

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

**БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ**

МАШИНОСТРОЕНИЕ

**РЕСПУБЛИКАНСКИЙ МЕЖВЕДОМСТВЕННЫЙ
СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ**

Основан в 1976 году

Выпуск 17

Минск
УП «Технопринт»
2001

621.7

МЗ8

УДК 621(082)

Машиностроение: Сб. научн. трудов. Вып. 17. Под ред. И. П. Филонова.– Мн.: УП «Технопринт», 2001.– 633 с. ISBN 985-464-101-5.

В сборнике представлены результаты исследований различных процессов механической обработки деталей и технологии их изготовления. Изложены новые принципы проектирования некоторых инструментов станков и другого технологического оборудования. Приведены результаты работ по электрофизическим и электрохимическим методам обработки материалов. Представлены некоторые направления практического использования интеллектуальных технологий в области машиностроения. Рассмотрены проблемы динамики и прочности машин. Изложены актуальные вопросы экономики машиностроительного производства, инженерной педагогики и психологии.

Редакционная коллегия:

**И. П. Филонов (гл. редактор), А. П. Акулич, Г. Я. Беляев (зам. гл. редактора),
Э. М. Дечко, С. А. Иващенко, М. М. Кане, А. И. Кочергин, М. И. Михайлов,
Ж. А. Мрочек, Ф. И. Пантелеенко, М. Ф. Пашкевич, В. И. Похабов,
А. Ф. Присевко, А. Т. Скойбеда, Н. В. Спиридонов, В. И. Туромша,
И. С. Фролов (отв. секретарь)**

Рецензенты:

**академик НАНБ, доктор технических наук
профессор П. И. Ящерицын;
доктор технических наук, профессор В. С. Ивашко**

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ВУЗОВСКОЙ НАУКИ

*Министерство образования РБ
Минск, Беларусь*

Осуществляемые в настоящее время преобразования в высшей школе Республики Беларусь направлены на дальнейшее совершенствование содержания и повышение качества учебного и научного процессов, более тесную увязку системы подготовки и использования специалистов с быстро изменяющимися потребностями личности и общества. Предстоит обеспечить существенную перестройку системы высшего образования в соответствии с задачами ускорения экономического и социального развития страны. В достижении этой цели огромная роль принадлежит вузовской науке. Президентом, Правительством республики поставлена перед учеными задача значительного улучшения использования научного потенциала высшей школы, расширения объема научных исследований и разработок, в том числе и в области машиностроения, значимого повышения их народнохозяйственной отдачи.

В целом, в нашем государстве на высшую школу возлагаются большие надежды в создании и развитии эффективной научно-технической среды в обществе, ориентированном на преобразования рыночной направленности. Какими же резервами располагает она сегодня? Каков ее научный потенциал? Какова отдача вузовских ученых?

В высших учебных заведениях Министерства образования трудятся более 12 тыс. научных и научно-педагогических работников, что составляет более трети общего числа этой категории работников в стране. Численность докторов и кандидатов наук составляет соответственно более 600 и 4650, т.е. почти половина всех белорусских ученых, имеющих ученые степени и звания. В тоже время объем НИОКР, выполняемых учеными высшей школы Минобразования, не превышает 8,2 процента от всего объема научно-исследовательских работ, проводимых в Республике Беларусь. И если даже учесть, что большую часть времени преподаватели заняты решением своей главной задачи – обучением и подготовкой студентов, то, исходя из имеющегося научного потенциала, участие их в проведении исследований могло бы быть более значимым.

В Концепции комплексного прогноза научно-технического прогресса Республики Беларусь на 2001-2020 г.г. особая роль уделена развитию НИОКР в области машиностроения, включая создание новых материалов и технологий их производства, разработку и внедрение гибких производственных процессов с использованием возможностей робототехнических комплексов, создание принципиально новых технологий, основанных на применении нетрадиционных источников энергии, результатов фундаментальных исследований в различных областях.

По этим направлениям проводятся исследования в течение многих лет, полученные определенные результаты. Учеными вузов разработаны и внедрены десятки новых технологий по обработке деталей машин с применением концентрированных источников энергии (лазер, ультразвук, электромагнитные колебания и т.д.), созданы новые материалы, в том числе композиционные, обладающие высокими эксплуатационными свойствами.

На многие из этих технологий и материалов есть патенты Белоруссии, России, США, ФРГ и других стран.

Мировую известность приобрели вузовские исследования в области микро- и нанoeлектроники, новых материалов и информационных технологий, выполняемые в рамках различных европейских программ (INTAS, ESPRIT и др.). Большим спросом на рынке высоких технологий КНР, Индии, ФРГ, Италии и других развитых стран пользуются разработки по СВЧ-электронике, радиолокации, микроэлектронике, радиопоглощающим материалам.

Научными работниками БГПА разработаны методы технического расчета frictionных тормозов автомобилей, тракторов, сельхозмашин и другой техники, разработаны методики расчета на геометрическую и кинематическую точность токарных станков; разработана модель автотранспортных средств, включающая параметры, определяющие их управляемость, устойчивость и др.

Значимость этих и других работ очевидна, но жизнь требует большего. Речь идет не о механическом наращивании объемных показателей НИОКР в области машиностроения (хотя и это важно), а прежде всего о необходимости ускорения развития и повышения значимости вузовских исследований в этой области, перевода их на качественно новый уровень.

В этом плане со всей остротой встает вопрос об обеспечении критериев полезности и эффективности научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. При этом в сфере потребления научной продукции могут использоваться различные критерии, в том числе и их сочетания.

Так, например, для оценки новых и высоких технологий следует применять такие критерии, как их новизна (патенты, привлеченные лицензии, ноу-хау); соответствие международным стандартам (в частности ISO 9000); ожидаемый объем реализации продукции, производимой с использованием предлагаемых технологий; прогнозируемое количество создаваемых рабочих мест с применением новых и высоких технологий; возможность использования местных ресурсов и др. Учитываемые критерии должны быть прагматичны.

В этом направлении нам предстоит сделать многое. И прежде всего, создать эффективно действующую систему информационного обеспечения НИОКР как на стадиях разработки, так и в завершающей стадии потребления продукции. Это проблема факультетов, вуза, министерства. Очевидно, что ее можно решить с более эф-

фактивным использованием межвузовского центра маркетинга, центров трансфера технологий, а также управленческих структур.

Межвузовский центр маркетинга НИР (МЦМ НИР) поддерживает постоянно обновляемую базу данных по научно-исследовательским разработкам вузов. В настоящее время в базе данных содержатся сведения о 3120 НИР. Из них около 1000 НИР относятся к области машиностроения, причем 90 процентов этих работ выполнено в Белорусской государственной политехнической академии, Могилевском государственном техническом университете и Полоцком государственном университете. В ближайшее время планируется обеспечить доступ к базе данных через сети Интернет.

Сегодня невозможно обеспечить поступательное развитие научных исследований в области машиностроения, как и в других областях, без конкретных научных школ, их преемственности и органической взаимосвязи с другими научными направлениями. В Беларуси, исходя из ее положения в экономическом потенциале бывшего Союза, были сформированы востребованные в народнохозяйственном комплексе научные школы, которые и сейчас, пополнившись новым содержанием, молодыми научными кадрами, вносят весомый вклад в отечественную науку. Среди них можно выделить научные школы в области обработки металлов давлением под руководством академика НАН Беларуси Степаненко А.В.; в области порошковой металлургии под руководством академика НАН Беларуси Романа О.В.; в области теории и практики литейных процессов под руководством д.т.н. Худокормова Д.Н.; технологии радиоэлектронных изделий – академика НАН Беларуси Достанко А.П.; технологии машиностроения – д.т.н. Филонова И.П.; в области термической и химико-термической обработки – д.т.н. Ворошникова Л.Г.; деталей машин – д.т.н. Скойбеды А.Т. и другие.

Следует отметить, что сотрудниками этих научных школ успешно выполняются межвузовские программы фундаментальных исследований «Металлургические процессы» (научный руководитель д.т.н. Немененок Б.М.) и «Машиностроение» (научный руководитель, чл.корр. НАН Беларуси, д.ф.-м.н. Демчук М.И.) и другие.

Можно привести немало примеров научных исследований и разработок, результаты которых внедрены в производство и принесли ощутимую пользу нашим предприятиям. Так, внедрение композиционных материалов для пар скольжения турбин позволило Минской ТЭЦ-4 отказаться от импорта аналогичных материалов и сэкономить 50 тыс. долл. США; на ПО «Гомсельмаш» внедрена косилка-плющилка КНР-6 (ГТГУ), за разработку которой к.т.н. Примаков В.Н. удостоен Госпремии Минпрома РБ. В БГПА разработана и внедрена технология изготовления комплексных сред для получения защитных покрытий, позволяющая увеличить износостойкость упрочненных деталей в 2-6 раз. В этом же вузе разработана и освоена технология получения высокопрочного чугуна на Могилевском лифтостроительном заводе и Полоцком авторемонтном заводе. Стоимость суммарно произведенной и реализованной продукции (коленчатые валы для ВАЗ) только в 2000 г. составила более 300 тыс. долл. США.

Разработан принципиально новый (получен патент и продана лицензия США) способ получения заготовок периодического профиля для подвески автомобилей, позволяющий снизить энергоемкость процесса на 40 %, повысить производительность в 2 раза и снизить стоимость оборудования до 350-500 тыс. долл. США за единицу.

Разработанные конструкции дисковых и колодочных тормозов для автомобилей, тракторов «Беларусь», комбайна КСК-100, «Полесье-250» позволили отказаться от покупки этих изделий за рубежом.

Технология упрочнения инструмента для холодного деформирования, разработанная в БГПА, позволила использовать высокохромистые стали вместо твердых сплавов, получаемых ранее из-за рубежа.

За разработку и промышленное освоение новых технологий в области радиоэлектроники и создание конкурентоспособной импортозамещающей продукции ученые БГУИР удостоены пяти Госпремий и одной премии Совета Министров Республики Беларусь.

Это далеко не полный перечень созданной научной продукции, которая по качеству вышла на уровень мировых требований.

Вузы участвуют в выполнении 8 ГНТП, из них программы «Материалы», «Алмазы», «Белэлектроника», «Приборы для научных исследований» относятся к области машиностроения. Нужно отметить, что это участие могло бы быть более значимым, адекватным имеющемуся научному потенциалу вузов, в том числе на уровне головных исполнителей.

Для увеличения объемов НИОКР и расширения НИР в области машиностроения вузы располагают определенным кадровым потенциалом. А если к выполнению этих работ привлечь докторантов, аспирантов и студентов, то вопрос о кадровом обеспечении НИОКР будет решен в значительной мере. Вместе с тем, назрела необходимость создания системы материального и морального стимулирования труда научных работников, используя все ценное и полезное из практики советских времен и реализуя новые подходы (выделение грантов, установление президентских стипендий ученым, преподавателям и т.п.).

Надо сказать, что действующее «Положение о порядке выделения грантов для выполнения НИР» уже дало положительные результаты. В предыдущие годы заметно активизировалась работа по привлечению докторантов, аспирантов и студентов к проведению НИОКР. В 2001 г. на эти цели Министерство выделило более 220 млн. руб., что позволило задействовать в научных исследованиях дополнительно около 200 человек. К сожалению, средний возраст работающих ученых не снижается, для кандидатов наук он составляет примерно 47 лет, докторов 55 лет.

Конкурентоспособность нашей продукции, пожалуй, сегодня является важнейшим экономическим показателем ее эффективности. Коммерциализация научной деятельности с одной стороны, защита на государственном уровне интеллектуальной соб-

ственности, с другой стороны, должны осуществляться с наибольшей выгодой для государства, на законодательной основе, гармонизированной с международным правом, регулирующим оказанную деятельность. Работа в этом направлении, а также проведение НИР в рамках международного сотрудничества сулит нам большие дивиденды.

Вот некоторые примеры. БГУИР более 6 лет успешно работает на мировом рынке высоких технологий. Только в 2000 г. университетом выполнялось 23 контракта с общим объемом финансирования 6,4 млн. долл. США, в т.ч. 8 – с Китаем общей стоимостью 3,4 млн. долл., 11 – с Индией на 2,9 млн. долл., с ФРГ – на 2 тыс. долл., 2 с Италией и др. Полученная прибыль от реализации 5 контрактов составила 292 тыс. долл. США.

БГПА в 2000 г. выполняла работы по 15 внешнеторговым сделкам с организациями 8-ми стран ближнего и дальнего зарубежья.

Работа по развитию международного сотрудничества продолжается. Только в 2000 г. 19 вузов и научных учреждений осуществляли это сотрудничество на основе 252 договоров с ведущими зарубежными университетами, научными центрами и фирмами 32 государств.

Научно-инновационный подход в организации научно-технической деятельности, ориентация этой деятельности на конечный результат является необходимым условием экономической стабильности вузов в современных условиях и обеспечения их динамичного развития. В соответствии с этим в высших учебных заведениях созданы и функционируют 12 центров трансфера технологий. Сформирована и успешно выполняется межвузовская отраслевая научная программа «Совершенствование работы центров трансфера технологий, региональных маркетинговых и инновационных центров высшей школы». Подготовлена и реализуется программа по экспорту научной продукции до 2005 года.

Министерством совместно с высшими учебными заведениями проведена работа по уточнению направлений научных исследований. Научные направления переработаны с преимущественной их ориентацией на реальные потребности экономики и социального развития республики, а также с учётом профиля подготовки специалистов.

Определена перспективная потребность в научных кадрах высшей квалификации на период 2000–2010 гг. в разрезе регионов (г. Минск, Гомельская область, Гродненская область, Витебская область, Брестская область, Могилёвская область).

Большое внимание уделяется совершенствованию системы управления научно-исследовательской работы студентов в вузах. С этой целью сформирована и с 2000 года выполняется межвузовская отраслевая научная программа, результаты которой позволят улучшить структуру организации НИРС, обеспечив при этом широкое развитие творческой инициативы студентов и преподавателей.

Таким образом, на основе сказанного можно сделать вывод, что вузовская наука вносит весомый вклад в развитие машиностроения в Беларуси, но этот вклад может и

должен быть увеличен за счет указанных выше резервов, улучшения всей системы управления НИОКР в вузах.

Вместе с тем мы видим нерешенные нами проблемы и недостатки: недостаточный удельный вес исследований, выполняемых по договорам с предприятиями; давно нет научных открытий; число патентуемых и внедряемых разработок не соответствует научному потенциалу вузов и НИИ, многие вузы слабо участвуют в ГНТП, государственных программах фундаментальных исследований, в т. ч. и по машиностроению; в выставках, конференциях и т. д.

Слабо решается проблема модернизации и развития материально-технологической, экспериментальной, конструкторско-технологической и производственной базы вузов и НИИ. Очевидно, тех средств, которые предусматриваются ежегодно в консолидированном бюджете на развитие науки (около 1 процента от ВВП), явно недостаточно. В связи с этим необходимо привлечение других источников финансирования на указанные цели и концентрация средств на выполнение приоритетных исследований, в т. ч. и в машиностроении. Примеры таких подходов имеются: государственные программы «Троллейбус», «Трамвай», союзная программа «Телевизор» и др. Очень важным в этом плане является объединение усилий ученых Национальной академии наук, отраслей и высшей школы. Думается, что консолидирующим звеном в этом объединительном процессе должно быть обеспечение конечных целей научных исследований и ОКР с максимальной для государства полезностью с учетом интересов всех участников.

Перспективы развития науки в вузах в ближайшие годы в целом благоприятны, поскольку решение одной из приоритетных задач увеличения экспорта белорусской продукции требует новых научных разработок и существенного развития прикладных исследований. В наиболее концентрированном виде вопросы дальнейшего совершенствования научной деятельности в вузах изложены в Концепции развития вузовской науки, одобренной Советом Министров Беларуси, и Программе ее реализации. Эти документы определяют основные направления развития науки в вузах Республики и позволяют обеспечить четкое планирование научной деятельности.

ПРОЦЕССЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

УДК 621.9.

А.И. Бачанцев, В.И. Туромша

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ НА ТОКАРНЫХ СТАНКАХ С ЧПУ

*Белорусская государственная политехническая академия.
Минск, Беларусь.*

Одним из показателей эффективности процесса обработки материалов резанием является производительность, т. е. количество обработанных деталей за определенный промежуток времени. Производительность обработки оценивают длиной пути, пройденного инструментом за единицу времени, или площадью обработанной поверхности, объемом снятого материала, машинным временем на операцию и др. Все эти критерии связаны друг с другом, а их уровень определяется величиной параметров режима резания (скорости резания, подачи и глубины резания) на конкретной операции.

В частности, машинное время при точении (мин)

$$T_{\text{маш}} = \frac{L}{sn} \times \frac{\delta}{t}, \quad (1)$$

где t – глубина резания, мм; L – длина одного рабочего хода инструмента, мм; s – подача, мм/об; n – частота вращения заготовки, мин⁻¹; d – припуск, мм.

Подставив в зависимость (1) выражение для частоты вращения

$$n = \frac{1000v}{\pi D},$$

где D – диаметр заготовки, мм; v – скорость резания, м/мин, получим

$$T_{\text{маш}} = \frac{L\pi D}{1000vs} \times \frac{\delta}{t}, \quad (2)$$

Числитель формулы (2) можно рассматривать как полный объём припуска, а знаменатель – как объём стружки, снимаемой в минуту. Для уменьшения машинного времени $T_{\text{маш}}$ необходимо увеличивать любой из параметров режима резания, стоящих в знаменателе (2). Но, как известно из теории резания, данные параметры связаны между собой как минимум математическими зависимостями мощности резания и периода стойкости инструмента

$$\begin{cases} N = \frac{P_z \times v}{61200} \\ v = \frac{C_v \times K_v}{T^m \times t^x \times s^y} \\ P_z = C_p \times t^{x_p} \times s^{y_p} \times v^{m_p} \end{cases}, \quad (3)$$

где N – мощность резания, кВт; T – период стойкости инструмента, мин; P_z – тангенциальная составляющая силы резания, Н; m, m_p, x, x_p, y, y_p – показатели степени; C_p, C_v – постоянные; K_v – коэффициент.

Из анализа системы (3) следует, что для обеспечения заданного уровня периода стойкости инструмента и мощности резания при изменении одного из параметров режима резания необходимо соответствующим образом изменять два других. Это же следует учитывать при выборе оптимальных параметров режима резания по критерию производительности. Однако, в ряде работ связь между v, s и t в соответствии с системой (3) не учитывается. Например, авторы [1–3] критерий производительности увязывают с периодом стойкости инструмента, как одним из факторов, влияющим на эффективность процесса резания

$$T_Q = ((1 - m)t_{cm}) / m, \quad (4)$$

где T_Q – стойкость наибольшей производительности; t_{cm} – время смены инструмента; m – показатель относительной стойкости (для твердосплавных инструментов $m = 0,2$).

Подразумевается, что, назначив период стойкости инструмента в соответствии с (4), при ранее выбранной глубине резания t и подаче s , мы получим скорость резания v , обеспечивающую наибольшую производительность обработки.

Еще более простой подход предлагается в работе [2], где рекомендуется снижать период стойкости до 15–25 мин, увеличивая тем самым скорость резания. Увеличение затрат времени на смену и наладку инструмента предлагается компенсировать в этом случае за счет автоматизации смены режущего инструмента.

При этом обращают на себя внимание следующие недостатки предлагаемых методик:

- критерий стойкости не учитывает мощность привода главного движения конкретного станка, которая обеспечивает определенную производительность резания;
- предлагается изменять только скорость резания, не учитывая связь ее с подачей и глубиной резания;
- отсутствует связь с хотя бы одним из критериев производительности резания, приведенных выше.

Традиционная методика назначения параметров режима резания по справочным таблицам также не гарантирует максимальной производительности резания, поскольку имеет свои недостатки:

- назначение в первую очередь максимально возможной глубины резания для снятия припуска за один рабочий ход инструмента изначально нарушает связь между t , s , и v , выражаемую системой (3);
- уменьшение скорости резания в случае если мощность резания превышает мощность привода станка также производится без соответствующей корректировки t и s по системе (3);
- отсутствует методика назначения режима резания максимальной производительности.

В настоящей работе в качестве критерия производительности резания при точении принято произведение $Pr = v \times s \times t$ (см³/мин). Тем самым учитывается связь между параметрами режима резания в соответствии с системой (3). Кроме того, через данное произведение могут быть выражены другие критерии производительности, приведенные выше. Поэтому, например, анализируя формулу (2), правильнее говорить, что для увеличения производительности резания необходимо увеличивать произведение $v \times s \times t$.

Экспериментальные исследования, проведенные авторами в широком диапазоне изменения подачи и глубины резания, выявили закономерность изменения численного значения показателей степени при t и s в системе (3). При этом исследования проводились в области «прямых» и «обратных» стружек [4–8]. Резание в области «обратных» стружек возникает в том случае, когда функцию главной режущей кромки по выполнению основной работы при снятии стружки обеспечивает вспомогательная режущая кромка резца. В этом случае подача больше глубины резания. Получено, что для стали с твердостью HB=200 в формуле для определения скорости резания системы (3) показатели степени составляют: в области «обратных» стружек при $s/t > 1 - x = 0,3$ и $y = 0,15$; в области «прямых» стружек при $s/t < 1 - x = 0,15$ и $y = 0,3$, а при $s/t = 1 - x = 0,3$ и $y = 0,3$.

Из решения системы (3) следует, что при заданной величине мощности резания и периода стойкости максимум производительности Pr достигается при назначении максимальной подачи s (рис 1). При этом глубина и скорость резания численно тоже изменяются, поскольку связаны с подачей системой (3), но при условии, что мощность резания и период стойкости инструмента остаются неизменными. Из системы (3) также следует, что с увеличением глубины резания, производительность падает (рис 2). Следовательно, при назначении режима резания не следует стремиться к назначению максимально возможной глубины резания.

Для примера сравним режимы резания при точении стали 45, полученные путем решения системы (3) и по справочным таблицам [9] (по традиционной методике).

**Значения параметров режимов резания
для традиционной методики ($T = 20$ мин)**

| $T_{расч}$, мин | P_p , см ³ /мин | V , м/мин | N , кВт | t , мм |
|------------------|------------------------------|-------------|-----------|----------|
| 20,0 | 148,9 | 248,2 | 3,1 | 0,5 |
| 20,0 | 218,1 | 181,7 | 4,7 | 1 |
| 20,0 | 291,4 | 161,9 | 6,4 | 1,5 |
| 22,8 | 362,6 | 151,1 | 8 | 2 |
| 58,1 | 351,1 | 121,9 | 8 | 2,4 |
| 182,5 | 337,5 | 93,8 | 8 | 3 |
| 271,5 | 321,5 | 91,9 | 8 | 3,5 |
| 538,7 | 314,0 | 78,5 | 8 | 4 |
| 986,1 | 307,6 | 68,3 | 8 | 4,5 |

В обоих случаях стойкость инструмента принята равной $T = 20$ мин в соответствии с рекомендациями работы [2]. Мощность резания, допускаемая станком, составляет $N = 8$ кВт. По данным расчетов построены графики (рис. 1 и 3). Поскольку первая методика предлагает максимально увеличивать подачу, а вторая – глубину резания, то на рис. 1 показаны зависимости основных параметров при увеличении s , а на рис. 2 – при увеличении t . В табл. 1 занесены расчетные значения режимов резания, определенные по традиционной методике, с корректировкой их по мощности резания [9]. В графе « $T_{расч}$ » даны значения фактической стойкости инструмента, пересчитанные после кор-

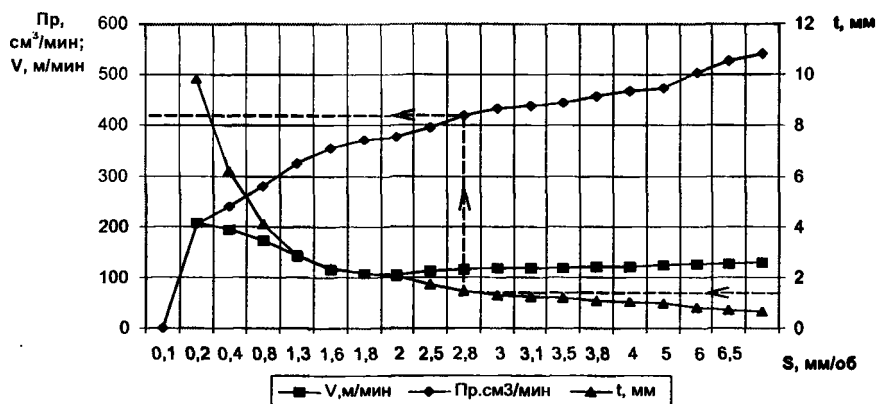


Рис. 1. Зависимости скорости резания, производительности и глубины резания от подачи
($T=20$ мин.)

ректировки режима если мощность резания превышает мощность, допускаемую станком. В последнем случае, как отмечено выше, снижали скорость резания и, соответ-

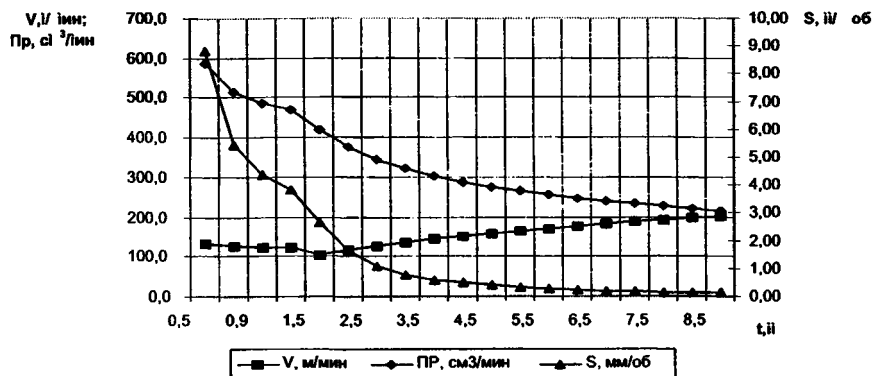


Рис. 2. Зависимость скорости резания, производительности и подачи от глубины резания ($T=20$ мин.)

ственно, увеличивали период стойкости режущего инструмента.

Из табл. 1 и рис. 2 видно, что по традиционной методике с применением критерия «стойкость наибольшей производительности» при глубине резания 1,5 мм обеспечивается производительность обработки 291,4 см³/мин. В то же время, режим резания, полученный решением системы (3), при $t = 1,5$ мм обеспечивает производительность 420 см³/мин. В последнем случае, кроме того, при той же стойкости инструмента можно достичь и более высокой производительности (см. рис. 1).

Анализируя данные, приведенные в табл. 1, а также на графиках (рис. 1 и 2), можно отметить следующее. Производительность обработки, рассчитанная на основе решения системы (3), возрастает с увеличением подачи. При этом скорость резания при увеличении s (рис. 1) сначала уменьшается, а затем медленно растет. Это происходит в тот момент, когда процесс резания переходит в зону «обратных стружек» и влияние подачи на скорость резания уменьшается (в области «обратных» стружек $x > u$, т. е. подача в меньшей степени влияет на уменьшение скорости резания, чем глубина резания). Поэтому при точении в области «обратных» стружек эффект от увеличения подачи будет более значительным, чем в области «прямых стружек». При назначении режимов резания по традиционной методике [9] при увеличении глубины резания до $t = 2$ мм производительность обработки сначала возрастает, а затем уменьшается. Это связано с тем, что при $t > 2$ мм мощность резания превышает мощность, допускаемую станком. После корректировки режима по мощности скорость резания (а в некоторых случаях подача) уменьшается, что, в свою очередь, приводит к снижению производительности.

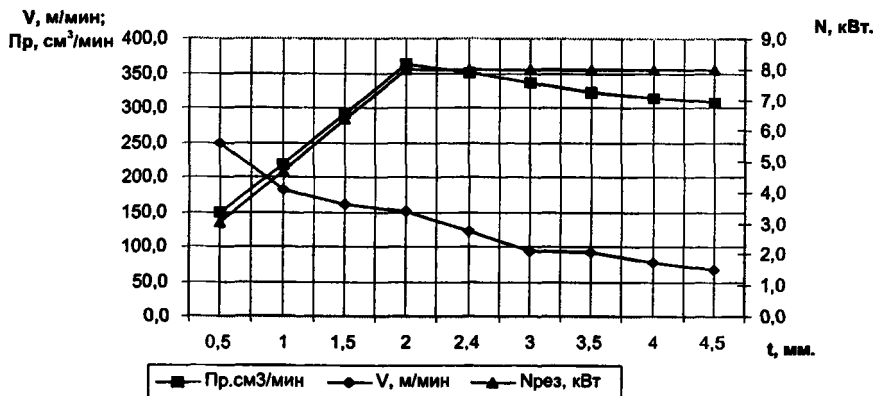


Рис. 3. Зависимость производительности, скорости резания и мощности от глубины резания по методике [9]

Учитывая результаты выполненных исследований, предложена методика выбора режима резания, основанная на учете связей параметров режима резания с техническими возможностями станка и режущего инструмента, выражаемых системой (3). Для этого вначале назначается максимально возможная подача s , затем решением системы (3) определяются скорость v и глубина резания t . Число рабочих ходов инструмента i определяется, как целая часть (int) из выражения

$$i = \text{int} (Pr / t) + 1,$$

где Pr – припуск, мм.

Время обработки одной детали $t_{\text{шт}}$

$$t_{\text{шт}} = (L_{51}/n_{5p}) + (L_{51}/V_{\text{отв}}),$$

где $V_{\text{отв}}$ – скорость отвода инструмента при холостом ходе, мм/мин.

Для сравнения назначили режимы резания по предлагаемой и традиционной методике на примере точения заготовки из стали 45 диаметром 100 мм до диаметра 80 мм при мощности привода главного движения станка 10 кВт. В первом случае $t_{\text{шт}} = 0,31$ мин, а во втором – $t_{\text{шт}} = 0,54$ мин. Таким образом, производительность процесса, выбранного по предлагаемой методике, приблизительно на 74% выше.

Учитывая изложенное, можно сделать следующие выводы:

1. При назначении параметров режима резания, исходя из критерия «стойкость наибольшей производительности», при наличии ограничения по мощности резания, повышение производительности обработки с увеличением глубины резания возможно только при малых глубинах. При средних и больших глубинах резания, после корректировки режимов, производительность обработки уменьшается.

2. В предложенной методике назначения режима резания в качестве критерия производительности обработки используется объем снимаемого материала в единицу времени. Одновременно учитывается взаимосвязь l , s , и v через уравнения мощности резания и стойкости инструмента. Это позволяет добиться увеличения производительности токарной обработки до 74%.

3. Для станков с ЧПУ многопроходная обработка при снятии черного припуска, более эффективна, чем однопроходная. Максимум производительности резания достигается при назначении максимальной подачи инструмента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ящерицын П.И. Еременко М.Л. Фельдштейн Е.Э. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах: Учеб. для вузов.— Мн.: Выш. Шк.— 1990.— 512 с.
2. Гжиров Р.И., Серебrenицкий П.П. Программирование обработки на станках с ЧПУ: Справочник.— Л.: Машиностроение, 1990.— 591 с.
3. Шарин Ю.С. Технологическое обеспечение станков с ЧПУ. М.: Машиностроение, 1986.— 176 с.
4. Барбашов Ф.А. Стойкостные зависимости при резании металлов. М.: Машгиз, 1958.— 44 с.
5. Грудов П.П. Обработка металлов с увеличенными подачами /Под ред. Семенченко И.И.— М.: Машгиз, 1954.— 32 с.
6. Гуськов Б.С. Режимы резания при точении силовым методом. Киев: Машгиз, Укр. отд., 1954.— 36 с.
7. Зорев Н.Н., Артамонов А.Я. Высокопроизводительное точение чугуна по методу В.А. Колесова. М.: Машгиз, 1954.— 32 с.
8. Можаяв С.С., Саромотина Т.Г. Скоростное и силовое точение сталей повышенной прочности М.: Оборонгиз, 1957.— 275 с.
9. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т.— Т. 1. /Под ред. А.Г. Косиловой и Р.Е. Мещерякова.— 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1985.— 656 с.

УДК 621.833.002

П.Н. Громыко, Д.М. Макаревич, С.Н. Хатетовский

К ПРОБЛЕМЕ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ ЗУБЬЕВ САТЕЛЛИТА ПЛАНЕТАРНОЙ ПРЕЦЕССИОННОЙ ПЕРЕДАЧИ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Проблема обеспечения требуемой точности обработки зубчатых поверхностей в настоящее время решена лишь для таких широкоприменяемых передач, как цилиндрические, конические, червячные и т. д. В большинстве новых передач используются колеса с зубьями, которые невозможно обработать на стандартном оборудовании или стандартным режущим инструментом. Для формирования таких зубьев прихо-

дится применять специальные устройства, которые вносят существенную долю в общую погрешность обработки.

Одним из видов механических передач, для которых проблема повышения точности обработки зубьев колес актуальна, являются планетарные прецессионные передачи (ППП) [1–3]. Особенностью их является наличие пространственных зубьев у одного из колес – сателлита [3]. Он совершает прецессионное движение и одновременно обкатывается с центральным колесом, именуемым внутренним эвольвентные зубья. Для обработки их используются специальные станочные приспособления, которые реализуют требуемую кинематику движения заготовки [1, 3]. При этом кинематическая цепь приспособления дополняет цепь деления зубообрабатывающего станка.

Обработка зубьев сателлита осуществляется при помощи производящего колеса, которое идентично центральному колесу, с которым сателлит контактирует в ППП. Инструмент в станочных условиях формирует не внутренние, а наружные зубья, по профилю идентичные зубьям производящего колеса (рис. 1).

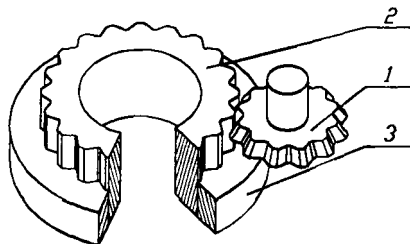


Рис. 1. Производящее колесо при обработке зубьев сателлита ППП:

1 – инструмент; 2 – производящее колесо; 3 – колесо с наружными зубьями, профиль которых идентичен профилю зубьев производящего колеса с внутренними зубьями

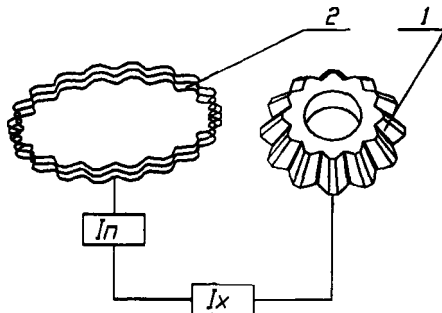


Рис. 2. Кинематическая цепь системы приспособление-станок:

1 – инструмент; 2 – заготовка; i_x – передаточное отношение цепи деления станка; i_n – передаточное отношение механической передачи устройства

При обработке пространственных зубьев сателлита необходимо учитывать погрешность гитары деления, которая совместно с погрешностью делительного устройства станка образует погрешность цепи деления.

Рассмотрим кинематическую цепь системы станок-устройство, представленную на рис. 2. Вращение от режущего инструмента 1 – червячной зуборезной фрезы или долбяка передается посредством цепи деления станка с передаточным отношением i_x , механической передачи устройства с передаточным отношением i_n на заготовку 2.

Таким образом, кинематическая цепь между инструментом и заготовкой должна обеспечить передаточное отношение

$$i_{12} = i_x \cdot i_n. \quad (1)$$

Формулу (1) перепишем, используя вместо i_{12} и i_x их приращения Δi_{12} и Δi_x , которые назовем погрешностями соответствующих величин:

$$\Delta i_{12} = \Delta i_x \cdot i_n. \quad (2)$$

погрешность передаточного отношения i_{12} возникает вследствие погрешности Δi_x .

Погрешность Δi_{12} прямо пропорциональна погрешности Δi_x , передаточное отношение устройства i_n меньше 1, то величина Δi_{12} мало чувствительна к изменению передаточного отношения цепи деления станка i_x .

Режущий инструмент в кинематической схеме заменим на производящее колесо (рис. 3). При этом в кинематическую цепь необходимо включить звено с передаточным отношением $i_{ки}$ между частотой вращения производящего колеса и частотой вращения инструмента. Величина $i_{ки}$ как и само производящее колесо присутствует в рассматриваемой кинематической цепи системы станок-устройство формально. Для червячной фрезы данная величина равна

$$i_{ки}^{\phi} = z_k, \quad (3)$$

а для долбяка –

$$i_{ки}^{\partial} = \frac{z_{\partial}}{z_k}, \quad (4)$$

где z_{∂} – количество зубьев долбяка; z_k – количество зубьев центрального колеса.

Таким образом, передаточное отношение между частотой вращения производящего колеса и частотой вращения заготовки в системе станок – устройство при использовании фрезы:

$$i_{12}^{\phi} = i_{ки}^{\phi} \cdot i_x \cdot i_n, \quad (5)$$

при использовании долбяка

$$i_{12}^{\partial} = i_{ки}^{\partial} \cdot i_x \cdot i_n. \quad (6)$$

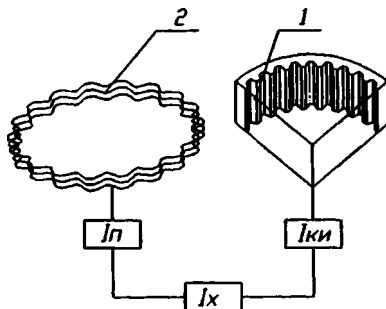


Рис. 3. Эквивалентная кинематическая цепь системы приспособление–станок:
 1 – инструмент; 2 – заготовка; i_x – передаточное отношение цепи деления станка;
 i_n – передаточное отношение механической передачи устройства; $i_{ин}$ – передаточное
 отношение инструмента относительно производящего колеса

С учетом зависимостей (3) и (4) выражения (5) и (6) запишутся в виде

$$i_{кз}^{\phi} = z_k \cdot i_x \cdot i_n, \quad (7)$$

$$i_{кз}^{\partial} = \frac{z_{\partial}}{z_k} \cdot i_x \cdot i_n. \quad (8)$$

Из зависимостей (7) и (8) следует

$$\Delta i_{кз}^{\phi} = z_k \cdot \Delta i_x \cdot i_n, \quad (9)$$

$$\Delta i_{кз}^{\partial} = \frac{z_{\partial}}{z_k} \cdot \Delta i_x \cdot i_n. \quad (10)$$

Так как число зубьев производящего колеса всегда больше 1, то погрешность $\Delta i_{кз}^{\phi}$ может быть значительной. Для ее уменьшения необходимо принимать величину i_n меньше 1.

При обработке зубьев сателлита долбяком погрешность $\Delta i_{кз}^{\phi}$ можно также уменьшить, выбрав инструмент с количеством зубьев, меньшим количества зубьев центрального колеса ППП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Громыко П.Н. Некоторые технологические аспекты изготовления зубчатых венцов прецессионного колеса прецессионной роликовой передачи / Могилев. машиностр. ин-т. – Могилев, 1992. – 21 с.: ил. – Библиогр.: 2 назв. – Деп. в БелНИИИТИ 07.07.92, № 1024.
2. Планетарные прецессионные передачи (ППП). Кинематический, силовой и технологический аспекты их создания / П.Н. Громыко, А.А. Жолобов, А.А. Стаценко и др.; Под общ. ред. А. Т. Скойбеды. – Мн.: БГПА, 2000. – 252 с.

ОСОБЕННОСТИ РЕЗКИ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СЛИТКОВ КРЕМНИЯ НА ПЛАСТИНЫ

*Физико-технический институт Национальной Академии Наук
Минск, Беларусь*

Операции обработки поверхности пластин стоят в начале маршрута изготовления БИС и определяют воспроизводимость параметров, надежность и процент выхода годных кристаллов. Особенно важно достижение минимального прогиба пластин на операции резки слитков, так как при наличии начального прогиба возрастает вероятность его увеличения при последующем формировании многослойных структур БИС.

Технологические процессы резки монокристаллических слитков на пластины основаны на закономерностях поведения поликристаллических материалов, механические свойства которых изотропны. Особенностью монокристаллов является наличие анизотропии механических свойств. Однако при разработке технологии обработки монокристаллов учет кристаллографических факторов ограничен ввиду отсутствия сведений о закономерностях их влияния на прогиб и дефектность пластин [1].

Целью настоящей работы является оптимизация режимов резки монокристаллических слитков кремния ориентации (001) на пластины.

В соответствии со стандартным технологическим процессом базовый срез слитка с ориентацией (001), выполненный по плоскости (110), устанавливают параллельно или перпендикулярно плоскости оправки, на которую приклеивают слиток при разделении его на пластины. Схема такого процесса резки слитка по плоскости (001) алмазным кругом с внутренней режущей кромкой (АВРК) приведена на рис. 1. Направление абразивного воздействия при этом близко к $[110]$, а направление перемещения инструмента относительно слитка близко к $[1\bar{1}0]$.

Для достижения поставленной цели было проведено несколько серий экспериментов, с помощью которых удалось выявить ряд особенностей процесса резки слитка кольцевым инструментом.

Во-первых, из четырех возможных положений базового среза при разделении слитка по плоскости (001) (точки А, В, С и Д на рис. 1) лучшие результаты по сколам и микровыколам (3,3 % брака) были получены при расположении базового среза в точке С. При размещении базового среза в точках А, В и Д брак составил 3,6; 4,4; и 4,2 %, соответственно.

Во-вторых, при постоянном кристаллографическом направлении абразивного воздействия не удается одновременно устранить образование сколов во время вре-

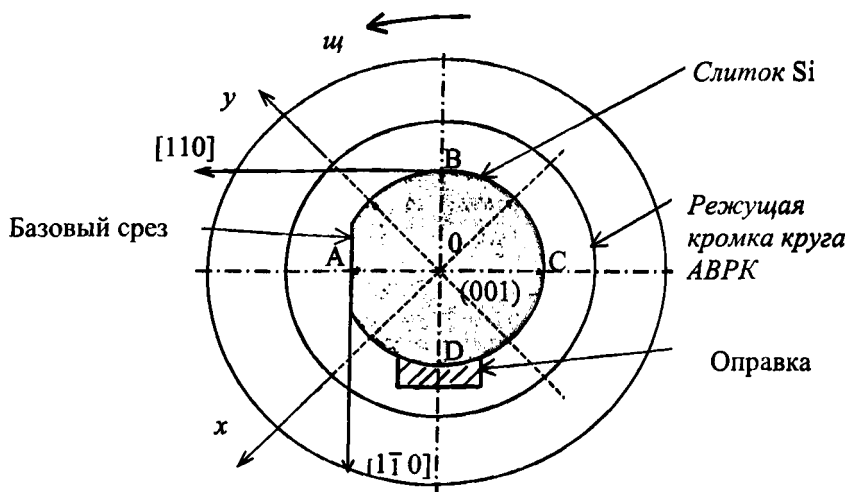


Рис. 1. Схема стандартного процесса резки слитка кремния ориентации (001) кругом АВРК

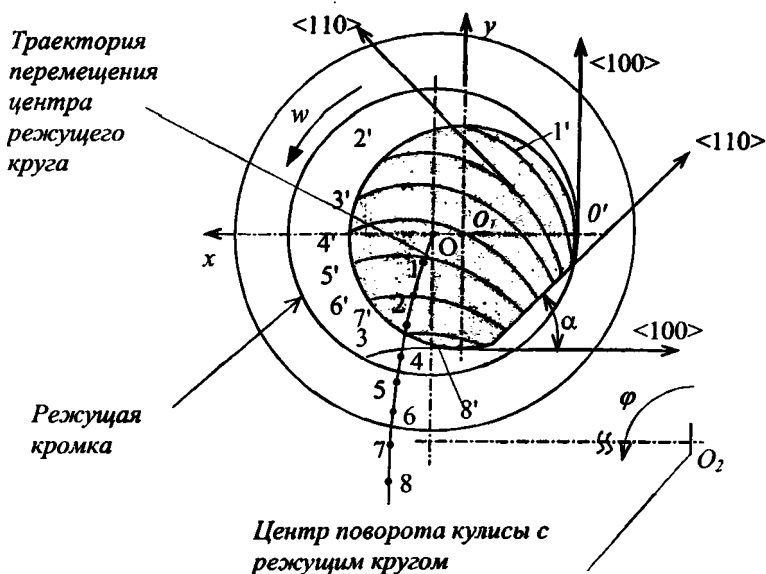


Рис. 2. Вариант резки при смещении слитка от траектории перемещения центра режущего круга на расстояние OO_1 и угле наклона базового среза $\alpha = 45^\circ$

зания и выхода инструмента из тела слитка и обеспечить высокое качество отрезаемых пластин. Это связано с тем, что при выгодном с точки зрения обеспечения высокого качества пластин направлении абразивного воздействия вдоль $\langle 110 \rangle$ высока вероятность образования сколов при врезании и при выходе инструмента. А при абразивном воздействии вдоль направления $\langle 100 \rangle$ наиболее затруднен процесс резания [2].

В-третьих, процесс резки слитка круглого сечения кольцевым инструментом существенно изменяется при установке оси слитка со смещением относительно траектории перемещения оси инструмента. В результате при постоянном направлении подачи вдоль определенного кристаллографического направления слитка в широких пределах изменяется в процессе резания направление абразивного воздействия, что увеличивает количество возможных вариантов резки.

И, в-четвертых, длина дуги контакта режущей кромки со слитком в процессе резки непостоянна и проходит через максимум в момент, когда она опирается на диаметр поперечного сечения слитка. Резание слитка при этом максимально затруднено.

С учетом отмеченных особенностей были исследованы новые варианты резки слитков по плоскости (001), схема одного из которых представлена на рис. 2. Слиток смещен по отношению к траектории движения центра режущего круга по горизонтали на расстояние OO_1 . Базовый срез слитка наклонен на угол α к горизонтальной плоскости и расположен в нижнем правом квадранте. Режущая кромка врезается в слиток в окрестности точки O' , направление абразивного воздействия в которой близко к направлению $\langle 100 \rangle$. При выходе инструмента из слитка направление абразивного воздействия также близко к направлению $\langle 100 \rangle$.

При максимальной длине дуги контакта режущей кромки со слитком (дуга $2'$) направление абразивного воздействия в центральном её участке близко к направлению $\langle 110 \rangle$. Положения оси режущего инструмента через равные промежутки времени обозначены буквой O_i и цифрами 1, 2 ... 8, а положения соответствующих им дуг контакта – $O', 1', 2' \dots 8'$. Направление абразивного воздействия в приведенном варианте изменяется от близкого к вертикальному во время врезания инструмента (дуга контакта O') до близкого к горизонтальному при выходе из слитка (дуга контакта $8'$). Направления вращения (ω) и подачи инструмента путем поворота кулисы вокруг центра O_2 (φ) указаны стрелками.

При смещении слитка от траектории перемещения оси вращения инструмента направление абразивного воздействия и скорость врезания (подачи) инструмента в слиток в процессе резки изменяются. При расположении базового среза в нижнем правом квадранте под углом $\alpha = 40-50^\circ$ к горизонтальной плоскости в начале и в конце резания абразивное воздействие осуществляется по направлению, близкому к $\langle 100 \rangle$, что предотвращает образование трещин и повышает процент выхода годных пластин. Кроме того, скорость врезания инструмента в слиток в этом случае значительно мень-

ше скорости подачи инструмента, поскольку угол между направлением подачи инструмента и направлением абразивного воздействия инструмента в этот период значительно меньше 90° . Это также способствует снижению образования трещин и повышает качество пластин. Резание слитка наиболее затруднено в момент, когда дуга контакта режущей кромки опирается на диаметр поперечного сечения слитка. Глубина врезания инструмента в слиток t в этот момент определяется выражением:

$$t = R_c + \sqrt{R_u^2 - R_c^2} - R_u, \quad (1)$$

где R_c , R_u – радиусы слитка и инструмента.

В рассматриваемом варианте направление абразивного воздействия инструмента на этом этапе становится близким к направлению $\langle 110 \rangle$, а угол между направлениями подачи и абразивного воздействия составляет порядка 60° , что приводит к облегчению процесса резания и обеспечивает получение пластин с малой величиной прогиба. По мере приближения режущей кромки инструмента к месту приклейки слитка к оправке направление абразивного воздействия опять приближается к направлению $\langle 100 \rangle$, что снижает вероятность образования сколов и повышает выход годных пластин.

Из 4-х возможных положений базового среза наилучшие результаты по качеству пластин были получены в случае, когда базовый срез был расположен в нижнем правом квадранте. При расположении базового среза в верхнем правом квадранте, вследствие неустановившегося режима при врезании в этом месте инструмента, наблюдалось снижение выхода годных пластин из-за микросколов в области базового среза. При расположении базового среза в левых квадрантах абразивные зерна инструмента, вращающегося против часовой стрелки, при выходе из слитка вызывают возникновение растягивающих напряжений, что приводит к снижению выхода годных пластин из-за сколов в области базового среза.

Смещение слитка вправо к центру поворота кулисы оказалось более предпочтительным, поскольку в этом случае действующие на алмазный круг силы резания выбирают все зазоры в системе СПИД, обеспечивая тем самым более стабильное положение алмазного круга и высокое качество пластин.

С учетом полученных результатов были проведены исследования влияния угла наклона базового среза α и величины смещения слитка от траектории перемещения оси режущего круга на качество и процент выхода годных пластин. Резку слитков кремния марок КДБ-12 (001) и КЭФ-4,5 (001) $\varnothing 100$ мм осуществляли по схеме, приведенной на рис. 2. Угол наклона базового среза к горизонтальной плоскости изменяли в пределах от 30° до 90° . Траектория центра вращения инструмента проходила через ось слитка, а также со смещением в горизонтальной плоскости вправо. При использовании отрезных кругов марки АВРК $422 \times 152 \times 0,3$ величина смещения дос-

тигала 25 мм. Скорость вращения инструмента составляла 2000 об/мин. Толщина отрезаемых пластин составляла 600 ± 20 мкм. Измерение прогиба пластин проводили на установке ЩЦМЗ.445.007.

Результаты исследований влияния угла наклона базового среза α и величины смещения слитка на выход пластин с прогибом до 20 мкм и на процент брака по прогибу и сколам представлены в табл. 1. При установке слитков с наклоном базового среза в пределах от 40° до 50° и смещении их на расстояние от 12 до 25 мм выход пластин с прогибом до 20 мкм возрастает по сравнению со стандартным процессом резки с 65 до 85–90%. Брак пластин по прогибу снижается с 3,8 до 2,1%, а при оптимальных условиях резки ($\alpha = 45^\circ$, $OO_1 = 17$ мм) – до 0,4%. Брак по сколам и микровыколам снижается с 3,3 до 1,85–2,5%.

Таким образом, учет кристаллографических факторов при резке слитков монокристаллического кремния привел к значительному снижению прогиба и к увеличению процента выхода годных пластин.

Таблица 1

Влияние условий резки на процент выхода пластин ориентации (001)

| Угол наклона базового среза $\alpha,^\circ$ | Смещение слитка OO_1 , мм | Выход пластин с прогибом $f \leq 20$ мкм, % | Брак пластин, % | |
|---|-----------------------------|---|-------------------------|--------------------------|
| | | | по прогибу $f > 40$ мкм | по сколам и микровыколам |
| 30 | 0 | 61,8 | 3,6 | 3,2 |
| 30 | 5 | 66,1 | 4,1 | 3,0 |
| 30 | 12 | 68,0 | 4,2 | 3,1 |
| 40 | 0 | 78,5 | 2,4 | 2,6 |
| 40 | 15 | 85,4 | 1,6 | 2,4 |
| 40 | 20 | 89,1 | 1,7 | 2,3 |
| 40 | 25 | 88,7 | 2,1 | 2,5 |
| 45 | 0 | 80,1 | 2,9 | 2,4 |
| 45 | 12 | 89,5 | 0,6 | 1,85 |
| 45 | 17 | 90,1 | 0,4 | 1,95 |
| 45 | 20 | 89,7 | 1,2 | 2,0 |
| 45 | 25 | 89,2 | 1,1 | 2,5 |
| 50 | 8 | 87,4 | 2,5 | 2,2 |
| 50 | 15 | 87,9 | 1,7 | 2,3 |
| 50 | 20 | 87,3 | 1,4 | 2,1 |
| 50 | 25 | 88,8 | 2,1 | 2,5 |
| 90 | 0 | 64,9 | 3,8 | 3,3 |

ЛИТЕРАТУРА

1. Бочкин О.И. и др. Механическая обработка полупроводниковых материалов. М.: Высш. шк. 1973, – 106 с.
2. Обработка полупроводниковых материалов/ Карбань В.И., Кой П., Рогов В.В., Хофман Х. и др.: Под. Ред. Новикова Н.В., Бертольди В. – Киев: Наук. думка. 1982. – 256 с.

ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Специфика ответственных деталей специального оборудования – большая длина при сравнительно малых размерах поперечного сечения – ограничивает выбор методов закрепления этих деталей в процессе механической обработки. Для длинномерных деталей, имеющих сравнительно малые размеры поперечного сечения, характерна повышенная склонность к деформации, в особенности угловой из-за концентрации значительной нагрузки в зоне контакта режущего инструмента с обрабатываемой поверхностью детали. Она усиливается при увеличении длины и уменьшении размеров поперечного сечения деталей. Деформация повышает трудоемкость механической обработки и часто приводит к неисправимому браку. Поэтому основной проблемой надежного закрепления длинномерных деталей при механической обработке является уменьшение этой сопутствующей деформации (при обеспечении требуемой точности и качества обрабатываемой поверхности). Поэтому для обработки длинномерных деталей могут быть пригодны лишь те методы обработки и способы закрепления деталей, которые обеспечивают либо полное исключение деформации деталей, либо существенное ее ограничение.

Как показывает практика и опыт станкостроительных заводов, ЭНИМСа длинномерные детали в особой степени подвержены деформации при закреплении и механической обработке. Для большинства типов длинномерных деталей нежелательным главным образом является искривление (коробление). В общем случае оно вызвано неодинаковыми усилиями прижима деталей, условиями нагрева и охлаждения различных ее участков при предварительной механической обработке.

Коробление вызывает необходимость правки деталей, а также увеличение объема их последующей механической обработки. В некоторых случаях оно может привести к неисправимому браку дорогостоящих деталей.

Коробление свойственно деталям с любой формой поперечного сечения, в том числе симметричной. Оно, как правило, усиливается при увеличении длины деталей и уменьшении размеров их поперечного сечения, т. е. при уменьшении жесткости. В соответствии с рекомендациями [1] для оценки склонности деталей к короблению используют условный показатель жесткости $K_{ж}$, определяемый по формуле:

$$K_{ж} = 1000 \left(\frac{H}{L} \right)^2,$$

где L – длина детали; H – наружный размер детали, преобладающий по ее длине, или наименьший эквивалентный размер ее поперечного сечения.

Склонность деталей к короблению возрастает с уменьшением показателя жесткости. В зависимости от величины показателя $K_{\text{ж}}$ детали относятся к одной из трех категорий жесткости: малой, средней или высокой [2]. Для деталей с круглой формой поперечного сечения показатель жесткости равен: для малой – $K_{\text{ж}} = 0,8 \div 2,5$; для средней – $K_{\text{ж}} = 2,5 \div 4,5$; для высокой – $K_{\text{ж}} > 0,5$, а для деталей с некруглой формой поперечного сечения: для малой – $K_{\text{ж}} = 2 \div 4,4$; для средней – $K_{\text{ж}} = 4,5 \div 7,5$ и для высокой – $K_{\text{ж}} > 7,5$.

К числу наиболее характерных длинномерных стальных деталей ответственного назначения металлообрабатывающего оборудования относятся направляющие качения и скольжения (близкие по форме и конфигурации обрабатываемых образцов), ходовые винты передач качения и скольжения, валы, шпиндели, пиноли, гильзы, имеющие преимущественно малую и среднюю жесткость.

Строгание позволяет исключить остаточный дефектный слой и обеспечивает высокое качество обрабатываемой поверхности: малые остаточные напряжения и микротвердость. Приповерхностный слой в результате пластической деформации приобретает направленную текстуру вдоль траекторий резания, что повышает прочность детали. Несмотря на кажущуюся низкую производительность из-за обратного холостого хода резца, строгание благодаря высокому качеству обработки успешно конкурирует с фрезерованием [3].

В настоящее время обработка плоских поверхностей на строгальных станках производится с дискретной поперечной подачей детали на одинарный или двойной ход стола (ползуна). Периодическая подача вызывает повышенные динамические нагрузки, связанные с мгновенным троганием и остановом стола. Упругие отжатия системы СПИД при трогании стола вызывают затухающие колебания, которые циклически повторяются с частотой двойных ходов. В результате снижаются качество поверхности и производительность обработки. Осуществление дискретной подачи требует более сложной кинематики и конструкции станка.

Строгание с непрерывной подачей позволяет устранить указанные недостатки. Сущность способа заключается в том, что поперечное перемещение стола происходит непрерывно в процессе возвратно-поступательного движения резца.

На продольно-строгальных станках непрерывное поперечное перемещение получает резец при возвратно-поступательном движении стола. Траектория движения резца относительно детали представляет линию, угол наклона ω которой к направлению хода ползуна (стола) определяется соотношением скоростей подачи S и строгания V_c :

$$\omega = \arctg \frac{S}{V_c}.$$

При непрерывной подаче, обеспечивающей толщину среза, равную по величине дискретной подаче на двойной ход $\alpha = S$, отношение S/V_c находится в пределах 0,01–0,05. Для указанных соотношений угол наклона траектории резца в среднем равен $30' + 2^\circ 30'$.

Скорость строгания является переменной величиной, изменяющейся от нуля в конце хода до максимума в середине.

При строгании в одном направлении толщина среза и сила резания постоянны.

Строгание с непрерывной подачей в обе стороны благодаря переменной ширине среза обеспечивает уменьшение силы резания при врезании. Изменение силы резания по длине резания прямо пропорционально расстоянию между траекториями движения резца при прямом и обратном ходах. В этом заключается дополнительное преимущество непрерывной подачи, которая в отличие от прерывной позволяет получить плавное нарастание силы резания от минимальной до максимальной, что положительно сказывается на точности обработки плоских поверхностей.

Если скорость подачи непрерывно увеличивается до скорости движения резца, то наклон траектории относительного движения возрастает существенно. При равенстве скоростей угол ω равен 45° . Резание осуществляется одновременно двумя гранями резца, а срезаемый слой разделяется на два потока, которые в виде стружки отводятся по обеим рабочим граням. Высокая скорость движения деталей требует реверсирования хода стола или непрерывного его вращения.

Преимущества способа строгания с соизмеримыми скоростями детали и инструмента заключаются в уменьшении удельных давлений на единицу длины режущего лезвия, улучшении отвода стружки и теплообмена. В результате режим строгания можно повысить в 1,5–2 раза.

Процесс обработки на поперечно-строгальном станке производится главным возвратно-поступательным движением инструмента; движение подачи в поперечном направлении сообщается заготовке, однако при строгании вертикальных, а также наклонных поверхностей движение подачи сообщается резцу.

Применение возвратно-поступательного движения предопределяет наличие прямого (рабочего) и обратного (холостого) хода, что снижает производительность станка. Для уменьшения времени холостого хода увеличивается его скорость по сравнению со скоростью рабочего хода. Поперечно-строгальные станки используются для обработки горизонтальных, вертикальных и наклонных плоскостей на мелких и средних деталях, для прорезания прямолинейных пазов, канавок и выемок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Назначение сталей повышенной прокаливаемости для массивных длинномерных деталей станков и методов их упрочнения. Методические рекомендации. – М.: НИИМаш, 1989. – 78 с. 2. Линник В.А. Упрочняющая обработка длинномерных дета-

лей станков.— М.: НИИМаш, 1983.— 52 с. 3. Ермаков Ю.М. Современные тенденции в развитии лезвийной обработки.— М.: НИИМаш, 1983.— 69 с.

УДК 621.7

А.Л. Климентьев, В.С. Мисевич

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ВЫБОРА МЕТОДОВ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ШИРОКОЙ НОМЕНКЛАТУРЫ

*Витебский государственный технологический университет
Витебск, Беларусь*

Развитие и совершенствование технологической деятельности человека обуславливается целым рядом факторов. Одним из таких факторов является непрерывное увеличение множества типоразмеров производимых изделий и деталей. По некоторым оценкам для технологий связанных с формообразованием это множество составляет не менее 10^{10} наименований [1]. При этом производство изделий зачастую характеризуется ускоренной сменяемостью, которая обуславливается сменой рыночной конъюнктуры. Вторым фактором является появление новых методов формообразования, в т. ч. методов управляемого синтеза.

Названные факторы предъявляют особые требования к качеству, срокам и форме технологической подготовки производства (ТПП), а также определяют тот огромный объем информации, который перерабатывается на стадии макропроектирования технологических процессов, т. е. при выборе метода формообразования и разработке технологической схемы.

Существенно упростить ТПП, а также избежать при этом большого числа ошибок можно за счет использования различных автоматизированных систем ТПП. Одной из проблем автоматизации ТПП является недостаточная степень формализации ряда определяющих этапов макропроектирования, в том числе и недостаточная формализация процесса выбора метода формообразования (деталеобразования) для изделий и деталей широкой номенклатуры.

В настоящее время выбор метода формообразования определяется либо ограниченными возможностями существующего производства, либо субъективным мнением проектанта, основанным на личном опыте, и в большинстве случаев ведется по аналогии с подобными изделиями или деталями. Создание формальной методики выбора методов формообразования для производства деталей позволит полнее использовать преимущества автоматизированных систем ТПП.

Связь между изделием/деталью и методом ее формообразования заключается в связи свойств функциональных групп изделий/деталей и факторов, их обуславлива-

ющих, с одной стороны, и технологических процессов, с другой стороны, с учетом серийности производства.

Свойства изделия определяются его функциональным назначением. Функциональное назначение детали может или полностью определяться ею самостоятельно, если эта деталь представляет собой не собираемое изделие, или же частично определяется функциональным назначением собираемого изделия, составной частью которого она является.

Свойства изделий и деталей представляют собой весьма ограниченный набор в отличие от практически бесконечного множества типоразмеров изделий/деталей. При этом свойства могут быть достаточно четко заданы параметрами и их численными значениями.

Анализ показывает, что существенные различия между функциональными группами изделий/деталей в большинстве случаев основаны не на обладании ими какими-либо особыми свойствами, а на различных сочетаниях с различными численными значениями параметров обычных свойств изделий/деталей.

Требуемые свойства изделий обеспечиваются факторами, которые в той или иной мере обуславливают или определяют эти свойства. Одним из основных факторов, в значительной мере определяющим большинство свойств изделий, является материал, в качестве других факторов могут быть выбраны сочетания материала с геометрической формой и другими особенностями изделия/детали. В свою очередь, факторы, определяющие свойства, тесным образом связаны с технологическими методами/способами изготовления изделий и деталей.

В соответствии с изложенным, связь между изделиями/детальями и методами/способами формообразования может быть выстроена в следующей последовательности.

Деталь – функциональная группа родственных деталей – основные и дополнительные свойства деталей – параметры, характеризующие свойства деталей – численные значения параметров – выявление факторов, обеспечивающих требуемые параметры изделия/детали – сопоставление свойств и параметров с некоторыми факторами (например, материалом детали и т. д.) – выбор метода формообразования и технологической схемы или технологии-аналога.

Выбранный метод формообразования и технологическая схема или технология-аналог анализируются с точки зрения соответствия особенностям производства и экономической эффективности.

В тех случаях, когда деталь имеет специфические свойства, что определяется экстремальными значениями ее параметров, принципиально различных вариантов технологического процесса не существует и выбирается технология-аналог для родственных деталей. Если же параметры изделия/детали имеют не экстремальные значения, технология изготовления многовариантна и необходимо проводить выбор ме-

тогда формообразования и технологической схемы с последующей подробной проработкой технологического процесса.

Для формализации выбора метода/способа формообразования необходимо составление общего систематизированного перечня технологических методов/способов, систематизированного перечня основных разновидностей материалов и построение специальных матриц, связывающих определенный фактор (например, материал детали) или комбинацию факторов (например, материал детали + параметры точности) с определенными технологическими методами/способами формообразования.

Систематизированный перечень технологических методов/способов строится на основе рассмотрения физической сущности процессов, протекающих в ходе формообразования. В данный перечень включаются все технологические методы/способы формообразования различных изделий независимо от их материала и области применения.

Систематизированный перечень технологических методов/способов формообразования может быть построен по следующей структурной схеме:

- вид физического (фазового) состояния материала в момент формообразования: плазменное, газообразное, аэрозольное, жидкое, вязкотекучее, эластичное, твердое порошкообразное, твердое компактное;
- класс технологического метода: литье, деформирование, резание, соединение;
- вид технологического метода: литье свободное, литье под давлением и т. д.;
- технологический способ: литье под давлением точечное, литье под давлением безлитниковое и т. д.

Способ формообразования для конкретного изделия/детали выбирается последовательно. Первоначально выбирается метод формообразования из ограниченного перечня основных методов, а затем выбирается способ формообразования из систематизированного перечня методов/способов формообразования.

Фрагмент перечня методов формообразования приведен ниже.

| Наименование метода формообразования | Код |
|--------------------------------------|-----|
| <u>Литьевые методы</u> | |
| Метод свободного литья | МСЛ |
| Метод литья под давлением | МЛД |
| Метод центробежного литья | МЦЛ |
| ... | |
| <u>Методы деформирования</u> | |
| Метод прокатки | МПР |
| Метод экструзии | МЭК |
| Метод объемной штамповки | МОШ |
| ... | |
| и т. д. | |

Формализация выбора метода/способа формообразования может быть основана на специальных матрицах, связывающих определенный фактор или комбинацию факторов с определенными технологическими методами/способами.

В качестве таких матриц могут быть выбраны матрицы, связывающие следующие факторы:

- | | |
|---|--------------------------|
| – материал | — технологический метод; |
| – материал + серийность производства | — технологический метод; |
| – материал + весовая группа | — технологический метод; |
| – материал + вид геометрической формы | — технологический метод; |
| – материал + вариант геометрической формы | — технологический метод; |
| – материал + параметры точности | — технологический метод; |
| – материал + параметры шероховатости | — технологический метод. |

Фрагмент матрицы, связывающей материал изделия/детали с технологическими методами формообразования, приведен ниже (кодирование методов формообразования указано в перечне).

| Материал | Технологический метод |
|--------------------|-------------------------------|
| Сталь | МСЛ, МЛД, МЦЛ..., МПР, МОШ... |
| Чугун | МСЛ, МЛД, МЦЛ... |
| Пластические массы | МЛД, МПР, МЭК, МОШ... |

Для рационального построения матриц необходимо произвести квантификацию параметров, принимающих непрерывный ряд значений и/или имеющих большой диапазон варьирования значений.

Под квантификацией понимается сведение множества качественных признаков предмета труда к счетному множеству категорий, обозначаемых порядковыми номерами, т. е. под категорией качества изделия понимается обозначаемая кодом градация требований к качеству [2]. Например, традиционно выделяется 4 категории качества: особо высокое (1), высокое (2), среднее (3), низкое (4).

В заключение необходимо отметить, что выбор метода формообразования является одним из этапов макропроектирования технологических процессов (ТП). При этом, формализованная методика макропроектирование ТП позволяет на много снизить затраты времени на проектирование ТП для деталей широкой номенклатуры при их выборе и последующем изготовлении в условиях рыночной конъюнктуры. Кроме того, методика макропроектирования ТП наиболее эффективна в тех случаях, когда проектант сталкивается с непривычной областью и при этом обладает оперативным простором для выбора методов формообразования.

Изложенная методика выбора методов формообразования требует расширения справочно-информационной базы. Формализованный выбор методов/способов фор-

мообразования не исключает проведения экспериментальных исследований, подтверждающих возможность получения изделий/деталей с требуемым качеством выбранным методом/способом формообразования.

Формализованный выбор методов формообразования для деталей широкой номенклатуры может быть достаточно легко автоматизирован и может войти составной частью в САПР/АСТПП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Смирнов А.И. Перспективы технологии машиностроения.– М.: Наука, 1992.– 183 с.
2. Дунаев И.М., Смоленцев В.П. Новое в типизации процессов механической обработки.– М.: Машиностроение, 1989.– 48 с.
3. Мисевич В.С., Климентьев А.Л., Гришаев А.Н., Кузьменков С.М. Общий алгоритм связи деталей и технологических процессов // Сб. статей XXX научно-технической конференции «Совершенствование технологических процессов и организации производства в легкой промышленности и машиностроении» / Витебский гос. технологический ун-т.– Витебск, 1997.– С. 114–116.
4. Климентьев А.Л. Общий алгоритм связи деталей и технологических процессов // Материалы международной 52-й научно-технической конференции профессоров, преподавателей, научных работников, аспирантов и студентов БГПА «Технические ВУЗы – Республике»: В 7 частях. / Белорусская гос. политехническая академия.– Мн., 1997.– Ч. 2.– С. 11.

УДК 621.787

А.Лабер, С.Лабер

ВЛИЯНИЕ СМАЗОЧНОГО ВЕЩЕСТВА НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СФЕРОИДАЛЬНОГО ЧУГУНА ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ ППД

*Политехника Зеленогурска
Зелена Гура, Польша*

Одним из основных факторов, влияющих на эксплуатационные свойства деталей, в том числе трибологические, является состояние их поверхностного слоя, который формируется в процессе обработки, в первую очередь, финишной и упрочняющей [1, 2]. Поверхностное пластическое деформирование (ППД) обеспечивает формирование благоприятной топографии поверхности (низкой шероховатости, значительных градиентов относительной опорной длины профиля t_{20} и t_{50}), а также физико-механических свойств поверхностного слоя (измельчения зерен микроструктуры, наклепа, остаточных напряжений сжатия).

Состояние поверхностного слоя зависит от целого ряда факторов, в том числе от свойств обрабатываемого материала; характера обработки (статическая, динамическая, осцилляционная); типа и конструкции инструмента; режимов обработки и т. д.

В научно-технической литературе подробно рассмотрено влияние упомянутых выше факторов на состояние поверхностного слоя, однако крайне мало сведений о роли смазочного вещества. Традиционно рекомендуется обрабатывать чугун без использования СОЖ, а сталь – с СОЖ в виде смеси масла и керосина.

Ниже представлены результаты исследований закономерностей трения и изнашивания деталей, подвергнутых ППД, в поверхностные слои которых в результате обработки имплантированы вещества, повышающие смазочные свойства масел: соединения на основе оксидов, сульфидов, фосфидов и др. Сформированный поверхностный слой (рис. 1) должен характеризоваться благоприятными трибологическими свойствами. Это обусловлено тем обстоятельством, что имплантированные присадки в процессе эксплуатации активно воздействуют на условия смазывания трущихся поверхностей.

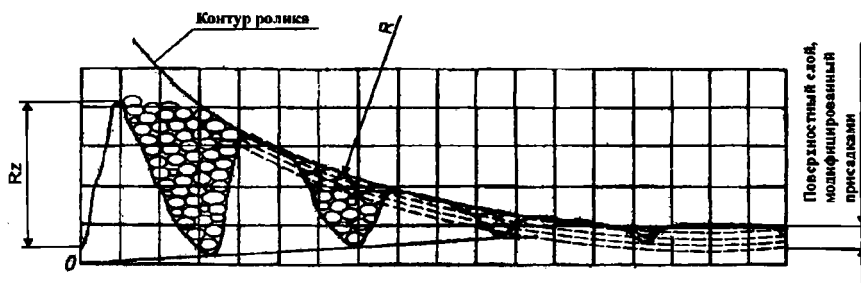


Рис. 1. Схема модификация поверхностного слоя эксплуатационными присадками в процессе ППД

Целью представленной работы было выяснение закономерностей влияния смазочного вещества (масло, присадка) на трибологические характеристики (коэффициент трения и интенсивность изнашивания) обработанной поверхности детали после ППД (обкатки роликом). Исследования выполнялись на деталях из серого чугуна со сфероидальной ферритно-перлитной структурой и твердостью HB ~ 230. Химический состав чугуна: 3,20% С, 0,329% Mn, 1,941% Si, 0,016% P и 0,005% S. Обработка ППД выполнялась на токарном станке TUD-50 с помощью специального устройства, основанного на принципе обкатывания вала роликом. Диаметр ролика 50 мм, радиус округления 20 мм. В качестве смазочных веществ и присадок использовались:

- чистое (без каких-либо присадок) масло SN 150;

- моторное масло TITAN CFE 1040 MC, в котором в качестве универсальной присадки находится 3% дисульфид молибдена;
- препарат R-2000 (100%) на базе мягких металлов с антифрикционным действием (меди и свинца);
- препарат MOTOR-LIFE (100%) химического принципа действия.

Трибологические исследования выполнялись на приборе Т-05. В качестве трущегося тела использовались кольца из чугуна, подвергнутого ППД, в качестве контрольного – плоские стальные колодки твердостью 60 HRC (~61 HRC). В качестве смазочного вещества во всех случаях использовалось масло SN 150. Исследования выполнялись в два этапа: 1 – приработка с частотами вращения 60, 120, 180 и 240 об/мин (линейная скорость соответственно $v = 9,42$ м/мин; 18,84 м/мин; 28,26 м/мин; 37,68 м/мин) и силах прижима 30 и 60 Н в течение 30 с; 2 – непрерывное трение с частотой вращения 180 об/мин ($v = 28,26$ м/мин), силой прижима 60 Н в течение 1 ч.

Результаты исследований трибологических свойств поверхностей, подвергнутых ППД в присутствии различных смазочных веществ, приведены на рис. 2, 3. Установлено, что наилучшими смазочными свойствами (минимальное сопротивление движению) характеризуются поверхности, сформированные в присутствии присадки MOTOR LIVE, несколько более низкими – в присутствии моторного масла TITAN CFE 1040 MC. Наихудшие результаты зафиксированы при использовании масла SN 150. Следует отметить, что различия в силах трения для смазочных материалов типов 1, 2, 4 (см. рис. 2) незначительны.

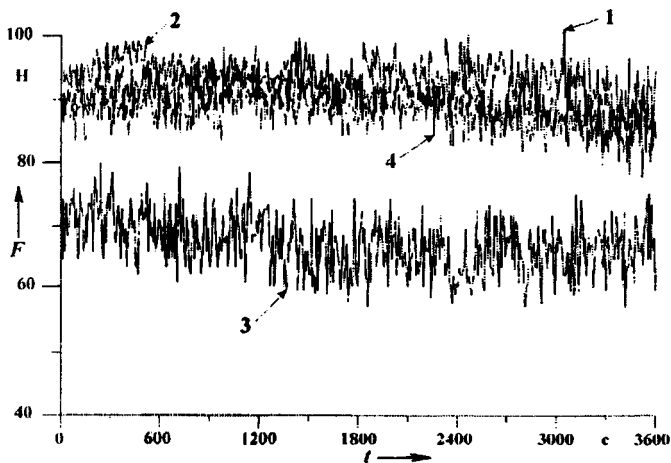


Рис. 2. Характер изменения сил трения на поверхности чугунного образца, подвергнутого ППД с использованием: 1 – масла SN 150; 2 – моторного масла TITAN CFE 1040 MC; 3 – препарата R-2000; 4 – препарата MOTOR-LIFE

Сопrotивление поверхности абразивному изнашиванию также значительно зависит от условия смазывания в ходе ППД (рис. 3). Минимальный износ контргрела зафиксирован при использовании препарата MOTOR LIVE, затем следуют препарат R-2000 и моторное масло TITAN CFE 1040 MC. Наибольший износ имеет место при использовании масла SN 150.

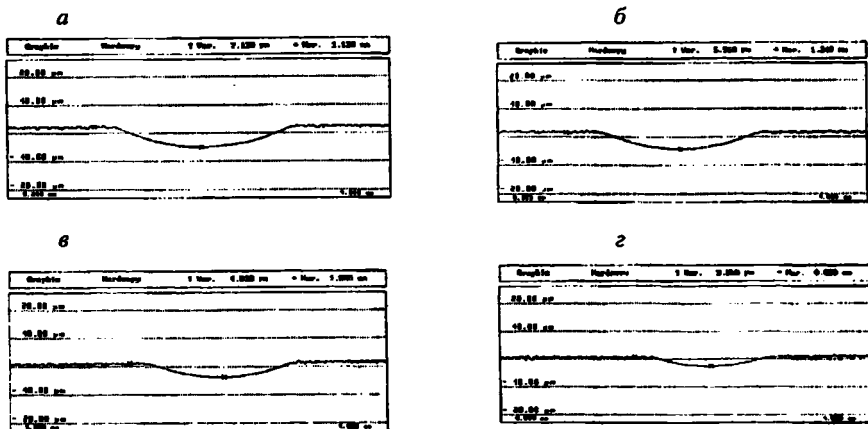


Рис. 3. Характер изнашивания контргрел, взаимодействующих с упрочненными поверхностями, в присутствии: а – масла SN 150; б – моторного масла TITAN CFE 1040 MC; в – препарата R-2000; з – препарата MOTOR-LIFE

Рассмотренный выше характер изменения сил трения обусловлен ролью смазочного вещества в процессе ППД. Это вещество, благодаря действию процессов адсорбции и хемосорбции смазочных присадок, модифицирует поверхностный слой обработанной детали (см. рис. 1). Смазочное вещество в ходе ППД проникает в поры чугуна, которые становятся своего рода емкостями используемого смазочного материала. Он активизируется в процессе работы деталей, улучшая трибологические характеристики узлов трения.

Проведенные исследования показали целесообразность использования присадок при ППД чугуна, а возможно, и стали. В результате модифицирования поверхностного слоя улучшаются трибологические характеристики узлов трения – снижаются коэффициент трения и интенсивность изнашивания трущихся поверхностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Laber St. Analiza wzpolzalezności pomiedzy stanem warstwy wierzchniej a własciwosciami uzytkowymi zeliwnych elementow maszyn obrabianych nagniataniem.

УДК 621.9

С.Лабер

ВЛИЯНИЕ СОЖ НА СИЛЫ РЕЗАНИЯ И ИЗНОС СВЕРЛ ПРИ СВЕРЛЕНИИ СТАЛИ

*Политехника Зеленогурска
Зелена Гура, Польша*

Качество обработанных поверхностей, в том числе полученных сверлением, в значительной степени определяет работоспособность деталей. Оно зависит от свойств обрабатываемого материала, режущего инструмента, режимов резания и прочих условий обработки.

В процессе обработки СОЖ способствует отводу теплоты из зоны резания и снижению трения на контактных площадках. Последнее обстоятельство связано с присутствием в СОЖ смазочных присадок. В результате процессов адсорбции и хемосорбции присадки образуют на трущихся контактных поверхностях инструмента и детали смазочные пленки, которые предотвращают возникновение металлических (адгезионных) связей. Кроме того, благодаря малой прочности на сдвиг они снижают коэффициент трения на площадке контакта и интенсивность изнашивания инструмента. Использование СОЖ с улучшенными смазочными свойствами способствует также снижению количества образующейся теплоты.

Смазочные свойства СОЖ зависят от качества и количества находящихся в ней присадок. Как правило, используются присадки типа EP (Extreme Pressure), содержащие вещества, легко вступающие в химические реакции с обрабатываемым материалом, особенно в условиях высоких давлений и температур, имеющих место в зоне резания. В качестве таких присадок используются соединения серы, фосфора, хлора и др. Под действием высоких давлений и температур они разлагаются на простые соединения либо ионы S^- , Cl^- , P^- , взаимодействующие с материалами инструмента и детали.

Правильно выбранная присадка должна полностью разлагаться в зоне резания, а продукты разложения вступать в соединения с металлом. В этом случае обеспечивается максимальный смазочный эффект при минимальной коррозии обрабатываемого материала и инструмента.

В последнее время для модифицирования смазочных материалов, в том числе и СОЖ, используются присадки химического действия, в том числе MotorLife. Автором были выполнены исследования процессов трения в различных условиях [1, 2, 4],

в том числе в зоне резания [3]. Представленные ниже результаты являются продолжением этих исследований применительно к процессу сверления.

Исследования проводились на вертикально-сверлильном станке с использованием спиральных сверл $\varnothing 8$ из быстрорежущей стали при сверлении стали 45. Крутящий момент измерялся с помощью тензометрического динамометра. Сигналы после усиления тензометрическим мостом TDA-6 обрабатывались на компьютере. Измерения износа сверл выполнялись на микроскопе ММИ. Диапазон режимов резания: подача 0,1...0,3 мм/об; скорость резания 12,5...31,5 м/мин. Сверление осуществлялось всухую; с эмульсией Synthio HRS; с эмульсией Synthio HRS + 5% присадки MotorLife.

Результаты исследований показывают, что СОЖ существенно влияет на крутящий момент, износ сверла и высоту нароста. При резании всухую (рис. 1, а) момент изменяется в весьма широких пределах, от 0 до 60 Н·м, сверление сопровождается значительными колебаниями. Использование СОЖ способствует снижению крутящего момента до 35 Н·м (рис. 1, б), а присадка MotorLife уменьшает его еще более, до 25 Н·м (рис. 1, в). СОЖ также снижает износ сверл и высоту образующегося нароста (рис. 2, табл. 1).

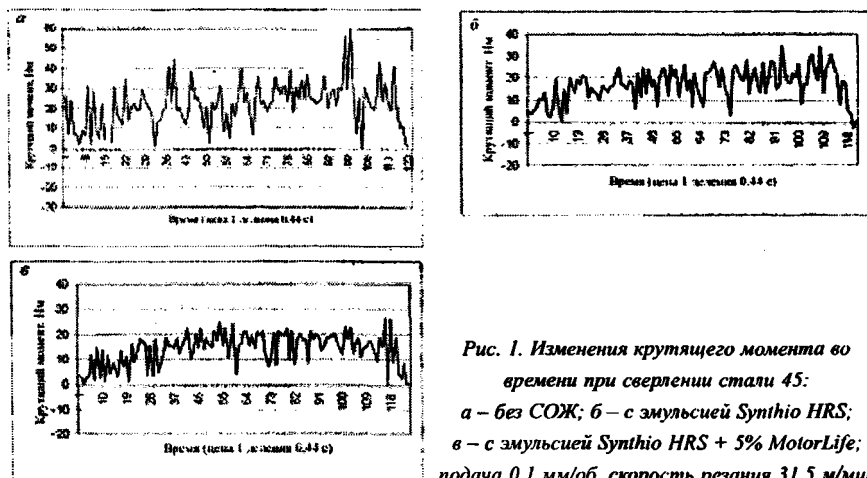


Таблица 1

Влияние СОЖ на износ сверл и высоту нароста

| Условия обработки | Размеры, мм | | |
|-------------------------------------|---------------|----------------------------------|----------------|
| | износ уголков | износ главной задней поверхности | высота нароста |
| Всухую | 0,85 | 0,25 | 0,17 |
| Эмульсия Synthio HRS | 0,45 | 0,06 | 0,08 |
| Эмульсия Synthio HRS + 5% MotorLife | 0,24 | 0,05 | 0,03 |

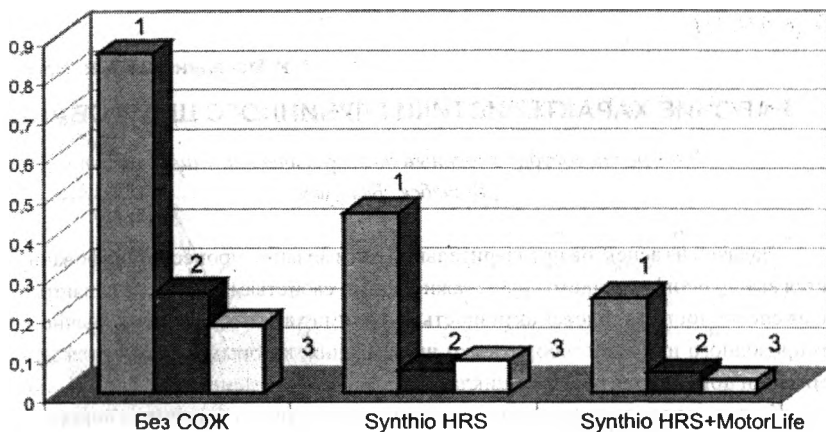


Рис. 2. Влияние СОЖ на износ сверл и высоту нароста: 1 – износ уголка; 2 – износ главной задней поверхности; 3 – высота нароста

Использование эмульсии снижает ширину площадки износа на задней поверхности с 0,85 до 0,45 мм, а в случае ее модификации присадкой MotorLife – до 0,24 мм. Еще более существенно влияет СОЖ на условия изнашивания уголков. Износ в этом случае снижается соответственно в 4,5 и 6 раз.

Таким образом, правильный выбор условий охлаждения позволяет обеспечить более оптимальные условия работы инструмента и снижает шероховатость обработанной поверхности отверстий в результате снижения высоты образующегося нароста.

ЛИТЕРАТУРА

1. Laber A., Laber St. Modyfikowanie warunkow pracy wezlow tarcia niekonwencjonalnymi dodatkami niskotarciowymi – mechanizmy dzialania// Materiały z Zebrania Plenarnego Sekcji Podstaw Eksploatacji KBM PAN.– Zielona Gora: WSP, 1988.– S.17–38.
2. Laber A., Laber St. Modyfikowanie warunkow pracy lozysk slizgowych silnikow spalinowych niekonwencjonalnymi dodatkami smarnymi// Materiały z Zebrania Plenarnego Sekcji Podstaw Eksploatacji KBM PAN.– Zielona Gora: WSP, 1988.– S. 39–46.
3. Laber A., Laber St. Modyfikowanie warunkow pracy wezlow skrawania niekonwencjonalnymi dodatkami niskotarciowymi// Materiały z Zebrania Plenarnego Sekcji Podstaw Eksploatacji KBM PAN.– Zielona Gora: WSP, 1988.– S. 68–74.
4. Лабер С. Улучшение условий работы подшипников трения скольжения автомобильных двигателей использованием присадок к маслам. //Сб. тр. Конгресса ПРОТЕК-2000. – М.: Станкин, 2000. – С. 193.

РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЛУБИННОГО ШЛИФОВАНИЯ

*Витебский государственный технологический университет
Витебск, Беларусь*

Задачей из аспектов предварительной оптимизации процесса шлифования является выбор шлифовального круга, важнейшими свойствами которого являются режущая способность и тепловая активность. Рабочими характеристиками обычного (многопроходного или многооборотного) шлифования, которыми пользуются для оптимизации показателей рабочего цикла [1], являются коэффициент режущей способности K_p , показатели теплового ограничения производительности (глубина бесприжогового шлифования a_x и коэффициент тепловой активности b) и параметры модели затупления шлифовального круга. Однако показатель K_p не пригоден для глубинного шлифования, так как в этом случае сила P_y не характеризует уровень полного давления в зоне шлифования (глубины внедрения абразивных зерен). Необходимо также учесть скорость шлифования. Поэтому в качестве новой характеристики режущих свойств шлифовального круга при глубинном и обычном шлифовании предлагается принять отношение объема материала $V_{уд}$, удаленного единицей площади рабочей поверхности шлифовального круга, к среднему радиальному давлению p_c в зоне шлифования.

Рассмотрим случай вышлифовки канавки кругом прямого профиля.

За время τ при глубинном шлифовании канавки глубиной a и шириной B со скоростью продольной подачи $S_{пр}$ удаляется объем $V = a \cdot B \cdot S_{пр} \cdot \tau$. За это же время в работе принимает участие площадь шлифовального круга $F = 0,001 \cdot B \cdot V_{кр} \cdot \tau$, где $V_{кр}$ рабочая скорость круга. Тогда отношение ($\text{мм}^3/\text{мм}^2$):

$$V_{уд} = 10^3 \cdot a \cdot S_{пр} / V_{кр}, \quad (1)$$

Среднее давление в зоне шлифования (контакта шлифовального круга с заготовкой) определяется выражением ($\text{кН}/\text{мм}^2$):

$$p_c = P_r / (B \cdot L), \quad (2)$$

где P_r – радиальная сила шлифования; L – длина дуги контакта.

В предположении, что давление p в зоне шлифования пропорционально текущему значению угла ψ (рис. 1), найдено выражение для вычисления значения угла μ отклонения радиальной силы от вертикальной оси.

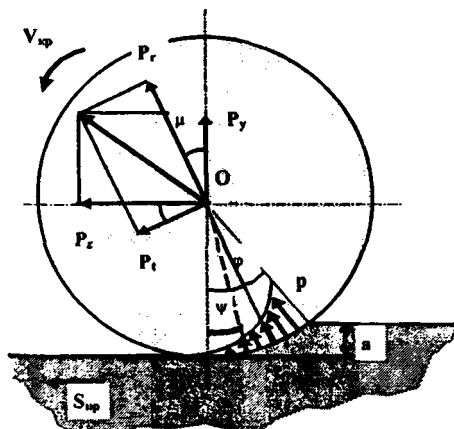


Рис. 1. Схема плоского глубинного шлифования

получена модель для вычисления обобщенного коэффициента режущей способности K_{po} в случае плоского глубинного шлифования кругом формы ПП ($\text{мм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{кН})$):

$$K_{po} = 10^3 \cdot \frac{a \cdot S_{up} \cdot B \cdot D}{V_{sp}} \cdot \frac{\text{arctg} \sqrt{a/(D-a)}}{P_y \cdot \cos \mu + P_x \cdot \sin \mu}, \quad (4)$$

где D – диаметр шлифовального круга, P_y и P_x – проекции силы шлифования на соответствующие оси.

Для случая многопроходного шлифования с малыми значениями глубины, когда угол $\mu \rightarrow 0$, согласно модели (4) и определению коэффициента режущей способности K_p , можно записать:

$$K_{po} = 10^3 \cdot K_p \cdot \sqrt{a \cdot D} / V_{sp}. \quad (5)$$

Значение K_{po} для разных сочетаний характеристик шлифовального круга и обрабатываемого материала можно экспериментально определять с помощью приспособления, схема которого показана на рис. 2. В том случае, когда образец шлифуется в течение времени τ , значение K_{po} определяется по зависимости:

$$K_{po} = 10^3 \cdot \frac{B \cdot h \cdot L^2}{V_{sp} \cdot P_r \cdot \tau}, \quad (6)$$

где h – линейный сьем материала образца за время τ , P_r – сила прижима образца к шлифовальному кругу, которую обеспечивают грузы 4.

$$\text{tg} \mu = \lim_{i \rightarrow N} \frac{\sum_{i=1}^N i \cdot \sin[(2i-1) \cdot \varphi / 2N]}{\sum_{i=1}^N i \cdot \cos[(2i-1) \cdot \varphi / 2N]},$$

где N – число дискрет, на которые разбит угол контакта φ .

Численным моделированием установлено, что значение μ с высокой степенью точности можно вычислять по следующей простой модели

$$\mu = 0,98 \cdot \sqrt{2 \cdot a / D}. \quad (3)$$

На основании схемы сил, показанной на рис. 1, и с учетом моделей (1) и (2),

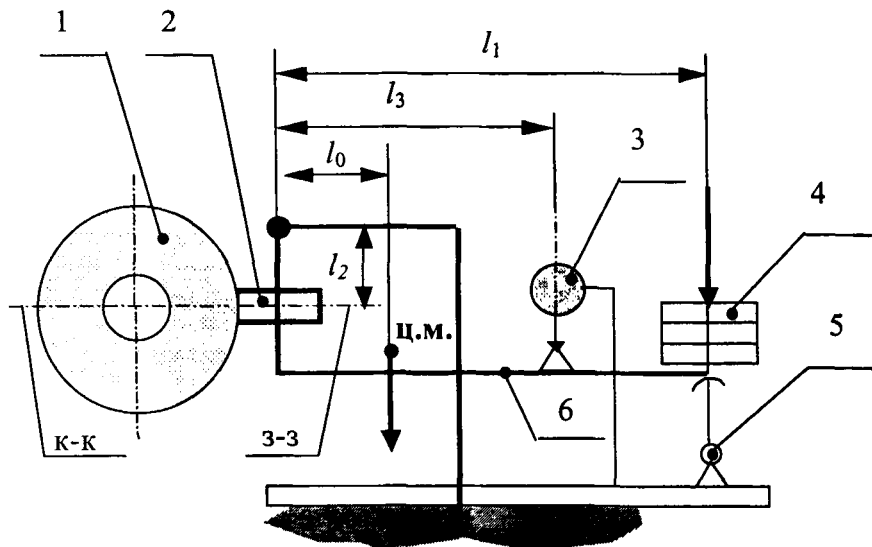


Рис. 2. Схема установки для определения K_{po} и K_{tr} .

1 – испытуемый шлифовальный круг; 2 – шлифуемый образец материала; 3 – индикатор съема; 4 – грузы; 5 – откидной упор; 6 – рычаг; l_1, l_2, l_3, l_0 – плечи, используемые в расчетах

Приспособление, схема которого показана на рис. 2, можно использовать и для определения комплексного показателя K_{tr} (условного коэффициента), позволяющего выбирать круг по его тепловой активности. Для этого следует применять образец, который представляет собой полусинтетическую термопару, что позволяет непрерывно измерять температуру шлифуемой поверхности образца T_0 .

Шлифуемый образец (в виде стержня прямоугольного сечения) представляем как полубесконечный, для которого определено граничное условие второго рода. В работе [2] получено следующее уравнение для вычисления температуры T_n на торце полубесконечного стержня, где действует источник тепла с плотностью q_0 :

$$T_n = \frac{2 \cdot q_0}{\lambda_0} \cdot \sqrt{\frac{\omega_0 \cdot \tau}{\pi}}, \quad (7)$$

где λ_0 – теплопроводность материала образца (заготовки), Вт/м·град; ω_0 – коэффициент температуропроводности образца, м²/с; τ – время действия источника, с.

Так как ширина стержня много меньше диаметра круга, то температурное поле круга можно описать уравнением теплопроводности для движущегося со скоростью V_{sp} теплового источника, для которого применимо граничное условие второго рода

($q_n = \text{const}$). При большой скорости источника, температура впереди источника и на его передней границе, равна первоначальной температуре тела ($T_0=0$). Внутри источника она быстро повышается и достигает своего максимума на его задней кромке. Для этого максимума выполняется [3]:

$$T_k = \frac{2 \cdot q_k \cdot \sqrt{L}}{\sqrt{\pi \cdot \lambda_k \cdot c_k \cdot \gamma_k \cdot V_{кр}}}, \quad (8)$$

где L – длина дуги контакта (ширина стержня), м; λ_k – теплопроводность круга, c_k – теплоёмкость круга, Дж/кг·град; γ_k – плотность, кг/м³.

В общем случае уравнение теплового баланса записывается следующим образом:

$$Q_{y,кр} + Q_{y,дет} + Q_{y,струж} + Q_{y,сож} = Q_y, \quad (9)$$

где $Q_{y,кр}$, $Q_{y,дет}$, $Q_{y,струж}$, $Q_{y,сож}$ – удельное количество теплоты (или тепловой поток), уходящее соответственно круг, деталь, стружку и СОЖ; Q_y – общее количество теплоты, выделившиеся в процессе резания, Дж/с.

Из (9) исключаем $Q_{y,сож}$, так как доля теплоты, поступающей в СОЖ (или (и) в атмосферу) попадает в нее не непосредственно из зоны контакта, а с поверхности нагретого металла уже после того, как шлифовальный круг прошел это место.

Тогда перепишем (9) как:

$$Q_{y,кр} + Q_{y,дет} = Q_y - Q_{y,струж}. \quad (10)$$

Здесь $Q_y = q \cdot S$, где q – плотность теплового потока, S – площадь, через которую передается теплота, м². $Q_{y,струж} = c_d \cdot m_c \cdot T_c$, где m_c – масса стружки, снимаемой за единицу времени, кг/с, T_c – температура стружки, °С. Уравнение (10) примет вид:

$$q_d \cdot S_d + q_k \cdot S_k = N_{эфф} - 10^{-9} \cdot c_d \cdot \gamma_d \cdot h \cdot S_d \cdot T_c / \tau, \quad (11)$$

где q_d , q_k – тепловые потоки, определяемые из (7) и (8), Дж/с·м²; $N_{эфф}$ – эффективная мощность шлифования, Вт; $S_d = B \cdot L$ – площадь, через которую теплота переходит в деталь (B – ширина контакта, L – длина дуги контакта); S_k – эффективная площадь контакта абразивных зерен с деталью, h – величина съема металла за время τ , мм.

В первом приближении можно считать, что T_c и T_k не зависят от режимов шлифования, а определяются температурой плавления шлифуемого материала $T_{пл}$. Тогда из [3] $T_n = T_k = 0,85 \cdot T_{пл}$.

В итоге получим выражение для некоторого показателя, отражающего совокупность теплофизических характеристик шлифовального круга:

$$K_{тк} = A \cdot \left(\frac{N_{эфф} - Q_c}{B \cdot L} - q_0 \right), \quad (12)$$

где $K_{тк}$ – коэффициент теплоотвода, характеризующий интенсивность отвода теплоты в шлифовальный круг и являющийся комплексной теплофизической характеристикой круга,

$$K_{тк} = \delta \cdot \sqrt{(\lambda \cdot c \cdot \gamma)_к}, \quad \delta = S_к / S_d,$$

$$A = \frac{2,35}{T_{пл}} \cdot \sqrt{\frac{L}{\pi \cdot V_{кр}}}, \quad q_0 = \frac{T_{пл}}{2} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot (\lambda \cdot c \cdot \gamma)_д}{\tau}},$$

$$Q_c = 0,85 \times 10^{-12} \cdot T_{пл} \cdot c_d \cdot \gamma_d \cdot K_{ро} \cdot V_{кр} \cdot P_r / L.$$

Поскольку S_x существенно зависит от радиальной силы P_r , то коэффициент теплоотвода шлифовального круга следует характеризовать параметрами модели $K_{тк} = f(P_r)$. Если значение $K_{ро}$ определено заранее, то при реализации эксперимента по определению $K_{тк}$ следует записывать только зависимость температуры поверхности от времени при различных значениях радиальной силы. Время каждого опыта составляет 10...20 с. Необходимые для расчета $K_{тк}$ значения теплофизических показателей материала образца приведены в [2].

Таким образом, для оценки рабочих свойств шлифовального круга предлагаются два новых показателя: обобщенный коэффициент режущей способности и коэффициент теплоотвода, а также методика их определения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Махаринский Е. И. Технологические основы управления процессом шлифования. – М.: СНИО СССР, 1990. – 52 с.
2. Сипайлов В. А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. – М.: Машиностроение, 1078. – 166 с.
3. Яцерицын П. И., Цокур А.К., Еременко М. Л. Тепловые явления при шлифовании и свойства обработанных поверхностей. – Мн.: Наука и техника, 1973. – 184 с.

УДК 621.9.048.6

Н.Т. Минченя, В.Г. Куптель

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ОПТИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ГЕНЕРАТОРА ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ ВИБРАЦИОННОГО ТОЧЕНИЯ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Повышение эффективности процесса резания нержавеющей, жаропрочных сплавов и других труднообрабатываемых материалов требует изыскания новых методов и

средств. Процесс пластической деформации срезаемого слоя за линией среза, а также интенсивность изнашивания инструмента существенно зависят от условий взаимодействия рабочих поверхностей инструмента и обрабатываемой заготовки, которые можно изменять путем возбуждения в системе СПИД вынужденных высокочастотных колебаний малой амплитуды. Эти колебания могут вызывать в системе СПИД дополнительные циклические перемещения контактных поверхностей инструмента относительно заготовки и приводить к периодическому повороту векторов сил резания на передних и задних поверхностях и значительному уменьшению сопротивления сходу стружки и облегчению процесса стружкообразования [1, 2].

Многочисленные устройства для наложения высокочастотных колебаний на инструмент не нашли широкого применения в производстве из-за громоздкости, сложности настройки на достижение требуемого эффекта, низких режимов резания, большой требуемой мощности привода.

В процессе обработки с наложением высокочастотных колебаний вследствие износа инструмента и других технологических факторов, приводящих к увеличению акустических потерь, резонансный режим работы системы нарушается, уменьшается амплитуда колебаний режущей кромки резца, что приводит к полному отсутствию эффекта от наложения акустических колебаний. Правильный расчет узлов акустического преобразователя и тщательность их изготовления в значительной степени определяют работоспособность системы.

При распространении волны происходит перенос энергии от источника к режущей кромке резца. Полная средняя энергия элемента объема среды

$$\bar{E}_{\text{нол}} = \rho A^2 \omega \frac{V_{\text{об}}}{2}, \quad (1)$$

где ρ – плотность среды; A – амплитуда волны; ω – круговая частота; $V_{\text{об}}$ – объем элемента среды.

От плотности энергии в акустической волне зависит интенсивность I , т. е. энергия, проходящая через единичную площадку, расположенную перпендикулярно направлению волны.

$$I = \bar{E}_{\text{нол}} \cdot c = \rho c \omega^2 \frac{A^2}{2}, \quad (2)$$

где c – скорость распространения волны в материале резца.

Акустическая волна сопровождается потерями энергии, вследствие чего амплитуда волны уменьшается.

$$A_x = A_0 e^{-\alpha x}, \quad (3)$$

где A_x – амплитуда смещения частиц в контролируемой точке; A_0 – амплитуда смещения частиц в нулевой точке.

Учитывая выражение (2), получаем

$$I_x = I_0 e^{-\alpha x}, \quad (4)$$

где I_x – интенсивность волны в контролируемой точке; I_0 – интенсивность волны в нулевой точке.

При известных A_{x_1} и A_{x_2} или I_{x_1} и I_{x_2} в точках x_1 и x_2 получим коэффициент затухания

$$\alpha = \frac{1}{x_2 - x_1} \ln \frac{A_{x_1}}{A_{x_2}} = \frac{1}{2(x_2 - x_1)} \ln \frac{I_{x_1}}{I_{x_2}}. \quad (5)$$

Таким образом, при выбранной выходной электрической мощности генератора эффективность обработки зависит от количества энергии, сообщаемой вершине режущего инструмента. Количество энергии можно определить согласно (2), если известна амплитуда колебаний.

Для определения амплитуды колебаний известны различные методы и средства [2]. Они предназначены в основном для лабораторных измерений, а для обеспечения режима вибрационного резания необходимо непрерывно контролировать амплитуду колебаний вершины резца или участка резца, амплитуда колебаний которого функционально связана с амплитудой вершины резца. С этой целью разработан бесконтактный индуктивный трансформаторный преобразователь (БИТП), применение которого в вибрационной системе резания позволит посредством обратной связи автоматически поддерживать заданный уровень амплитуды колебаний вершины резца.

Для экспериментальной оценки мощности генератора, требуемой для обеспечения заданной амплитуды акустических колебаний вершины резца под нагрузкой, разработан стенд (рис. 1). Посредством зажимающих накладок 4 и 5 резец 1 закреплен в сечениях с нулевой амплитудой. Нагрузка на его вершину создается цилиндрической прорезной пружиной 7 со встроенным внутрь индуктивным преобразователем, предназначенным для преобразования упругой деформации пружины в электрический сигнал с помощью электронного блока 10. Деформация пружины создается перемещением винта 9 относительно корпуса 8. Зависимость величины электрического сигнала на выходе электронного блока 10 от нагрузки, создаваемой при деформации цилиндрической прорезной пружины 7 представлена на рис. 2. Для контроля амплитуды акустической волны, распространяющейся вдоль оси резца, в точке, удаленной от узла, вблизи сечения, где находится режущая кромка, установлен БИТП 6. При подключении акустического преобразователя 2 к генератору 3 в резец вводятся высокочастотные колебания. При этом зазор между поверхностью резца 1 и БИТП 6 изменяется с частотой волны, распространяющейся вдоль резца. Изменения зазора приводят к изменению параметров БИТП, которые преобразуются в электрический сигнал. На выходе БИТП получаем модулированное ультразвуковыми колебаниями на-

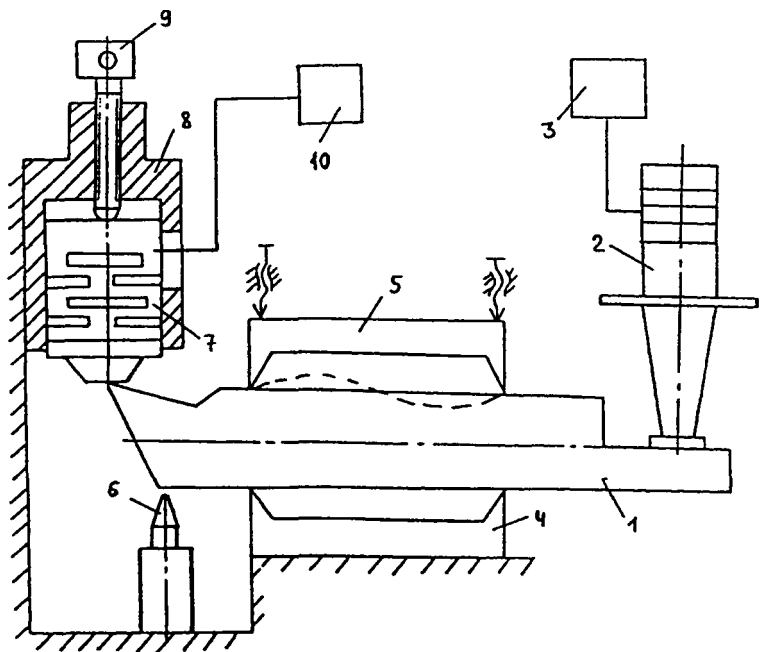


Рис. 1. Схема измерительного стенда

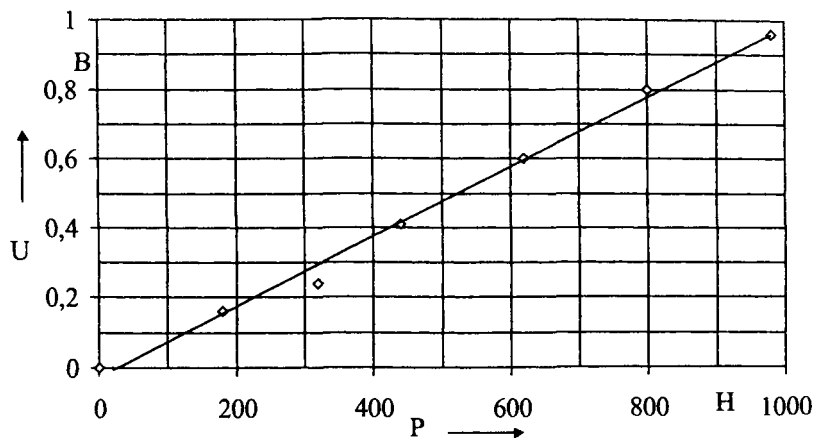


Рис. 2. Зависимость величины электрического сигнала на выходе электронного блока от приложенной нагрузки

пряжение несущей частоты 200 кГц, которое усиливается усилителем переменного тока и выпрямляется демодулятором. Затем отфильтровывается несущая частота, и сигнал пропорциональный амплитуде колебаний регистрируется на экране электронно-лучевого осциллографа.

Получены зависимости амплитуды колебаний режущей кромки резца от нагрузки при различной мощности генератора. При мощности генератора 25 Вт увеличение нагрузки более 400 Н уменьшает амплитуду колебаний (рис. 3) и при нагрузке в 1000 Н амплитуда уменьшается до 1 мкм. При 50 Вт и начальной амплитуде 4 мкм нагрузка в 1000 Н уменьшает амплитуду на 1,5 мкм. Это связано с уменьшением добротности акустической системы. Чтобы восстановить потери, необходимо увеличивать мощность акустического преобразователя.

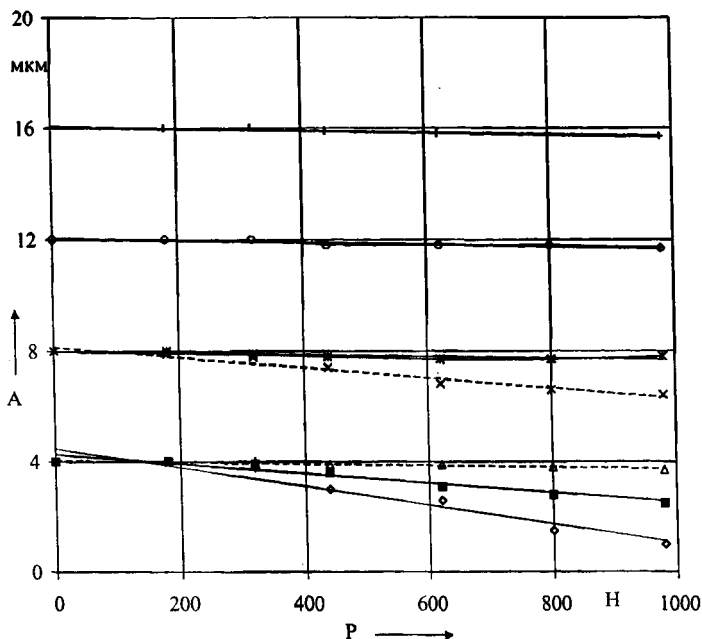


Рис. 3. Зависимость амплитуды колебаний вершины режущей кромки инструмента от приложенной нагрузки (◊ - 25 Вт; ■ - 50 Вт; △ - 100 Вт; × - 100 Вт; * - 200 Вт; ○ - 400 Вт; + - 400 Вт)

Начиная со 100 Вт начальная амплитуда в 4 мкм практически не уменьшается во всем диапазоне нагрузок. При амплитудах от 8 до 16 мкм наиболее оптимальной для поддержания режима вибрационного резания является мощность 400 Вт.

Таким образом, при правильном определении узловых точек для крепления резца, настройке ультразвукового преобразователя в резонанс и контроле амплитуды колебаний резца в точке, находящейся между узлами колебаний, можно при небольших мощностях создавать и посредством обратной связи поддерживать амплитуду колебаний режущей кромки резца, а следовательно и режим вибрационного резания. Разработанная оснастка и измерительные устройства позволяют проводить нагруженные и контроль амплитуды колебаний инструмента при любой схеме ввода акустических колебаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Марков А.И. Ультразвуковое резание труднообрабатываемых материалов.— М.: Машиностроение, 1968.— 367 с. 2. Кумабэ Д. Вибрационное резание.— М.: Машиностроение, 1985.— 424 с.

УДК 621.9.02.001

М. И. Михайлов

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРОФИЛЯ ФРЕЗЫ С УЧЕТОМ ХАРАКТЕРА ВИНТОВОЙ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛИ

*Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого
Гомель, Беларусь*

На качество поверхности детали влияет не только высота остаточных гребешков шероховатости, но и характер их распределения на поверхности [1–3].

При синтезе общих схем обработки возникают задачи выбора рациональной формы инструмента. Для сложной поверхности существует множество решений данной задачи. Поэтому практический интерес представляет установление влияния характера кинематической поверхности детали на формообразующую кромку инструмента.

Решение этой задачи требует начального определения значения кинематической погрешности. Для этого образующую локального участка кинематической поверхности описываем векторным многочленом [4–7]

$$r = r(t) = p_0 + tp_1 + t^2p_2 + t^3p_3 \quad (0 \leq t \leq 1). \quad (1)$$

Векторные коэффициенты p_0, p_1, p_2, p_3 определяем по известным граничным условиям

$$r(0) = r_0, \quad r(1) = r_1, \quad r'(0) = T_0, \quad r'(1) = T_1. \quad (2)$$

Значение кинематической погрешности рассчитывалось по уравнению

$$\Delta_{ij} = |a_{ij}|; a_{ij} = \frac{(Y_i - Y_{nj})(X_{nj+1} - X_{nj}) - (X_i - X_{nj})(Y_{nj+1} - Y_{nj})}{\sqrt{(Y_{nj+1} - Y_{nj})^2 + (X_{nj+1} - X_{nj})^2}}, \quad (5)$$

где Δ_{ij} – кинематическая погрешность в i -ой точке j -ой аппроксимирующей прямой.

Если направляющая поверхности детали винтовая линия, то требуется перемещение полученных аппроксимирующих прямых образующей детали по винтовой линии.

Запишем уравнения аппроксимирующих прямых в начальном положении образующей. Для этого выберем две системы координат $X_1Y_1Z_1$ (местную) и XYZ (рис. 2, а), которые в начальный момент обработки совпадают, тогда

$$X = l \sin \lambda + X_0; \quad Y = -Y_0 - l \cos \lambda, \quad (6)$$

где l – расстояние от точки пересечения аппроксимирующих прямых до точки M .

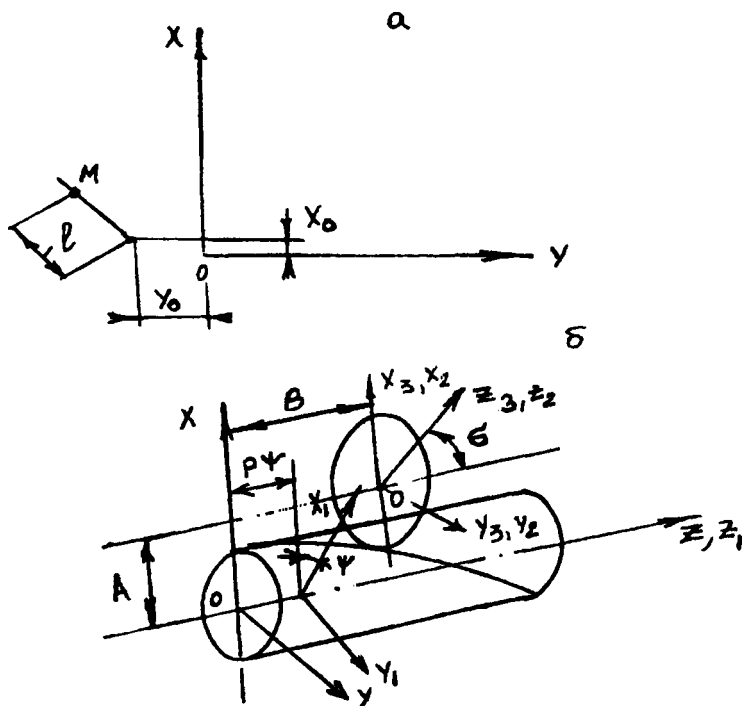


Рис. 2. Расчетная схема

Если перемещать аппроксимирующую прямую по винтовой направляющей поверхности детали, то получим часть этой поверхности. Вместе с аппроксимирующей прямой будет перемещаться подвижная система координат $X_1Y_1Z_1$, которая также будет совершать винтовое движение относительно системы XYZ . Формулы перехода от системы XYZ к системе $X_1Y_1Z_1$ следующие:

$$\begin{aligned} X_1 &= X \cos \psi - Y \sin \psi, \\ Y_1 &= X \sin \psi + Y \cos \psi, \\ Z_1 &= Z + P\psi, \end{aligned} \quad (7)$$

где P – параметр винтовой поверхности детали; ψ – угол поворота системы XYZ относительно $X_1Y_1Z_1$.

Подставив из системы (6) выражения X , Y и Z в систему (7), получим уравнения винтовой кинематической поверхности детали

$$\begin{aligned} X_1 &= X_0 \cos \psi + Y_0 \sin \psi + \sin(\psi + \lambda), \\ Y_1 &= X_0 \sin \psi - Y_0 \cos \psi - l \cos(\psi + \lambda), \\ Z_1 &= P\psi. \end{aligned} \quad (8)$$

Определим нормаль к кинематической поверхности детали

$$N = \frac{\partial \bar{F}}{\partial l} \times \frac{\partial \bar{F}}{\partial \psi}, \quad (9)$$

где $F = F(l, \psi)$ – уравнение поверхности детали.

Для получения более удобных выражений разложим вектор на оси координат N_x, N_y, N_z .

Найдем частные производные из уравнений (8)

$$\begin{aligned} \frac{\partial X_1}{\partial l} &= \cos(\lambda + \psi); \quad \frac{\partial Y_1}{\partial l} = -\cos(\lambda + \psi); \quad \frac{\partial Z_1}{\partial l} = 0, \\ \frac{\partial X_1}{\partial \psi} &= Y_0 \cos \psi - X_0 \sin \psi - l \cos(\lambda + \psi); \quad \frac{\partial Y_1}{\partial \psi} = X_0 \cos \psi + Y_0 \sin \psi + l \sin(\lambda + \psi); \quad (10) \\ \frac{\partial Z_1}{\partial \psi} &= P. \end{aligned}$$

Подставим выражения (10) в уравнение (9):

$$\begin{aligned} N_{x1} &= -P \cos(\lambda + \psi); \\ N_{y1} &= -P \sin(\lambda + \psi); \end{aligned} \quad (11)$$

$$N_{z1} = \sin(\lambda + \psi)(X_0 \cos \psi + l \sin(\psi + \lambda) + Y_0 \sin \psi) + \cos(\psi + \lambda)(l \cos(\lambda + \psi) - X_0 \sin \psi).$$

Дисковая фреза является телом вращения, поэтому нормаль в точке касания инструментальной поверхности и поверхности детали пересекает ось фрезы. Координаты точки центра фрезы в системе $X_1 Y_1 Z_1$ (рис. 2, б)

$$X_{102} = A; \quad Y_{102} = 0; \quad Z_{102} = B. \quad (12)$$

Выберем на оси фрезы единичный вектор k_{02} . Проекция его на оси координат в системе $X_1 Y_1 Z_1$ детали

$$k_{02x} = 0; \quad k_{02y} = -\sin \sigma; \quad k_{02z} = \cos \sigma \quad (13)$$

Запишем условие пересечения векторов N и k_{02} :

$$\begin{aligned} (X_1 - X_{102})(N_{y1} k_{02z} - N_{z1} k_{02y}) - (Y_1 - Y_{102})(N_{x1} k_{02z} - \\ - N_{z1} k_{02x}) + (Z_1 - Z_{102})(N_{x1} k_{02y} - N_{y1} k_{02x}) = 0. \end{aligned} \quad (14)$$

Уравнение (14) описывает контактную линию в системе координат $X_1 Y_1 Z_1$.

Для определения исходной инструментальной поверхности запишем аппроксимированную образующую поверхности детали в системе $X_2 Y_2 Z_2$, связанной с фрезой. Для этого случая уравнения перехода из системы $X_1 Y_1 Z_1$ в $X_2 Y_2 Z_2$ можно записать в виде

$$X_2 = X_1 - A;$$

$$Y_2 = Y_1 \cos \sigma + Z_1 \sin \sigma + B \sin \sigma; \quad (15)$$

$$Z_2 = -Y_1 \sin \sigma + Z_1 \cos \sigma + B \cos \sigma,$$

где A – расстояние между осями Y_2 и Y_1 , в направлении X_1 ;

B – расстояние между осями X_2 и X_1 в направлении Z_1 ;

σ – угол поворота оси Z_2 до совмещения с Z_1 вокруг оси X_2 .

Исходная поверхность дискового инструмента образовывалась круговым движением линии (15) относительно Z_2 . Для записи уравнения искомой круговой поверхности введём условно неподвижную систему координат $X_3 Y_3 Z_3$, в которой будет по-

ворачиваться X_2, Y_2, Z_2 вместе с характеристикой. Формулы перехода от системы X_2, Y_2, Z_2 к X_3, Y_3, Z_3 будут иметь вид

$$\begin{aligned} X_3 &= X_2 \cos \tau - Y_2 \sin \tau; \\ Y_3 &= X_2 \sin \tau + Y_2 \cos \tau; \\ Z_3 &= Z_2. \end{aligned} \quad (16)$$

Зависимости (15) подставим в (16) и получим

$$\begin{aligned} X_3 &= (X_1 - A) \cos \tau - (Y_1 \cos \sigma + Z_1 \sin \sigma + B \sin \sigma) \sin \tau; \\ Y_3 &= (X_1 - A) \sin \tau + (Y_1 \cos \sigma + Z_1 \sin \sigma + B \sin \sigma) \cos \tau; \\ Z_3 &= -Y_1 \sin \sigma + Z_1 \cos \sigma + B \cos \sigma. \end{aligned} \quad (17)$$

Подставив в (17) значения параметров X_1, Y_1, Z_1 , получим уравнения

$$\begin{aligned} X_3 &= (X_0 \sin \psi + Y_0 \cos \psi + l \sin(\psi + \lambda) - A) \cos \tau - \\ &- [(X_0 \sin \psi - Y_0 \cos \psi - l \cos(\lambda + \psi)) \cos \sigma + P \psi \sin \sigma + B \sin \sigma] \sin \tau; \\ Y_3 &= (X_0 \sin \psi + Y_0 \cos \psi + l \sin(\psi + \lambda) - A) \cos \tau - \\ &- [(X_0 \sin \psi - Y_0 \cos \psi - l \cos(\lambda + \psi)) \cos \sigma + P \psi \sin \sigma + B \sin \sigma] \cos \tau; \\ Z_3 &= -(X_0 \sin \psi - Y_0 \cos \psi - l \cos(\psi + \lambda)) \sin \sigma + P \psi \cos \sigma + B \cos \sigma. \end{aligned}$$

В полученные уравнения подставляем параметры $\tau, \psi, \lambda, r, \sigma, P$ для двух смежных зубьев. Решив совместно полученные системы уравнений, определим значение кинематической погрешности и, сравнив ее с допустимой, корректируем окончательно форму режущей кромки инструмента.

Использование предлагаемой методики рационально при криволинейной обрабатываемой поверхности детали с переменным радиусом кривизны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ящерицын П.И., Рыжов Э.В., Аверченков В.И. Технологическая наследственность в машиностроении. – Минск: Наука и техника, 1977. – 256 с.
2. Fischer H.L. and Elrod J.T. Surface Finish as a Function of Tool Blometry and Feed – A Theoretical Approach // Microtechnic Precision and Production Engineering. – 1975. – Vol. XXV, № 3. – P. 175–178.
3. Коновалов Е. Г. Основы новых способов металлообработки. – Мн.: Наука и

техника, 1961.– 328 с. 4. Симоновский В. Н. Некоторые исследования по теории формообразования поверхностей в машиностроении: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 /БПИ.– Мн., 1971.– 21 с. 5. Бобров В. Ф., Иерусалимский Д. Е. Резание металлов самовращающимися резаками.– М.: Машиностроение, 1972.– 179 с. 6. Юнусов Ф. С. Формообразование сложнопрофильных поверхностей шлифованием.– М.: Машиностроение, 1987.– 168 с. 7. Гречишников В.А., Кирсанов Г.И. Проектирование дискового инструмента для обработки винтовых поверхностей //Машиностроитель.– 1978.– № 10.– С. 16–17.

УДК 621.941.229

В.И. Молочко, А.А. Вольнец

О ШЕРОХОВАТОСТИ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ВИБРАЦИОННОМ РЕЗАНИИ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Несмотря на обеспечение высокой эффективности стружкодробления вибрационное резание не получило широкого применения прежде всего из-за ухудшения качества обработки, а именно из-за увеличения шероховатости обработанной поверхности. Поэтому анализ факторов, влияющих на величину гребешков шероховатости при резании с вибрациями, имеет важное практическое значение.

Цель данной работы – выявление степени возрастания параметра шероховатости R_z при вибрационном резании по сравнению с обычным и разработка некоторых предложений по его уменьшению. Поставленные задачи будут решаться на основе теоретического анализа.

Как известно, высота $H_{гр}$ гребешков шероховатости при точении резцом с точечной вершиной соответствует зависимости

$$H_{гр} = \Delta \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \varphi_1 / (\operatorname{tg} \varphi + \operatorname{tg} \varphi_1), \quad (1)$$

а при точении резцом с переходной дуговой (радиусной) кромкой – зависимости

$$H_{гр} = \Delta^2 / 8r, \quad (2)$$

где Δ – осевой шаг между двумя соседними траекториями движения резца; φ и φ_1 – главный и вспомогательный углы резца в плане; r – радиус закругления вершины резца, причем r больше подачи на оборот.

При обычном резании Δ – величина постоянная, равная подаче на оборот S ; при вибрационном же резании Δ – величина переменная, изменяющаяся от некоторого

минимального Δ_{\min} до максимального Δ_{\max} значений. Величина Δ_{\max} зависит от выбранной амплитуды A колебательного движения инструмента, которая в свою очередь связана с постоянной подачей S_0 и параметром $\nu = f/n$ известным [1] соотношением

$$A = S_0 / 2 \cdot |\sin(\nu\pi)|. \quad (3)$$

Здесь f и n – соответственно частота двойных ходов инструмента и частота вращения заготовки, следовательно, ν – это частотный параметр, определяющий число колебаний (двойных ходов) резца за один оборот заготовки.

При $\nu = 0,5; 1,5; 2,5 \dots (i+0,5)$, где i – целое положительное число, $A_{\min} = S_0/2$. При других значениях ν амплитуда колебаний инструмента (рис. 1) существенно возрастает, а при $\nu = 1; 2; 3 \dots$ и т. д. она становится равной ∞ , т. е. перерезание стружки на элементы в этих случаях становится невозможным.

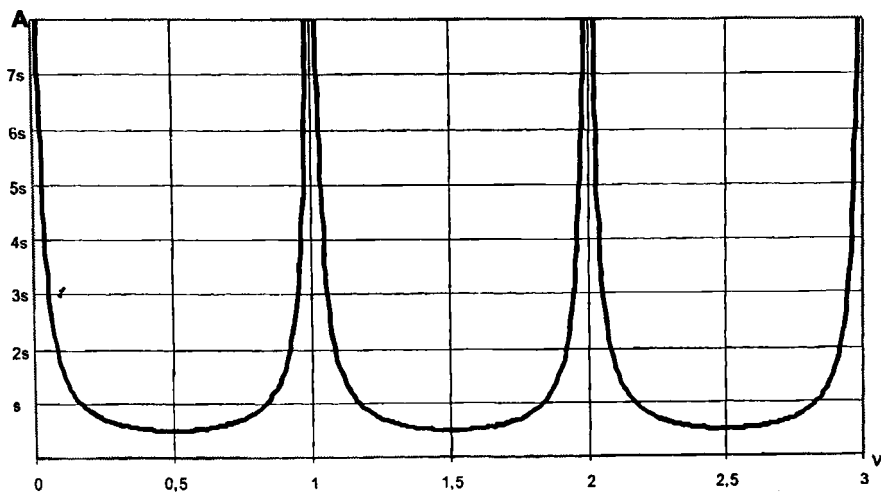


Рис. 1. Зависимость амплитуды A в долях S от параметра ν

При выборе значения коэффициента ν учитывают, что с его увеличением возрастает динамическая напряженность процесса резания, а с уменьшением возрастает длина срезаемого элемента стружки и, следовательно, снижается эффективность процесса стружкодробления. Поэтому оптимальным считается вариант вибрационного резания, при котором $\nu = 1,5$.

Для наглядного представления о характере изменения величины Δ при вибрационном резании удобно обработанную цилиндрическую поверхность детали вместе со следом (траекторией) движения вершины резца изображать в виде плоской развертки. На рис. 2 такая развертка представлена для случая $\nu = 1,5$.

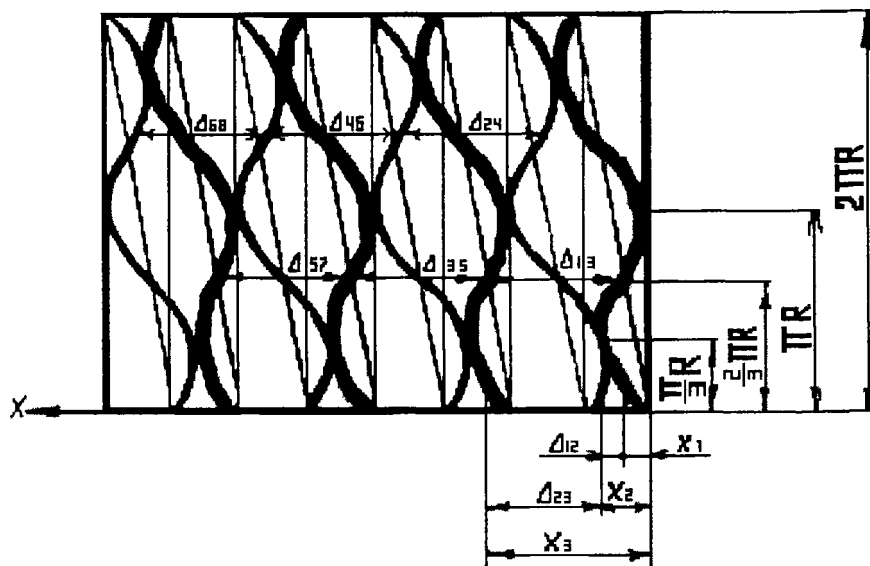


Рис. 2. Схема вибрационного резания ($\nu = 1,5$)

Из рис. 2 следует, что траектории движения резца повторяются через оборот заготовки, поэтому осевые расстояния между ближайшими нечетными траекториями, т.е. двойные шаги Δ_{13} , Δ_{35} , Δ_{57} и т. д., равно как и осевые расстояния между ближайшими четными траекториями, т.е. двойные шаги Δ_{24} , Δ_{46} , Δ_{68} и т. д. – величины постоянные, равные $2S$. Следовательно, сумма отрезков внутри шага также равна $2S$, т.е. $\Delta_{12} + \Delta_{23} = \Delta_{13} = 2S$, $\Delta_{23} + \Delta_{34} = \Delta_{24} = 2S$ и т. д. Отсюда следует, что для характеристики величин гребешков шероховатости при вибрационном резании достаточно рассмотреть динамику изменения двух соседних одинарных шагов, например Δ_{12} и Δ_{23} , одного двойного шага Δ_{13} .

Переменные значения одинарных шагов Δ_{12} и Δ_{23} могут быть определены с учетом принятых законов движения инструмента как некоторые функции текущего угла поворота заготовки φ . Для точек траектории движения инструмента, лежащих на одной прямой, параллельной оси заготовки, т.е. для точек φ ; $\varphi + 2\pi$; $\varphi + 4\pi$ и т. д. можно записать:

$$\begin{aligned} \Delta_{12} = X_2 - X_1 &= \frac{S_0(\varphi + 2\pi)}{2\pi} + A \sin[(\varphi + 2\pi)\nu] - S_0 \frac{\varphi}{2\pi} - A \sin(\varphi\nu) = \\ &= S_0 + A[\sin(\varphi + 2\pi)\nu - \sin\varphi\nu]; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\Delta_{2n} = X_1 - X_2 = S_0 \frac{(\varphi + 4\pi)}{2\pi} + A \sin[(\varphi + 4\pi)\nu] - S_0 \frac{\varphi + 2\pi}{2\pi} - A \sin[(\varphi + 2\pi)\nu] =$$

$$= S_0 + A[\sin(\varphi + 4\pi)\nu - \sin(\varphi + 2\pi)\nu], \quad (5)$$

где X_1 , X_2 и X_3 – соответственно текущие осевые перемещения инструмента в течение одного, двух и трех оборотов заготовки.

Поскольку сумма соседних одинарных шагов равна $2S$, то обычно один из отрезков Δ меньше, а второй больше S . В предельных случаях (при $\varphi = \frac{k\pi}{\nu}$) все одинарные шаги Δ равны S , а при $\varphi = \frac{\pi}{2\nu}(1 + 2k)$ один из одинарных шагов равен нулю, а второй – $2S$ (здесь $k = 0; 1; 2; 3$ и т. д.).

Соответственно изменениям одинарных шагов Δ изменяются и высоты H_p соседних гребешков шероховатости, в связи с чем характерные теоретические профилограммы при вибрационном резании имеют вид чередующихся выступов меньшего и большего размеров (рис. 3). Так как параметр R_z обычно используемый для оценки шероховатости при черновом и получистовом точении, определяется высотой наибольших максимумов профиля, то должен учитываться больший из двух соседних выступов, а, следовательно, и больший из двух соседних одинарных шагов, т. е. отрезок Δ , величина которого лежит в диапазоне $S \dots 2S$.

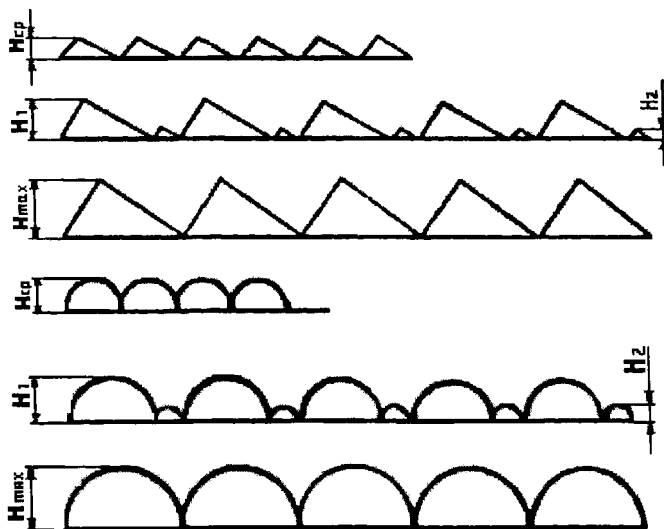


Рис. 3. Теоретические профилограммы при резании с вибрациями

С учетом изложенного параметр R_z^* , оценивающий шероховатость обработанной поверхности при вибрационном резании, может быть определен выражением $R_z^* = kR_z^0$, где k – коэффициент увеличения гребешков шероховатости, изменяющийся в диапазоне 1...2 при точечной вершине резца и в диапазоне 1...4 при дуговой вершинной кромке; R_z^0 – теоретический параметр шероховатости при обычном резании.

Таким образом, при вибрационном резании шероховатость обработанной поверхности возрастает в среднем в 1,5...2,25 раза, а максимальная шероховатость – в 2...4 раза по сравнению с обычным резанием.

Для уменьшения шероховатости необходимо применять резцы с увеличенным радиусом r закругления вершинной кромки, или резцы с точечной вершиной, и дополнительной зачищающей фаской с углом в плане, равным 0...5°. Можно также применять методы кинематического стружкодробления, например, вибрационно-прерывистое [2] или дискретное [3] резание.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лавров Н.К. Завивание и дробление стружки в процессе резания. – М.: Машиностроение, 1971. – 88 с. 2. Щеголев В.В. Способ кинематического стружкодробления. А. с. № 670384 В 23/В 1/00. 3. Корольков И.С., Молочко В.И. Дробление сливной стружки методом дискретного резания // Промышленность Белоруссии. – 1964. – № 1. – С. 54–56.

УДК 621.941.1

Ж.А.МРОЧЕК, В.И.АРБУЗОВ, В.Л.ХАРТОН

ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ ЧУГУННЫХ, СТАЛЬНЫХ И АЛЮМИНИЕВЫХ ОБРАЗЦОВ ПОСЛЕ ХОНИНГОВАНИЯ, ШЛИФОВАНИЯ И РАСТОЧКИ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Одна из многих проблем технологии машиностроения – это задача определения оптимальных режимов обработки материалов и установления качественных и точностных параметров изготавливаемых деталей. Решению этой задачи должны сопутствовать высокая производительность, экономическая целесообразность использования выбранного способа обработки заготовок деталей и, в ряде случаев, увеличение их долговечности при эксплуатации в условиях трения и износа.

Известно, что получистовое и чистовое формообразование поверхностей заготовок деталей машин в машиностроении осуществляется с использованием механических способов обработки [1–4]. К ним относятся: лезвийная обработка (точение,

растачивание), алмазно-образивная (шлифование, суперфиниш, полирование), отделочно-упрочняющая обработка поверхности пластическим деформированием (раскатывание, вибронакатывание, выглаживание).

Анализ влияния условий обработки на точностные параметры деталей и на шероховатость поверхности показывает, что наиболее значимыми являются: выбор плана операций; способ установки заготовок на столе станка; соблюдение постоянства всех свойств материала заготовки, влияющих на точность обработки; величина износа инструмента и станка; жесткость упругой системы станок – приспособление – инструмент – деталь; выброустойчивость оборудования; геометрическая точность и настройка станка и т. д.

При определении эксплуатационных свойств деталей машин, установлении рациональных режимов обработки, обеспечивающих наиболее экономичное получение заданной точности размеров и системы параметров состояния поверхности детали, чаще всего требуется экспериментальная проверка.

Была поставлена задача определения оптимальных параметров обработки отверстий в заготовках из различных материалов (чугун, сталь, алюминий) при использовании хонингования, раскатывания и прецизионного точения. В качестве критерия оптимальности принята шероховатость поверхности. Образцы для исследований изготавливались в виде цилиндров с наружным диаметром 30 мм; внутренним – 20 мм; высотой – 40 мм.

Проводили хонингование образцов из чугуна, раскатывание – на образцах из стали, прецизионную расточку – на образцах из алюминиевого сплава.

Режимы обработки:

- хонингование: припуск на обработку 0,02–0,03 мм, черновое и чистовое хонингование Ra 0,16–0,63, $K = U_{вр} / U_{пр} = 6$, зернистость M40;
- раскатывание напроход: припуск на обработку 0,02 мм; частота вращения раскаточной головки 450 об/мин;
- прецизионное точение: частота вращения шпиндельной головки 1200 об/мин, подача 0,01 мм/об., припуск на обработку 0,1–0,15 мм.

Измерение шероховатости поверхности проводилось в соответствии с требованиями технической инструкции фирмы «Lucas», которая регламентирует порядок проведения измерений с использованием профилометра – профилографа и контактного (игольчатого) инструмента (ISO 3274, Rank Jaylor Hobson «Surtronic»). Во время измерений игла инструмента (радиус острия иглы – 5 мкм, общая длина измерения – 4,8 мм) устанавливается перпендикулярно поверхности отверстия. Перед измерением шероховатости поверхность проверялась на предмет отсутствия отклонений от однородности текстуры, отсутствия пористости, расслоений и видимых следов от обрабатывающего инструмента. Использовался профилометр-профилограф M4P с аналоговой обработкой и индикацией измеренных результатов (рис. 1–3). Вывод ре-

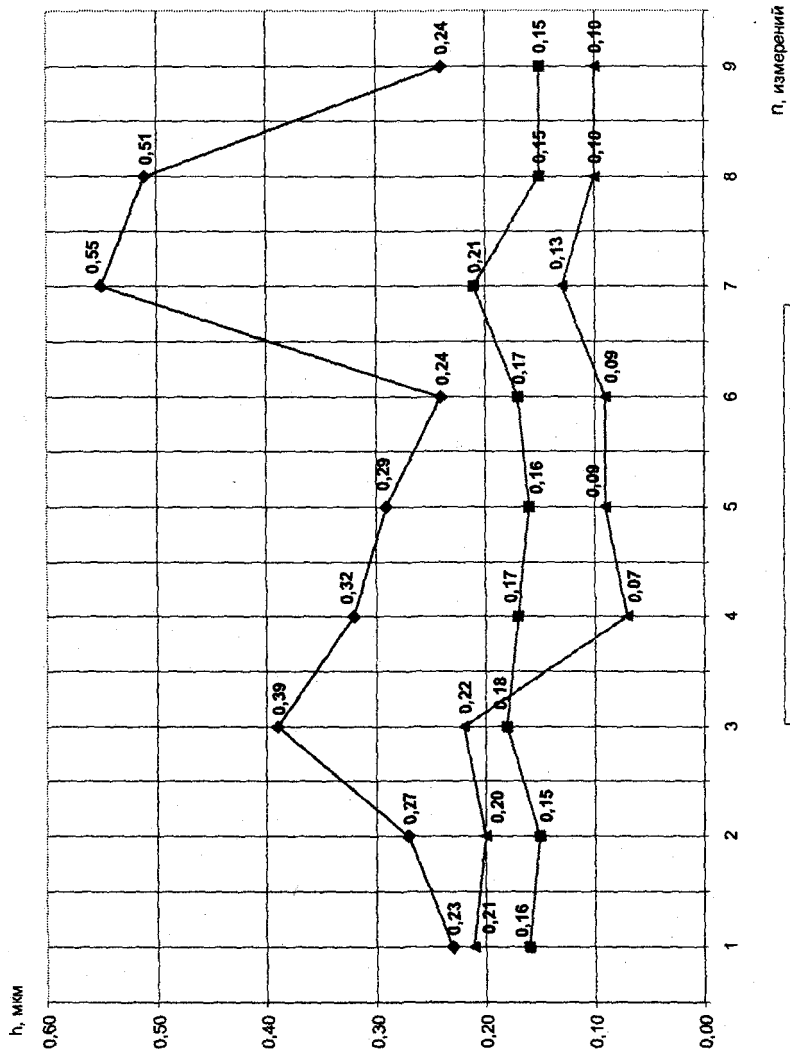
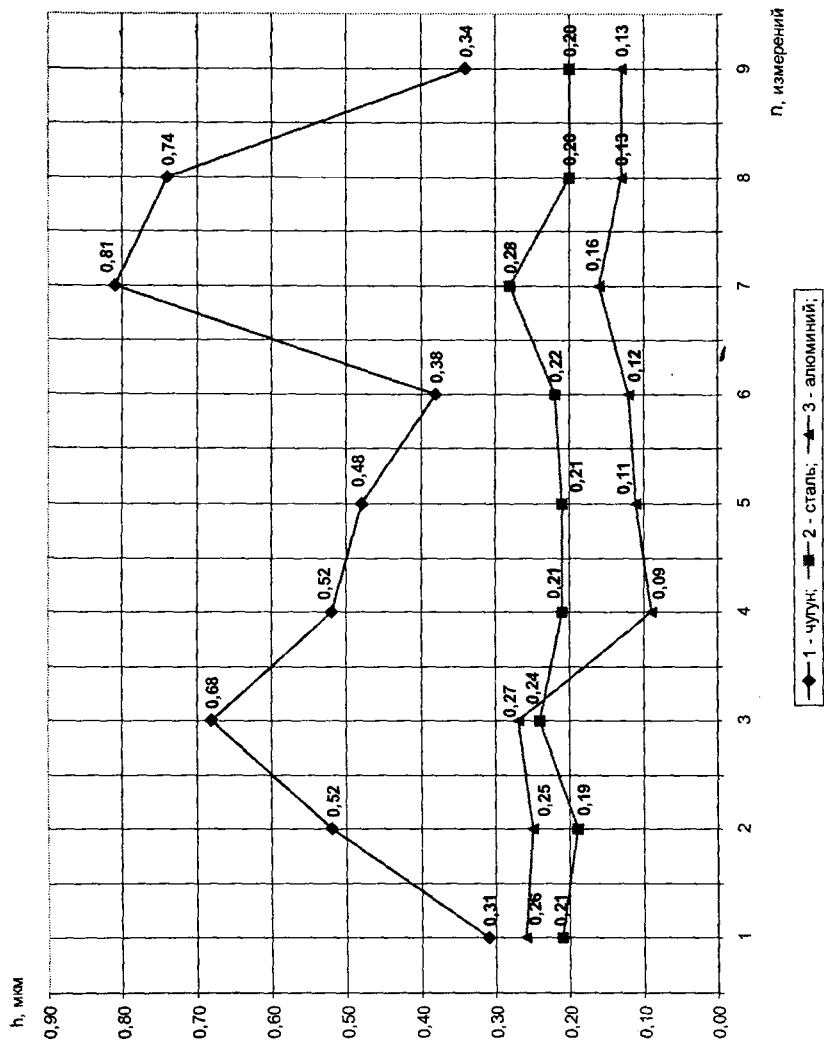


Рис.1. График изменения Ra по числу измерений

Рис. 2. График изменения R_d по числу измерений

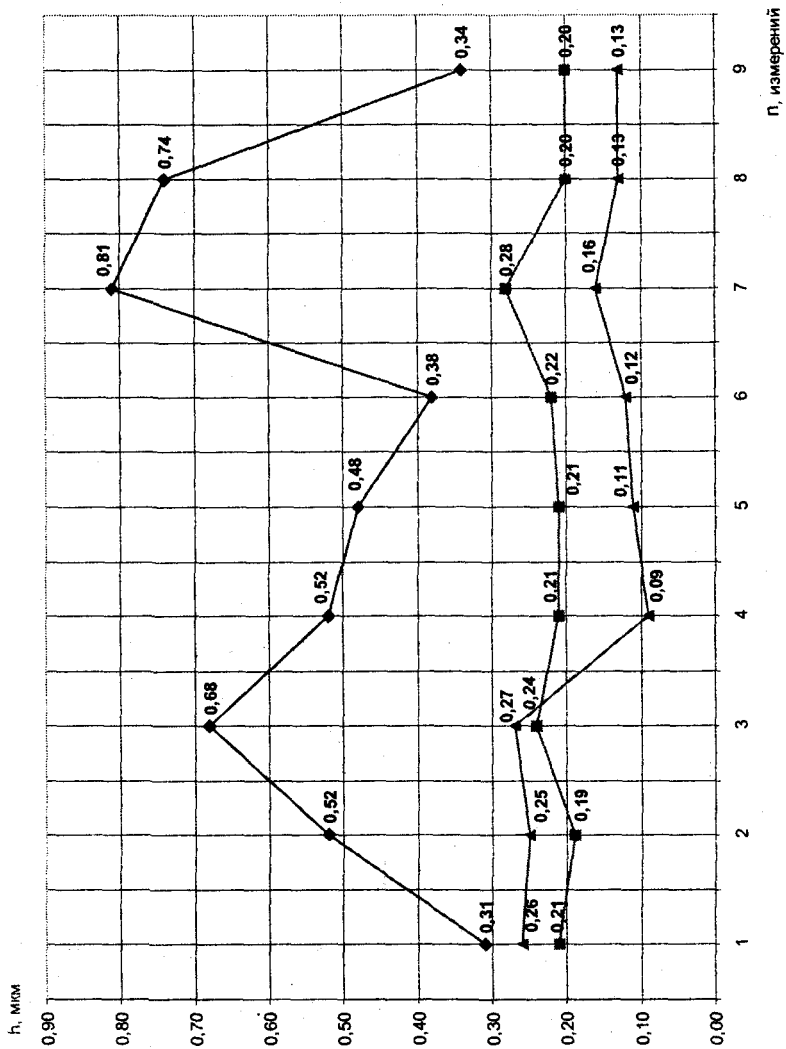


Рис. 3. График изменения R_z по числу измерений

зультатов измерений осуществлялся в алфавитно-цифровой форме. В качестве печатающего устройства использовался игольчатый принтер. Определялись параметры шероховатости:

- R_a – среднеарифметическая высота микронеровностей – арифметическое среднее значение величин профиля шероховатости R в пределах общего измерительного участка;
- R_z – усредненная высота микронеровностей – среднее значение, полученное из единичных значений высоты микронеровностей на пяти следующих друг за другом единичных измерительных участках;
- R_q – среднее квадратическое отклонение профиля в пределах базовой длины.

Установлено: наибольшая величина R_a , R_z , R_q достигается при раскатке чугуновых образцов и равна соответственно 0,55; 4; 17; 081 мкм; наименьшая величина R_a , R_z , R_q достигается при чистовом точении алюминиевых образцов (0,07; 0,51; 0,09 мкм).

ЛИТЕРАТУРА

1. Магалин А.А. Технология механической обработки.– Л., 1977.– 460 с.
2. Справочник металлиста. Т. 2. / Под ред. А.Г.Рахштадта и В.А. Брострема.– М., 1976.– 717 с.
3. Справочник технолога-машиностроителя. Т. 1. / Под ред. А.Г.Косиловой и Р.К.Мещерякова.– М., 1985.– 568 с.
4. Старков В.К. Дислокационные представления о резании металлов.– М., 1979.– 160 с.

УДК 621.941.1

Ж.А.МРОЧЕК, Г.Ф.ШАТУРОВ

ПРОФИЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ НАБИВНЫХ БУМАЖНЫХ ВАЛОВ КАЛАНДРА

Белорусская государственная политехническая академия

Минск, Беларусь

Институт технологии металлов НАН Беларуси

Могилев, Беларусь

Набивной бумажный вал каландра (НБВК) набран из тонких бумажных колец, установленных на стальной вал и сжатых вдоль оси торцевыми металлическими замками. Длина валов составляет 4...9 метров, а диаметр 0,4...0,8 метра. Геометрическая форма рабочей поверхности НБВК должна быть бочкообразной с перепадом диаметров на каждые 1000 мм длины не более 0,01 мм. Вес НБВК может достигать 170 кН. Это обстоятельство является причиной статического прогиба вала (достигает 4 мм), который сохраняется и в процессе профилирования его рабочей поверхности на металлорежущем станке. В процессе обработки вала приложенный крутящий

момент смещает центр масс вала от исходного вертикального положения в направлении угловой скорости ω_0 шпинделя станка на угол $\varphi_{0ц}$ до установления динамического равновесия (рис. 1). Поворот вала на угол $\varphi_{0ц}$ вызовет закручивание середин

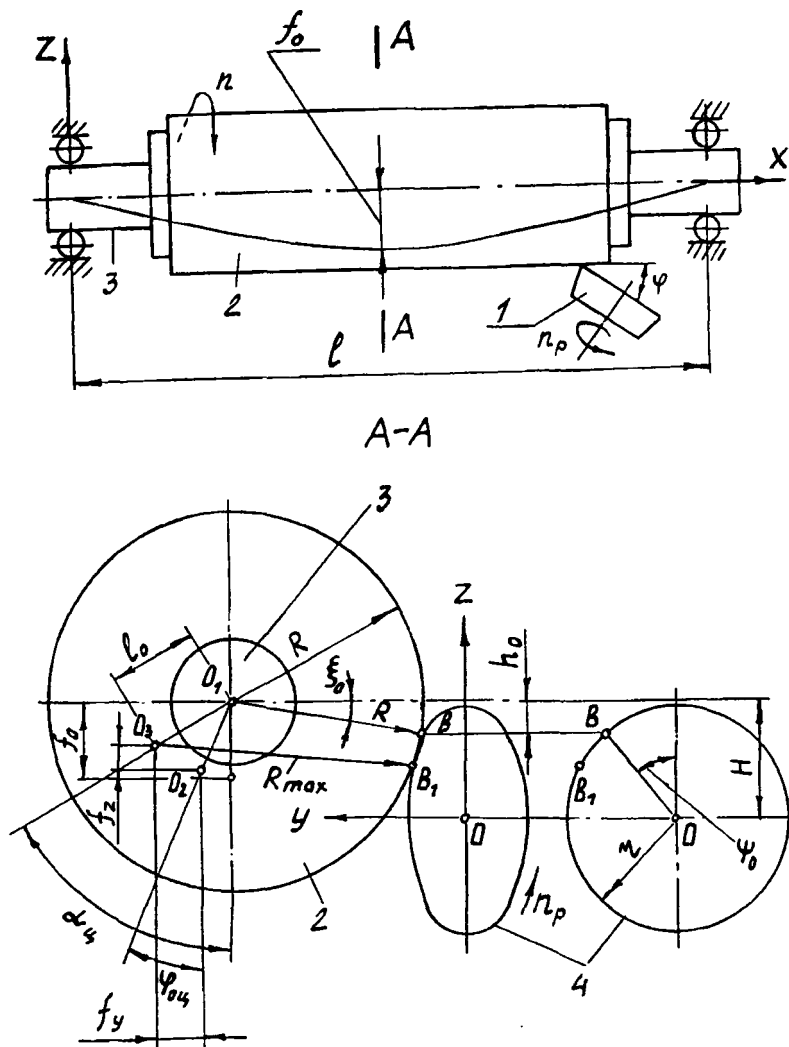


Рис. 1. Расчетная схема к определению точности обработки каландрового вала (1 – резец; 2 – бумажный цилиндр; 3 – стальной вал; 4 – режущая кромка резца)

ного сечения стального вала относительно закрепленного в патроне его конца. Угол $\varphi_{\text{ОЦ}}$ равен [1]

$$\varphi_{\text{ОЦ}} = 0,64 f_0 \omega_0 \sqrt{\frac{Q_B \ell}{2gG^* J_{\text{PC}}}}, \quad (1)$$

где

$$f_0 = \frac{5Q_B \ell^3}{384EJ_{\text{CB}}}. \quad (2)$$

Здесь f_0 – величина максимального прогиба вала;
 ω_0 – угловая скорость шпинделя станка;
 Q_B – вес вала;
 g – ускорение свободного падения;
 G^* – модуль упругости материала стального вала при сдвиге;
 J_{PC} – полярный момент инерции площади сечения стального вала;
 E – модуль упругости;
 J_{CB} – момент инерции сечения стального вала.

С учетом деформаций по осям координат f_Y и f_Z от сил резания максимальный угол $\alpha_{\text{Ц}}$ отклонения центра масс вала от исходного положения в процессе обработки равен

$$\alpha_{\text{Ц}} = \arctg \left(\frac{f_0 \sin \varphi_{\text{ОЦ}} + f_{\text{Ц}}}{f_0 \cos \varphi_{\text{ОЦ}} - f_Z} \right); \quad (3)$$

$$f_Z = P_Z \frac{\ell^3}{48EJ_{\text{CB}}}; \quad (4)$$

$$f_Y = P_Y \frac{\ell^3}{48EJ_{\text{CB}}}, \quad (5)$$

где P_Y, P_Z – радиальная и тангенциальная составляющие силы резания; f_Y, f_Z – деформация вала в горизонтальной и вертикальной плоскости соответственно от действия сил P_Y и P_Z ; $\alpha_{\text{Ц}}$ – максимальный угол отклонения центра масс вала от вертикальной плоскости.

Профилирование рабочей поверхности НБВК усложняется не только наличием статического прогиба заготовки и инерционным отклонением центра масс вала, но и неизбежным размерным износом элемента ротационного или алмазного резца, который достигает критических значений при обработке длинных валов. Для решения проблемы точности предлагается токарный чашечный резец с микрообновляемой режущей кромкой в процессе обработки, что позволяет исключить влияние размерного износа на точность получения профилируемой поверхности [2].

Режущий элемент резца имеет замкнутую круговую режущую кромку, совершающую перемещение относительно оси резца от электродвигателя со скоростью один оборот за 2...4 часа. В этом случае размерный износ режущего элемента становится постоянной величиной, максимальное значение которой находится на краю активной зоны в направлении перемещения режущего лезвия, а профилирование поверхности осуществляется острой режущей кромкой. Продолжительность одного оборота режущей кромки гарантирует высокую стойкость инструмента.

Режущая кромка в форме окружности располагается в плоскости, которая ориентирована вертикально под углом φ относительно продольной оси заготовки, а ось режущего элемента смещена относительно оси вала на величину H (рис. 1). Наименее удаленная от оси точка B режущей кромки (вершина резца) обеспечивает диаметр обработанной поверхности. Положение вершины резца определяется центральными углами: ξ_0 относительно оси центров станка и ψ_0 относительно наивысшей точки режущей кромки:

$$\xi_0 = \arcsin (h_0 / R); \quad (6)$$

$$\psi_0 = \arctg (\sin \varphi / \operatorname{tg} \xi_0), \quad (7)$$

где R, r – радиусы обработанной поверхности заготовки и режущей кромки; h_0 – смещение вершины режущей кромки резца относительно оси центров станка; φ – угол установки резца.

Изменение положения центра вала (точка O_3) относительно геометрического центра режущей кромки (точка O) при обработке влечет за собой изменение положения вершины резца и диаметра его профилируемой поверхности (рис. 1). Максимальный радиус обработанной поверхности вала увеличивается и может быть определен из зависимости [1]

$$R_{\max} = R + \frac{\ell_0^2}{R} + \ell_0 \sin (\alpha_{\text{ц}} - \xi_0), \quad (8)$$

где

$$\ell_0 = \sqrt{(f_0 \sin \varphi_{\text{ОЦ}} + f_Y)^2 + (f_0 \cos \varphi_{\text{ОЦ}} - f_Z)^2}, \quad (9)$$

ℓ_0 – максимальная величина прогиба детали.

Тогда величина изменения диаметра обработанной поверхности вала (величина бочкообразности) равна

$$\Delta D_6 = 2(R_{\max} - R) = \frac{\ell_0^2}{R} + 2\ell_0 \sin (\alpha_{\text{ц}} - \xi_0), \quad (10)$$

где ΔD_6 – максимальная величина бочкообразности вала.

При заданной максимально допустимой погрешности обработки ΔD_g (бочкообразности) КВ, используя зависимость (10), можно определить минимальное смещение вершины резца h_0^{\min} , а затем и минимальное смещение H^{\min} , обеспечивающее заданную точность обработки (заданную бочкообразность).

$$\xi_0^{\min} = \alpha_{\text{ц}} - \arcsin\left(\frac{\Delta D}{2\ell_0} - \frac{\ell_0}{2R}\right); \quad (11)$$

$$h_0^{\min} = R \sin \xi_0^{\min}; \quad (12)$$

$$H^{\min} = h_0^{\min} + r \cos \psi_0^{\max}, \quad (13)$$

где

$$\psi_0^{\max} = \arctg(\sin \varphi / \tg \xi_0^{\min}).$$

В случае, когда $\xi_0 = \alpha_{\text{ц}}$, получим минимальную величину бочкообразности поверхности вала и максимальное смещение оси резца

$$h_0^{\max} = R \sin \alpha_{\text{ц}}; \quad (15)$$

$$H^{\max} = h_0^{\max} + r \cos \psi_0^{\max}, \quad (16)$$

где

$$\psi_0^{\max} = \arctg(\sin \varphi / \tg \alpha_{\text{ц}}). \quad (17)$$

На рис. 2 приведен алгоритм определения высоты установки оси резца, обеспечивающей необходимую точность обработки.

Рассмотрим пример определения величины смещения оси резца относительно оси центров станка для обеспечения бочкообразности вала $\Delta D_g = 0,02...0,03$ мм. Исходные данные: длина КВ $\ell = 8,6$ м; радиус наружной поверхности вала $R = 0,3$ м; диаметр внутреннего стального вала $d_{\text{св}} = 0,42$ м; радиус режущей кромки резца $r = 0,03$ м; угол установки плоскости режущей кромки резца относительно обрабатываемой поверхности $\varphi = 1^\circ$; частота вращения вала $n = 160$ об/мин; составляющие силы резания: $P_y = 180$ Н, $P_z = 280$ Н.

Вес стального вала равен $Q_{\text{св}} = 93,65$ кН, вес бумажного цилиндра $Q_{\text{бу}} = 11,40$ кН, общий вес – 105 кН. Все остальные расчеты сведены в табл. 1.

Следовательно, ось резца необходимо установить ниже оси заготовки на $H = 23,76...24,96$ мм, при этом погрешность обработки $\Delta D = 0,024...0,03$ мм. Профиль обработанной поверхности вдоль оси детали будет бочкообразным.

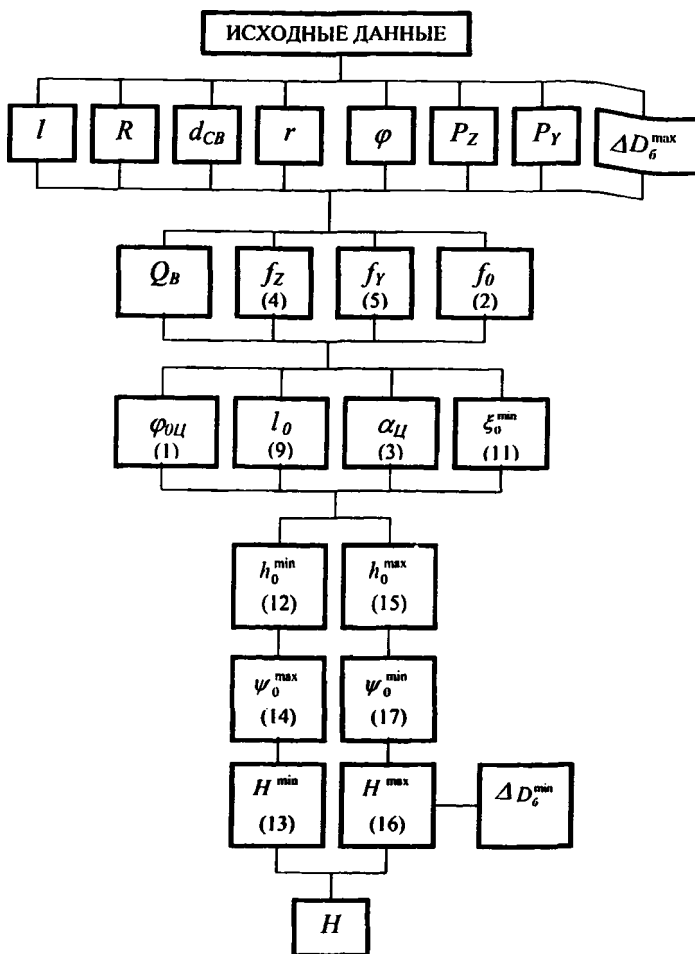


Рис. 2. Алгоритм поиска высоты установки (H) оси режущей кромки чашечного резца при тангенциальном резании для достижения необходимой точности обработки каландрового вала

Предложенная модель и методика расчета погрешности формы продольного профиля каландрового вала, имеющего статический прогиб, позволяют на стадии проектирования технологического процесса определить установочные параметры

инструмента, обеспечивающие точность профилируемой поверхности, и спроектировать необходимую технологическую оснастку.

Таблица 1

Результаты расчета смещения H установки оси резца относительно оси центров станка для обеспечения продольной погрешности (бочкообразности) вала $\Delta D_{\delta} = 0,02...0,03$ мм.

| Исходные данные | | | | | | | |
|--------------------|-----------------------|-------------------------|---------|--------------------------------|--------------|--------------------------------|-----------|
| l , мм | R , мм | $d_{св}$, м | r , м | φ , град | n , об/мин | P_z , Н | P_y , Н |
| 8,6 | 0,3 | 0,42 | 0,03 | 1 | 160 | 280 | 180 |
| Результаты расчета | | | | | | | |
| Q_B , т | 10,5 | φ_{oc} , град | 0,75 | h_0^{min} , мм | 4,4 | h_0^{max} , мм | 4,765 |
| f_z , мм | $1,19 \cdot 10^{-2}$ | α_c , град | 0,91 | ψ_0^{max} , град | 49,8 | ψ_0^{min} , град | 47,69 |
| f_y , мм | $0,766 \cdot 10^{-2}$ | l_0 , мм | 2,68 | ΔD_{δ}^{max} , мм | 0,03 | ΔD_{δ}^{min} , мм | 0,024 |
| f_0 , мм | 2,8 | ξ_{s0}^{min} , град | 0,845 | H^{min} , мм | 23,76 | H^{max} , мм | 24,96 |

ЛИТЕРАТУРА

1. Шатуров Г.Ф., Разнорвич Г.А. Положение центра масс вала со статическим прогибом при комбинированной обработке и его влияние на точность и скорость обработки / Ред. журн. «Известия АН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук», – Минск, 1996. – 14 с. – Деп. в ВИНТИ 22.07.96, № 2477. 2. А. с. № 1718454 СССР, МКИ В 23 В 27/12. Приводной ротационный резец / Г.Ф. Шатуров, А.С. Бухтилов (СССР). – № 4213622; Заявлено 27.01.87.

УДК 621.9.014

С.А. Соловей, В.Г. Куптель

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ НА ПРОЦЕСС ДРОБЛЕНИЯ СТРУЖКИ ПРИ ПРОДОЛЬНОМ НАРУЖНОМ ТОЧЕНИИ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Сведения о параметрах стружки в макрообъеме немногочисленны. Найдена зависимость радиуса стружки от радиуса канавки на передней поверхности инструмента, толщины стружки, модуля упругости и предела текучести обрабатываемого мате-

риала [1]. В результате производственных наблюдений найдены области применения стружколомающих канавок и уступов на передней поверхности, установлены зависимости радиуса стружки от радиуса канавки и подачи [2]. При износе инструмента стружкоформирующие элементы исчезают и появляются отказы оборудования, вызванные стружкой [3].

Экспериментальные исследования влияния режимов резания на дробление стружки проводились при продольном точении заготовок диаметром 60–110 мм и длиной 600–800 мм из сталей марок 30, 40Х, 30ХГСА. Обработка велась на токарно-винторезном станке модели 16К20. Способ закрепления заготовки: левый конец зажат в патроне, правый поджат центром задней бабки. В качестве инструмента использовался сборный проходной токарный резец с неперетачиваемыми трехгранными пластинами твердого сплава с лунками для дробления стружки. Материал пластин – Т15К6. Установка пластин в корпус резца обеспечивала следующие геометрические параметры: задний угол $\alpha = 5^\circ$; передний угол $\gamma = -5^\circ$; главный угол в плане $\varphi = 90^\circ$; радиус закругления режущей кромки $r = 0,8$ мм. Обработка велась без применения СОТС на режимах резания: глубина резания $t = 0,5\text{--}4$ мм, подача $S = 0,15\text{--}0,8$ мм/об, скорость резания $V = 40\text{--}220$ м/мин.

Параметры стружки фиксировали 10–20 раз в течение периода стойкости. Отмечали форму и направление движения стружки. По 30 образцам определяли параметры стружки: минимальный и максимальный радиусы кривизны, угол наклона витка и число витков в отрезке стружки.

За период стойкости инструмента появлялась стружка различных типов. Доминирующими в отдельные моменты были путаная, винтовая и дробленая стружки (дробленая – стружка, имеющая в плане менее одной окружности; винтовая – стружка, имеющая несколько витков и угол наклона винтовой линии не равный нулю; путаная – стружка с переменными радиусом кривизны и углом наклона витков). В течение периода стойкости форма стружки меняется от путаной и винтовой и далее к дробленой (рис. 1). Нередки случаи возникновения в течение нескольких секунд трех различных типов стружки. Направ-

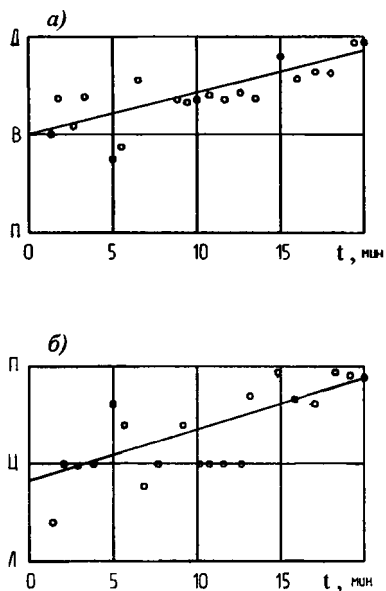


Рис. 1 Изменение формы стружки (а) и направления ее движения (б) за период стойкости (обрабатываемый материал – 30 ХГСА; $S=0,25$ мм/об; $V=120$ м/мин; $t=1$ мм)

ление движения стружки рассматривалось в вертикальной плоскости. Фиксировали правое, левое, центровое движение стружки.

Форма стружки и направление ее движения взаимосвязаны. Телесный угол сектора разлета стружки весьма велик; преимущественное направление полета стружки испытывает статистические колебания достаточно высоких частот и амплитуды. В начальный период резания преимущественное направление движения стружки может измениться почти на противоположное. С увеличением износа инструмента направление полета стружки существенно меняется.

Для изучения кинетики параметра стружки в течение прохода собирали стружку через каждые 5 с резания. В начале прохода в результате переходных процессов, связанных, видимо, с нагревом инструмента, в течение 5–15 с появляется стружка с отличным от стабильного радиусом кривизны. В различных условиях он был значительно меньше или больше стабильного. Число витков отрезка стружки, а также "мгновенное" рассеяние параметра стружки не менялись.

Одной из основных характеристик процесса формирования стружек различных типов является отношение ширины срезаемого слоя b к толщине a , при обработке резцами с главным углом в плане $\varphi = 90^\circ$ – глубины резания t к подаче S . Практический интерес представляет анализ влияния отношения t/S на процессы формирования стружки в виде винтовой спирали и ее дробления. Под дроблением понимается такой случай образования винтовой спирали, когда стружка ломается на отрезки, длина которых равна шагу спирали или меньше его.

Сущность влияния отношения t/S на процесс завивания и дробления стружки проявляется в следующем. При уменьшении отношения t/S меняются и параметры поперечного сечения стружки b_1 и a_1 . Отношение b_1/a_1 при этом уменьшается не прямо пропорционально уменьшению отношения t/S , хотя для качественной оценки влияния отношения t/S на рассматриваемый процесс этим можно пренебречь.

Уменьшение отношения t/S за счет увеличения S или уменьшения t приводит к изменениям усадки стружки, формы ее поперечного сечения, диаметра витка [4]. Результаты эксперимента свидетельствуют о том, что изменение отношения t/S за счет подачи S не приводит к изменению среднего диаметра витка стружки (рис. 2). В то же время изменение этого отношения путем варьирования шириной стружки приводит к су-

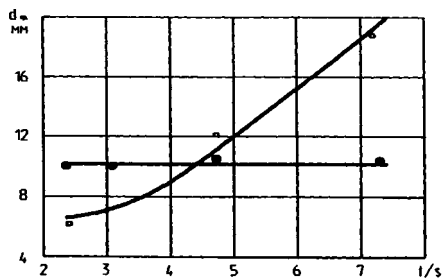


Рис. 2. Влияние отношения t/S на величину среднего диаметра спирали стружки: \bullet — $t = 2$ мм; $S = 0,8; 0,6; 0,4; 0,25$ мм/об; \circ — $S = 0,4$ мм/об; $t = 1; 2; 3$ мм ($V = 160$ м/мин)

щественному изменению среднего диаметра витка.

Влияние скорости резания на процесс дробления стружки следует оценивать, анализируя ее влияние на жесткость стружки. С изменением скорости резания изменяется усадка стружки, а, следовательно, и ее толщина a_1 . Различные точки при данном отношении t/S на рис. 3 соответствуют различным скоростям резания. Чем меньше скорость резания, тем больше усадка и толщина стружки и больше ее жесткость.

Это приводит к тому, что при работе на низких скоростях резания стружка дробится даже при больших отношениях t/S . Изменение скорости резания влияет также и на диаметр витка стружки. Хотя это влияние невелико, зависимость жесткости стружки от диаметра ее витка столь существенна, что пренебрегать этим влиянием нельзя.

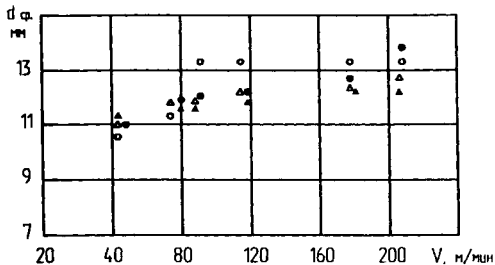


Рис. 3. Влияние скорости резания на величину среднего диаметра спирали стружки: ○ – $S = 0,15$ мм/об; ● – $S = 0,25$ мм/об; △ – $S = 0,4$ мм/об; ▲ – $S = 0,6$ мм/об. (обрабатываемый материал – сталь 30; $t = 2$ мм)

ЛИТЕРАТУРА

1. Металлообрабатывающий твердосплавный инструмент / В.С. Самойлов, Э.Ф. Эйхкюнс, В.А. Фальковский и др. – М.: Машиностроение, 1988. – 368 с.
2. Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями – М.: Машиностроение, 1993. – 336 с.
3. Баранчиков В.И. Справочник конструктора-инструментальщика. – М.: Машиностроение, 1994. – 547 с.
4. Куфарев Г.Л., Океанов К.Б., Говорухин В.А. Стружкообразование и качество обработанной поверхности при несвободном резании – Фрунзе: Мектеп, 1970. – 170 с.

УДК 621.914.6

В. В. Сяборов, В. С. Мисевич

РЕЗЕРВЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ МНОГОЗАХОДНЫХ ЧЕРВЯЧНЫХ ФРЕЗ

*Витебский государственный технологический университет
Витебск, Беларусь*

В связи с повышением качества зубофрезерных станков, в которых используются электронные кинематические связи, намечается тенденция к расширению многозаходных червячных фрез, однако оценка их эффективности отсут-

Сравнение эффективности многозаходных и однозаходных фрез на первом этапе исследований ведется в предположении, что материал и конструкция фрез одинаковы (кроме числа заходов). Рассматривается обработка с радиальной подачей.

Определим условия, при которых повышение производительности от увеличения числа заходов не приводит к снижению стойкости фрез. Для этого воспользуемся зависимостью максимальной толщины срезаемого слоя a_z от параметров обработки, которая получена нами на основании анализа схемы резания при зубофрезеровании

$$a_z = \frac{\pi \cdot m \cdot k_f}{Z_f} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \delta}{R}}, \quad (1)$$

где m – модуль обрабатываемого зубчатого колеса; k_f – число заходов червячной фрезы; Z_f – число режущих реек фрезы; δ – величина слоя, набегающего на зуб фрезы; R – радиус делительной окружности колеса. При обработке с радиальной подачей S_p можно принять $\delta = S_p$.

Осевая подача при зубофрезеровании является установочной, а не рабочей в ее обычном понимании [4]. Поэтому для установления связи между рабочей подачей в классическом понимании и толщиной срезаемого слоя a_z воспользуемся зависимостями для определения стойкости при фрезеровании торцовыми фрезами из быстрорежущей стали. Толщина среза и подача здесь пропорциональны, поэтому отношение стойкостей однозаходной и многозаходной фрез можно выразить следующей формулой:

$$K_a = \left(\frac{a_z^1}{a_z^k} \right)^y, \quad (2)$$

где y – показатель степени влияния подачи при фрезеровании на стойкость фрезы; l , k – верхние индексы, относящиеся соответственно к однозаходной и многозаходной фрезе. С повышением толщины среза увеличивается производительность, но уменьшается стойкость фрезы, что и учитывается коэффициентом (2).

При зубофрезеровании наиболее нагруженным является зуб фрезы, срезающий слой толщины меньшей максимальной, но большей длины. Однако при определении отношений стойкости может быть взята толщина слоя a_z , определяемая зависимостью (1). Поэтому подставим в формулу (2) выражение (1) и учитывая, что для однозаходной фрезы $k_f=1$, а для многозаходной – $k_f=k$, получим

$$K_a = \left(\frac{\frac{\pi \cdot m \cdot 1}{Z_f} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot S_p^1}{R}}}{\frac{\pi \cdot m \cdot k}{Z_f} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot S_p^k}{R}}} \right)^y = \left(\frac{1}{k} \cdot \sqrt{\frac{S_p^1}{S_p^k}} \right)^y. \quad (3)$$

Кроме режимов, учитываемых в (3), на стойкость влияет число передвижек, зависящих от длины зоны контакта фрезы и заготовки, которая определяется по формуле

$$l_k = \sqrt{2 \cdot R \cdot S_p}. \quad (4)$$

Определим отношение числа передвижек для многозаходной и однозаходной фрез. Для упрощения расчетов примем передвижку фрезы равной длине зоны контакта фрезы и заготовки l_k . При этом увеличение длины передвижки приведет к потере суммарной стойкости фрезы между переточками. Оптимизировав величину передвижки фрезы, можно получить прирост ее стойкости. Числа передвижек определяются из выражений

$$N_1 = \frac{L_{pv}}{l_k^1}, \quad N_k = \frac{L_{pv}}{l_k^k}, \quad (5)$$

где L_{pv} – длина режущей части червячной фрезы. Обозначим $K_{nep} = \frac{N_k}{N_1}$, тогда с учетом формул (4) и (5) получаем

$$K_{nep} = \frac{L_{pv} \sqrt{2 \cdot R \cdot S_p^1}}{L_{pv} \sqrt{2 \cdot R \cdot S_p^k}} = \sqrt{\frac{S_p^1}{S_p^k}}. \quad (6)$$

Кроме режимов и числа передвижек на стойкость червячной фрезы влияет объем припуска, снимаемого каждым заходом. Коэффициент отношения объема снимаемого припуска

$$K_{np} = \frac{V_1}{V_k} = \frac{V_{an} \cdot z}{V_{an} \frac{z}{k}} = k, \quad (7)$$

где V_{an} – объем впадины зуба колеса.

Общий коэффициент отношения стойкостей многозаходной и однозаходной червячных фрез с учетом формул (3), (6) и (7) равен

$$K_{cm} = K_a \cdot K_{nep} K_{np} = \left(\frac{1}{k} \cdot \sqrt{\frac{S_p^1}{S_p^k}} \right) \cdot \sqrt{\frac{S_p^1}{S_p^k}} \cdot k = k^{1-y} \cdot \left(\frac{S_p^1}{S_p^k} \right)^{\frac{1+y}{2}}. \quad (8)$$

На дальнейших этапах исследований отклонения от принятых условий будут учитываться с помощью соответствующих коэффициентов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Полученная формула (8) позволяет с учетом режимов, материала инструмента и числа заходов определять оптимальное соотношение параметров обработки при зубофрезеровании, дающее наивысшую стойкость.

2. Очевидно, что только комплексное назначение этих параметров может дать наибольший эффект. В частности, назначение неправильной величины передвижки ведет к потере эффективности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лейн А.М., Эйдинов М.М., Элькун Л.Я. Конструирование и применение многозаходных червячных фрез // Станки и инструмент.– 1977.– № 4.– С. 20–22.
2. Снегирев А.И. Анализ возможности повышения производительности зубофрезерования увеличением числа заходов фрезы // Вестник машиностроения.– 1992.– № 1.– С. 39–40.
3. Настасенко В.А. Дополнительный анализ возможности повышения производительности зубофрезерования увеличением числа заходов фрезы // Вестник машиностроения.– 1996.– № 1.– С. 38–40.
4. Лашнев С.И., Юликов М.И. Проектирование режущей части инструмента с применением ЭВМ.– М.: Машиностроение, 1980.– 180 с.

УДК 621.923.04:621.922.8

Д. Ф. Устинович

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ СТАЛИ УВ ПОЛИМЕРНО-АБРАЗИВНЫМИ ВОЛОКОННЫМИ КОМПОЗИТАМИ

*Физико-технический институт НАН Беларуси
Минск, Беларусь*

Современный уровень развития машиностроения ставит задачу создания новых и совершенствования существующих процессов обработки материалов, обеспечивающих требуемые эксплуатационные показатели деталей машин и механизмов.

Одним из направлений интенсификации процессов финишной обработки металлов и сплавов является использование форсированных режимов резания, что сопровождается возрастанием теплонапряженности процесса и повышением температуры в зоне резания. Следствием этого является возникновение в поверхностном слое деталей прижогов, микротрещин, растягивающих остаточных напряжений, вызывающих снижение его физико-механических характеристик.

Метод обработки полимерно-абразивными волоконными композитами (ПАВК) характеризуется «мягкими» режимами силового и температурного воздействия на обрабатываемую поверхность, позволяет расширить возможности финишных технологий и повысить качество обработки [1, 2]. В условиях постоянно возрастающих требований к качеству изделий машиностроения исследование особенностей данной операции имеет важное практическое значение.

Были проведены исследования влияния отдельных технологических факторов обработки полимерно-абразивными волоконными композитами на основные харак-

теристики шероховатости поверхности образцов из стали У8 (НВ177...182). Обработку осуществляли инструментом в виде диска размером $D \times H = 125 \times 12$ мм, в котором радиально расположенные волокна жестко закреплялись в металлической ступице. В качестве полимерного связующего композита использовали модифицированный полиамид ПА-6. Абразивным наполнителем являлся электрокорунд белый 25А зернистостью 120 и 160 мкм. Длина волокна составляла 25 мм.

Обработку осуществляли на универсально-фрезерном станке модели 6М82. Образцы размером $L \times B \times H = 100 \times 10 \times 4$ мм закреплялись на столе станка. Исследуемые поверхности образцов предварительно шлифовались на станке модели 3Д71ВФ11 и имели следующие характеристики шероховатости: $R_a = 0,71 \dots 0,76$ мкм; $R_{max} = 5,54 \dots 5,82$ мкм; $R_p = 3,63 \dots 3,75$ мкм; $t_p = 52$ (50%); $n = 39$. Характеристики шероховатости регистрировались на профилографе-профилометре модели 252, величину массового съема материала образцов определяли на весах модели ВЛА-200.

Результаты влияния продолжительности обработки на величину массового съема материала образцов приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Зависимость массового съема материала образцов
от продолжительности обработки
($n = 1600$ об/мин, $S_n = 100$ мм/мин)**

| Количество двойных ходов | Зернистость абразива $\Delta = 160$ мкм | Зернистость абразива $\Delta = 120$ мкм |
|--------------------------|--|--|
| 5 | 49 | 38 |
| 10 | 37 | 31 |
| 15 | 31 | 25 |
| 20 | 27 | 19 |
| 25 | 21 | 18 |
| 30 | 18 | 15 |

Установлено, что с увеличением зернистости абразивного наполнителя съем металла возрастает на 16...42%, что связано с увеличением силового воздействия на обрабатываемую поверхность. Максимальный съем получен при обработке инструментом зернистостью 160 мкм. Наибольшая интенсивность обработки и снижение исходной шероховатости происходит в течение первых 5...15 двойных ходов. Уменьшение величины массового съема объясняется повышением прочностных свойств обрабатываемой поверхности по мере удаления дефектного слоя, сформированного на операции шлифования.

Анализ формирования микрогеометрии поверхностного слоя показывает, что на первой стадии обработки происходит резкое уменьшение высоты исходных микронеровностей, вторая стадия характеризуется стабилизацией шероховатости поверхности на некотором уровне. Интенсивное начальное снижение микронеровностей

происходит при обработке инструментом с размерами зерен, превышающими средний шаг исходной шероховатости. Удалению подвергаются выступы неровностей, их высота существенно уменьшается, после чего абразивному воздействию подвергаются впадины неровностей. Снижение шероховатости замедляется вследствие достижения ее предельного уровня для данных условий обработки, удаления дефектного слоя, сформированного на предшествующей технологической операции обработки, и формирования упрочненного слоя под воздействием волоконного инструмента (табл. 2).

Таблица 2

Влияние технологических факторов обработки на характеристики поверхности

| Технологические факторы обработки | | | | Характеристики поверхности | | | | |
|-----------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|------------------|----------------------------|-------|-------|----------|----|
| Частота вращения инстр-та, об/мин | Продольн. подача S_p , мм/мин | Зернистость абразива Δ , мкм | Кол-во дв. ходов | Ra | Rp | Rmax | tp (50%) | n |
| 1600 | 100 | 120 | 5 | 0,269 | 0,832 | 1,145 | 60 | 38 |
| 1600 | 100 | 120 | 20 | 0,164 | 0,493 | 0,882 | 63 | 47 |
| 1000 | 100 | 160 | 5 | 0,327 | 1,177 | 1,821 | 61 | 42 |
| 1000 | 100 | 160 | 20 | 0,206 | 0,605 | 0,985 | 63 | 45 |

В отличие от шлифования кругами на жесткой связке, при котором процесс резания происходит без значительных деформаций инструмента, при обработке ПАВК имеет место упругое отжатие абразивонесущего волокна от обрабатываемой поверхности. Это способствует превалированию процесса пластической деформации поверхности над абразивным резанием. Полимерное связующее волокон участвует только в удалении окисных и адсорбционных пленок, непрерывно возникающих на поверхности. Указанные особенности обработки делают ее перспективной для снятия и приуплотнения микровыступов поверхности, сформированной предшествующей обработкой. Это обеспечит формирование микропрофиля с повышенной относительной опорной длиной и оптимальной маслосъемкостью поверхности.

На основании исследований можно отметить, что обработка стали У8 полимерно-абразивными волоконными композитами является эффективным методом финишной обработки, обеспечивающим значительное улучшение основных характеристик качества поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Устинович Д.Ф. Повышение качества поверхности деталей полимерно-абразивной обработкой // Тез. докл. II Межд. симпозиума по трибофатике. – М., 1996. – С. 70.
2. Устинович Д.Ф. Технологические возможности процесса обработки полимер-

УДК 621.941.1

Г. Ф. Шатуров

ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОВМЕЩЕННОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ С ОПЕРЕЖАЮЩИМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

*Институт технологии металлов НАН Беларуси
Могилев, Беларусь*

В процессе резания отделяемый от основы слой металла (стружка) под-вергается интенсивному пластическому деформированию. Моменту стружкообразования предшествует процесс сжатия полоски металла со сдвигом вдоль условной плоскости сдвига по линии наибольших касательных напряжений и процесс ее отрыва от заготовки за счет растягивающих напряжений.

Известны различные способы обработки резанием металлов, позволяющие снизить термическую и силовую напряженность процесса резания путем изменения физико-механических свойств материала срезаемого слоя. Одним из таких методов является способ обработки резанием с опережающим пластическим деформированием (ОПД) (рис. 1) [1]. Пластическое деформирование по указанному способу осуществляется обкатыванием роликом поверхности резания. В работах [1, 2] подтверждена высокая эффективность применения опережающего пластического деформирования при обработке резанием труднообрабатываемых материалов. За счет предварительной пластической деформации металла, уменьшается запас его пластичности, что повышает его хрупкость и улучшает обрабатываемость. При резании с ОПД часть общей работы A_p , совершаемой резцом в процессе резания, принимает на себя ролик ($A_{p,r}$ – работа ролика), который предварительно сжимает и пластически деформи-

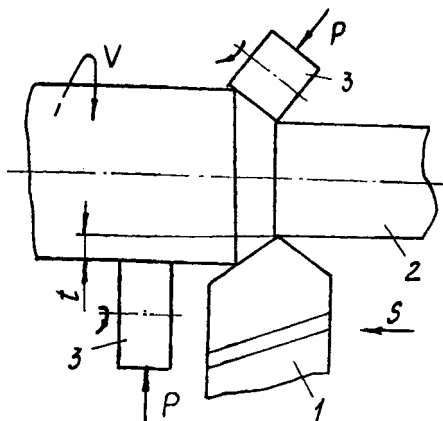


Рис. 1. Схема обработки резанием с опережающим пластическим деформированием: 1 – резец; 2 – обрабатываемая заготовка; 3 – ролик

рует часть снимаемого припуска, уменьшая тем самым работу A_{2p} по пластической деформации срезаемого слоя металла, приходящуюся на резец, $A_{2p} = A_p - A_{1p}$.

При ОПД необработанной поверхности или поверхности резания последние упрочняются и в них создаются остаточные сжимающие напряжения: осевые $\sigma_{ос}$, тангенциальные (окружные) σ_{τ} и растягивающие радиальные σ_r . Образованные сжимающие и растягивающие напряжения взаимодействуют с напряжениями, создаваемыми резцом, что при определенных условиях способствует переходу металла (при меньших усилиях) из напряженного состояния в пластическое.

Проведем анализ влияния остаточных тангенциальных сжимающих напряжений, созданных после ОПД роликом (рис. 1), например, поверхности резания, по отношению к действующей в том же направлении тангенциальной силе резания P_z . Для первоначального анализа возьмем эпюру распределения тангенциальных остаточных напряжений с расположением нулевого их значения на поверхности резания. Максимальное значение этих напряжений будет на некоторой глубине t_1 от поверхности резания или толщине слоя a_1 (рис. 2, а), что правомерно [3]. Примем закон изменения остаточных тангенциальных сжимающих напряжений σ_{τ} параболическим. Тогда

$$\sigma_{\tau} = \frac{\sigma_{\tau 0}}{t_1^2} t^2 - 2 \frac{\sigma_{\tau 0}}{t_1} t, \quad (1)$$

где t_1 – глубина расположения остаточных максимальных тангенциальных напряжений сжатия от поверхности; t – текущая глубина рассматриваемого слоя металла от поверхности; $\sigma_{\tau 0}$ – максимальная величина тангенциальных напряжений.

Поскольку в радиальном сечении детали действуют остаточные сжимающие напряжения, то, очевидно, при резании необходимо создать меньшие рабочие сжимающие напряжения, чтобы достигнуть напряжения равного местному пределу текучести σ'_{τ} , соответствующего наступлению пластического состояния металла.

Эффективность процесса обработки резанием с ОПД оценивается безразмерным параметром [1]

$$\eta_{PZ} = \frac{P_z - P_{z0}}{P_z}, \quad (2)$$

где P_z, P_{z0} – тангенциальные составляющие силы резания при обработке резанием без ОПД и с ОПД соответственно.

Преобразуем параметр η_{PZ} с учетом тангенциального напряжения σ_{τ} . Из рис. 2 имеем

$$\eta_{PZ} = \frac{F_{1\sigma}}{F_{\sigma}} = \frac{t_X}{t_1} - \frac{t_X^2}{3t_1^2}, \quad (3)$$

где

$$F_{1\sigma} = - \int_0^{t_x} \sigma_t dt = \frac{\sigma_{\tau 0}}{t_1} t_x^2 - \frac{\sigma_{\tau 0}}{3t_1^2} t_x^3 ;$$

$$F_{\sigma} = \sigma_{\tau 0} t_x .$$

Величина η_{PZ} изменяется по параболическому закону с максимальным значением равным 0,75 при $t_x^2 = 1,5t_1$. При $t_x = t_1$ и $t_x = t_0 = 2t_1$ имеем $\eta_{PZ} = 0,67$. В действительности максимальная величина η_{PZ} значительно меньше 0,75, так как площадь F_{σ} должна быть увеличена до значения $F_{\sigma} = t_x \cdot \sigma_x'$, соответствующего напряжению пластического состояния металла. Истинная зависимость η_{PZ} (рис. 2, а) будет расположена ниже расчетной и показана пунктиром. При увеличении глубины резания t_x или толщины срезаемого слоя металла a_x , при обработке резанием с ОПД поверхности резания $t_x > t_0$ ($a_x > a_0$), параметр η_{PZ} будет уменьшаться за счет значительного увеличения значения F_{σ} .

На основании проведенных теоретических исследований можно сделать заключение, что при обработке резанием с ОПД поверхности резания может иметь место только один максимум параметра h_{PZ} , расположенный на расстоянии от наружной поверхности, превышающем примерно в 1,5 раза глубину залегания максимальных тангенциальных остаточных сжимающих напряжений. Поэтому максимальная эффективность процесса резания с ОПД для указанных выше условий обработки достигается при ОПД необработанной поверхности вала при глубине резания $t_x = 1,5 t_1$, и при ОПД по-

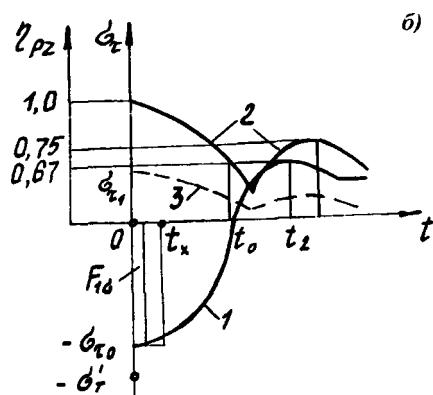
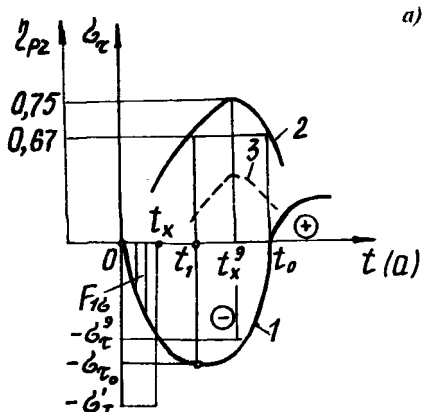


Рис. 2. Варианты эпюр распределения тангенциальных остаточных напряжений (1) и изменение параметра η_{PZ} эффективности процесса резания с ОПД (2) ($a - \sigma_{\tau 0} = 0$, $b - \sigma_{\tau 0} = \sigma_{\tau 0}'$; $\sigma_{\tau 0}$ — тангенциальное сжимающее напряжение на поверхности; $\sigma_{\tau 0}' t_1$ — максимальное тангенциальное сжимающее напряжение и глубина его залегания; 3 — фактическое значение параметра η_{PZ}).

верхности резания при толщине снимаемого припуска $a_x = 1,5a_1$. В этом случае t_1 и a_1 – глубина расположения максимальных остаточных тангенциальных напряжений сжатия от наружной поверхности.

Рассмотрим случай обработки резцом с расположением после ОПД максимальных остаточных тангенциальных напряжений на обработанной поверхности (рис. 2, б).

В этом случае имеем:

$$\sigma_r = \frac{\sigma_{r0}}{t_0^2} t_x^2 - \sigma_{r0}; \quad (4)$$

$$F_{r0} = \sigma_{r0} t_x - \frac{\sigma_{r0} t_x^3}{3t_0^2};$$

$$\eta_{PZ} = \frac{F_{r0}}{F_{r0}} = 1 - \frac{t_x^2}{3t_0^2}, \quad 0 \leq t_x \leq t_0. \quad (5)$$

Тогда параметр η_{PZ} с учетом сжимающих тангенциальных напряжений для разных глубин t_x будет равным: $t_x = 0$, $\eta_{PZ} = 1,0$; $t_x = t_0$, $\eta_{PZ} = 2/3$, т. е. с увеличением глубины резания, параметр η_{PZ} уменьшается по параболической зависимости. Однако, с увеличением $t_x > t_0$ в радиальном сечении детали действуют положительные тангенциальные напряжения. Поскольку процесс резания – это процесс отрыва слоя металла с поверхности заготовки, который происходит под действием растягивающих напряжений, то наличие последних уменьшает необходимую величину рабочих растягивающих напряжений, создаваемых резцом, достаточных для пластической деформации этого слоя.

Параметр η_{PZ} (тангенциальные растягивающие напряжения) при $t_x > t_0$ увеличивается по параболическому закону и равен

$$\eta_{PZ1} = \frac{t_x - t_0}{t_2 - t_0} - \frac{(t_x - t_0)^2}{3(t_2 - t_0)^2}. \quad (6)$$

Он принимает максимальное значение $\eta_{PZ}^{\max} = 0,75$ при $t_x = 1,5(t_2 - t_0)$, а при $t_x = t_2$ равен $\eta_{PZ} = 0,67$.

Таким образом, с увеличением $t_x > t_0$ имеем второй максимум по параметру η_{PZ} . Поскольку величина σ_r значительно меньше σ_{r0} , то и $\eta_{PZ1}^{\max} < \eta_{PZ}^{\max}$. На рис. 2, б предполагаемое изменение параметра η_{PZ} для обоих участков показано пунктиром.

Исследования по влиянию глубины резания на параметр η_{PZ} при обработке резанием с ОПД необработанной поверхности подтвердит правильность теоретических предпосылок о возможности наличия двух оптимальных интервалов глубины резания при расположении максимальных тангенциальных сжимающих напряжений после

ОПД на обрабатываемой поверхности и выявили снижение тангенциальной силы резания на 15...26% (рис. 3).

Таким образом, предложенный механизм взаимодействия остаточных напряжений после ОПД поверхности с напряжениями, возникающими в процессе резания вдоль условной плоскости сдвига при образовании стружки, следует рассматривать как приближенную схему их взаимодействия, подлежащую дальнейшему изучению с учетом специфических условий обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Подураев В.Н., Ярославцев В.М., Ярославцева Н.А. Эффективность обработки резанием с опережающим пластическим деформированием // Вестник машиностроения. – 1972. – № 12. – С. 58–61.
2. Подураев В.Н., Шатуров Г.Ф., Войтов В.В. К вопросу обработки резанием с опережающим пластическим деформированием поверхности / Ред. журн. «Известия АН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук». – Мн., 1990. – 18 с. Деп. в ВИНТИ 24.05.90. № 2849.
3. Папшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 1978. – 152 с.

УДК 621.941.1

Г.Ф.ШАТУРОВ

МЕХАНИКА ПРОЦЕССА РОТАЦИОННОГО РЕЗАНИЯ

*Институт технологии металлов НАН Беларуси
Могилев, Беларусь*

Наличие вращательного движения режущей кромки в процессе обработки ротационным резцом ведет к изменению динамических показателей процесса, т. е. к изменению направления и величин сил резания.

Для установления всех сил, действующих на рабочих поверхностях ротационного резца, рассмотрим прямую схему резания при первой схеме установки резца (рис. 1).

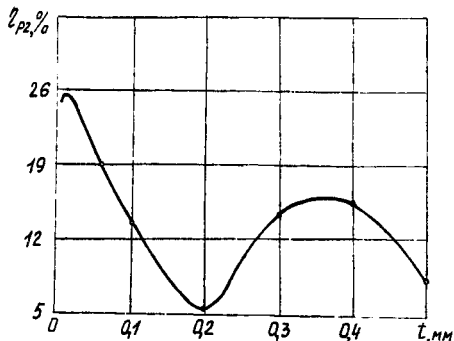


Рис. 3. Зависимость параметра η_{PZ} от глубины резания t при обработке заготовки вала с ОПД необработанной поверхности (материал заготовки – сталь 12Х18Н9Т; $S = 0,43$ мм/об; $V = 35$ м/мин; $P = 700$ Н)

При ротационном резании в режиме установившегося процесса имеет место наличие на рабочих поверхностях реза касательных сил трения, противоположно направленных по отношению к скорости вращения, точкой раздела которых служит точка нормального скольжения – точка P , что является условием равномерности его вращения.

Поскольку передняя и задняя поверхности реза имеют контакт с заготовкой и стружкой в пределах некоторой площадки, то можно говорить о двух областях этой площадки с разнонаправленными силами трения разделенных между собой полюсной линией $P-P$.

Из схемы сил рис. 1 имеем:

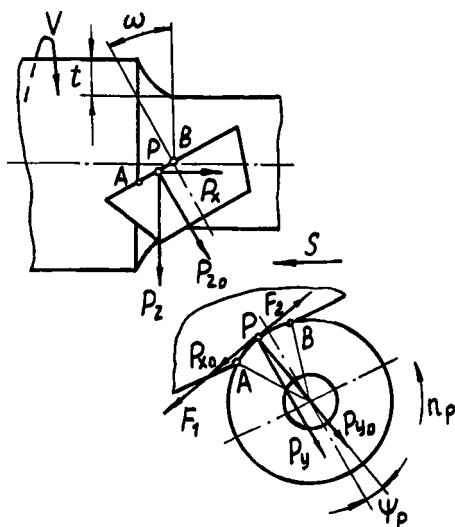


Рис. 1. Схема действия сил для самовращающегося ротационного реза (первая схема установки, прямая схема резания).

$$P_{x0} = (P_z \sin \omega - P_x \cos \omega) \cos \psi_p + P_y \sin \psi_p ;$$

$$P_{y0} = P_y \cos \psi_p - (P_z \sin \omega - P_x \cos \omega) \sin \psi_p ; \quad (1)$$

$$P_{z0} = P_x \sin \omega + P_z \cos \omega ,$$

где $\psi_p = \frac{1}{2} \psi_K$; P_{x0} , P_{y0} , P_{z0} – соответствующие силы резания направленные соответственно касательно к режущей кромке, радиально к центру режущего элемента и вдоль оси реза; ψ_K – угол контакта режущей кромки реза с заготовкой; P – точка приложения силы резания.

Из кинестатического уравнения вращения реза имеем

$$P_{x0} = F_1 - F_2 = F_{TPO} , \quad (2)$$

где F_1 и F_2 – силы трения на поверхности режущего элемента ротационного реза; F_{TPO} – сила трения в опорах оси реза, приведенная к режущей кромке.

Предположим, что нам известны силы P_{x0} , P_{y0} , и P_{z0} . Тогда составляющие силы резания в системе координат детали равны:

$$P_x = P_{y0} \cos \omega \sin \psi_p + P_{z0} \sin \omega - (F_1 - F_2) \cos \omega \cos \psi_p;$$

$$P_y = P_{y0} \cos \psi_p + (F_1 - F_2) \sin \psi_p; \quad (3)$$

$$P_z = P_{z0} \cos \omega - P_{y0} \sin \psi_p \sin \omega + (F_1 - F_2) \cos \psi_p \sin \omega.$$

Исходя из анализа зависимостей (3), приходим к выводу, что измерение составляющих сил резания динамометром не дает нам возможность определить силы, действующие на поверхностях режущего элемента реза. Так как при динамометрическом измерении мы находим разницу сил $(F_1 - F_2)$, а не сами силы F_1 и F_2 . Разница сил F_1 и F_2 это не что иное, как приведенная к режущей кромке сила трения в опорах ротационного реза $F_{тp.o}$. Значение силы трения в опорах ротационного реза не должно учитываться при нахождении средних коэффициентов трения, как это делалось многими исследователями. Суммарное значение сил $(F_1 + F_2)$ можно определить, если вращать резец принудительно со скоростью $V_p = V \sin \lambda_A$ или $V_p = V \sin \lambda_B$, где λ_A и λ_B – углы наклона режущей кромки в крайних точках ее контакта с заготовкой, и измерить составляющие силы резания в этот момент. Тогда будет соблюдаться условие $P_{x0} = F_1 + F_2$. Однако силы F_1 и F_2 можно определить косвенным путем, приравняв их к силе P_{x0H} невращающегося реза и решив систему уравнений

$$\begin{cases} P_{x0H} = F_1 + F_2, \\ P_{x0} = F_1 - F_2, \end{cases} \quad (4)$$

где P_{x0H} – касательная сила, направленная вдоль режущей кромки для невращающегося режущего элемента реза.

Система уравнений (4) справедлива также при определении F_1 и F_2 как для передней, так и для задней рабочих поверхностей реза.

В результате экспериментальных исследований получены следующие зависимости для определения составляющих сил резания, пределы изменения факторов которых равны: $\omega = 10 \dots 44^\circ$; подача $S = (0,2 \dots 0,6)$ мм/об; глубина резания $t = (0,2 \dots 0,6)$ мм; скорость резания $V = (1,3 \dots 4,3)$ м/с.

При $V_p = 0$ имеем

$$P_x = 2,2\omega - 162,5S^2 + 342,5S - 394,2t^2 + 560,6t - 210,32;$$

$$P_y = -0,248\omega^2 + 16,7\omega - 1000S^2 + 1375S + 855,6t + 12,7V - 571; \quad (5)$$

$$P_z = -0,33\omega^2 + 17\omega - 1650S^2 + 2475S - 1785,7t^2 + 2828,6t - 6,63V - 1167,7.$$

При $V_p \neq 0$

$$P_x = -0,0785\omega^2 + 9,55\omega + 37,5S^2 + 272,5S + 112,94t^2 + 351,3t - 11,82V - 224,2;$$

$$P_y = -0,161\omega^2 + 12,31\omega - 1900S^2 + 2090S + 676,5t - 13V - 578,3; \quad (6)$$

$$P_z = -0,3\omega^2 + 15,35\omega - 1700S^2 + 2690S - 1956t^2 + 2972t - 6,63V^2 + 23,13V - 1350.$$

При использовании зависимостей (5) и (6) величины сил P_x, P_y, P_z получим в ньютонах.

Для определения нормальных и касательных сил на рабочих поверхностях режущего элемента резца была разработана методика их определения со стоп-подачей [1], по которой составляющие силы на задней поверхности определялись (рис. 2) через один оборот заготовки после выключения подачи, а затем рассчитывались по зависимостям (1; 4) и формулам:

для передней поверхности:

$$N_{\pi} = P_{z0\pi} \cos \gamma_3' - P_{y0\pi} \sin \gamma_3';$$

$$F_{\pi\pi} = P_{z0\pi} \sin \gamma_3' + P_{y0\pi} \cos \gamma_3';$$

$$F_{\pi\pi} = P_{x0\pi}; \quad (7)$$

$$F_{\pi} = \sqrt{F_{\pi\pi}^2 + F_{\pi\pi}^2};$$

$$f_{\pi} = F_{\pi} / N_{\pi};$$

для задней поверхности:

$$N_3 = P_{z03} \cos \alpha_3 - P_{y03} \sin \alpha_3;$$

$$F_{N3} = P_{z03} \sin \alpha_3 + P_{y03} \cos \alpha_3;$$

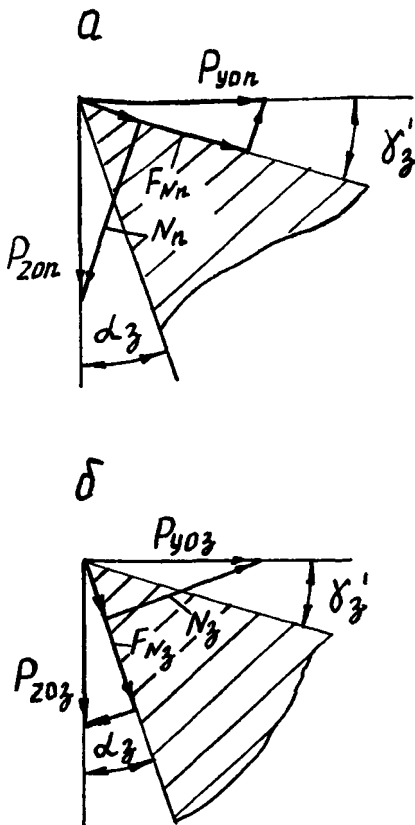


Рис. 2. Схема действия сил на передней (а) и задней (б) поверхностях самовращающегося ротационного резца

$$F_{\text{т3}} = P_{\text{хт3}}; \quad (8)$$

$$F_3 = \sqrt{F_{N3}^2 + F_{\text{т3}}^2};$$

$$f_3 = F_3 / N_3.$$

На основании результатов исследований установлено, что коэффициент трения на передней поверхности для резца с самовращающимся режущим элементом на 5...15% меньше, чем для невращающегося. Коэффициент трения на задней поверхности для резца с невращающимся режущим элементом при $\omega > 28^\circ$ меньше, чем для самовращающегося (рис. 3).

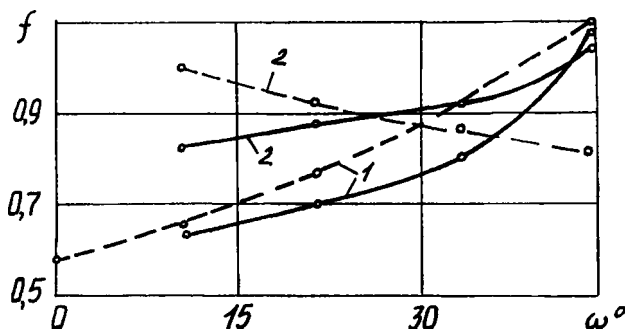


Рис. 3. Зависимости влияния угла установки самовращающегося ротационного резца на средний коэффициент трения на передней (1) и задней (2) его поверхностях (материал заготовки — сталь 45; $S = 0,4$ мм/об; $t = 0,4$ мм; $V = 3,1$ м/с; — о — — ротационный; - - о - - невращающийся режущие элементы резца).

Таким образом, оптимизацию процесса резания для ротационного резца нужно производить с учетом суммы сил F_1 и F_2 , которая превосходит измеряемую динамометром силу $P_{\text{хт}}$, равную приведенной к режущей кромке силе трения в опорах резца $F_{\text{тРО}}$ в 2...3 раза (табл. 1).

Отсутствие в реальном процессе силы F_2 приводит к вибрациям, нестабильности процесса резания из-за нарушения кинестатического равновесия вращения режущего элемента резца. Это может иметь место, когда сила трения в опорах резца превосходит касательную силу F_1 и полюс P находится вне зоны AB контакта режущей кромки с заготовкой (см. рис. 1). Измерение при динамометрировании силы $P_{\text{хт}} = F_{\text{тРО}}$, а не суммы F_1 и F_2 и объясняет большие расхождения в величинах сил P_x , P_y и P_z при ротационном резании, опубликованные в различных источниках многими исследователями.

Таблица 1

Значения касательных к режущей кромке сил трения, действующих на передней рабочей поверхности самовращающегося ротационного резца ($S = 0,4$ мм/об; $t = 0,4$ мм; $V = 3,1$ м/с; материал заготовки – сталь 45)

| ω° | 11 | 22 | 33 | 44 |
|---------------------------|------|------|-------|-------|
| F_1, H | 17,8 | 64,2 | 120,8 | 122,7 |
| F_2, H | 9,5 | 31,3 | 26,5 | 35,6 |
| F_n, H | 27,3 | 95,5 | 147,3 | 158,3 |
| $P_{\text{ХО}}, \text{H}$ | 8,3 | 32,9 | 94,3 | 87,2 |

Следовательно, как для передней, так и для задней поверхностей резца с точки зрения уменьшения касательных сил трения необходимо стремиться к минимальным углам установки ω ($\omega_{\text{opt}} \leq 28^\circ$).

ЛИТЕРАТУРА

1. А.с. 1207632 СССР, МКИ В 23 В 1/00. Способ определения сил на задней поверхности резца и упругой деформации материала при его обработке / Г.Ф Шатуров, В.Н. Подураев (СССР).– № 37786655-08; Заявлено 09.08.84; Опубл. 30.01.86; Бюл. № 4.

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.38.029.6.01

А.Л. Адамович, Ю.Г. Грозберг, М.Е. Капралов

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЧ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Полоцкий государственный университет

Завод Измеритель

Новополоцк, Беларусь

Микроволновая обработка самых разнообразных диэлектрических материалов находит в последнее время широкое применение в различных отраслях промышленности ввиду значительно меньшей энергоемкости и более высокой производительности по сравнению с традиционными технологическими процессами. Необходимость повышения продуктивности и качественных показателей, снижения энергозатрат процессов обработки и переработки материалов, экологическая чистота процессов побудила к проектированию и созданию как лабораторных, так и промышленных микроволновых комплексов (МВК) на основе электромагнитных СВЧ полей (от 300 МГц до 300 ГГц), способных воздействовать на физические и биологические характеристики различных материалов или сред. Практическая ценность этого воздействия проявляется также в особом свойстве волн не только проникать в объем материала, но и избирательно воздействовать на среды, имеющие различный состав. Спектр этих воздействий в промышленности, сельском хозяйстве, биологии и медицине достаточно широк: сушка, нагрев, вулканизация и девулканизация резин, полимеризация, улучшение физико-механических и химических свойств конструкционных материалов, пастеризация и консервация, обеззараживание биологических сред, стимуляция роста растений и др. Известен опыт использования микроволновых технологий (МВТ) как в зарубежных странах, так и в СНГ. Это сушка бумаги, картона, печатающих составов, клеев и обложек книг в полиграфической промышленности (снижение энергозатрат до 30%), кож, текстильных волокон и шерсти (до 50% снижены энергозатраты и повышена производительность в 25–200 раз с одновременным улучшением качества продукции), сушка дерева, фанеры в деревообрабатывающей промышленности (качество древесины повышается из-за появления внутренних связей под действием СВЧ излучения с одновременной противогрибковой обработкой и уничтожением микроорганизмов), сушка керамики и бетона.

Другие применения МВТ не так развиты, как вышеназванные, и находятся на различных стадиях развития. Это изготовление композитных материалов, очистка нефти от воды, ремонт асфальта, снятие корки льда, процессы отвердевания и полимеризации, изготовление эмульсий, разрушение камней, бетона и руды, стимуляция роста

семян, уничтожение сорняков, сушка зерна, дезинфекция кормов, пастеризация кормов и лекарственных форм [1, 2, 3].

Нами проводятся исследования по использованию СВЧ энергии для сушки нитей стекловолокна, с одновременной термообработкой, при производстве стеклоткани на Полоцком ПО "Стекловолокно" (получен положительный результат); для сушки кремния фторида натрия, как сырья при получении кремния; обработки полимерных и диэлектрических материалов, резин.

Для проведения опытов создана экспериментальная установка (рис. 1), оснащенная автоматизированной микропроцессорной системой управления технологическими режимами, на которой детально изучается поведение СВЧ поля в средах и материалах различной структуры и формы, направленное изменение свойств широкого спектра материалов, возможность моделирования процессов микроволнового воздействия и создания надежных методов защиты от СВЧ излучения. Установка представляет собой экранированную камеру 1 с присоединенным к ней модулем магнетрона. СВЧ энергия, вырабатываемая магнетроном 3, который охлаждается вентилятором 4, поступает через волновод 5 на циркулятор 6, а затем излучается в объем камеры шелевым коллиматором 2. Часть энергии, не поглощенная средой, отражается в нагрузку 7.

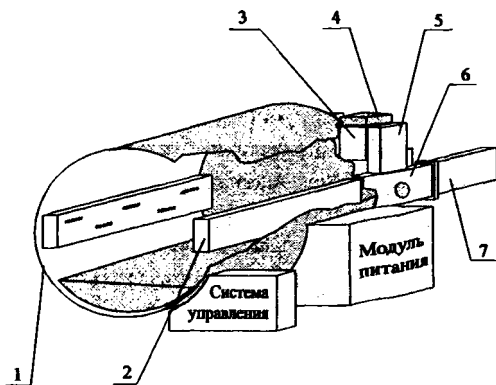


Рис. 1. Конструкция установки СВЧ обработки

Высокая проникающая способность волн СВЧ диапазона дает возможность обработки материалов различной формы в достаточно больших объемах. Опыт применения СВЧ энергии для сушки древесины показал необходимость обеспечения равномерности облучения материала. В случае облучения материала с высоким коэффициентом поглощения, падающая волна быстро затухает в поверхностных слоях и не проникает в глубину материала, что приводит к перегреву участков, прилегающих к вводу СВЧ энергии и неравномерности воздействия по объему. Это вызывает не толь-

ко перегрев, но и появление внутренних напряжений, деформаций и трещин, что не всегда приемлемо и допустимо для различных материалов. Поэтому необходимо равномерно распределять вводимую СВЧ энергию по объему, что можно сделать при помощи антенных устройств - коллиматоров. Кроме того, при введении энергии в камеру от одного магнетрона при стабильной частоте, будут иметь место интерференционные минимумы и максимумы. Их относительная величина, при применении коллиматоров, будет уменьшена. Наряду с этим имеет смысл применять несколько магнетронов СВЧ. В этом случае, меняя фазу (частоту) вводимых в камеру полей, можно смещать интерференционные минимумы и максимумы, повышая равномерность поглощения СВЧ энергии в объеме материала. Коллиматоры (рис. 2), примененные в описанной выше установке, представляют собой волноводно-щелевые решетки с продольными щелями, смещенными относительно оси симметрии волновода с волной типа Н10. Длина коллиматора определяется длиной камеры, что в свою очередь определяет количество щелей при известной рабочей частоте f , Гц [4].

Входная проводимость волновода Y , см, с продольными щелями определяется выражением

$$Y = M \cdot G_{щ},$$

где $G_{щ}$ – эквивалентная проводимость одной щели, см.

Условие согласования коллиматора

$$M \cdot G'_{щ} = 1$$

С другой стороны, проводимость одной щели равна

$$G_{щ} = G'_{щ} \cdot W_{H10}^{-1},$$

где $G'_{щ}$ – нормированная проводимость щели; W_{H10} – волновое сопротивление волновода для волны Н10, Ом;

$$W_{H10} = \frac{W_0}{\sqrt{1 - (\lambda/2 \cdot a)^2}} = \frac{120 \cdot \pi}{\sqrt{1 - (\lambda/2 \cdot a)^2}},$$

где λ – длина волны, м;

$$G'_{щ} = 2.09 \cdot \frac{a}{b} \cdot \frac{\Lambda}{\lambda} \cdot \cos^2 \frac{\pi \cdot x_l}{a} \cdot \cos^2 \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\lambda}{\Lambda},$$

где Λ – длина волны в волноводе, м.

Выражая x_l и учитывая соотношения

$$\Lambda = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{кр})^2}}, \lambda_{кр} = 2 \cdot a, \lambda = \frac{2 \cdot \pi}{k}, k = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{v_0}$$

$$v_0 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}, \quad \epsilon_0 = \frac{1}{36 \cdot \pi} \cdot 10^{-9} \text{ Ф/м}, \quad \mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}.$$

$$d = \frac{\Lambda}{2}, \quad L = \frac{\Lambda}{2}, \quad L = \frac{\lambda}{2}.$$

можно вычислить размеры элементов коллиматора.

Применяемый в установке коллиматор (при рабочей частоте f , равной 2500 МГц и размерах волновода 45 на 90 мм) имеет длину волны в волноводе Λ , равную 160,99 мм, при 11 щелях с переменнo-фазовой запиткой. Размер x_1 равен 35,45 мм при длине волны в свободном пространстве λ , равной 120 мм. При выбранной ширине щели t , равной 5 мм, с учетом коэффициента укорочения (и последующей экспериментальной отработкой), длина щели L равна 55,5 мм.

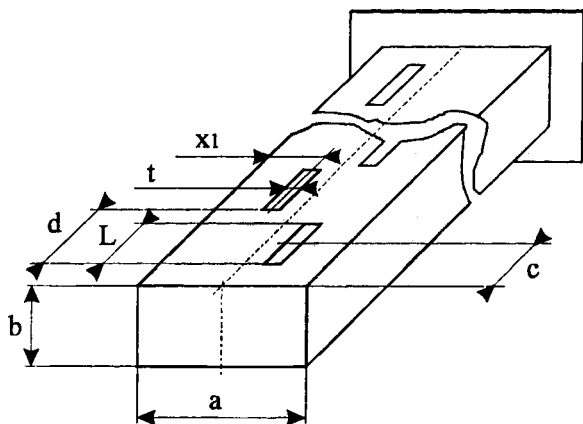


Рис. 2. Геометрические размеры СВЧ коллиматора

ЛИТЕРАТУРА

1. Морозов Г.А. Микроволновые технологии в промышленности и сельском хозяйстве: современные достижения и новые подходы. – Антенны. – 1998. – №1(40). – С.88–96.
2. Jangué's, Thuery, Microwave Industrial, Scientific and Medical Applications Edited by Edward M. Grant. Kings College. Larstin Arteda House, London, Boston, 1992.
3. Бородин И.Ф., Шарков Г.А., Гарин А.Д. Применение СВЧ-энергии в сельском хозяйстве. – М.: ВНИИТЭИагропром, 1987.
4. Никольский В.В. Антенны. – М.: Связь, 1996. – 368 с.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОМБИНИРОВАННОЙ И СОВМЕЩЕННОЙ ОБРАБОТКИ ИГЛОФРЕЗЕРОВАНИЕМ И ППД

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Для формирования и упрочнения поверхности деталей используются комбинированные способы, сочетающие резание (точение, фрезерование, шлифование) и поверхностное пластическое деформирование (ППД).

Совмещение или комбинирование предварительной обработки резанием с ППД позволяет значительно повысить производительность за счет сокращения количества операций и переходов [1, 2]. Основным недостатком этих разработок – сложность реализации в условиях поточного производства.

Этого недостатка лишены способы, сочетающие обработку шлифованием и ППД [3, 4]. Ограничением применения в этом случае являются возможные дефекты обрабатываемой поверхности, возникающие при шлифовании.

Нами были выполнены исследования, результаты которых легли в основу создания совмещенного и комбинированного способов обработки иглофрезерованием и ППД.

В существующих устройствах режущие и деформирующие элементы работают с равными минутными подачам. При этом деформирующие инструменты являются регламентирующими

Применение в качестве режущих инструментов иглофрез характеризуется значительной разницей контакта этих и деформирующих инструментов с обрабатываемой поверхностью. Следствием этого является существенное различие подач, обеспечивающих требуемое качество поверхности. Выбор подачи, допускаемой деформирующим инструментом, в этом случае снижает производительность обработки. Кроме этого, невысокие круговые подачи иглофрез регламентируют скорости обкатывания деформирующих инструментов. Учитывая, что величина круговой подачи иглофрез меньше скорости обкатывания в 20–40 раз, применение в рассматриваемом случае традиционных зависимостей режимов комбинированной обработки резанием и ППД не обеспечивает высокой производительности процесса.

В связи с этим для разработки способа совмещенной обработки были установлены зависимости оптимального сочетания режимов обработки указанных процессов, позволяющих устранить отмеченные недостатки.

Для определения зависимости, согласующей движение иглофрез и деформирующих инструментов относительно детали, исходя из равенства минутных подач иглофрез и деформирующих элементов, можно записать

$$S_{ou} \cdot n_{ou} \cdot Z_u = S_{od} \cdot n_{od} \cdot Z_d, \quad (1)$$

где S_{ou} и S_{od} – подача на одну иглофрезу и один деформирующий инструмент, мм/ои; мм/од, соответственно; n_{ou} и n_{od} – частота вращения иглофрезы и деформирующего инструмента, соответственно в движении круговой подачи иглофрезы и главном движении деформирующего инструмента, мин⁻¹; Z_u и Z_d – количество иглофрез и деформирующих инструментов, шт.

Тогда частота вращения n_{od} деформирующего инструмента будет равна

$$n_{od} = (S_{ou} \cdot n_{ou} \cdot Z_u) / (S_{od} \cdot Z_d) \quad (2)$$

Минимально возможная частота вращения деформирующего инструмента определяется его максимально возможной подачей, превышение которой приведет к появлению на поверхности детали необработанных участков

$$n_{od, \text{мин}} = (S_{ou} \cdot Z_u \cdot n_{ou}) / (S_{od, \text{макс}} \cdot Z_d) \quad (3)$$

Максимально возможную подачу деформирующего инструмента $S_{od, \text{макс}}$ определяли на основе зависимости, приведенной в работе [5]

$$S_{od, \text{макс}} = \sqrt{4R_{np} \cdot i \cdot i^2} \quad (4)$$

где i – натяг в системе обрабатываемая поверхность – деформирующий элемент, мм; R_{np} – профильный радиус деформирующего инструмента в продольном сечении, мм.

Упругое последствие, высота и неравномерность исходного микрорельефа учитываются в величине подачи коэффициентом коррекции $K = 0,6-0,7$ [5]:

$$S_{od, \text{мин}} = (0,6-0,7) \sqrt{4R_{np} \cdot i \cdot i^2}. \quad (5)$$

Величину подачи одной иглофрезы S_{ou} целесообразно принимать равной

$$S_{ou} = (0,2...0,4) \cdot H_u \quad (6)$$

где H_u – ширина рабочей части иглофрезы, мм.

Это связано с тем, что при подаче равной ширине иглофрезы в результате упругой деформации проволоочных элементов снижается эффективность процесса резания и преобладает процесс пластического деформирования.

Используя формулы (5) и (6) получим

$$n_{od, \text{мин}} = [(0,28...0,66) H_u Z_u n_{ou}] / (\sqrt{4R_{np} \cdot i \cdot i^2} \cdot Z_d) \quad (7)$$

При этой частоте вращения деформирующих элементов обеспечивается обработка поверхности без пропуска локальных участков. Однако шероховатость и волнистость поверхности будут максимальными. Для снижения шероховатости поверхности следует уменьшить подачу на оборот детали деформирующих инструментов в 3,3–

3,5 раза [6]. Это приведет к соответствующему увеличению частоты вращения деформирующих инструментов без уменьшения минутной подачи, а, следовательно, производительности обработки.

Окончательно формула (7) примет вид

$$n_{\text{од.мин}} = [(0,92...2,31) H_u Z_u n_u] / (\sqrt{4R_{np} \cdot i - i^2} \cdot Z_u) \quad (8)$$

Для реализации метода совмещенной обработки разработан способ (рис. 1) [7]. В корпусе 1 размещены механизмы привода с качающимся редуктором 2, на выходных валах 3, которого установлены иглофрезы 4. Приводные валы 5 через жестко закрепленные на них шестерни 6 связаны с неподвижной шестерней 7. Эта шестерня закреплена на неподвижном кожухе 8. В отверстии шестерни 7 в подшипниках установлена втулка 9, соединенная с корпусом 1. На втулке 9 на подшипнике установлен диск 10 с выполненным на нем зубчатым венцом 11. В диске 10 закреплены держатели 12 с деформирующими элементами 13. Зубчатый венец 11 диска 10 соединен с шестерней 14, установленной на валу 15, на котором расположена сменная шестерня 16. Эта шестерня связана со сменной шестерней 17, установленной на валу 18. Сменные шестерни 16 и 17 представляют собой гитару сменных колес привода деформирующих элементов 13. На валу 18 установлена сменная шестерня 19, соединенная со сменной шестерней 20, размещенной на валу 21, на котором закреплен шкив 22 ременной передачи привода. Сменные шестерни 19 и 20 представляют собой гитару сменных шестерен общего привода устройства.

На корпусе 1 закреплена шестерня 23, которая связана с шестерней 24, установленной на валу 18. Для направления обрабатываемой детали 25 после выхода ее из зоны деформирующих инструментов 13 используется втулка 26. Для подачи детали 25 применяются две пары тянущих роликов, установленных со сторон входа и выхода детали (не показаны). Совокупность шестерен может быть иной.

Устройство для реализации способа совмещенной обработки работает следующим образом. От шкива 22 вращение через вал 21 передается шестерням 20 и 19. От шестерни 19 вращение передается валу 18 и расположенным на нем шестерням 24 и 17. От шестерни 24 вращение сообщается шестерне 23 и связанному с ней корпусу 1, который сообщает планетарное движение иглофрезам 4. При планетарном движении шестерни 6, обкатываясь по неподвижной шестерне 7, приводят во вращение приводные валы 5 и через качающийся редукторы 2 – выходные валы 3 с иглофрезами 4. Режущим инструментам сообщается вращательное движение. Одновременно через шестерни 17 и 16 вращение сообщается валу 15 с установленной на нем шестерней 14, от которой через зубчатый венец 11 вращение передается диску 10 с деформирующими инструментами 13. Последним сообщается планетарное движение с частотой вращения большей, чем частота вращения планетарного движения иглофрез 4. Частота вращения планетарного движения деформирующих инструментов 13 может изменяться с помощью шестерен 16 и 17.

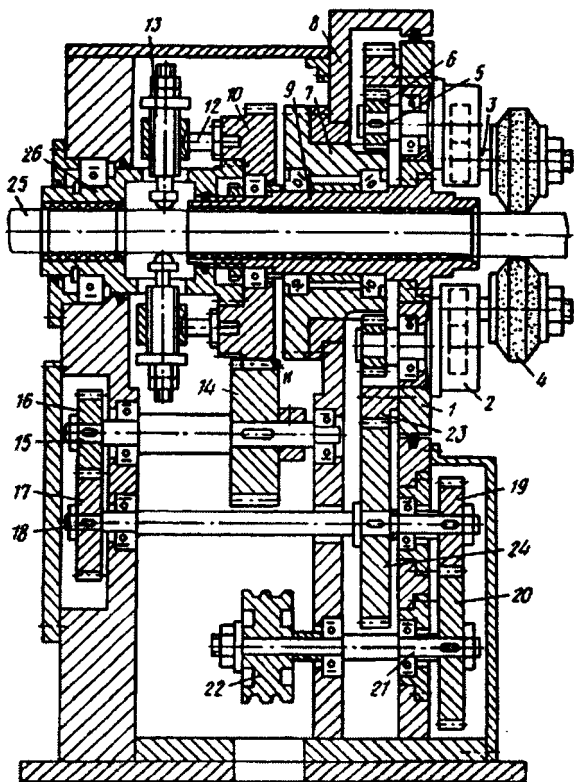


Рис. 1. Схема реализации способа совмещенной обработки иглофрезерованием и ППД: 1 – корпус, 2 – качающийся редуктор, 3 – выходной вал, 4 – иглофреза, 5 – приводной вал, 6 – шестерня, 7 – шестерня, 8 – кожух, 9 – втулка, 10 – диск, 11 – зубчатый венец, 12 – держатель, 13 – деформирующий элемент, 14 – шестерня, 15 – вал, 16 – сменная шестерня, 17 – сменная шестерня, 18 – вал, 19 – сменная шестерня, 20 – вал, 21 – вал, 22 – шкив, 23 – шестерня, 24 – шестерня. 25 – обрабатываемая заготовка, 26 – втулка

Использование предлагаемого способа обуславливает повышение производительности процесса за счет обеспечения возможности совмещенной обработки с большими подачами. Кроме этого, повышается качество обработанной поверхности в результате использования подач на оборот планетарного движения, равных оптимальным при раздельном использовании процессов иглофрезерования и обкатки.

Сочетание процессов иглофрезерования и ППД возможно также в результате разработанного способа комбинированной обработки [8]. На рис. 2а изображена схема

реализации способа комбинированной обработки с принудительной подачей детали при обработке иглофрезами; на рис. 2б – схема способа с самоподачей детали при обработке иглофрезами.

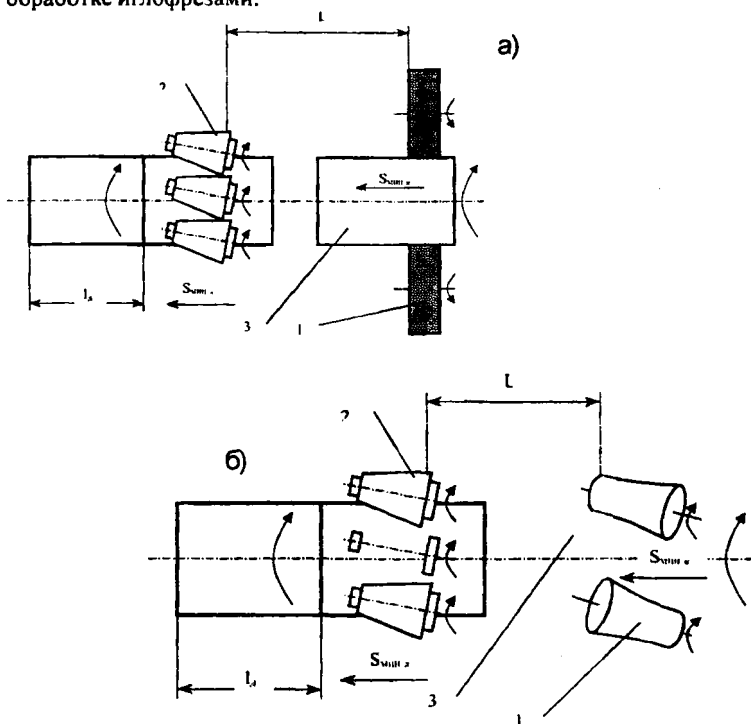


Рис. 2. Схема реализации способа комбинированной обработки иглофрезерованием и ППД: (1 – иглофреза, 2 – деформирующий элемент, 3 – обрабатываемая заготовка): а – с принудительной подачей при обработке иглофрезами; б – с самоподачей при обработке иглофрезами

Способ заключается в том, что иглофрезы 1 и деформирующие элементы 2 установлены на расстоянии L , большем длины l_1 детали 3. Иглофрезам 1 сообщается движение вокруг своей оси и планетарное движение вокруг детали 3 (см. рис. 2а). При обработке с самоподачей иглофрезы 1 вращаются вокруг своей оси и приводят во вращение деталь 3. Деформирующим элементам 2 сообщают планетарное движение вокруг детали 3. За счет контакта деформирующих элементов 2 с деталью 3 им сообщается вращение вокруг своей оси. Деформирующие инструменты 2 установлены под углом к оси детали 3. Заготовка 3 подается в зону иглофрез 1 с помощью подаю-

шего устройства (не показано) с минутной подачей (см. рис 2а). При самоподаче (см. рис. 2б) иглофрезы 1 изготовляют гиперболоидной формы и их оси устанавливают под углом друг к другу. После обработки иглофрезами 1 заготовки потоком двигаются с той же подачей до захвата их деформирующими инструментами 2. Эти инструменты в результате установки под углом к оси заготовки 3 производят ее самоподачу с минутной подачей $s_{д.мин}$. Минутная подача при обкатывании деформирующими инструментами 2 $s_{д.мин}$ больше на 20%, чем минутная подача при иглофрезеровании. Это обеспечивает определенное расстояние между деталью 3, обрабатываемой деформирующими инструментами 2, от детали, обрабатываемой иглофрезами 1. Последнее исключает влияние колебаний минутных подач на качество обработанной поверхности и надежность при реализации способа.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.с. 1180247 СССР. Устройство для совмещенной обработки резанием и поверхностным пластическим деформированием/ Я.М. Сургунт, А.М. Довгалеv. – Оpubл. в БИ № 36. 1985. 2. А.с. 1247249 СССР. Способ комбинированной обработки резанием и поверхностным пластическим деформированием/ Я.М. Сургунт, А.М. Довгалеv. – Оpubл. в БИ № 28, 1986. 3. А.с. 1243935 СССР. Способ комбинированной обработки шлифованием и поверхностным пластическим деформированием/ Я.М. Сургунт, А.М. Довгалеv. – Оpubл. в БИ № 26, 1986. 4. А.с. 1279801 СССР. Способ комбинированной обработки шлифованием и поверхностным пластическим деформированием и инструмент для его осуществления/ Я.М. Сургунт, А.М. Довгалеv, Э.А. Свидерский. – Оpubл. в БИ № 26. 1986. 5. Шнейдер Ю.Г. Чистовая обработка металлов давлением. – М.: – Л.: Mashgiz, 1963. – 272 с. 6. Баршай И.Л., Абугов А.Л. Кинематические зависимости при совмещенной обработке иглофрезерованием и поверхностным пластическим деформированием//Машиностроение. – Мн.: Вышэйшая школа, 1987. – Вып. 12. – С. 20-22. 7. А.с. 1310182 В 24 В 39/04 СССР. Способ совмещенной обработки иглофрезерованием и ППД/А.Л. Абугов, И.Л. Баршай. – Оpubл. в БИ № 44, 1987. 8. А.с. 1355476 В 24 В 39/00 СССР. Способ комбинированной обработки/А.Л. Абугов, И.Л. Баршай. – Оpubл. в БИ № 44, 1987.

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СХЕМЫ БАЗИРОВАНИЯ ЗАГОТОВОК КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

*Витебский государственный технологический университет
Витебск, Беларусь*

Одним из средств повышения качества и производительности процесса технологической подготовки производства машин является автоматизация проектирования деталей и технологических процессов их изготовления. Однако анализ литературных источников и опыта эксплуатации систем автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП) показал, что пока еще не созданы САПР ТП для достаточно сложных (корпусных) деталей машин, которые могли бы в автоматическом режиме, осуществлять синтез схем базирования, установки и операций технологического маршрута, формировать технологические цепи, рассчитывать технологические размеры, оценивать допустимость принятого маршрута и схем базирования.

Разработка (выбор) схемы установки заготовки является одной из наиболее важных и сложных процедур проектирования технологического процесса механической обработки. Разработке схемы установки должна предшествовать разработка схемы базирования, под которой будем понимать геометрическую модель заготовки (ГМЗ), на которой выделены обрабатываемые поверхности, проставлены размеры, показатели относительных поворотов и изображены условными значками точки сопряжения технологических баз с базовой (собственной) системой координат. Выполнение этой процедуры существенно облегчится и возникнет возможность его автоматизации, если процесс разработки будет формализован.

В [1] впервые предлагается основанный на алгебре логики полностью формализованный метод определения технологических баз при помощи анализа матриц размерных связей поверхностей детали. Однако этот метод имеет существенные недостатки: 1) он пригоден только для случая, когда анализируемые поверхности детали параллельны или перпендикулярны; 2) в нем не предложен алгоритм выбора числа связей, которые накладывает выбранная база; 3) выбор наилучшего комплекта баз из довольно мощного множества предлагается проводить в режиме диалога с ЭВМ. Причем для последнего не указаны формальные правила.

Чтобы существенно уменьшить “размерность” поставленной задачи, предлагается рассматривать деталь не как совокупность взаимосвязанных элементарных поверхностей, а как совокупность взаимосвязанных функциональных модулей разных уровней сложности. Функциональный модуль (ФМ) – это группа элементарных по-

верхностей, вместе выполняющих хотя бы одну функцию [2]. Однако, принципы классификации ФМ еще недостаточно разработаны.

В основу разрабатываемого классификатора ФМ корпусных деталей, которые изготавливаются на машиностроительных предприятиях Витебской области, положена классификация типовых поверхностей, приведенная в работе [3].

По служебному назначению ФМ корпусных деталей предлагается разбить на следующие классы: 1) основные и вспомогательные сборочные базы; 2) ФМ крепления; 3) ФМ коммуникации; 4) ФМ, объединяющие компоненты детали в единое целое; 5) технологические поверхности и ФМ, которые облегчают сборку (фаски), обеспечивают выход режущего инструмента (канавки) и искусственные технологические базы.

Система ФМ должна быть иерархичной. По уровню сложности ФМ предлагается разбить на следующие группы: 1) элементарные поверхности будут считаться ФМ нулевого ранга (ФМ0р); 2) технологические поверхности (фаски и канавки) считаются ФМ первого ранга (ФМ1р); 3) сочетание ФМ0р и ФМ1р считается ФМ второго ранга (ФМ2р); 4) сочетание нескольких однородных ФМ0р считается ФМ третьего ранга (ФМ3р); 5) сочетание нескольких разнородных ФМ0р считается ФМ четвертого ранга (ФМ4р); 6) сочетание ФМ2р и ФМ3р или ФМ4р считается ФМ пятого ранга ФМ5р; и так далее. Предельного оптимального усложнения ФМ следует еще установить.

Каждый ФМ характеризуют показатели двух видов: 1) внутренние, определяющие форму (коды формы), размеры, взаимное расположение и показатели качества компонентов ФМ; 2) внешние, определяющие расположение ФМ относительно глобальной системы координат или других ФМ детали. Внешними показателями ФМ являются координаты начала локальной системы координат ФМ, а также коды и (или) показатели относительных поворотов главной оси локальной системы координат ФМ.

Угловую ориентацию ФМ предлагается характеризовать значениями проекций единичных векторов, совпадающих с главными осями его локальной системы координат, на оси глобальной системы координат, которая обычно связана с основной сборочной базой детали. С помощью этих характеристик просто, в соответствии с общеизвестными из аналитической геометрии условиями параллельности, перпендикулярности и выражения для вычисления угла, определять показатели взаимного углового расположения любых пар функциональных модулей. Линейное взаимное расположение ФМ характеризуется графами размерных связей (расстояний между началами локальных систем координат) соответственно построенных для каждой оси глобальной системы координат.

Предлагается ограниченное множество сочетаний номинальных поверхностей (конструкторских баз), относительно которых задается расположение обрабатываемого ФМ: 1) три взаимно перпендикулярных плоскости; 2) плоскость и две перпендикулярных к ней оси; 3) две взаимно перпендикулярные плоскости и одна ось, перпендикулярная к одной из этих плоскостей (и, следовательно, параллельная или совпадающая с другой плоскостью); 4) плоскость и две оси, одна из которых параллельна, а

другая перпендикулярна к этой плоскости; 5) две взаимно перпендикулярных и пересекающихся оси. Чаще всего конструкторские базы принадлежат одному ФМ, но бывает, что и разным.

Синтез схемы базирования в соответствующей процедуре индивидуального проектирования технологических процессов [4] будет осуществляться в соответствии с разработанными для каждого варианта комплекта конструкторских баз формальными правилами, которые обеспечивают в первую очередь выполнение заданной точности относительных поворотов, а затем только расстояний (размеров).

Для примера приведены следующие правила:

1.1. а) Если ориентация обрабатываемого ФМ задана согласно п.1, то та плоскость другого ФМ ГМЗ, по отношению к которой допуск относительного положения обрабатываемой поверхности минимальный, назначается установочной базой; направляющей базой назначается другая плоскость ГМЗ, по отношению к которой допуск относительного положения больше первого; третья плоскость ГМЗ назначается опорной базой. (рис. 1). б) Если допуски относительного расположения ГМЗ (и чертежом) явно не заданы, то установочной базой назначается плоскость ГМЗ наибольшей площади, а направляющей – та из перпендикулярных первой плоскости, которая имеет наибольшую длину.

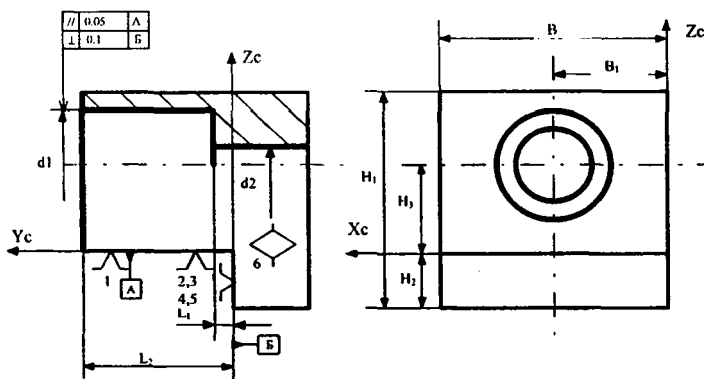


Рис. 1.

Если площади плоскостей одинаковы, то за установочную базу принимается плоскость, имеющая наименьший показатель шероховатости (рис. 2).

1.2. а) Если ориентация обрабатываемой поверхности ФМ задана согласно п.2, и если допуски ее относительного расположения заданы относительно плоскости ГМЗ и линии, проходящей через две оси, то эта плоскость назначается установочной базой одна из осей (от которой задан размер) – двойной опорной, а другая – опорной базой. (рис.3). б) Если допуски относительного расположения обрабатываемой поверхности

ФМ заданы относительно одной из осей (достаточной длины) другого ФМ и линии, проходящей через две оси, то первую назначают двойной направляющей базой, а вторую ось и плоскость – опорными базами. в) Если допуски относительного расположения ГМЗ (и чертежом) явно не заданы, то плоскость ГМЗ назначается установочной базой в случае, когда габариты плоскости больше длины осей, одна из осей, от которой задан размер назначается двойной опорной базой, а другая – опорной.

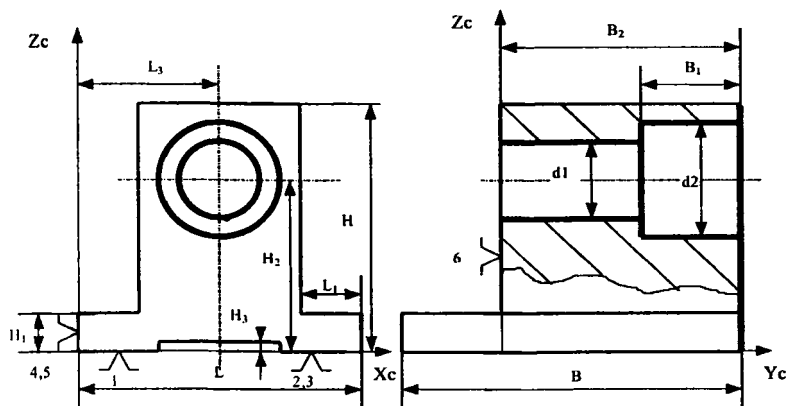


Рис. 2

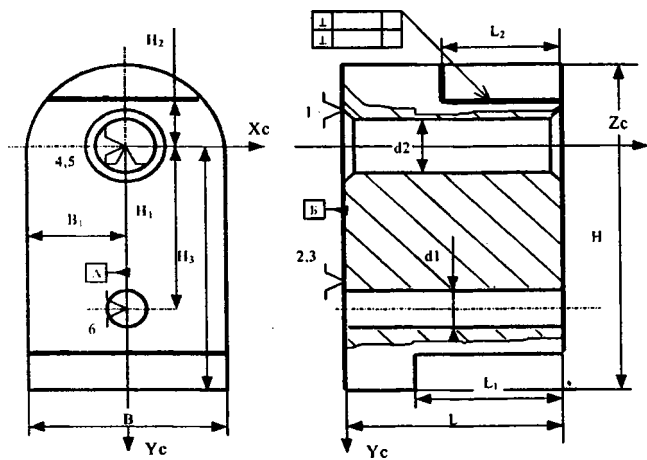


Рис. 3

Если длина хотя бы одной из осей больше габаритов плоскости, то эта ось назначается двойной направляющей базой, а другая ось и плоскость назначаются опорными базами. На этапе разработки схемы установки моделируется расположение точек контакта моделей реальных поверхностей заготовки с геометрическими моделями установочных элементов приспособления. На схеме установки желательно совместить опорную систему координат с базовой. Если этого нет, то возникают условия для возникновения погрешности схемы установки.

Если технологическая база является скрытой, то ее непосредственное сопряжение с установочным компонентом невозможно. Для фиксации такой базы следует применять полностью или частично самоцентрирующие компоненты приспособления (конические пальцы, самоцентрирующиеся тиски, призмы и т.д.). Разрабатываются таблицы соответствия и алгоритмы для замены элемента схемы базирования элементом схемы установки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Старостин В.Г., Лелюхин В.Е. Формализация проектирования процессов обработки резанием. – М.: Машиностроение, 1986. – 136 с. 2. Технология газонефтяного и нефтехимического машиностроения: учебное пособие. / Б.М. Базров, Б.А. Авербух и др.; Под общ. ред. Базрова Б.М. – М.: Машиностроение, 1986. – 256 с. 3. Цветков В.Д. Система автоматизированного проектирования технологических процессов. – М.: Машиностроение, 1972. – 240 с. 4. Махаринский Е.И., Горохов В.А. Основы технологии машиностроения: Учебник. – Мн.: Выш. шк., 1997. – 423 с.

УДК 621.762.4

А.Н. Голубев

ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ПЛАСТИФИКАТОРА В СОСТАВЕ ПЕРЕДАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА РАВНОПЛОТНОСТЬ ПОРОШКОВЫХ ПРЕССОВОК, ПОЛУЧЕННЫХ СПОСОБОМ КВАЗИИЗОСТАТИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ

*Витебский государственный технологический университет
Витебск, Беларусь*

В порошковой металлургии для изготовления изделий сложной формы находит применение способ квазиизостатического прессования (КИП), характерным признаком которого является наличие между рабочими органами оснастки (пуансонами и матрицей) и порошком изделия нежидкой и негазообразной передающей среды (ПС). Известно, что ПС из парафина, стеарина, желатина и им подобных материа-

лов [1] равномерно передают давление по всем направлениям (коэффициент бокового давления таких ПС близок к единице) и обладают низким коэффициентом трения по стенкам матрицы. Однако, наиболее оптимальным составом ПС для КИП являются не сами эти материалы, а пластифицированные ими металлические порошки в силу следующих причин.

1. В ходе прессования парафин склонен пропитывать порошок изделия, тем самым загрязняя его и повышая пористость поверхности спеченной прессовки. Уменьшение процентного содержания парафина в составе ПС способствует значительному снижению интенсивности протекания этого негативного процесса.

2. Парафин является практически неуплотняемым, но сжимаемым телом. При снятии давления прессования он стремится восстановить первоначальный объем и разрывает прессовку, в особенности из твердых мелкодисперсных порошков (например, твердосплавных смесей).

3. Применение пластифицированного порошка позволяет расширить технологические возможности КИП, в частности, за счет изготовления легированных изделий [2].

При замене ПС из парафина на ПС из пластифицированных порошков следует ожидать изменений в свойствах получаемых прессовок. В настоящей работе исследовано влияние содержания пластификатора в составе ПС на показатель равноплотности (изменение плотности прессовки по длине), являющийся одним из наиболее важных показателей, характеризующих способ прессования.

В качестве порошка изделия был выбран один из наиболее широко применяемых материалов – железный порошок марки ПЖ2М3; в качестве ПС использовался пластифицированный парафином медный порошок. Получая формообразующие полости из ПС для прессования экспериментальных образцов, каждый раз меняли массовый процент содержания пластификатора в ПС. Это значение изменялось в пределах от 0 % (непластифицированный медный порошок) до 100 % (чистый парафин).

Прессование способом КИП проводилось в цилиндрической матрице диаметром 40 мм на гидравлическом прессе односторонним прессованием давлением 450 МПа. Полученные экспериментальные образцы по извлечению из ПС имели цилиндрическую форму со средними значениями диаметра в 16 мм и длины в 75 мм. На торцах образцов выполнялись пометки “верх” и “низ” в соответствии с их положением в матрице в ходе прессования. Методика определения равноплотности образцов заключалась в следующем.

Каждая из полученных прессовок предварительно обрабатывалась на токарном станке до наружного диаметра 15 мм (прочность неспеченной железной прессовки, полученной при данном давлении, позволяет сделать это без ее разрушения). Методом подрезки торца прессовку укорачивали на 2–5 мм и расчетным методом по ГОСТ 18898–83 определяли среднюю плотность остатка $\rho_{\text{с}}$. Таким способом получали девять значений плотности остатка $\rho_{\text{с}}$ в зависимости от его длины:

$$\rho_{s,i} = 4m_i / \pi d_i^2 z_i, \quad (1)$$

где m_i , d_i и z_i – соответственно масса i -го остатка, его диаметр и длина, $i = 1 \dots 9$. Погрешность определения этой плотности, вызванная неточностью измерительных приборов, на середине прессовки составляла 0,02...0,03 г/см³, или 0,4...0,5%.

Направим координату z вдоль оси прессовки (рис. 1). Тогда функцию средней плотности остатка длиной z $\rho_s(z)$ и искомую функцию текущей плотности прессовки на координате z $\rho(z)$ можно связать зависимостью

$$(1/z) \int_0^z \rho(z) dz = \rho_s(z) \quad (2)$$

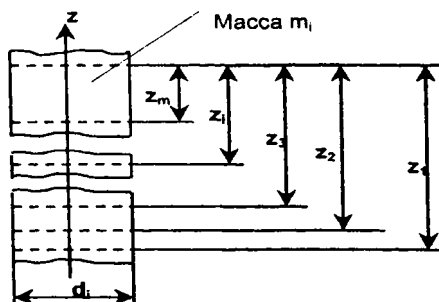


Рис. 1

С достаточной для целей эксперимента точностью можно считать закон изменения плотности по длине линейным (выборочный коэффициент корреляции составляет 0,92... 0,95). Если

$$\rho_s(z) = a_s z + b, \quad (3)$$

то, интегрируя (2) с учетом (3), находим, что функция $\rho(z)$ есть прямая, уравнение которой

$$\rho(z) = az + b \quad (4)$$

причем

$$a = 2a_s, \quad b = b_s. \quad (5)$$

Тогда за критерий равноплотности прессовки можно взять коэффициент a уравнения (4), являющийся тангенсом угла наклона этой прямой к оси абсцисс. Значение этого коэффициента отлично от нуля и тем больше, чем сильнее отличаются друг от друга значения средней плотности прессовки в верхнем и нижнем сечениях.

Для получения числовых значений коэффициента неравноплотности по изложенной выше методике экспериментальные данные средней плотности остатка (1) ставились в соответствие с длиной остатка (координатой z) и аппроксимировались прямой (3) методом наименьших квадратов (рис. 2). Среднее значение коэффициента неравноплотности и доверительный интервал

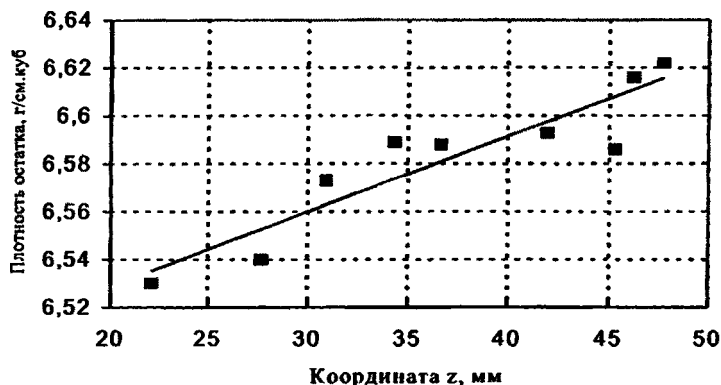


Рис. 2

$$a = 2(n \sum z_i \rho_{si} - \sum z_i \sum \rho_{si}) / (n \sum z_i^2 - (\sum z_i)^2), \quad (6)$$

$$\Delta = 2t(s_y \sqrt{1-r}) / (s_x \sqrt{n-2}), \quad (7)$$

где ρ_{si} определяется по (1), n – количество экспериментальных точек ($n=9$), s_x и s_y – корни квадратные из дисперсий выборок вокруг своих средних, r – выборочный коэффициент корреляции, t – квантиль распределения Стьюдента при уровне значимости 0,05.

В соответствии с приведенной выше методикой обрабатывался каждый из полученных образцов. Найденный показатель a , характеризующий неравноплотность для принятых условий прессования и выбранных размеров образцов, ставился в соответствие с процентным содержанием пластификатора в составе ПС. Результаты эксперимента приведены на графике (рис. 3).

Как видно из графика, с повышением количества пластификатора в составе ПС от нуля до 15–20% коэффициент неравноплотности интенсивно снижается. Далее, вплоть до чистого парафина (100% пластификатора) происходит несущественное снижение этого коэффициента.

Полученные результаты можно интерпретировать следующим образом. Неравноплотность прессовок вызвана, как известно, наличием коэффициента трения ПС по поверхности матрицы. Значение этого коэффициента тем меньше, чем больше в составе

ПС пластификатора. При использовании в качестве ПС сухого непластифицированного порошка неравноплотность прессовки соответствует наблюдаемой при обычном прессовании в жесткой пресс-форме (около 10% на 10 мм длины прессовки). При массовом содержании пластификатора около 15–20% последний заполняет весь свободный объем межчастичного пространства, выдавливается в пространство между ПС и стенкой матрицы и значительно снижает коэффициент трения ПС. Изменение плотности прессовки при этом составляет около 1,5–2% на 10 мм длины. При дальнейшем повышении содержания пластификатора, вплоть до чистого парафина, уже не наблюдается существенного повышения равноплотности, поскольку не происходит заметного повышения коэффициента трения ПС по поверхности матрицы.

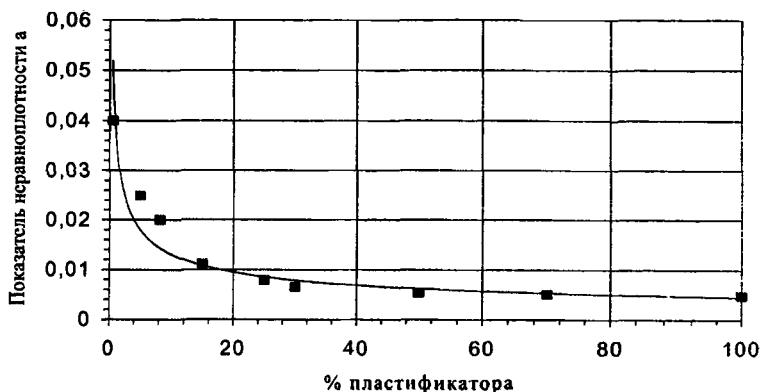


Рис. 3

Таким образом, без существенного ухудшения равноплотности прессовки можно уменьшить объем контактирующего с порошком изделия парафина и тем самым снизить указанное выше его негативное влияние на прессовку. Для этого в качестве ПС необходимо применять пластифицированные металлические порошки, содержание пластификатора в которых обеспечивает заполнение всего свободного объема межчастичного пространства.

Результаты исследований можно использовать при разработке технологий квази-изостатического прессования, в частности, для оптимизации состава передающих сред.

ЛИТЕРАТУРА

1. С.С. Кипарисов, Г.А. Либенсон. Порошковая металлургия. — М.: Металлургия, 1991. — 305 с.
2. Способ прессования изделий из порошков / Патент РФ 3568 С1 по заявке № 970494 от 19.09.97, кл. В22F 3/02. — Авторы Клименков С.С., Матвеев К.С., Голубев А.Н., Ахтанин О.Н., Пятов В.В. — Оpubл. в Офиц. бюллетене № 1 от 30.03.99.

ПОЛУЧЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ

*Витебский государственный технологический университет
Витебск, Беларусь*

Композиционные электрохимические покрытия (КЭП) применяются в промышленности для восстановления и упрочнения деталей машин, и представляют собой металлическую матрицу с распределенными в ней дисперсными частицами оксидов, боридов, нитридов и т.п. [1]. При определенных условиях электролиза возможно получение покрытий в которых могут быть частицы от самых минимальных размеров до соизмеримых с толщиной осадка. По толщине матрицы частицы располагаются неравномерно. Наибольшее количество частиц осаждается ближе к основному металлу и в тех местах, где выше плотность силовых линий тока. Включение дисперсных материалов в металлическую матрицу сильно изменяет свойства покрытий и, главное в несколько раз увеличивает их износостойкость. По различным литературным и экспериментальным данным процентное включение дисперсных частиц (1...10 мкм) в покрытие (по объему), приводящее к наилучшим физико-механическим характеристикам материала, различно и колеблется от 5 до 30%. Установлено, что чем больше размер частиц, тем меньшее количество их внедряется в осадок. Так, например, при получении КЭП на основе никеля при изменении размера частиц от 1 до 10 мкм содержание частиц в осадке снижается в 2–3 раза [2]. Общая закономерность для всех типов покрытий одна – увеличение процентного содержания дисперсного материала в покрытии при его равномерном распределении способствует увеличению механических свойств покрытия, однако, неизбежно наступает предел, при котором дальнейшее увеличение количества частиц приводит к появлению трещин и разупрочнению матрицы.

Одним из способов получения композиционных электрохимических покрытий с высоким содержанием дисперсной фазы является седиментационный способ [1]. Способ заключается в выделении композиционных электрохимических покрытий из густых суспензий с высоким (до 60–70%) содержанием дисперсной фазы при горизонтальном расположении катода, на поверхность которого седиментируют макрочастицы вещества. Так, были получены КЭП с матрицей из никеля с содержанием макрочастиц Al_2O_3 на горизонтально расположенном катоде, нижняя сторона которого была изолирована лаком.

Для того чтобы обеспечить встречу частицы с катодом (и растущим покрытием), необходимо их в достаточном количестве подвести к нему с определенной скоростью. Скорость оседания частиц можно оценить формулой Стокса, которая имеет вид:

$$V_s = \frac{gd(\rho_n - \rho_{ж})}{18\eta},$$

где η – вязкость жидкости (электролита), Па·с; g – ускорение свободного падения, м/с²; ρ_n – пикнометрическая плотность порошка кг/м³; $\rho_{ж}$ – плотность жидкости (электролита), кг/м³; d – диаметр частицы, м.

Теоретические расчеты и практика показывают, что скорость оседания дисперсных частиц (1–10 мкм) значительно больше скорости осаждения многих электролитических покрытий. Следовательно, по истечении определенного времени, дисперсные частицы, не успевшие зарости металлом-матрицей, покроят тонким слоем поверхность катода. Таким образом, при седиментационном способе получения композиционного электрохимического покрытия, имеет место экранирование поверхности катода, происходящее тем больше, чем менее электропроводна частица. Данное обстоятельство существенно снижает скорость процесса получения покрытия, вплоть до его полного прекращения.

Ускорить процесс образования покрытия можно, уменьшая толщину прикатодного (диффузионного) слоя, обедненного ионами осаждаемого металла. Так, известен способ получения композиционного электрохимического покрытия, при котором осуществляется прокачивание электролита-суспензии фронтально к катоду, вызывающее турбулентное движение электролита в околокатодном пространстве [3]. При прокачивании электролита-суспензии частицы оказывают воздействие на характер протекающих на электродах процессов и качество поверхности кристаллизуемого металла. Их воздействие препятствует образованию экранирующего слоя, а также приводит к механическому снятию пассивирующих пленок (ослабляется поляризация). Движущиеся твердые частицы очищают поверхность от адсорбированных пузырьков газа и механических загрязнений. Пассивирующие пленки обладают защитной способностью против истирания абразивом, но при малых скоростях движения. Существует значение критической скорости, при которой скорость разрушения пленки равна скорости ее образования, при более высоких скоростях движения наступает депассивация. Однако при высоких скоростях движения электролита-суспензии частицы не задерживаются на поверхности катода и не успевают зарости металлом-матрицей, что приводит к получению покрытий с низким содержанием дисперсной фазы.

Таким образом при совместном осаждении металлов с частицами различной электропроводности действуют два противоположно направленных фактора: с одной стороны, депассивация поверхности за счет абразивных частиц, очищающих поверхность катода от пассивных пленок, окислов, газов, которая увеличивает их активную поверхность; с другой стороны, экранирование поверхности катода, происходящее тем больше, чем менее электропроводна частица.

Нашей задачей является получение композиционных электрохимических покрытий с высоким содержанием дисперсной фазы и с равномерной структурой, а также интенсификация процесса осаждения композиционного покрытия.

Поставленная задача решается за счет того, что процесс осаждения композиционного покрытия включает две циклически повторяющиеся стадии: стадию предварительного закрепления дисперсных частиц (седиментационное осаждение) и стадию ускоренного осаждения металла-матрицы на слой, толщиной в линейный размер частицы при прокачивании электролита-сuspензии, при повышении плотности тока.

Принципиальная схема реализации способа изображена на рис. 1.

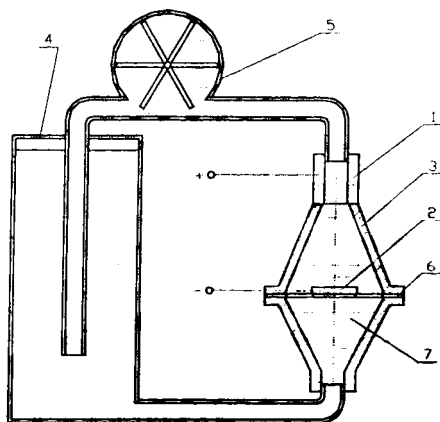


Рис. 1

На рис.1 обозначены анод 1, катод (заготовка) 2, гальваническая ванна 3, бак 4, насос 5, диафрагма 6, электролит-сuspензия 7.

Схема заравнивания частиц металлом-матрицей показана на рис.2.

На рис.2 обозначены слой предварительного закрепления металлы-матрицы I, слой скоростного заравнивания металла-матрицы II, частицы III,

Способ осуществляется следующим образом.

Заготовка 2, на которую планируется нанести композиционное покрытие, подвергается предварительной обработке, состоящей из химического обезжиривания, промывки и травления. Заготовку помещают на диафрагму 6 и закрепляют в закрытой гальванической ванне 3. Ванна заполняется электролитом-сuspензией 7. Процесс осаждения композиционного покрытия состоит из двух циклически повторяющихся стадий. Первая стадия заключается в седиментационном осаждении (условия электролиза – стандартные), при котором происходит заравнивание частицы металлом-матри-

цей на слой I, необходимый для ее удержания. Вторая стадия заключается в ускоренном осаждении металла-матрицы на слой II, толщиной в линейный размер частицы III путем прокачивания электролита-суспензии со скоростью 25–50 мм/с при повышении плотности тока до 25–100 А/дм².

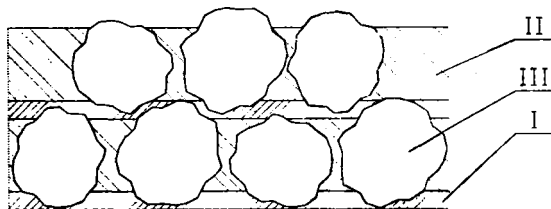


Рис. 2

Прокачивание электролита-суспензии позволяет смыть частицы, экранирующие поверхность катода а также повысить плотность тока, а следовательно интенсифицировать процесс осаждения. Кроме того, движущиеся частицы оказывают благоприятное влияние на поверхность осаждаемого слоя, улучшая тем самым качество поверхности. Прокачивание электролита-суспензии осуществляется при помощи насоса 5.

В качестве примера было получено композиционное покрытие на основе никеля с включениями дисперсных частиц Al_2O_3 .

Заготовка, на которую планируется нанести композиционное покрытие, подвергается предварительной обработке, состоящей из химического обезжиривания, промывки и травления.

После проведения предварительной обработки заготовку помещают горизонтально на диафрагму в гальваническую ванну с электролитом следующего состава:

| | | |
|---|-------|----------|
| никель сернокислый ($NiSO_4 \cdot 7H_2O$) | | 180 г/л; |
| никель хлористый ($NiCl_2 \cdot 6H_2O$) | | 40 г/л; |
| кислота борная (H_3BO_3) | | 30 г/л. |

В электролит добавляется мелкодисперсный порошок Al_2O_3 с гранулометрическим составом 5–10 мкм, распределенных по всему объему раствора. Концентрация порошка в электролите составляет 150–200 г/л. pH-электролита 5,2–5,5. Плотность тока 0,5–1,2 А/дм².

Частицы седиментируют на поверхность катода и зарастают металлом-матрицей. Время седиментационной стадии составляет 5–7 мин.

Вторая стадия составляет 12–15 мин. За это время частица полностью зарастает металлом-матрицей. Стадия ускоренного зарастания дисперсных частиц металлом-матрицей осуществляется путем прокачивания электролита-суспензии со скоростью 25–50 мм/с. Плотность тока повышают до 75 А/дм².

Анализ макроструктуры полученного композиционного материала показал высокое содержание дисперсной фазы (25–30%) и равномерность распределения керамических частиц в матрице, а также отсутствие пор и трещин, что свидетельствует о низкой напряженности композиционного материала. Вследствие высокого содержания керамических частиц равномерной структуры полученного покрытия его износостойкость повысилась в 1,3–1,5 раза по сравнению с покрытием полученным седиментационным способом. Предлагаемый способ также позволил увеличить скорость образования КЭП в 2–3 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сайфуллин Р.С. Комбинированные электрохимические покрытия и материалы. – М.: Химия, 1972. – 170 с. 2. Антропов Л.И., Лебединский Ю.Н. Композиционные электрохимические покрытия и материалы. – Кисв: Техника, 1986. – 199 с. 3. Сайфуллин Р.С. Неорганические композиционные покрытия и материалы. – М.: Химия, 1982. – 296 с.

УДК 621.83.06:622.248.13

Р.М. Игнатицев, Д.М. Макаревич, М.Е. Лустенков

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗНАШИВАНИЯ СЕПАРАТОРОВ СИНУСОЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ШАРИКОВЫХ РЕДУКТОРОВ

*Могилевский государственный технический университет
Могилев, Беларусь*

Продолжают оставаться актуальными работы по созданию новых видов передач, несмотря на достижения в теории и практике зубчатых передач. Особый интерес представляют планетарные синусоцилиндрические шариковые передачи, в которых тела качения перемещаются по замкнутым периодическим дорожкам, выполненным на внутренней и наружной цилиндрических поверхностях, и вдоль прорезей сепаратора. Из трех звеньев (внутренняя втулка, наружная втулка и сепаратор) одно звено является ведущим, другое – заторможенным, а третье – ведомым. Передаточное отношение таких передач зависит от числа периодов периодических дорожек и от кинематической схемы.

Синусоцилиндрические шариковые передачи обладают повышенной несущей способностью, высокой ремонтпригодностью и высокими кинематическими возможностями [1].

В добывающей промышленности, при геологоразведочном бурении, бурении на нефть и газ, где максимальные габариты редуктора ограничены диаметральными размерами скважины, целесообразно применять именно такие передачи, так как, в отличие от зубчатых передач, передаточное отношение у них не зависит непосредственно

от диаметральных размеров, что является в этом случае их основным преимуществом. Применение подобных передач оправдано также для создания разнонаправленного вращения ведущего и ведомого валов в механизмах для отворачивания резьб, гайковертах и т. п. Так, в МГТУ в 1998 году совместно с Ивано-Франковским Государственным техническим университетом нефти и газа (Украина) было создано устройство для развинчивания бурильных труб (УРБТ), которое применяется для ликвидации аварий при бурении скважин. Целью данной работы является обеспечение работоспособности устройства при заданных условиях работы.

При тяжелом режиме нагружения наиболее распространенная причина выхода из строя синусошариковых редукторов является заклинивание шарика, которое происходит при значительном износе прорезей водила (сепаратора). В связи с этим проводились исследования процесса изнашивания сепаратора с использованием метода планирования эксперимента [2], который позволяет значительно повысить эффективность исследований.

Из большого числа параметров, оказывающих влияние на процесс износа, были выбраны твердость поверхности изнашиваемой детали (X_1), нагрузка (крутящий момент на ведомом валу) (X_2) и время работы зацепления (число нагружений) (X_3).

Указанные параметры удовлетворяют требованиям управляемости, однозначности, совместимости, а также могут быть определены операционально. Это позволяет использовать данные параметры в качестве факторов, произвести факторное планирование эксперимента и получить математическую модель процесса изнашивания сепаратора вдоль его прорезей.

Ввиду того, что для физической интерпретации математической модели необходима информация об эффектах взаимодействия факторов, при нахождении коэффициентов уравнения регрессии был реализован полный факторный эксперимент 2^3 , условия проведения которого представлены в табл. 1.

Таблица 1

Условия проведения многофакторного эксперимента по исследованию износа сепаратора вдоль его прорезей

| Факторы | Уровни | |
|---|----------------|-----------------|
| | Нижний уровень | Верхний уровень |
| Твердость рабочей поверхности, HRC, X_1 | 45 | 60 |
| Нагрузка (крутящий момент), Нм, X_2 | 150 | 450 |
| Время работы, час., X_3 | 1 | 3 |

В качестве функции отклика был принят размерный износ сепаратора у средних прорези, который определяет заклинивание шарика и потерю работоспособности редуктора. Измерения проводились индикаторным нутромером с точностью 0,01 мм. Объектом экспериментального исследования являлась синусошариковая секция с па-

раметрами: передаточное отношение $u = 6$, число шариков в секции – 5, диаметр шарика (ширина прорези сепаратора) – 13 мм, максимальный диаметр редукторной секции – 72 мм.

В качестве исходного уравнения поверхности отклика был использован полином

$$y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{123}X_1X_2X_3. \quad (1)$$

После определения коэффициентов в соответствии с методикой, приведенной в [2], и подстановки их значений в выражение (1), было получено следующее уравнение регрессии (y – в мкм):

$$y = 102 - 14X_1 + 41.5X_2 + 49.5X_3 - 1.5X_1X_2 - 5.5X_1X_3 + 21X_2X_3 - 3X_1X_2X_3. \quad (2)$$

Проверка по критерию Кохрена доказала равнозначность экспериментов. При проверке значимости коэффициентов был использован критерий Стьюдента. Результаты данной проверки показали, что не значимы коэффициенты b_{12} и b_{123} . Усеченная модель примет вид

$$y = 102 - 14X_1 + 41.5X_2 + 49.5X_3 - 5.5X_1X_3 + 21X_2X_3. \quad (3)$$

Проверка по критерию Фишера подтвердила адекватность усеченного уравнения регрессии (3) результатам эксперимента.

Степень влияния каждого из рассматриваемых факторов на износ водила можно количественно оценить по величине соответствующих коэффициентов регрессии. В исследуемой области факторного пространства наибольший вклад в износ водила вносит фактор X_3 – время работы редуктора (число нагружений). Значения коэффициентов $b_{13} = -5.5$ и $b_{23} = 21$ свидетельствуют о том, что размерный износ водила не является линейной функцией твердости, нагрузки и времени. Вклад, вносимый фактором X_1 зависит от уровней, на котором находятся факторы X_1 и X_2 . С увеличением твердости рабочих поверхностей водила или снижением нагрузки на зацепление, уменьшается степень воздействия длительности эксплуатации на величину износа. С целью снижения износа и повышения ресурса работы, при изготовлении деталей СШР, сепараторы необходимо закалять до 50 -54 HRC.

ЛИТЕРАТУРА

1. Игнатишев Р.М. Синусошариковые редукторы. – Мн.: Выш. шк., 1983. – 107 с.
2. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1971. – 279 с.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ЗУБЬЕВ ПРИ ОБРАБОТКЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ШЕСТЕРЕН

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Повышение качества зубчатых передач может быть достигнуто при соблюдении следующих условий при их проектировании и изготовлении:

1. Требования к качеству поверхностей шестерен должны устанавливаться исходя из условий эксплуатации передач.

2. Маршруты обработки зубчатых колес, а также условия выполнения каждой операции должны выбираться с учетом пооперационного изменения параметров качества поверхности и их формирования на отдельных операциях.

Для решения 2-й задачи применительно к цилиндрическим зубчатым колесам нами разработаны соответствующие методики и рекомендации по выбору маршрутов обработки зубчатых колес и требований к качеству их рабочих поверхностей на промежуточных операциях с учетом обеспечения требуемого качества готовых деталей [1].

Указанные рекомендации должны использоваться при проектировании процессов изготовления шестерен, а методики – при экспериментальной отладке этих процессов.

Отладка техпроцессов – необходимый этап организации производства новой продукции, так как она позволяет приспособить разработанную технологию к конкретным производственным условиям. Но до настоящего времени отсутствует обоснованная методика выполнения этого этапа, который обычно осуществляется интуитивным методом, что снижает качество, повышает стоимость продукции и увеличивает сроки ее освоения.

Предлагаемые нами методы изучения пооперационного изменения параметров качества поверхностей зубьев с учетом влияния на эти параметры условий обработки на разных операциях обеспечивают высокую точность моделирования указанных взаимосвязей ($\epsilon_{cp} = 1-30\%$, где ϵ_{cp} – средняя относительная ошибка уравнения связи).

Данные взаимосвязи могут быть описаны полиномом первой степени (1), а предлагаемые методы успешно использоваться при отладке техпроцессов изготовления цилиндрических шестерен,

$$\bar{y} = a + b\bar{x} \quad (1)$$

В рамках данной задачи были выполнены экспериментальные исследования пооперационного изменения 4-х параметров качества поверхности зубьев (R_z , H_v , s_1 , s_2)

цилиндрических шестерен тракторов и автомобилей ($m = 2-5$ мм; $z = 23-51$; материалы колес – стали 40Х, 25ХГТ, 20ХН3А) после шести операций обработки зубьев в производственных условиях Минских заводов шестерен и автомобильного. Были рассмотрены такие операции обработки шестерен как зубофрезерование червячной фрезой, шевингование, цементация и нитроцементация в безмуфельных агрегатах, зубообкатка, зубохонингование, зубошлифование червячным и коническим кругами.

Исследованные детали обработаны на современном оборудовании с использованием современной оснастки и оптимальных режимов резания. Была обеспечена возможность измерения на одних и тех же зубьях (или вырезанных сегментах зубьев) и сопоставления параметров качества поверхности зубьев до и после данной операции. Параметр шероховатости R_a измеряли на профилографе-профилометре, микротвердость H_{μ} – с помощью микротвердомеров ПМТ-3 и ПМТ-4; остаточные напряжения 1 и 2 родов σ_1 и σ_2 – рентгенографическим методом на установке ДРОН-05.

Для каждой операции обработки, материала колеса, характеристики качества поверхности зубьев были исследованы не менее 3-х – 5-ти партий колес с числом измерений в партии не менее 50.

Предварительно, на основании анализа законов распределения указанных параметров качества на перечисленных выше операциях оценки стационарности и эргодичности изученных процессов было показано, что моделирование этих процессов можно осуществлять статистическими методами по результатам одной выборки достаточной продолжительности.

Было установлено, что для исследованных параметров качества и операций их обработки имеет место технологическая наследственность (с предыдущих операций наследуется от 10 до 77% дисперсий изученных параметров).

Значения параметров качества, характеристики пооперационных взаимосвязей в рассмотренных условиях для одного процесса изменялись в пределах 70–100%. Поэтому указанные взаимосвязи наиболее точно можно описать лишь статистическими методами по результатам эксперимента.

Данные исследования позволили предложить методики выбора маршрута обработки цилиндрических зубчатых колес и требования к их качеству на промежуточных операциях.

Прислемым с технической точки зрения можно считать такой процесс обработки шестерни, который обеспечивает для каждого из показателей качества зубчатого колеса, нормируемых по чертежу готовой детали, соблюдение условия

$$K_{\text{изм. об.}} \leq \prod_1^m K_{\text{изм. } i} \quad (2)$$

где $K_{\text{изм. об.}}$ – общий коэффициент изменения параметра качества при реализации технологического процесса; $K_{\text{изм. } i}$ – коэффициент изменения данного параметра на i -й операции; m – число операций технологического процесса.

$$K_{\text{итм.об.}} = X_{\text{дон.мах.заг.}} / Y_{\text{дон.мах.гол.}}, \quad (3)$$

где $X_{\text{дон.мах.заг.}}$ и $Y_{\text{дон.мах.гол.}}$ – максимально допустимые значения данной характеристики качества поверхности зубьев после 1-ой операции зубообработки шестерни и у готовой детали по чертежу.

$$K_{\text{итм.и}} = X_{(i-1)\text{мах.}} / Y_{i\text{мах.}}, \quad (4)$$

где $X_{(i-1)\text{мах.}}$ и $Y_{i\text{мах.}}$ – максимально допустимые значения параметров качества на предшествующей и выполняемой операциях техпроцесса.

Для всех изученных параметров качества и процессов изготовления зубчатых колес найдены значения $K_{\text{итм.и}}$, средние значения которых приведены в табл. 1.

В табл.2 в качестве примера приведены полученные нами значения R_a и НВ зубьев цилиндрических шестерен перед шевингованием, которые обеспечивают необходимые значения этих параметров после шевингования.

Подобные таблицы составлены нами также для операций ХТО (нитроцементация), зубохонингования, обкатки и зубошлифования для всех изученных параметров качества поверхности зубьев.

При проектировании техпроцесса с помощью табл.1 выбирается маршрут обработки зубьев, а с помощью табл. 2 – требования к качеству поверхности зубьев на промежуточных операциях обработки зубьев.

Эти требования могут выбираться также и с помощью табл.1 по формуле (5), начиная с последней операции обработки зубьев,

$$X_{(i-1)\text{мах.}} = Y_{i\text{мах.}} \cdot K_{\text{итм.и}}. \quad (5)$$

где все обозначения согласно формулы (4).

При отладке техпроцесса необходимо обработать одну-две партии шестерен по спроектированному маршруту, рассчитать для каждой операции коэффициенты a и b уравнения (1), а также значения $K_{\text{итм.и}}$ и по методике [2] рассчитать уточненные значения параметров качества поверхности зубьев на промежуточных операциях их обработки.

В реальных условиях необходимо учитывать изменения всех, нормируемых по чертежу готовой шестерни, параметров качества зубьев.

Рассмотрим пример выбора маршрута обработки зубьев и требований к параметрам качества их поверхностей на промежуточных операциях по предложенной нами методике, ограничиваясь задачами обеспечения требуемых значений параметров качества поверхности зубьев R_a и НВ (H_{μ}).

Таблица 1

Усредненные значения коэффициентов изменения $K_{изм,i}$ параметров качества поверхности зубьев цилиндрических зубчатых колес при их изготовлении

| Последовательно выполняемые операции | Материалы зубчатых колес | Параметры качества поверхности | | | |
|---|--------------------------|--------------------------------|-------------|------------------|------------------|
| | | R_a , мкм | H_v , МПа | σ_1 , МПа | σ_2 , МПа |
| Зубофрезерование червячной фрезой – шевингование на жесткой оправке | 40X | 2,53 | 1,24 | -0,82 | 1,25 |
| | 25XГТ | 1,99 | 1,17 | -2,20 | 1,74 |
| | 20ХН3А | 2,29 | 1,12 | -1,62 | 1,69 |
| Шевингование – ХТО (нитроцементация) | 25XГТ | 0,93 | 0,23 | 0,37 | 0,23 |
| | 20ХН3А | 0,90 | 0,22 | 0,23 | 0,25 |
| ХТО – обкатка зубьев | 25XГТ | 1,49 | 0,96 | 0,98 | 0,97 |
| | 20ХН3А | 1,56 | 0,98 | 0,96 | 0,97 |
| ХТО – зубохонингование | 25XГТ | 1,38 | 1,06 | 1,65 | 1,17 |
| | 20ХН3А | 1,56 | 1,09 | 1,54 | 1,26 |
| ХТО – зубошлифование червячным кругом | 25XГТ | 2,90 | 0,90 | -0,80 | 1,04 |
| | 20ХН3А | 2,98 | 0,95 | -0,90 | 1,03 |
| ХТО – зубошлифование коническим кругом | 25XГТ | 2,98 | 0,96 | -0,70 | 0,99 |
| | 20ХН3А | 3,10 | 0,98 | -0,75 | 0,96 |

Примечание: R_a – параметр шероховатости поверхности, мкм; H_v – микротвердость поверхности, МПа; σ_1 и σ_2 – остаточные напряжения 1 и 2 рода, МПа.

Таблица 2

Допустимые значения показателей качества поверхностей зубьев шестерен перед шевингованием, обеспечивающие требуемые значения показателей качества после шевингования

| Материал зубчатых колес | Степень точности зубчатых колес после шевингования по ГОСТ 1643-81 | | | Требуемые значения твердости поверхностей зубьев после шевингования, НВ | | |
|-------------------------|--|------------------|---------------------|---|---------|---------|
| | 7 | 8 | 9 | Материал зубчатого колеса | | |
| | Требуемая шероховатость R_a поверхностей зубчатого колеса после шевингования | | | 25XГТ | 20ХН3А | 40X |
| | 2,5 | 3,2 | 5,0 | 158-211 | 143-217 | 177-261 |
| 40X | (6,3) 4,3-8,3 | (8,0) 6-10 | (12,6) 10,6-14,6 | | | 226-312 |
| 25XГТ | (5) 3,5-6,5 | (6,3) 4,3-8,3 | (10) 8-12 | 184-246 | | |
| 20ХН3А | (5,7) 3,9-7,5 | (7,3) 5,3-9,3 | (11,5) 9,5-13,5 | | 156-226 | |

В табл. 2 меньшие значения параметров качества приведены для плохого состояния оборудования, большие – для хорошего и средние (в скобках) – для среднего состояния. Оценка состояния оборудования может быть выполнена с помощью коэффициента точности K_T [4]. Для хорошего состояния $K_T \leq 0,7$, для среднего – $K_T \leq 0,8$, для плохого $K_T \leq 0,9$.

Дано. Необходимо спроектировать техпроцесс обработки одновенцово цилиндрической прямозубой шестерни $m = 3$ мм, 7-ой степени точности, материал – сталь 25ХГТ. При зубофрезеровании может быть обеспечено $R_a = 6,3$ мкм и НВ = 156–226 (ср. знач. 191). По чертежу готовой детали необходимо обеспечить $R_a = 2,5$ мкм и $H_\mu = 6490$ –8679 МПа (ср. знач. 7580 МПа), что соответствует HRC₃ = 56–63 (ср. знач. 60). Состояние оборудования среднее.

Решение:

1. Определяем значения общего коэффициента изменения параметров качества.

Для $R_a - K_{изм.об} = 6,3/2,5 = 2,52$; для НВ – $K_{изм.об} = 191/758 = 0,25$.

2. С помощью таблицы 1 выбираем маршрут обработки зубьев по условию (2) для обеспечения каждого из рассматриваемых параметров качества поверхности зубьев.

Для $R_a - 2,52 < 1,99 \cdot 0,93 \cdot 1,38 = 2,55$,

где 1,99 – $K_{изм.1}$ при шевинговании; 0,93 – $K_{изм.1}$ при ХТО; 1,38 – $K_{изм.1}$ при зубохонинговании.

Для НВ – $0,25 \leq 1,17 \cdot 0,23 \cdot 0,96 = 0,258$,

где 1,17 – $K_{изм.1}$ при шевинговании; 0,23 – $K_{изм.1}$ при ХТО; 0,96 – $K_{изм.1}$ при обкатке зубьев; (1,06 – $K_{изм.1}$ при зубохонинговании).

3. Выбор общего маршрута обработки зубьев шестерни для обеспечения выбранных параметров качества.

Как видно из п.2 маршрут, найденный для параметра R_a , обеспечивает и требования к НВ, хотя для обеспечения только значения НВ достаточно выполнить операцию обкатки зубьев.

Таким образом, принимаем следующий маршрут обработки шестерни: зубофрезерование, шевингование, ХТО и зубохонингование.

Значения параметров качества поверхности зубьев на промежуточных операциях их обработки следующие.

Для параметра R_a :

– после зубохонингования $R_a = 2,5$ мкм (по чертежу детали);

– после ХТО $R_a = 2,5 \cdot 1,38 = 3,5$ мкм;

– после шевингования $R_a = 3,5 \cdot 0,93 = 3,2$ мкм;

– после зубофрезерования $R_a = 3,2 \cdot 1,99 = 6,3$ мкм.

Для параметра НВ (H_μ):

– после зубохонингования $H_\mu = (6490 - 8670)$ МПа (по чертежу детали);

– после ХТО $H_\mu = (6490 - 8670) \cdot 1,06 = (6879 - 9190)$ МПа;

- после шевингования $HV = (6879 - 9190) \cdot 0,23 = 158 - 211$;
- после зубофрезерования $HV = (158 - 211) \cdot 1,17 = 184 - 246$.

ЛИТЕРАТУРА

1. СТП 930-1379-90. Технологическая подготовка производства. Выбор и обеспечение основных характеристик качества поверхности зубьев цилиндрических зубчатых колес на различных операциях их изготовления. Разработчики Кане М.М., Медведев А.И. Изд-во МЗШ, 1999. – 84 с. 2. Кане М.М. Выбор рациональной точности цилиндрических зубчатых колес на различных операциях их обработки // Вестник машиностроения. – 1996. – № 8. – С. 3–8. 3. Кане М.М., Медведев А.И. Изменение параметров качества поверхности зубьев цилиндрических зубчатых колес на различных операциях их изготовления // Вестник машиностроения. – 1997. – № 7. – С. 3–7. 4. Технологические системы. Методы оценки надежности по параметрам качества изготавливаемой продукции. ГОСТ 27.202-83. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 50 с.

УДК 621.791

Л.М. Кожуро, Н.Ф. Лугаков, В.С. Точило, М.Л. Хейфец

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКИ ПОГРУЖЕНИЕМ В РАСПЛАВ

Белорусский государственный аграрный технический университет,

Минск, Беларусь,

Полоцкий государственный университет,

Новополоцк, Беларусь

Сущность процесса индукционной наплавки погружением заключается в том, что наплавляемый металл затвердевает на очищенной от оксидной пленки поверхности заготовки, погруженной в расплав этого металла [1]. Процесс применяется для наращивания поверхностных слоев заготовки. Вследствии разницы температур расплава и заготовки, задающей начальные условия процесса, локальный объем расплава, контактирующий с поверхностью заготовки и определяемый граничными условиями, охлаждается до затвердевания [2]. После кратковременной выдержки заготовку извлекают и на ее поверхности получают слой присадочного металла.

При индукционной наплавке погружением в расплав целесообразно формировать покрытие толщиной до 4 мм. Для этого можно рекомендовать следующий режим: температура стальной детали перед наплавкой – 850–900° С; температура расплава – 1500° С; время выдержки обрабатываемой детали в расплаве – 1,5–2,5 с. Исследования металлопокрытий стальных образцов сплавом ФБХ показывают, что для образ-

цов, активация которых осуществлялась при температуре до 800°C , в зоне сплавления, а также непосредственно в самих металлопокрытиях имеются включения флюса, раковины. Начиная с температуры активации 850°C и выше, независимо от перегрева расплава, при индукционной наплавке обеспечивается монолитное соединение наплавленного сплава с основой. Металлопокрытия при указанных температурах активации получаются качественными, без раковин и пор. Однако, как показали результаты экспериментов, когда перегрев расплава не превышал $15\text{--}20^{\circ}\text{C}$, слой затвердевшего сплава формировался неравномерно. Покрытия по толщине получались 3 мм и более, а их внешняя поверхность была неровной. При увеличении перегрева расплава до $25\text{--}50^{\circ}\text{C}$, наплавленный слой присадочного износостойкого сплава копировал поверхность образца. Внешняя поверхность наплавленного слоя была гладкой, а его толщина достаточно равномерной и составляла $1,8\text{--}2,3\text{ мм}$ на сторону.

Толщина слоя затвердевшего сплава зависит не только от исходных значений температуры активации и перегрева расплава, но также от продолжительности пребывания образца в расплаве. При нахождении образца в расплаве более $2,0\text{--}2,5\text{ с}$, тонкие части его перегреваются, и на их поверхностях оплавляется затвердевший слой. Полное покрытие всех поверхностей образцов присадочным сплавом достигается при условии пребывания образца в расплаве в течение $0,8\text{--}1,4\text{ с}$. Толщина затвердевшего слоя при этом составляет $1,5\text{--}2,0\text{ мм}$ на сторону. Исследования зоны сплавления показывают, что наплавленный слой имеет монолитное соединение с металлом (рис. 1, а).

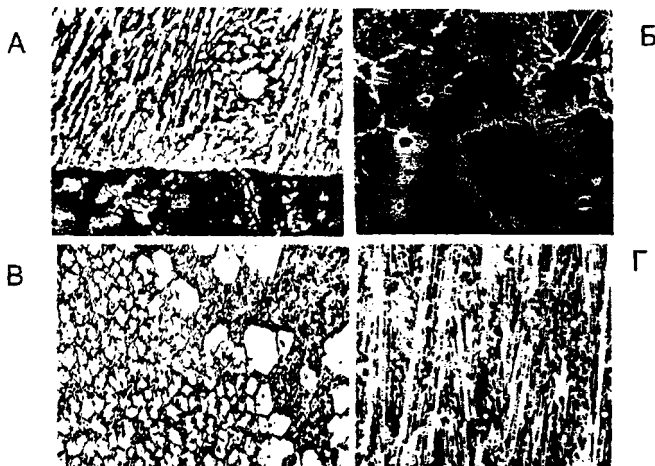


Рис. 1 Микроструктуры зоны сплавления (а) при индукционной наплавке погружением в расплав ФБХ-6-2 (1200), основного материала детали (б), наплавленного сплава со стороны внешней поверхности покрытия (в) и в плоскости, перпендикулярной поверхности тепловода (г)

Монолитность соединения подтверждается наличием диффузии легирующих элементов из наплавленного сплава в основной металл, о чем свидетельствуют результаты микрорентгеноспектрального анализа (рис.2). Характер распределения концентрации хрома свидетельствует о протекании диффузионных процессов, что невозможно было бы без наличия монолитного соединения. О наличии монолитного соединения при индукционной наплавке погружением в расплав свидетельствует также высокая прочность сцепления между основным металлом и покрытием. Такие покрытия удовлетворяют требованиям, предъявляемым к наплавленному сплаву, предназначенному для работы в условиях ударно-абразивного изнашивания.

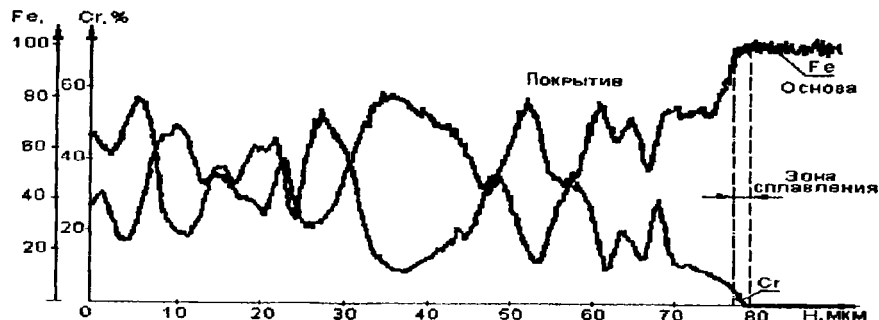


Рис. 2 Зависимости распределения концентрации Cr и Fe в поверхностном слое при индукционной наплавке погружением в расплав

Микроструктура основного металла – стали 45 после наплавки – ферритно-перлитная, крупнозернистая (рис. 1, б). Это является следствием резкого перегрева основного металла и выдержки его при этой температуре. Так, с 850...900 °С при активации, основной металл затем нагревается до температуры 1400 °С за 1,0...1,5с.

При последующем медленном охлаждении на воздухе, наблюдается значительный рост зерен. Такая структура основного металла нежелательна, так как имеет низкую твердость – 30 HRC и износостойкость.

Микроструктура наплавленного сплава при охлаждении на воздухе состоит из крупных первичных карбидов хрома и матрицы, которая, в свою очередь, состоит из ледебурита с включениями остаточного аустенита (рис. 1, в, г). Для микроструктуры наплавленного сплава характерна крупнозернистость первичных карбидов, продолговатая их форма и ориентация перпендикулярная к наплавляемой поверхности. Последнее можно объяснить наличием направленного тепловода во время затвердевания слоя присадочного сплава (рис. 1, г). Карбиды в плоскости, параллельной поверхности тепловода, имеют форму многогранников, они сравнительно равномерно

распределены по поверхности и цементированы в пластичной матрице (рис. 1, в). Такое строение и твердость наплавленного слоя 53–55 HRC являются предпочтительными применительно к деталям, работающим в абразивной среде.

Твердость наплавленного сплава лишь косвенно характеризует износостойкость материала при взаимодействии его с абразивной средой. Возрастание твердости увеличивает износостойкость хромистых чугунов, но для них возможен рост твердости только матрицы, так как первичные карбиды хрома в процессе термообработки не претерпевают структурных изменений. Значительное повышение твердости можно получить путем превращения аустенита матрицы в мартенсит или бейнит, что возможно при значительных переохлаждениях и больших скоростях охлаждения, при закалке.

Для определения возможности управления формированием структуры основного материала путем последующей термообработки проведены исследования влияния различных видов термообработки: нормализации, закалки в масло и закалки в воду.

При нормализации образцы нагревались до 850° С, выдерживались 15 минут и охлаждались на воздухе. После нормализации получена ферритно-перлитная структура с зерном средней величины (рис. 3, а). Твердость материала – 28 HRC неудовлетворительна для деталей, работающих в условиях абразивного изнашивания.

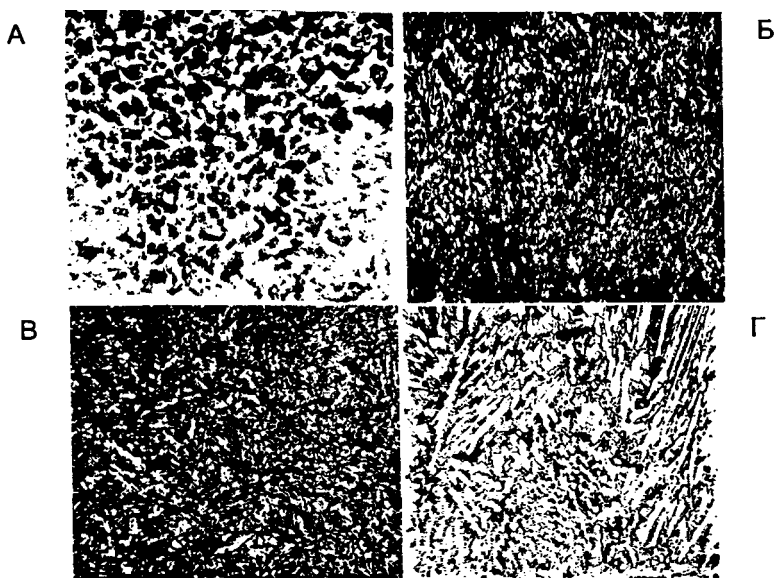


Рис. 3 Микроструктуры основного металла детали ($\times 500$) после нормализации (а), закалки в масло (б), закалки в воду (в) и наплавленного сплава ($\times 500$) после подсуживания на воздухе и закалки в воду (г)

При закалке образцы нагревались до температуры 850 °С и охлаждались в веретенном масле до температуры 20 °С. Структура основного материала после закалки в масло – троостомартенсит, обладает достаточной твердостью 51 HRC и износостойкостью (рис. 3, б). Однако закалка в масло сопровождается высокими производственными издержками и поэтому данный вид термообработки технологически мало применим.

Технологически наиболее приемлема закалка в воду, непосредственно после наплавки и подстуживания на воздухе до температуры закалки. Закалка образцов производилась после подстуживания с температуры наплавки (1500 °С) до температуры закалки (850...900 °С) охлаждением в воду с температурой 20 °С. Структура основного металла представляет собой мартенсит с участками троостита (рис. 3, в). Появление участков троостита при закалке в воду объясняется снижением скорости охлаждения за счет низкой теплопроводности наплавленного слоя (высоколегированного чугуна) и обеспечивает достаточную вязкость материала. Такая структура твердостью 54 HRC наиболее благоприятная по условиям износостойкости. Состояние структуры наплавленного металла не изменяется, структура остается ледебуритной но более мелкозернистой с избытком мелких карбидов (рис. 3, г). Твердость покрытия 58 HRC.

Исследование микротвердости фазовых составляющих микроструктуры наплавленного металла показало следующее: микротвердость карбидной фазы не зависит от среды охлаждения и составляет 14500 Н/мм², микротвердость матрицы при охлаждении образца на воздухе составляет 3000- 4000 Н/мм², при охлаждении в воду – 5700- 6500 Н/мм².

Термообработка наплавленных образцов с подстуживанием до температуры 850–900° С с закалкой в воду дает возможность получить наиболее благоприятную по условиям износостойкости структуру основного и наплавленного металла. Согласно экспериментальным исследованиям скорость охлаждения детали на воздухе в интервале температур 850–900° С равна 13 град/с, а скорость ее охлаждения в воде с температурой 20° С равна 110 град/с. На основании экспериментальных данных определено время подстуживания до температуры закалки 850–900° С равное 40–45 с.

Результаты, полученные при исследовании индукционной наплавки погружением в расплав показывают, что начальные и граничные условия процесса взаимосвязаны и влияют на конечный результат, так размеры зерен и их ориентация относительно поверхностей теплоотвода, формирующиеся при скоростном охлаждении после наплавки могут быть изменены в результате термической обработки; в процессе скоростной термообработки наблюдается изменение структуры матрицы материала покрытия, при этом происходит наследование твердых включений карбидной фазы вне зависимости от температуры закалки и среды охлаждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Индукционная наплавка твердых сплавов/ В.Н.Ткачев, Б.М.Фиштейн, Н.В.Казинцев и др. – Москва: Машиностроение, 1970.–184 с.
2. Теоретические основы

УДК 621.923

Г.П. Кривко

МОДУЛЬНЫЙ ПРИНЦИП АНАЛИЗА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Повышение эксплуатационных свойств деталей за счет совершенствования технологических процессов их обработки является неотъемлемой частью технического прогресса. Надежность и долговечность деталей во многом определяется состоянием их поверхностного слоя, который формируется на отдельных операциях – модулях на протяжении всего цикла обработки [1.2].

В целом нами определен философский подход к анализу и совершенствованию технологических процессов механической обработки деталей исходя из принципов познания явлений от частного к общему и наоборот. В нашем случае частным является отдельная операция, назовем ее модулем, общим является технологический процесс обработки конкретной детали.

В задачу исследования входило установление пооперационного копирования отдельных погрешностей обрабатываемых поверхностей роликов, наружных и внутренних колец роликовых двухрядных сферических подшипников. На основании произведенных исследований были предложены эскизные проекты перспективных технологических процессов обработки вышеуказанных деталей с последующей разработкой оригинальных альбомов.

При обработке роликов учитывались динамические характеристики станков с помощью комплекта тензометрической аппаратуры, для измерения вибраций отдельных узлов станков использовался комплект приборов К001. Бочкообразные ролики закаливались после токарной обработки до твердости HRC 62...65 по установленной на Минском подшипниковом заводе технологии. После закалки поверхность качения роликов подвергалась черновому бесцентровому шлифованию методом “напроход”, затем ролики проходили предварительное, чистовое и окончательное шлифование.

Черновое шлифование проводилось на станке СБШ-01. Характеристика шлифующего круга ПП 500 x 63 x 305 24А 25 СТ1К7, $v_{кр} = 31$ м/с. Предварительное и чистовое шлифование проводилось на станках модели 3180, ВШ241 методом вреза-

ния. Для первого прохода врезного шлифования применялся шлифовальный круг ПП 500 x 25 x 305 14A16 СТ2К8, $v_{кр} = 27,5$ м/с. Ведущий круг с частотой вращения – 140 мин⁻¹. Второй чистовой проход проводился на станке модели ВШ-241, шлифовальный круг ПП500 x 25 x 305 14A16СТ2К8; ведущий – 14A16ТВ, $v_{кр} = 35$ м/с. Окончательное шлифование проводилось на станке ВШ-241, шлифовальный круг ПП 50 x 25 x 350 14A10СТ2К8; ведущий – 14A10ТВ, $v_{кр} = 47$ м/с.

На бочкообразных роликах изменялись: овальность, гранность, биение сферы ролика относительно базового торца, волнистость и шероховатость. С целью установления степени влияния различных технологических факторов на формирование геометрических показателей качества роликов серия опытов была осуществлена по методу многофакторного планирования экспериментов экспериментальные данные были обработаны на ЭВМ и получены следующие зависимости для отдельных проходов:

I проход:

$$H_r = 9,97 + 0,13 H_0 + 0,22 C_m;$$

$$C_m = 23,6 + 0,23 P - 0,09 \Pi - 0,18 H_r + 0,54 C_{m,i-1} - 7 R_a$$

II проход:

$$H_r = 24,93 - 1,35 h_n + 0,29 H_{r,i-1} + 0,14 H_0 - 0,64 P;$$

$$H_0 = 1,68 - 0,66 h_n - 0,01 H_r;$$

$$C_m = 1,62 - 0,24 C_m + 0,41 P - 2,66 \cdot H_n;$$

$$R_a = 0,92 + 0,01 P + 0,34 R_{a,z-1} + 0,03 H_n$$

III проход:

$$H_r = 5,73 + 0,44 H_{дв-х} + 0,25 H_{r,i-1} - 0,06 C_m - 3,7 R_a;$$

$$H_0 = 6,66 + 0,01 n_{в.к} - 0,64 H_r + 0,02 C_m;$$

$$C_m = 0,06 + 0,34 H_{дв-х} - 0,1 H_r + 0,23 C_{m,i-1} - 0,15 P$$

IV проход:

$$H_r = 2,97 - 0,01 n_{в.к} + 0,13 H_{r,i-1} + 0,11 C_m;$$

$$H_0 = 1,28 + 0,21 H_{0,i-1} - 0,6 R_a + 0,15 H_n,$$

где H_r – гранность, мкм; H_0 – овальность, мкм; C_m – смещение радиуса обработанной поверхности ролика относительно базового торца в мкм; P – радиус образующей ролика, мкм; Π – припуск, мм; R_a – шероховатость, мкм; h_n – высота установки ножа, мкм; $H_{дв-х}$ – число двойных ходов шлифовальной бабки в минуту; $n_{в.к}$ – частота вращения ведущего круга, мин⁻¹; H_n – волнистость, мкм; $C_{m,i-1}$, $H_{r,i-1}$; $R_{a,i-1}$, $H_{0,i-1}$ – соответствующие параметры на предыдущих модулях.

После анализа данных по существующему технологическому процессу был предложен эскизный перспективный проект механической обработки роликов (рис. 1).

По аналогичной методике были произведены анализы технологических процессов обработки наружных и внутренних колец роликовых двухрядных сферических колец подшипников и предложены перспективные эскизные процессы данных деталей (рис. 2, 3).

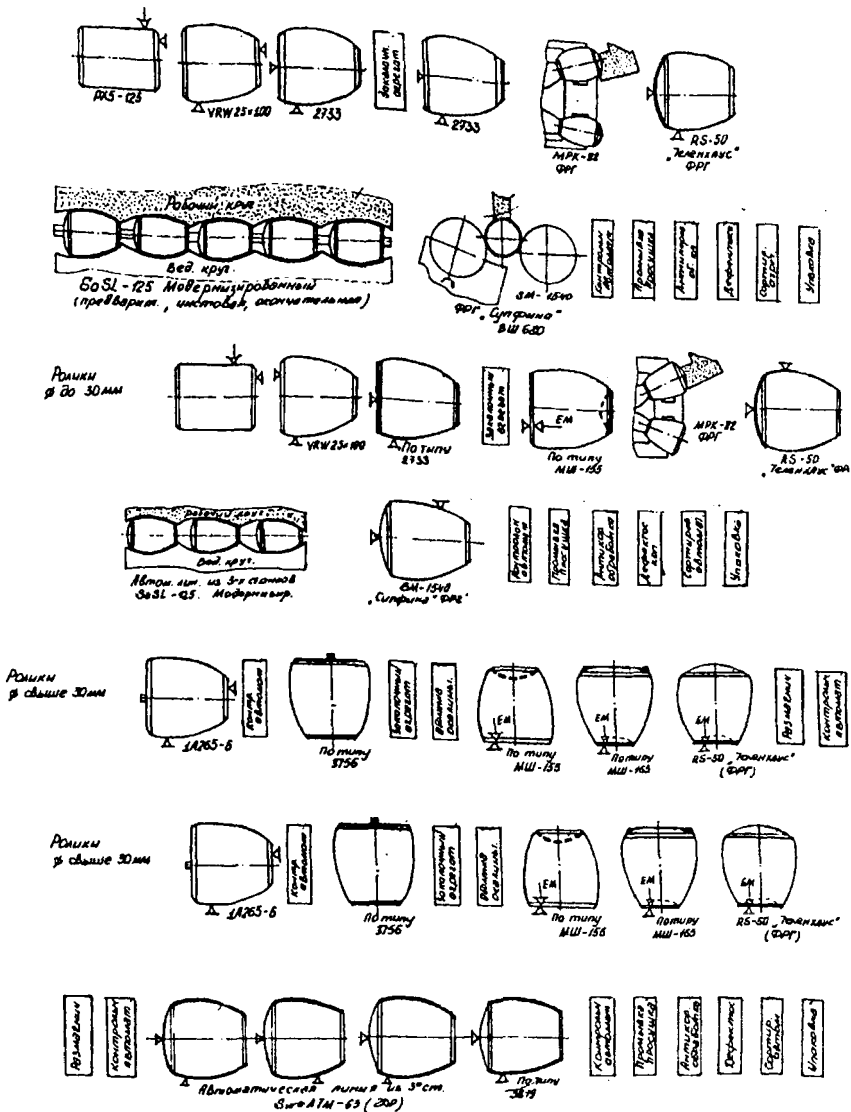


Рис. 1. Перспективный процесс механической обработки бочкообразных роликов роликовых сферических подшипников

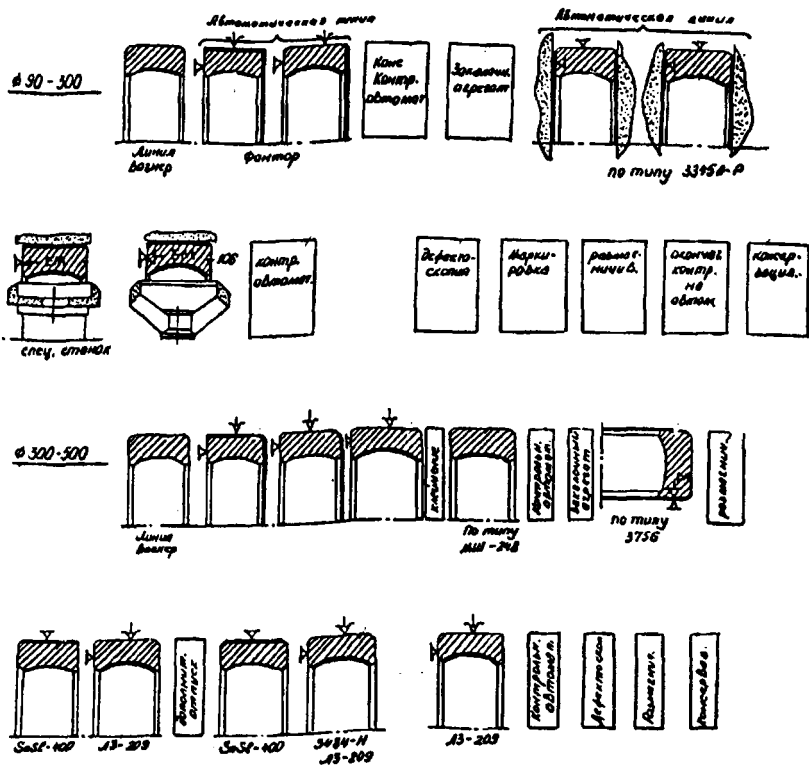


Рис. 2. Перспективный процесс механической обработки наружных колец роликовых сферических подшипников

Заключение. Полученные значения коэффициентов уравнений регрессий для отдельных технологических модулей позволяют установить степень и характер взаимного влияния различных параметров качества друг на друга, а также технологических факторов на выходные параметры качества поверхности при определенной последовательности расположения технологических модулей, представленных в виде технологических эскизов. Это позволяет более наглядно представить технологическую цепочку обработки деталей на всем заводе и более оперативно использовать средства ЭВМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кривко Г.П. Основы совершенствования способов и технологических процессов механической обработки деталей подшипников. – Мн.: Технопринт, 2001. – 219 с.
2. Ящерицын П.И. Технологическая наследственность и эксплуатационные свойства шлифовальных поверхностей. – Мн.: Наука и техника, 1971. – 210 с.

УДК 620.178.162.43

Ж.А.МРОЧЕК, Г.Ф.ШАТУРОВ, И.В.СПАСКИЙ

ПРОГРЕССИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ГИЛЬЗ ЦИЛИНДРОВ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Белорусская государственная политехническая академия

Минск, Беларусь

Институт технологии металлов НАН Беларуси

Могилев, Беларусь

Обработка большинства ответственных деталей машиностроения, работающих на износ, оканчивается такими финишными операциями как хонингование. К таким деталям относятся гильзы цилиндров тракторных и автомобильных двигателей. Повышение долговечности гильз цилиндров двигателей внутреннего сгорания (ДВС) является первоочередной задачей в двигателестроении. Точность изготовления вышеуказанных деталей находится в пределах 6 и 7 квалитета точности. Погрешности геометрии поверхностей не должны превышать 0,01–0,06 мм. Если учесть, что детали представляют собой в большинстве своем тонкостенные втулки, то финишная обработка их рабочих поверхностей пластическим деформированием затруднена. Одновременно повышение в 1,5–3 раза эксплуатационных характеристик гильз цилиндров двигателей и поршневых колец может быть обеспечено путем размерно-чистой обработки их рабочих поверхностей методом ППД с одновременным получением полностью регулярного микрорельефа (ПРМ).

Последовательность технологических операций обработки в процессе получения износостойкого микрорельефа имеет большое значение. Так исследованиями на изнашивание, проведенными на стальных образцах, установлено, что образование квази-регулярного микрорельефа (КРМ) методом виброротационного накатывания (ВРН) на шлифованной и упрочненной поверхностях, по сравнению со шлифованной поверхностью, уменьшает износ соответственно на 27,8 и 86%, при этом в последнем случае на долю предварительного упрочнения обкатыванием приходится 44,4%, а на долю микрорельефа – 41,6% (рис. 1) [1].

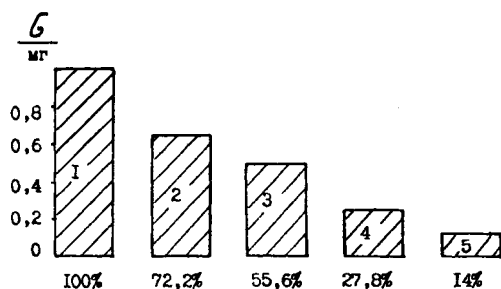


Рис. 1. Диаграммы зависимости изменения массы образцов при испытании на износостойкость от способа обработки поверхности (1 – шлифование; 2 – шлифование, ВРН; 3 – шлифование, обкатывание; 4 – шлифование, ВРН и обкатывание; 5 – шлифование, обкатывание, ВРН; $P = 0,6 \text{ кН}$; $R_u = 0,51\text{--}0,56 \text{ мкм}$; $F_k = 34\%$; материал образцов – сталь 45)

Таким образом, самая оптимальная технология создания микрорельефа будет та, при которой его образование осуществляется на предварительно упрочненной поверхности, что обеспечивает пологость формы микрорельефа при переходе от впадин к выступам.

Одним из методов создания микрорельефа на поверхности является метод импульсно-силового вибронакатывания (ИСВ) [2], при котором осевое или радиальное перемещение деформирующих шаров осуществляется с переменным усилием, выдерживая соотношение

$$\frac{\Delta\tau_0 V \cdot Z}{\pi D} = 1 \pm \Delta, \quad (1)$$

где $\Delta\tau_0$ – время чередования максимального импульса деформирующего усилия; V – скорость перемещения заготовки; z – число заходов канавок микрорельефа, $z = 1/n \Delta\tau_0$; D – диаметр заготовки; Δ – бесконечно малая величина, $\Delta < 1,0$; n – частота вращения заготовки.

Тогда шаг винтовой смазочной канавки будет равен

$$T_{CK} = S \left(\frac{1}{\Delta} + 1 \right), \quad (2)$$

где T_{CK} – шаг винтовой канавки микрорельефа; S – подача инструмента.

Способ импульсно-силового вибронакатывания позволяет предварительно упрочнить поверхность с одновременным последующим образованием периодического микрорельефа с глубиной Δh_k [3] и углом наклона α к вектору скорости обработки

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{S}{\pi D} \left(\frac{1}{\Delta} + 1 \right). \quad (3)$$

Возвратно-поступательные перемещения шара в направлении подачи обеспечивают получение периодического профиля рельефа, намного отличающегося от рабочего профиля деформирующего элемента. В таблице приведены сравнительные данные параметров микронеровностей рельефа после некоторых видов обработки.

Радиус закругления вершин r_B и угол наклона боковых сторон микрорельефа β_{II} влияют на контактную жесткость, время и скорость приработки, толщину масляной пленки и износ. Упрочняющие способы обработки обеспечивают по сравнению со шлифованными на порядок, а виброупрочняющие – на два порядка увеличение радиуса r_B . Получение малых углов β_{II} при больших значениях радиуса r_B определяет пологую, “обтекаемую” форму неровностей, способствующую удержанию масляной пленки на поверхности и повышению износостойкости (табл. 1).

Таблица 1

Геометрические характеристики микрорельефа поверхностей, полученных при различных способах обработки

| Вид обработки | Характеристики поверхности | | | | | | |
|------------------------|----------------------------|-------------|-------------|---------------------|-------------------|--------------------|------------|
| | R_a , мкм | R_z , мкм | r_B , мкм | β_{II} , град | R_B , мм | Δh_k , мкм | b_k , мм |
| Точение | 1,36 | 5,4 | 30 | 12,8 | - | - | - |
| Круглое шлифование | 1,25 | 6,8 | 12 | 8,6 | - | - | - |
| Обкатывание | 0,37 | - | 800 | 4 | - | - | - |
| Вибронакатывание (ИСВ) | 0,22...0,68 | - | 1000...3000 | 0,5...1,0 | $10^2 \dots 10^3$ | 1...6 | 1...10 |

Гильзы цилиндров тракторных двигателей СМД-14, СМД-62 и КАМАЗ-740 изготавливаются из специального чугуна ($C = 3,2-3,5\%$). Заготовкой для гильз являются отливки, полученные методом литья в землю и центробежным способом. Твердость отливки НВ = 130–241.

В процессе обработки по действующей технологии гильза проходит ряд операций, в том числе термообработку внутренней поверхности: закалку ТВЧ до твердости

$HRC_3 = 38-42$ и последующее хонингование зеркала гильзы. Всего гильза проходит четыре хонинговальные операции и еще плюс одну операцию – выборочную хонинговку 20% деталей в партии. Время, необходимое для хонингования зеркала гильзы, составляет 4,8 минуты.

Гильзы цилиндров тракторных двигателей СМД-14, СМД-62 и КАМАЗ-740 изготавливаются из специального чугуна ($C = 3,2-3,5\%$). Заготовкой для гильз являются отливки, полученные методом литья в землю и центробежным способом. Твердость отливки $HB = 130-241$.

В процессе обработки по действующей технологии гильза проходит ряд операций, в том числе термообработку внутренней поверхности: закалку ТВЧ до твердости $HRC_3 = 38-42$ и последующее хонингование зеркала гильзы. Всего гильза проходит четыре хонинговальные операции и еще плюс одну операцию – выборочную хонинговку 20% деталей в партии. Время, необходимое для хонингования зеркала гильзы, составляет 4,8 минуты.

Гильзы цилиндров обрабатывались по серийной и новой технологии, предусматривающей ИСВ внутренней незакаленной поверхности с предварительным упрочнением последующим образованием периодического рельефа ГУ вида. Заготовка гильзы вставлялась во внутрь резиновой диафрагмы и закреплялась в процессе работы воздухом, подаваемым во внутрь корпуса, установленного вместо резцедержателя на суппорте токарного станка ИК62. Это обеспечивало самоустановку заготовки в процессе работы по виброголовке, закрепленной в шпиндель станка. Обработка гильз цилиндров диаметром 120 мм на режимах: $n = 800$ об/мин ($V \approx 5,0$ м/с), $S = 0,21$ мм/об, натяг $i = 0,1-0,12$ мм обеспечила овальность и конусность изготовления гильзы в пределах 0,04–0,05 мм. Перед вибронакатыванием гильзы обрабатывались на расточном станке с погрешностью, не превышающей 0,03 мм и припуском под накатывание равным 0,02–0,03 мм. Шероховатость поверхности после ИСВ составляла $R_a = 0,32-0,68$ мкм. Глубина упрочненного слоя измерялась в трех сечениях по длине гильзы и равна $h = 0,03-0,05$ мм. Микротвердость упрочненного слоя $H_v = 4580-5200$ МПа при исходной $H_v = 2200-3060$ МПа.

Гильзы серийные и обработанные ИСВ были установлены на двигатель, который был испытан в условиях ГСКДБ (г. Харьков) на топливе с содержанием 2,5% присадки АЛП-2 в течение 20 часов. В результате испытаний установлено (рис. 2), что в равных условиях износ серийных гильз цилиндров составил 0,06–0,07 мм, сырых гильз с вибронакаткой 0,02–0,04 мм. Таким образом, износ сырых гильз с вибронакаткой в 2–3 раза меньше износа гильз, изготовленных по серийной технологии.

Износ поршневых компрессионных колец по радиальной толщине при работе в сырой гильзе с вибронакаткой значительно меньше, чем при работе с серийными закаленными гильзами. Так максимальный износ колец, оцениваемый по увеличению зазора в замках, в серийной гильзе составил 1,0 мм, в сырой гильзе с вибронакаткой – 0,55 мм.

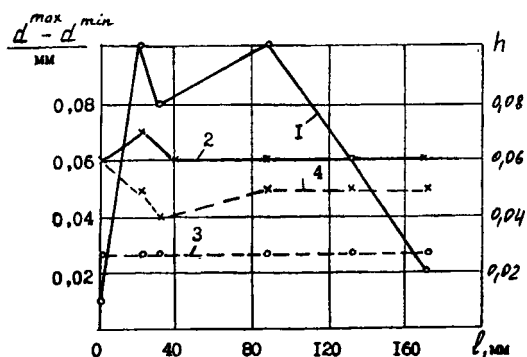


Рис. 2. Величины износа h тракторных гильз после 20 часов испытаний и их распределение по длине для серийных (1) и обработанных импульсно-силовым вибронакатыванием (2) (3 – геометрия серийных и 4 – вибронакатанных до испытаний)

Партия гильз цилиндров отлитых центробежным способом и обработанных методом ИСВ испытывалась на дизельном двигателе КАМАЗ-740 на заводе двигателей (г. Набережные Челны). На рис. 3 представлены профилограммы рабочей поверхности гильзы после 1000-часовых испытаний в районе установа I-го компрессорного кольца в верхней мертвой точке нагруженной стороны.

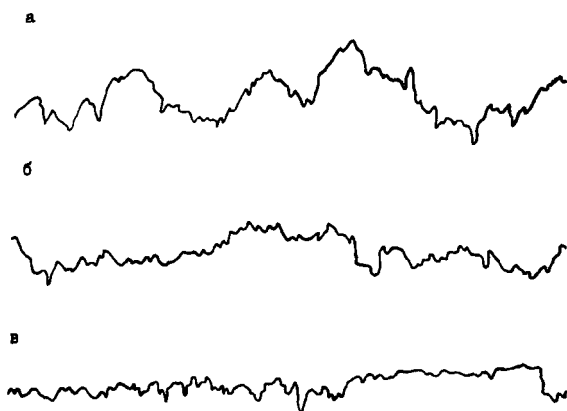


Рис. 3. Профилограммы рабочей поверхности гильзы КАМАЗ-740: а – до испытаний, $R_a = 1,1$ мкм; б – после 50 часов испытаний, $R_a = 0,64$ мкм; в – после 1000-часовых испытаний, $R_a = 0,33$ мкм; вертикальное увеличение – 5000; горизонтальное увеличение – 50

В результате испытаний установлено, что износ гильз цилиндров, обработанных методом ИСВ, после 1000-часовых испытаний по данным микрометража в среднем составляет 10 мкм, что в 2–3 раза меньше износа серийных гильз. Износ поршневых колец, работавших в паре с гильзами, обработанных ИСВ и серийными, одинаковый. Расход масла на угар составляет 0,35% при допустимой норме 0,6%.

Таким образом, новая технология обработки рабочей поверхности гильз цилиндров исключает операции термообработки и хонингования и обеспечивает увеличение их долговечности в 2–3 раза с улучшением эксплуатационных характеристик двигателя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шатуров Г.Ф., Лачев Б.М., Дребушевич И.Я. Повышение износостойкости поверхностей путем нанесения канавочных микро рельефов / Ред. журн. «Известия АН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук», – Минск, 1988. – 12 с. – Деп. в ВИНТИ 02.09.88, № 6830. 2. А.с. 621556 СССР, МКИ В 24 В 39/00. Способ упрочнения поверхности металлических деталей / Г.Ф. Шатуров, В.Н. Подураев (СССР). – № 2345711/25-08; Заявлено 07.04.76; Оpubл. 30.08.78, Бюл. № 32. – 2 с. 3. Лачев Б.М., Шатуров Г.Ф. Связь между параметрами процесса пластического деформирования / Ред. журн. «Известия АН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук», – Минск, 1992. – 19 с. – Деп. в ВИНТИ 25.05.92, № 1727.

УДК 621.357.6

А.К. Новиков, С.С. Клименков

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

*Витебский государственный технологический университет
Витебск, Беларусь*

Применение чистых гальванических покрытий широко известно. Они используются как декоративные покрытия, для защиты металла от коррозии, металлизации диэлектриков и повышения стойкости материала к истиранию. В последнем случае, когда особых требований к внешнему виду покрытий не предъявляется, предпочтительней использовать композиционные гальванические покрытия. Эти покрытия используют для работы в экстремальных условиях: высокие температуры, нагрузка. От чистых гальванических покрытий они отличаются наличием упрочняющей фазы, в качестве которой используют карбиды, оксиды и интерметаллиды, имеющие высокую инертность по отношению к матрице, прочность и температуру плавления. Композиционные гальванические покрытия (КГП) отличаются тем, что высокая проч-

ность достигается за счет структурных факторов: матрица несет нагрузку, а упрочняющая фаза, во-первых, облегчает формирование дислокационной структуры и, во-вторых, стабилизирует структуру при эксплуатации. [1].

Таким образом, можно выделить два основных фактора влияющих на свойства композиционного гальванического покрытия – вид и процентное соотношение применяемых металла матрицы дисперсного материала, а также режимы электролиза. В данной работе было исследовано влияние материала и объемной доли дисперсной фазы, а также режимов электроосаждения материала матрицы на свойства композиционного покрытия.

Было проведено две группы опытов. Цель проведения первой группы опытов – определение влияния вида применяемых керамических частиц (Cu-SiC и Al_2O_3) на износостойкость металлокерамического покрытия, а также исследование влияния на эти же показатели объемной доли керамической фазы в КГП. Для сравнения характеристик износостойкости и твердости полученных КГП использовались чистые гальванические медные и никелевые покрытия и стальная заготовка листового проката.

1. Первая группа опытов

Для определения величины износа материалов использовалась методика, по которой производится трение образца, без смазки, торцом контртела при приложении определенной нагрузки. Величина износа характеризуется массой потерянного материала образца за определенный промежуток времени. Усилие, прикладываемое к контртелу в осевом направлении 60-65 Н, материал контртела – Ст3, подвергнутая закалке. Скорость вращения контртела – $n=180$ об/мин. Взвешивание образцов проводилось через 5 и 10 минут. Данные проведенных опытов представлены на рис. 1.

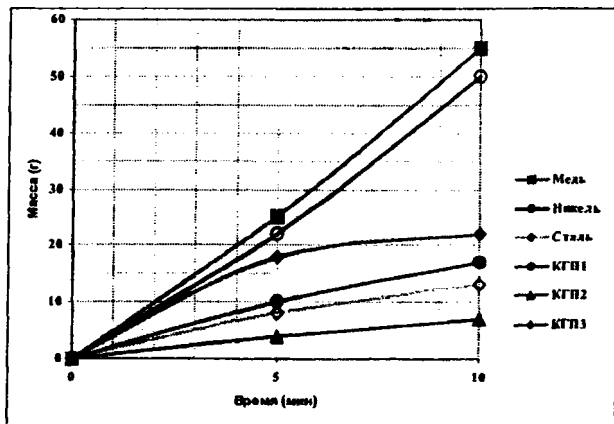


Рис. 1

Как можно видеть, наилучшей износостойкостью обладает металлокерамическое покрытие КГП 2 на основе никеля. Сопротивляемость изнашиванию у этого образца

в пять раз выше, чем у чистого никелевого покрытия, и сопоставима с износостойкостью не термообработанной стальной заготовки. Образец КГП1 на основе меди с включениями частиц SiC в два раза менее стоек, чем образец КГП2, однако превосходит данные по сопротивляемости изнашиванию чистой меди в 3 раза. Отсюда можно сделать вывод, что включение в состав электрохимически осаждаемого металла керамических частиц различного вида приводит к повышению износостойкости в несколько раз. Как известно, в дисперсно-упрочненных материалах характерными препятствиями движению дислокации являются некогерентные матрице тонкодисперсные частицы упрочняющей фазы. Поэтому основным механизмом упрочнения в материалах данного класса является сопротивление со стороны частиц движению как единичных дислокаций, так и достаточно мощных дислокационных образований, таких как субграницы и границы зерен [2].

При осаждении образца КГП3 добавка порошка в электролит-суспензию была уменьшена, чтобы изучить влияние объемной доли включений в металлокерамическом покрытии на характеристику износостойкости. Изучение структуры образцов КГП1, КГП2 и КГП3 показало присутствие в этих образцах 15–20%, 15–20% и 5–10% керамических частиц соответственно. Сравнение показателей износостойкости образцов КГП2 и КГП3 на основе никеля свидетельствует о повышении сопротивляемости износу при увеличении количества керамических частиц в покрытии. Объяснение заключается в том, что в композиционных материалах с более высоким объемным содержанием дисперсных частиц число дислокационных образований (субграниц и границ зерен) выше, и блокированные частицами они сами по себе являются препятствиями для движущихся дислокаций.

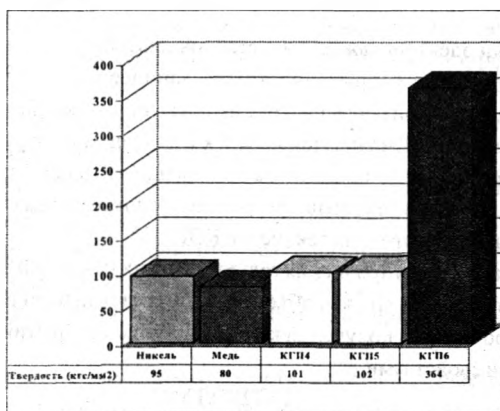


Рис. 2

2. Вторая группа опытов.

Цель проведения второй группы опытов – определение влияния плотности тока электролиза на износостойкость и твердость металлокерамического покрытия. Для

сравнения износостойкости полученных КГП и чистых электролитических покрытий использовалось никелевое и медное покрытия без включений порошка. Результаты проверки представлены в рис. 2,3.

Как видно из рис. 2, повышение силы тока приводит к увеличению твердости КГП.

б). Износ (мкм). На рис. 3 представлены зависимости износа медных и никелевых КГП от плотности тока, при которой наносились покрытия. С увеличением I_k износ медных покрытий увеличивается, никелевых — уменьшается, и в основном наблюдается корреляция износа и твердости исследованных электролитических металлов, полученных при соответствующих плотностях тока. Отступление от общей закономерности взаимосвязи износ – твердость не замечено.

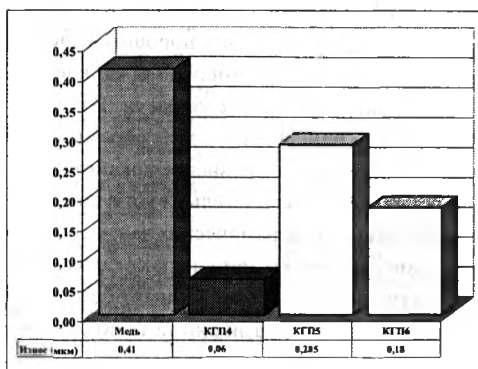


Рис. 3.

Из практики электроосаждения металлов известно, что повышение силы тока приводит к увеличению напряженности гальванического осадка, росту количества дефектов кристаллической решетки. Рост напряженности композиционных электрохимических покрытий КЭП может приводить к короблению и отрыву покрытия от подложки. В тоже время, увеличение числа дислокаций, в присутствии дисперсных частиц, приводит к образованию большого числа дислокационных петель, которые способствуют повышению предела текучести КЭП. [3].

Таким образом, для упрочнения гальванических покрытий дисперсными материалами необходимо учитывать как объемную долю частиц в покрытии, так и силу тока процесса электролиза для получения композиционных покрытий с улучшенными эксплуатационными свойствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сайфуллин Р.С., Комбинированные электрохимические покрытия и материалы. – М.: Химия, 1972, 170 с. 2. Антропов Л. И., Лебединский Ю. Н., Композиционные электрохимические покрытия и материалы. – Киев: Техника, 1986, 199 с. 3. Сайфуллин Р.С., Неорганические композиционные покрытия и материалы. – М.: Химия, 1982, 296 с.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ ПРИ РЕШЕНИИ НЕКОТОРЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Использование математических методов и средств вычислительной техники при решении многих задач технологии машиностроения позволяет повысить эффективность и гибкость производства различных изделий.

Для решения такого класса задач необходимо создать имитационную математическую модель данного процесса [1], которая строится с использованием реляционной базы данных [2] и может применяться к технологическим процессам, в ход которых время от времени вмешивается человек. Он может, в зависимости от сложившейся ситуации, принимать те или иные решения (менять различные параметры). Затем приводится в действие сама модель, которая показывает какое ожидается изменение обстановки в ответ на это решение и к каким последствиям оно приведет. Следующее «текущее решение» принимается учетом реальной новой обстановки и принимается оптимальное решение. В таких случаях строится прямая математическая модель, которая отвечает на вопрос: «Что будет, если в заданных условиях мы примем какое-то решение x_{OX} ». Таким образом решаются задачи, исходные данные для которых можно представить в табличном виде. К таким задачам можно отнести: расчет режимов резания по эмпирическим зависимостям с использованием поправочных коэффициентов; расчет припусков; расчет норм времени ит.д.

При решении этих задач используются таблицы входных и выходных параметров, включающие приведенные ниже спецификации.

Реляционная база данных имеет следующую структуру: строки соответствуют коротежам (записям), а столбцы – полям (доменам) отношений. По отношению в целом могут быть сформированы некоторые итоговые оценки. Связи между таблицами устанавливаются по совпадению имен полей.

Реализация данной базы выполнена с помощью приложения Microsoft Office-Excel 2000.

Для примера, рассмотрим вариант расчета табличной и действительной скоростей резания для продольного чернового точения стальных заготовок из проката твердосплавными резцами (сплав Т15К6) с постоянными характеристиками подачи и глубины резания. Значения коэффициента C_v и показателей степени приведены в табл. 1, а предел прочности σ_B в табл. 2 (таблицы входных параметров). Коэффициент K_{pv} , зависящий от вида заготовки, для проката принимается 0,9.

Табличная скорость резания рассчитывается по следующей зависимости [3]:

$$V_{тб} = \frac{C_v}{T^m \cdot t^x \cdot S^y} \cdot K_v, \quad (1)$$

где C_v – постоянная, зависящая от материала режущей части инструмента; S – характеристика подачи (мм/об); t – глубина резания на сторону (мм); T – стойкость инструмента (мин); K_v – показатель относительной стойкости;

$$K_v = K_{mv} \cdot K_{nv} \cdot K_{nv}, \quad (2)$$

где K_{mv} – поправочный коэффициент, учитывающий влияние физико-механических свойств обрабатываемого материала на скорость резания,

$$K_{mv} = K_r \left(\frac{750}{\sigma_B} \right)^{n_r},$$

где K_r – коэффициент для материала инструмента из твердого сплава; n_r – показатель степени, при обработке резцами из твердого сплава; K_{nv} – поправочный коэффициент, учитывающий влияние инструментального материала; K_{nv} – поправочный коэффициент, учитывающий влияние состояния поверхности заготовки.

Действительная скорость резания рассчитывается по следующей зависимости:

$$V_{дейст.} = V_{тб} \cdot K_v, \quad (3)$$

Таблица 1

Коэффициенты и показатели степени для различных сталей

| Марка стали | Характеристика подачи S , (мм/об) | t – глубина резания на сторону, мм | Коэффициент C_v и показатели степени | | | |
|-------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--|------|------|-----|
| | | | C_v | x | y | m |
| Ст 15 | 0,3 | 3 | 340 | 0,15 | 0,45 | 0,2 |
| Ст 25 | | | 350 | | 0,35 | |
| Ст 35 | | | 350 | | 0,35 | |
| Ст 45 | | | 420 | | 0,2 | |
| Ст 55 | | | 350 | | 0,35 | |

Таблица 2

Предел прочности сталей

| Марка стали | Предел прочности σ_B (МПа) |
|-------------|-----------------------------------|
| Ст 15 | 350 |
| Ст 25 | 450 |
| Ст 35 | 550 |
| Ст 45 | 650 |
| Ст 55 | 750 |

По результатам вычислений создается таблица выходных величин скорости резания (табл. 3).

Таблица 3

Значения выходных параметров

| Марка стали | Вид заготовки | $V_{\text{табл.}}$ | $V_{\text{действ.}}$ |
|-------------|---------------|--------------------|----------------------|
| Ст 15 | Прокат | 199,814 | 311,955 |
| Ст 25 | | 166,511 | 249,767 |
| Ст 35 | | 166,511 | 204,355 |
| Ст 45 | | 166,511 | 207,499 |
| Ст 55 | | 161,754 | 149,860 |

В результате расчетов построен график, наглядно показывающий зависимость скорости резания от марки стали (рис.1). Аналогично можно получить зависимость скорости от глубины резания и других параметров обработки.

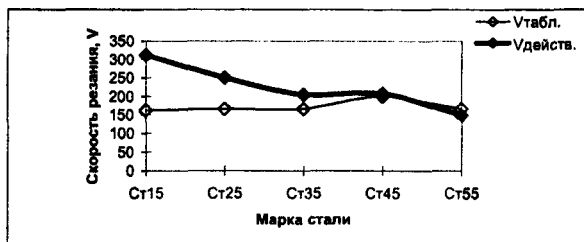


Рис.1. График зависимости скорости резания от марки стали

Графическая интерпретация данного процесса позволяет более оперативно оценить ситуацию и принять верное решение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вентцель Е.С. Исследование операций. Задачи, принципы, методология. Учебное пособие для студентов вузов. – М.: Высшая школа, 2001. – 208 с. 2. Рыжиков О.И. Информатика. Лекции и практикум. – СПб.: КОРОНА, 2000. – 256 с. 3. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т.// Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. –М.: Машиностроение, 1985. – 496 с. 4. Лавренов С.М. Excel: Сборник примеров и задач. – М.: Финансы и статистика, 2000. – 336 с.

РАЗВИТИЕ ЛАЗЕРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОСЛОЙНОГО СИНТЕЗА В КОМПАКТНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

*Витебский государственный технологический университет
Витебск, Беларусь*

В 80-х годах в ряде развитых стран были созданы образцы принципиально нового типа технологического оборудования – “системы быстрого прототипирования” (Rapid Prototyping Systems). В СССР аналогичные исследования велись на кафедре технологии машиностроения Витебского технологического института [1]. Научным коллективом под руководством В.И.Горюшкина были сформулированы основные принципы технологии послойного синтеза изделий – метода прямого и автоматизированного переноса конструкторской информации о продукции на сырье с помощью одно- и двухмерных сигналов.

В результате выполненных исследований до уровня промышленного применения были доведены 3 версии ТПС: на основе лазерного раскроя и автоматической сборки слоев; на основе послойной полимеризации жидкого фотополимерного композиционного материала; на основе лазерного избирательного спекания порошковых материалов. В 1989 г. был разработан и изготовлен гибкий производственный модуль послойной сборки “СКМ-500” (рис. 1) для производства аэродинамических моделей, пресс-оснастки, литейных моделей из широкого круга материалов (металлов, полимеров, керамики, композитов и т.п.). В модуле был использован метод двумерного лазерного формообразования.



Рис. 1. Гибкий производственный модуль послойной сборки “СКМ-500”

На современном этапе работы в этой области ведутся в Центре компьютерного проектирования Витебского государственного технологического университета. Научный коллектив ставит перед собой задачу создания дешевой системы компьютерного проектирования и производства изделий для промышленных предприятий. Решение указанной задачи основано на концепции компактного (комплексного ресурсосберегающего) производства. Единой технологической базой при этом остается технология послыонного синтеза. Такое сочетание организационных и технологических факторов обеспечивает технико-экономические показатели предлагаемой опытно-промышленной установки на уровне зарубежных образцов при 10-кратном снижении стоимости производства.

Функциональная компактность производства обеспечивается морфологической неизбыточностью инвариантной установки двумерного формообразования со специальными сборочными адаптерами, причем точностные возможности адаптера и инварианта существенно не превышают требования к изделию. Сущность временной компактности заключается в значительном сокращении периода времени от получения заказа до его выполнения путем применения оригинальных методов проектирования конструкции, лазерного формообразования и высокого уровня автоматизации этих процессов. Информационная компактность основана на интегрированном подходе при разработке конструкторской и технологической подготовки производства на базе компьютерного проектирования изделия и пакетной трансляции результата до уровня управляющих программ. Пространственная компактность достигается за счет сочетания «бесбумажной» подготовки производства и автоматизированной реализации лазерного раскроя в едином комплексе. Эксплуатационная компактность обеспечивается параметрами лазерной производственной системы, соответствующими стандартным условиям (характер помещения и несущих конструкций, источники энергии, требования по защите окружающей среды и т.п.). Аспект стоимостной компактности связан с приведенными затратами на единицу продукции, величина которых сокращается за счет оптимального соотношения затрат ручного (сборка изделий) и ошественно-го труда (формообразование слоев) при производстве продукции.

В основе временной и информационной компактности производственной системы лежит кибернетический подход к анализу и проектированию технологических процессов, заключающийся в представлении технологической системы как канала передачи информации. Обработка система рассматривается как информационный канал «план – продукция». План продукции представляет собой набор сообщений о ее количестве, форме, размерах, материале и т.д., которые необходимо воспроизвести в виде деталей, используя сырье и энергию. На уровне кибернетической модели любой технологический процесс проявляется в виде ряда последовательных переводов с языка заказчика на язык исполнителя: формулировка служебного назначения заказа, выполнение модели заказа, выбор методов реализации заказа, выполнение заказа. В

связи с тем, что геометрическая форма является важнейшей характеристикой изделий, проблема выбора эффективного метода формообразования, особенно в условиях автоматизации производства, является остро актуальной [2].

В свете выбранного подхода была разработана и изготовлена производственная система, сочетающая указанные аспекты компактности (рис. 2). Опытно-промышленная установка обеспечивает точность позиционирования 0,05 мм на поле 1700х1200 мм (рис. 3). Лазерное излучение позволяет осуществлять раскрой плоских заготовок из неметаллических материалов толщиной до 20 мм со скоростью до 24 м/мин. Инвариантность установки по отношению к профилю обрабатываемого изделия достигается за счет высокого уровня автоматизации формообразования и минимального диаметра луча (0,3 мм). Охлаждение энергетической установки осуществляется бытовой водой и может быть организовано по замкнутому циклу. Установленная мощность основного оборудования составляет 1,54 кВт, причем все устройства потребляют энергию от осветительной однофазной электросети с напряжением 220 в. Наибольшие габариты установки (2000х3000 мм) и вес (менее 900 кг) позволяют монтировать ее в любых помещениях. Известный недостаток лазерной обработки связан с выбросом отходов, возникающим в результате высокотемпературного воздействия излучения на обрабатываемый материал. Однако современные методы очистки позволяют исключить вредное влияние отходов на окружающую среду. Авторами запатентован метод лазерного раскроя под слоем жидкости, который препятствует выбросам газообразных отходов и улучшает технологические параметры формообразования [3].

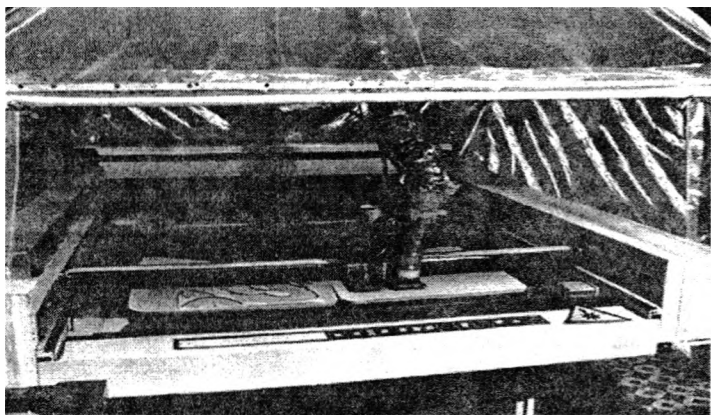


Рис. 2. Опытно-промышленной установки лазерного формообразования

Следует отметить, что при помощи установки можно получить не только прототип или единичный экземпляр нового изделия, но и изготовить формообразующую

оснастку для серийного производства продукции. В частности, прошли апробацию в производственных условиях послойные литейные модели, модели для гальванопластики, матрицы для пневмо- и вакуумного формования листовых пластиков, штампы для мелкосерийной листовой штамповки. На компактном производственном модуле возможно изготовление не только сплошных пространственных изделий, но и целой гаммы разнообразной продукции (табл. 1) [4].

Таблица 1

Область применения компактных лазерных производственных систем

| Тип изделия | Вид продукции | Промышленность |
|-------------|-----------------------|------------------------|
| Плоские | Лекала, шаблоны, крой | Швейная, обувная |
| | Инкрустация | Художественная |
| Рельефные | Прокладки | Ремонтные предприятия |
| | Вывески, таблички | Реклама |
| | Вырубочные штампы | Полиграфия, галантерея |
| | Сборные | Мебель специальная |
| Оболочки | Выставочные стенды | Реклама, дизайн |
| | Судо-, авиастроение | Спорт, туризм |
| Объемные | Литейные модели | Литье различное |
| | Сплошные | Пластмассы, керамика |
| | | Вытяжные штампы |
| | Муляжи, карты | Картография, пособия |

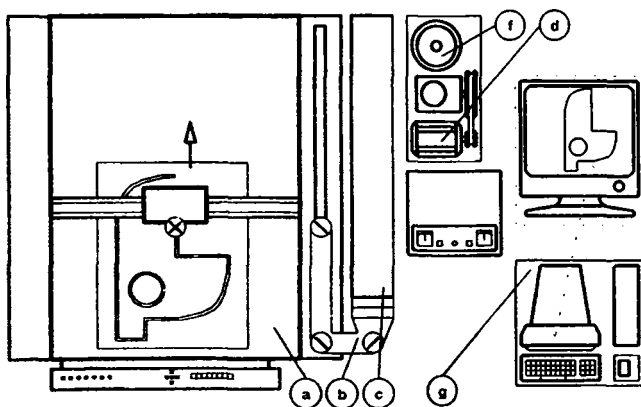


Рис. 3. Установка двумерного лазерного формообразования

a - координатный стол; b - оптическая система; c - лазер; d - система охлаждения; f - система обдува; g - система проектирования и управления (система вентиляции и очистки не показана)

ЛИТЕРАТУРА

1. Gorushkin V., Skorodumov S., Zaitzev V. Rapid Prototyping in the USSR // Rapid Prototyping Monitor, 1992. – Vol. 1, № 4, P. 4 – 6. 2. Сухиненко Б.Н., Свирский Д.Н. Лазерная компактная производственная система: от технологического инварианта к конструктивному разнообразию продукции // Современные энергосберегающие и энергобезопасные технологии в машиностроении и легкой промышленности. – 1998. – С. 220–224. 3. Патент Республики Беларусь № 960240. 4. Патент Республики Беларусь № 960185.

УДК 621.923.7

Ю.В. Синькевич, Г.Я. Беляев

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО ПОЛИРОВАНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

При изготовлении высокотехнологичных изделий, в частности тепловыделяющих сборок (ТВС) и тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ), очень остро стоит вопрос обеспечения заданного качества поверхности этих изделий. На комплектующих деталях ТВС и ТВЭЛх не допускается наличие заусенцев и термических окисных пленок; поверхности должны иметь заданную шероховатость с однородной микроструктурой и не иметь склонности к межкристаллитной коррозии (МКК).

Целью настоящей работы являлся сравнительный анализ процессов финишной обработки поверхности ТВЭЛов.

Критериями пригодности технологий для финишной обработки поверхности ТВЭЛов были приняты следующие:

- величина съема металла должна обеспечивать гарантированное нахождение остаточной толщины оболочки ТВЭЛов в заданном допуске;
- однородность состояния поверхности, ее микроструктура и шероховатость должны быть не хуже, чем при использовании штатной технологии финишной обработки;
- у обработанных сварных швов должна отсутствовать склонность к МКК.

Для проведения исследований и испытаний были изготовлены макеты ТВЭЛов с использованием медного порошка вместо топливной композиции. После проведения термических операций на поверхности макетов имелась темная окисная пленка различной интенсивности. Окончательно обработанные ТВЭЛы контролировались на соответствие требованиям чертежа, а также контролировалась остаточная толщина оболочки ТВЭЛа и склонность сварных швов к МКК.

Величина съема металла при обработке оценивалась по результатам измерений размеров макетов в одних и тех же сечениях до и после обработки с помощью рычажной скобы с ценой деления 1 мкм. Однородность поверхности контролировалась визуально, а микроструктура изучалась на микроскопе ММУ-3 при увеличении х56. Снятие профилограмм и автоматизированная обработка параметров шероховатости поверхности проводилась на перфометре S8P в соответствии с ГОСТ 2789-73. Склонность сварных швов к МКК исследовалась методом АМУ по ГОСТ 6032-89.

Штатная технология финишной обработки поверхности ТВЭЛов предусматривает проведение следующих операций:

1. Травление поверхности изделий в водном растворе азотной кислоты и фтористого аммония с последующей промывкой в холодной проточной воде.

2. Электрохимическое полирование в электролите, содержащем ортофосфорную и серную кислоты с добавкой глицерина с последующей промывкой изделий в ваннах улавливания, с холодной проточной, с горячей водопроводной и горячей дистиллированной водой и сушку изделий хлопчатобумажной салфеткой.

Недостатком технологии является использование раствора, содержащего особо агрессивное вещество первого класса опасности – плавиковую кислоту, образующуюся при взаимодействии фтористого аммония с азотной кислотой.

Для исключения из технологии фторсодержащего раствора была опробована штатная технология травления окисной пленки, включающая в себя две стадии: первоначальное разрыхление окисной пленки в водном растворе гидроокиси натрия и марганцовокислого калия с последующей промывкой в горячей и холодной дистиллированной воде и окончательное растворение окислов в водном растворе лимонной кислоты и трилона Б с последующей промывкой первоначально в подкисленной воде и окончательно – в холодной и горячей дистиллированной воде. Суммарное время 1 цикла травления составило 60 минут. После травления окисной пленки макеты ТВЭЛов электрополировались по штатной технологии.

Из 8 макетов изделий, обработанных по второй технологии, на 4 окисная пленка была удалена за 1 цикл травления, а на остальных осветление поверхности было достигнуто за 3 цикла травления.

Исследовалась также возможность совмещения в одной операции удаления окисной пленки и полирования поверхности с использованием электрохимического полирования на постоянном токе. Был опробован ряд электролитов на основе ортофосфорной и серной кислот с добавками глицерина, щавелевой и лимонной кислот, а также поверхностно-активных веществ. Установлено, что одновременное удаление окисной пленки и полирование поверхности в указанных электролитах возможно только при относительно большом (порядка 30 мкм на сторону) съеме металла, что может привести к повышенной вероятности появления брака по критерию “остаточная толщина оболочки”. При меньшем съеме металла на обработанной поверхности наблюдались

точечные язвы, обусловленные первичным растворением металла по дефектам окисной пленки.

Как один из вариантов технологии, совмещающей удаление окисной пленки и полирование поверхности в одной технологической операции была опробована технология электроимпульсного полирования, заключающаяся в создании вокруг изделия, погруженного в электролит, парогазовой оболочки и ее физико-электрохимическом взаимодействии с поверхностью изделия [1,2]. Обработка макетов изделий проводилась на установке ЭИП-1 в течение 2, 5 и 8 минут. После обработки изделия последовательно промывались в горячей и холодной дистиллированной воде, а затем протирались. В результате обработки окисная пленка была полностью удалена во всех случаях, макеты имели гладкую блестящую поверхность. Было установлено, что термическая окисная пленка полностью удалялась за 20–30 сек. обработки, однако шероховатость поверхности при этом не достигала заданных параметров.

Результаты проведенных исследований представлены в табл. 1.

Таблица 1

Состояние поверхности после финишной обработки

| Технология обработки поверхности | Состояние поверхности, микроструктура | Склонность сварных швов к МКК |
|---|---|-------------------------------|
| Штатная технология №1 (однократное травление и полирование) | Светлая, блестящая, мелкозернистая | Отсутствует |
| Штатная технология №2 (двух кратное травление за 1 или 3 цикла и полирование) | Светлая, блестящая, мелкозернистая, поперечная полосчатость | « » |
| Электроимпульсное полирование | Светлая, блестящая, мелкозернистая | « » |

Продолжение табл. 1

| Съем металла на сторону, мкм | Параметры шероховатости, мкм | | |
|------------------------------|------------------------------|-------------|-------------|
| | Ra | Rz | Rmax |
| 10...17 | 0,25...0,77 | 1,32...4,02 | 1,66...4,62 |
| 7...18 | 0,11...0,31 | 0,65...1,76 | 1,72...2,86 |
| 6...32 | 0,03...0,24 | 0,15...1,24 | 0,18...1,62 |

Из представленных в табл. 1 результатов оценки состояния поверхности макетов ТВЭЛов после финишной обработки по различным технологиям следует:

1. Штатная технология обработки поверхности ТВЭЛов приводит к удалению слоя металла толщиной 10–17 мкм, обеспечивая светлую блестящую поверхность мелкозернистой структуры с шероховатостью $Ra = 0,25–0,77$ мкм.

2. Замена операции удаления окисной пленки во фторсодержащем растворе на двух стадийную обработку при значительной продолжительности (от 60 до 180 мин) обеспечивает те же величины съема металла, что и штатная технология. На обработанной поверхности, не смотря на операцию полирования, наблюдаются следы полосчатости, имевшей место на исходных заготовках. Двух стадийное травление окисной пленки с последующим электрохимическим полированием позволило снизить шероховатость поверхности ТВЭЛов до $Ra = 0,11-0,31$ мкм.

3. Электроимпульсное полирование обеспечивает полное удаление окисной пленки с одновременным получением блестящей полированной поверхности мелкозернистой структуры за 1 цикл обработки продолжительностью менее 2 минут и полностью исключает наличие в технологии растворов кислот. Съем металла имеет линейную зависимость (3–4 мкм/мин на сторону), определяется продолжительностью обработки и при 3–4 минутах не превышает значений, имеющих место при использовании штатной технологии травления и полирования, обеспечивая при этом шероховатость поверхности $Ra = 0,08-0,15$ мкм.

4. Все исследованные варианты финишной обработки поверхности не приводят к склонности сварных швов к МКК.

Таким образом, с точки зрения обеспечения заданного качества поверхности, снижения трудоемкости обработки и повышения экологической безопасности производства ТВЭЛов наиболее перспективной и экономически обоснованной является технология электроимпульсного полирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Метод электроимпульсного полирования металлов / Е.Я. Головкина, С.Н. Терехов, Ю.В. Силькевич, О.И. Авсеевич // Машиностроение. – Мн., 1988 – Вып. 13. – С. 40–43. 2. Головкина Е.Я., Силькевич Ю.В., Иващенко С.А., Фролов И.С. Исследование параметров шероховатости поверхности стальных деталей после электроимпульсного полирования и нанесения тонкопленочных покрытий // Известия вузов СССР. Машиностроение. – 1989. – № 6. – С. 134–137.

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

УДК 621.791

А.М. Авсиевич, Н.В. Спиридонов, В.М. Константинов, С.А. Гришанов

НАНЕСЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ДИФфуЗИОННО ЛЕГИРОВАННЫХ САМОФЛЮСУЮЩИХСЯ (ДЛС) ПОРОШКОВ НА ЖЕЛЕЗНОЙ ОСНОВЕ

Белорусская государственная политехническая академия

Минск, Беларусь

Полоцкий государственный университет

Новополоцк, Беларусь

Для технологии газотермического осаждения покрытий остается актуальной задача снижения себестоимости при улучшении качества. На сегодняшний день при нанесении покрытий наиболее широко и эффективно используются два типа самофлюсующихся порошковых материалов: на никелевой и на железной основе. Первые обладают высокими технологическими свойствами и обеспечивают хорошее качество покрытий. Вторые имеют в 2–3 раза меньшую стоимость, но и меньшую технологичность – повышенную температуру плавления и низкую пластичность. Устранить эти недостатки железных порошков можно, модифицируя их химический состав.

В течение последних лет в Полоцком государственном университете (ПГУ) разрабатываются диффузионно-легируемые самофлюсующиеся порошки (ДЛС-порошки) на железной основе, предназначенные для нанесения покрытий методом наплавки [1]. Технология диффузионного насыщения позволяет эффективно управлять химическим составом порошковых материалов. В ПГУ разработана гамма порошков с различным содержанием легирующих элементов и изучено влияние их химического состава на физико-механические характеристики и эксплуатационные свойства наплавленных покрытий при различных условиях изнашивания [2,3]. Разработка новых и апробация уже имеющихся ДЛС-порошков для нанесения покрытий газотермическим осаждением открывает широкие возможности для значительного удешевления данной технологии. Высокая экономическая эффективность использования таких материалов обусловливается тем, что при их изготовлении могут широко использоваться отходы производства.

Целью проводимых исследований является изучение процессов, происходящих при газотермическом напылении диффузионно легируемых порошков от момента начала разогрева частицы в высокоэнергетической струе до формирования покрытия, физико-механических и эксплуатационных свойств полученных покрытий.

Установлено, что наилучшей технологичностью обладают ДЛС-порошки на основе стружки серого и высокохромистого чугунов как имеющие меньшую относительно стальных температуру плавления. Наиболее высокими коэффициентом использования материала и производительностью характеризуется порошок на основе высокохромистого чугуна, что объясняется сферической формой его частиц, являющихся отходами электроэрозионной обработки. При диффузионном насыщении исходные порошки насыщались бором и медью.

Так как процесс осаждения покрытий является быстро протекающим и не поддается экспериментальным методам изучения, были математически смоделированы тепловые процессы в ДЛС-частице, разгоняемой в плазменной струе. Изучение динамики нагрева и остывания частиц включает в себя расчет температурного поля и скорости частиц. В расчетах, выполненных на основе разработок [4,5], учитывалась двухфазность частиц. Принималось, что легированный слой поверхности представляет собой сплошную боридную фазу, а сердцевина – железо, а такое допущение соответствует реальной ДЛС-частице. Принималось, что осаждение покрытий происходит в струе азотной плазмы при силе тока 200 А.

В результате моделирования установлено, что при одинаковых размерах двухфазная частица, по сравнению с однофазной, медленнее нагревается и медленнее остывает, однако, максимальная температура разогрева для однофазной частицы несколько выше. До наиболее высоких температур разогреваются частицы грануляцией 100–120 мкм за счет достаточно долгого нахождения в горячей части струи. ДЛС-частицы любой грануляции успевают разогреться выше температуры плавления. Установлено, что оптимальная дистанция осаждения покрытия составляет 90–120 мм, когда частица будет обладать высокой температурой и, следовательно, активацией, но поверхностный слой ее уже перейдет в твердое состояние, что предотвратит разбрызгивание.

Перегрев частиц выше $T_{\text{уд}}$ делает необходимой оценку диффузионных процессов в ней. Установлено, что при нахождении частицы в расплавленном состоянии, согласно расчетам, 1–2 миллисекунды, диффузионный путь атомов бора при свободном перемещении его в расплаве не превышает 5 мкм. А свободно могут перемещаться только атомы, находящиеся наиболее близко к центру частиц. Таким образом, гомогенизация по бору находится в начальной стадии, и теплофизические свойства поверхности в основном соответствуют свойствам борида. Данные выводы подтверждаются результатами исследования структуры.

Структура покрытий из ДЛС-порошка высокохромистого чугуна характеризуется значительной степенью неоднородности как внутри отдельных частиц, так и по покрытию в целом, что благоприятно для триботехнических свойств покрытий. Многие частицы в большей или меньшей мере сохраняют структуру, полученную при диффузионном насыщении. Помимо неполной гомогенизации неоднородность объясняется неодинаковостью теплового взаимодействия ДЛС-частицы с окружающей сре-

дой в процессе осаждения покрытия и застывания. Увеличение силы тока и дополнительное легирование медью способствуют увеличению времени остывания частиц и некоторому выравниванию структуры. Фотография напыленного плазмой покрытия из ДЛС-порошка приведена на рис. 1.



Рис. 1. Поверхность покрытия ДЛС-порошка высокохромистого чугуна после плазменного напыления $\times 200$

Отличия в строении ДЛС-частиц определяют особенности процесса формирования прочного сцепления с основой при их осаждении.

Из-за значительно меньшей теплопроводности боридной фазы для ДЛС-частицы по сравнению с однофазной железной характерна в 4–5 раз меньшее превышение температуры в контакте при застывании над температурой подложки (рассчитана по методике В.В. Кудинова). Время отвердевания наоборот больше, но оно определяется порядком 10^{-4} с. Следовательно температура контакта $T_{\text{к}}$ и определяемая ею активация поверхности контакта сильно зависят от разогрева подложки, тогда как для однофазных железных порошков при осаждении покрытия на железную же подложку T° контакта $\gg T^{\circ}$ частицы в момент удара.

Высокая концентрация бора в частицах материала покрытия предполагает протекание реакции раскисления поверхности подложки. Проведен расчет степени протекания данной реакции. Установлено, что при формировании покрытия она мала, но резко интенсифицируется с увеличением температуры контакта и достаточно полно протекает за несколько часов при температуре около 800°C . Все это создает резерв для увеличения величины адгезии покрытия к основе.

На адгезию в значительной мере могут повлиять остаточные напряжения после осаждения покрытий. В результате экспериментальных исследований установлено,

что ввиду близости механических свойств материалов покрытия и подложки, осаждение ДЛС-порошков на основе высокохромистого чугуна приводит к незначительному изменению напряженного состояния, сформировавшегося после дробеструйной обработки: в образцах несколько увеличиваются напряжения сжатия, что не является критическим для адгезионной прочности.

Результаты экспериментальных исследований прочности сцепления покрытий из ДЛС-порошков приведены на рис. 2. Установлен факт увеличения адгезии в два раза с ростом силы тока от 200 А до 300 А и такой же рост адгезии с увеличением температуры подложки от 200° С до 500° С. Данный факт подтверждает предположение о высокой степени зависимости исследуемого параметра от разогрева частиц и возможности значительного увеличения адгезионной и когезионной прочности покрытий при большей величине тепловложения как в частицу, так и в поверхность подложки. Все это может быть объяснено не только дополнительной активацией поверхности, но и частичным связыванием адсорбированных поверхностных пленок бором.

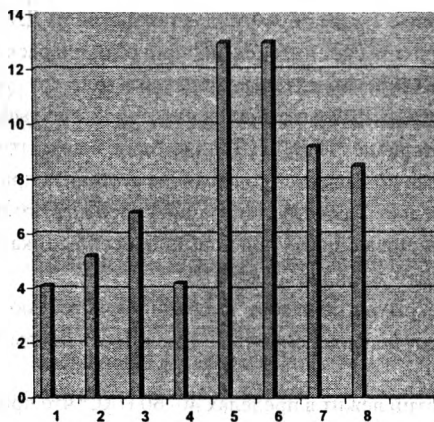


Рис. 2. Прочность сцепления покрытий из ДЛС-порошков при плазменном напылении:

1 – “ЧХ+В” : $I=200$ А, $L=95$ мм, $T_{\text{н}} = 200$ °С

2 – “ЧХ+В+Сu” : $I=200$ А, $L=95$ мм, $T_{\text{н}} = 200$ °С

3 – “СЧ+В+ Сu” : $I=200$ А, $L=95$ мм, $T_{\text{н}} = 200$ °С

4 – “ЧХ+В+Сu” : $I=200$ А, $L=130$ мм, $T_{\text{н}} = 200$ °С

5 – “ЧХ+В+Сu” : $I=300$ А, $L=95$ мм, $T_{\text{н}} = 200$ °С

6 – “СЧ+В+ Сu” : $I=300$ А, $L=95$ мм, $T_{\text{н}} = 200$ °С

7 – “ЧХ+В+Сu” : $I=200$ А, $L=95$ мм, $T_{\text{н}} = 500$ °С

8 – “ЧХ+В+Сu” : $I=200$ А, $L=95$ мм, $T_{\text{н}} = 200$ °С, с подслоем

Заметное влияние на рост прочности сцепления оказывает пластификация поверхности контакта. За счет добавки в поверхностный слой меди она увеличивается на 30%, а при осаждении подслоя из никель-алюминиевого порошка – на 70%.

ДЛС-порошки на железной основе уступают по прочности сцепления никелевым самофлюсам (соответственно 5 и 10 МПа при силе тока 200 А), но превосходят объемно легированный железный порошок ПР-Х4Г2Р4С2 (4,2 МПа).

Установлено, что эффективным методом увеличения адгезии является последующая термообработка покрытий, активизирующая реакцию раскисления подложки и диффузию бора. И при оплавлении газовой горелкой, и при выдержке в печи (3 часа при $t = 950-1000^{\circ}\text{C}$) прочность сцепления оказалась одинаковой и составила около 35 МПа. Наблюдалось разрушение образцов по покрытию. Структура поперечного среза по-разному термообработанных покрытий для слоев вблизи подложки также весьма сходная. Оплавилась только насыщенная боридами поверхность, в результате резко увеличилась поверхность контакта между частицами и между покрытием и подложкой. Соответствующие границы стали менее различимы по сравнению с покрытием, уменьшилась пористость. Таким образом, для покрытий из ДЛС-порошков увеличение прочности сцепления за счет интенсификации реакции раскисления поверхности контакта происходит в широком интервале температур.

Рентгеноструктурным фазовым анализом установлено высокое содержание аустенита в исходном материале “ИЧХ” (56 %), которое в покрытиях увеличивается до 60–80%. Наиболее резко повышается содержание аустенита при дополнительном легировании порошка медью. Также аустенизации способствуют высокие скорости охлаждения частиц, увеличивающиеся при повышении силы тока осаждения. Содержание упрочняющей фазы – боридов – около 5%.

Исследуемые покрытия обладают высокой пористостью – 10–20%. Меньшие значения соответствуют большей силе тока. Пористость покрытий после оплавления составляет 3–8%.

Твердость покрытий лежит в пределах 40–60 HRC, что примерно соответствует уровню твердости покрытий из никелевых самофлюсов.

Имеет место большой разброс значений микротвердости – от 5000 до 11000 МПа, обусловленный структурной неоднородностью покрытий. Присутствие меди и увеличение силы тока осаждения повышает содержание γ -фазы и снижает среднюю твердость покрытия. После оплавления наоборот характерно некоторое увеличение микротвердости.

Экспресс испытания износостойкости показывают, что работоспособность покрытий из ДЛС-порошков и никелевых самофлюсов в условиях сухого трения и трения в смазке находятся примерно на одном уровне. При граничном тернии образца с покрытием в паре с контртелом из стали, закаленной до 60 HRC, износ покрытия и контртела также был примерно одинаков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ворошнин Л.Г., Пантелеенко Ф.И., Константинов В.М. Теория и практика получения защитных покрытий с помощью ХТО. – Минск: ФТИ; Новополоцк: ПГУ, 1999. – 133 с. 2. Пантелеенко Ф.И., Константинов В.М. Исследование износостойкости борсодержащих эвтектических покрытий ДЛС-порошков. // Трение и износ. – 1994. – Т. 15 – № 2. С. 243–247. 3. Константинов В.М., Пантелеенко Ф.И., Иванов В.П. Абразивная износостойкость покрытий из ДЛС-порошков // Трение и износ. – 1996. – Т. 17, № 4. С. 508–512. 4. Компьютерное моделирование процессов плазменного напыления покрытий / С.П. Кундас, А.П. Достанко, А.Ф.Ильющенко, А.Н.Кузьменков, E.Lugscheider, U. Eritt. – Мн.: Бестпринт, 1998. – 212 с. 5. Гуревич В.А. Кашко Т.А., Левашкевич Я.С., Кундас С.П. Математическая модель процесса плазменного напыления покрытий // Физика конденсированных сред: Тезисы докл. VIII Респ. науч. конф. студентов и аспирантов / Под ред. В.А. Лиопо.– Гродно: ГГУ, 2000.– С. 85–86.

УДК 621.723

Л.М. Акулович, Миранович А.В., Тризна В.В.

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛЮСНЫХ НАКОНЕЧНИКОВ В УСТРОЙСТВАХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ НАПЛАВКИ

*КТИ СМА с ОП, Белорусский государственный аграрный технический университет
Минск, Беларусь*

Актуальной задачей современного машиностроительного и ремонтного производства является повышение надежности и долговечности деталей машин. Один из путей решения этой задачи – использование различных способов упрочнения и восстановления рабочих поверхностей деталей нанесением износостойких покрытий.

Эффективным и доступным методом нанесения износостойких покрытий является электромагнитная наплавка (ЭМН), позволяющая реализовать в едином технологическом процессе восстановление геометрических размеров и увеличение срока службы деталей за счет упрочнения – повышения износостойкости рабочей поверхности.

Сущность процесса заключается в следующем. Заготовка располагается на некотором расстоянии от полюсного наконечника сердечника электромагнитной катушки. Сердечник и катушка подключаются к источнику электрического тока. В зазор между обрабатываемой поверхностью заготовки и полюсным наконечником подается ферромагнитный порошок, частицы которого выстраиваются вдоль силовых линий магнитного поля и замыкают электрическую цепь “деталь-наконечник”. Зерна порошка под действием энергии проходящего по ним тока нагреваются, расплавляются и расплав порошка переносится на обрабатываемую поверхность вращающейся детали.

Таким образом, при ЭМН характер переноса порошка на обрабатываемую поверхность зависит от многих факторов, однако доминирующими будут являться энергии электрического и магнитного полей и пути ее преобразования в рабочей зоне.

Рабочей зоной при ЭМН является область пространства между обрабатываемой поверхностью и полюсным наконечником, в котором происходит модификация поверхности [1]. При ЭМН в рабочей зоне происходит расплавление зерен ферропорошка, выстроенных вдоль магнитных силовых линий, импульсами электрических разрядов и полярный перенос капель расплава на подплавленную поверхность заготовки в постоянном магнитном поле. Зерна ферропорошка, попадая в пространство между наплавляемой поверхностью и полюсным наконечником, смещаются к выходу из рабочего зазора, где удерживаются тангенциальной составляющей $\vec{F}_{M\tau}$ магнитной силы \vec{F}_M (рис. 1, а), которая определяется [1]:

$$\vec{F}_M = k_m * \frac{1}{\mu_0} * V * B * \text{grad } \vec{B},$$

где k_m – магнитная восприимчивость вещества; $\mu_0 = 4\pi * 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; V – объем ферромагнитного зерна, м³; B – магнитная индукция, Тл; $\text{grad } \vec{B}$ – вектор градиента магнитной индукции в точке рабочей зоны, где расположено зерно.

Как видно (1), тангенциальная составляющая силы магнитного поля зависит от тангенциальной составляющей градиента магнитной индукции $\text{grad } \vec{B}_\tau$ (см. рис. 1, а), который определяется неравномерностью распределения магнитного потока, образованной за счет разности площадей рабочего торца полюсного наконечника и поверхности заготовки. Следовательно, изменением геометрических параметров полюсного наконечника можно регулировать величину магнитных сил и целенаправленно управлять процессом упрочнения.

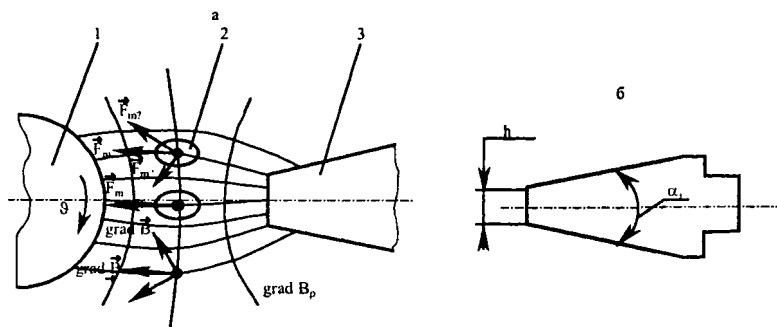


Рис.1. Схема воздействия магнитных сил на зерно ферропорошка (а) и схема полюсного наконечника (б): 1 – заготовка, 2 – зерно ферропорошка, 3 – полюсный наконечник

Для исследования влияния геометрических параметров полусного наконечника на результат упрочнения и определения их оптимальных значений использовано центральное композиционное ротатабельное униформ планирование второго порядка (ЦКРУП).

В качестве параметра оптимизации принята $Y = Q$ – производительность процесса наплавки, г/дм². Независимыми переменными взяты следующие факторы: α_3 – угол заострения, град; h – высота рабочего торца полусного наконечника, мм (рис. 1, б). Условия экспериментов приведены в табл. 1.

Таблица 1

| Интервалы и уровни факторов | | |
|--|-------------------|----------|
| Уровни факторов | Значения факторов | |
| | α_3 , град | h , мм |
| | X_1 | X_2 |
| 0 | 60 | 5 |
| +1 | 90 | 7 |
| -1 | 30 | 3 |
| $+\alpha$ | 102 | 7,8 |
| $-\alpha$ | 18 | 2,2 |
| Интервалы выравнивания: основной по α | 30 | 2 |
| | 42 | 3,8 |

Все опыты рандомизировались во времени при помощи таблицы случайных чисел.

Для обработки результатов экспериментов с помощью ЦКРУП второго порядка использовался алгоритм, представленный в работах [2, 3], по которому была составлена программа для вычисления коэффициентов регрессии и предсказываемых уравнением регрессии значений функций отклика для опыта, вычисления отклонений предсказываемых значений от полученного в эксперименте и квадратов этих отклонений.

Статистическая модель, определяющая зависимость производительности $Y = Q$ от геометрических параметров полусного наконечника a , h в нормированном виде соответственно X_1 , X_2 имеет следующий вид:

$$Y = Q = 3,60 - 0,65X_1 + 0,08X_2 - 0,25X_1X_2 - 0,09X_1^2 - 0,54X_2^2. \quad (2)$$

Проверка воспроизводимости экспериментов по критерию Кохрена при доверительной вероятности 0,95 установила, что гипотеза воспроизводимости принимается. В результате расчетов установлено, что все коэффициенты уравнения значимы с 90%-й доверительной вероятностью по критерию Стьюдента. Выявлено, что статистическая модель адекватна при 5%-м уровне значимости по критерию Фишера.

Полученное уравнение регрессии (2) с двумя переменными представлено графически в виде одномерных сечений в двумерной системе координат на рис. 2.

В преобразованных координатах (перенос начала в центр кривой и поворот осей) X'_1 , X'_2 уравнение (1) имеет вид:

$$Y = Q = 5,380 - 0,575X_1'^2 - 0,058X_2'^2. \quad (3)$$

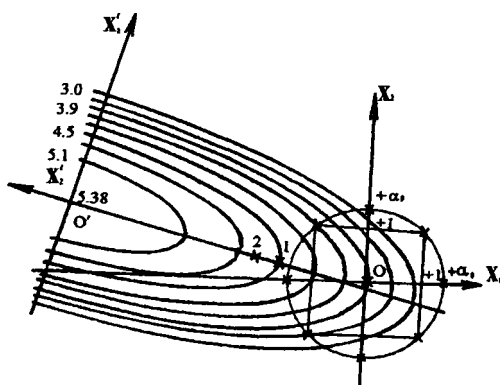


Рис. 2. Зависимости производительности (Q) от геометрических параметров полюсных наконечников: угла заострения (X_1) и высоты рабочего торца (X_2); цифры у линии – значения выхода $g/дм^2$; (x) – точки экспериментов

Как видно (3) лучшее предсказываемое значение (центр эллипса) лежит за пределами области эксперимента. В этом случае оптимальные геометрические параметры определены предельными значениями независимых переменных, которые могут быть конструктивно допущены, при движении по оси X_1' к центру эллипса.

Предельное значение фактора $X_1 = -2$ (точка 2 на рис. 2). Поскольку точка 2 находится за пределами области эксперимента, то для проверки предсказываемых значений Y поставлены дополнительные эксперименты в точках 1 и 2, в которых $\alpha_3 = 12^\circ$ и 0° , $h = 5,7$ мм и $5,9$ мм соответственно. Результаты экспериментов показали, что значение Y в точке 2 больше на 2%, чем в точке 1.

Таким образом, на основании полученных результатов исследований определены следующие оптимальные значения геометрических параметров полюсных наконечников: $\alpha_3 = 12^\circ$ и $h = 5,7$ мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ящерицын П. И., Кожуро Л. М., Ракомсин А. П. и др. Технологические основы обработки изделий в магнитном поле. – Мн.: ФТИ НАНБ, 1997. – 416 с.
2. Кряжков В.М. Надежность и качество сельскохозяйственной техники. – М.: Агропромиздат, 1989. – 335 с.
3. Сафронов И.И. Формирование высоких триботехнических свойств изделий наплавкой. – Кишинев: Карта Молдовеняска, 1989. – 286 с.

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА В ЧАСТИЦАХ ПОРОШКА ПРИ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОМ СПЕКАНИИ

*Научно-исследовательский институт порошковой металлургии с опытным производством
Минск, Беларусь*

Введение

Электроимпульсное спекание (ЭИС) металлического порошка, производимое на машинах конденсаторной сварки, представляет собой сложный физический процесс, связанный с неоднородным распределением по объёму тепловой энергии, выделяемой в местах соприкосновения частиц при прохождении импульса электрического тока. Для целенаправленного выбора режимов ЭИС, обеспечивающих получение изделий с требуемыми свойствами, необходимо установить связь между характеристиками исходных порошков, электрическими параметрами процесса и свойствами получаемых изделий. При этом особый интерес представляет теплообмен в частицах порошка, приводящий к расплавлению металла и образованию контактов между частицами.

Целью настоящей работы является установление на модельной основе основных закономерностей теплообмена в частицах порошка при импульсном разряде высоковольтного конденсатора электроимпульсной установки через порошковую засыпку.

1. Основные положения физической модели.

Исходя из работ [1–3], при составлении физической модели теплообмена между частицами порошка, следует ввести следующие допущения:

1. Размер зоны расплавления мал по сравнению с диаметром частицы, так что процессы теплообмена в отдельных контактных зонах можно считать независимыми;

2. Выделение энергии происходит равномерно между всеми имеющимися местами соприкосновения частиц:

$$q_0 = \frac{Q_0}{N_0} = \frac{CU_0^2}{2N_0}, \quad (1)$$

где q_0 – удельная энергия разряда; Q_0 – энергия разряда, N_0 – общее число контактов в засыпке; C – ёмкость конденсатора; U_0 – напряжение на конденсаторе.

3. Число контактов на одну частицу (N_k) зависит от пористости засыпки (Π) и определяется по формуле Еремеева [4]:

$$N_k = \frac{\Pi + 3 + \sqrt{\Pi^2 - 10\Pi + 9}}{2\Pi}. \quad (2)$$

Числа контактов N_0 и N_k связаны выражением:

$$N_0 = \frac{N_c N_k}{2}, \quad (3)$$

где $N_c = \frac{6m}{\rho\pi D^3}$ (4) – число частиц в засыпке; m – масса засыпки; ρ – плотность; D – средний размер частицы, вычисляемый по выражению [5]:

$$D = D_1 D_2 \sqrt{\frac{2}{D_1^2 + D_2^2}}, \quad (5)$$

где D_1 и D_2 – минимальный и максимальный размеры частиц.

Они позволяют, за счёт уравнений (1)–(5), установить среднее значение тепловой энергии, выделяющейся на порошковой частице при ЭИС и, тем самым, свести тепловую задачу к рассмотрению теплообмена внутри её самой.

Среднее значение тепловой энергии при этом равно удельной энергии разряда q_p , которое определяется уравнением (1).

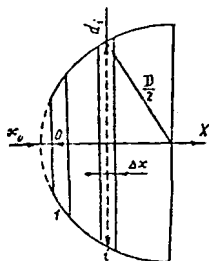
2. Теплообмен внутри частицы порошка

Задача теплопроводности для сферических порошков, при наличии зоны плавления и отвердевания, может решаться по расчётной схеме, представленной на рис. 1, с использованием численного метода. На ней частица диаметра D условно делится на шаровые слои 1, 2, ..., i , ... толщиной Δx каждый. Меньшее основание слоя 1 соответствует площади выделения энергии и площади образуемого контакта. Для среднего диаметра i -го слоя, соответствующего средней площади сечения слоя, можно получить:

$$d_i = 2\sqrt{(x_i + x_0)(D - x_i - x_0)}, \quad i = 1, \dots \quad (6)$$

где x_0 – высота шарового сегмента, $x_i = \Delta x(i-0,5)$ – координата середины i -го шарового слоя. Если обозначить отношение диаметра контакта к диаметру частицы $n = d_i/D$, то для x_0 можно получить:

$$x_0 = \frac{D}{2} \left(1 - \frac{\sqrt{n^2 - 1}}{n} \right). \quad (7)$$



D – диаметр частицы; Δx – толщина слоя

Рис. 1. Расчётная схема

Алгоритм численного решения рассматриваемой задачи нестационарной теплопроводности заключается в следующем. В центре каждого шарового слоя помещается воображаемый узел (рис.2). На частице имеются участки, где температура ниже температуры плавления ($T_{пл}$), участки, на которых эта температура достигнута, и участки, на которых температура выше $T_{пл}$. С учётом этого, исходя из закона Фурье, энергии для каждого i -го узла, определяется следующим уравнением:

$$q_i = kS_{i-1,i} \frac{T'_{i-1} - T'_i}{\Delta x} \Delta t + kS_{i,i+1} \frac{T'_{i+1} - T'_i}{\Delta x} \Delta t = \begin{cases} m_i c_1 (T'_{i+\Delta t} - T'_i), & T_i < T_{пл}; \\ r(m'_{pi+\Delta t} - m'_{pi}), & T_i = T_{пл}; \\ m_i c_2 (T'_{i+\Delta t} - T'_i), & T_i > T_{пл}; \end{cases} \quad (8)$$

где k – коэффициент теплопроводности материала частицы, $S_{i-1,i}$ и $S_{i,i+1}$ – площади оснований соответствующих соседних слоев, их разделяющих; T'_i – температура i -го слоя; m_i – масса i -го узла, c_1 – удельная теплоемкость твердого металла; c_2 – удельная теплоемкость расплава; r – удельная теплота плавления; m'_{pi} – масса расплава в слое; Δt – интервал времени.

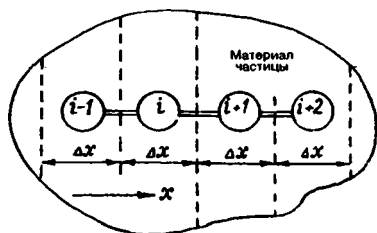


Рис. 2. Схема расположения узлов внутри частицы

При этом должно соблюдаться ограничение на величину числа Фурье, называемое критерием устойчивости:

$$Fo \leq 0,5, \quad (10)$$

что накладывает требования на выбор Δx и Δt .

На основании уравнений (6)-(10), численным методом была решена тепловая задача при использовании порошка титана ВТ1-00, имеющего пористость 0,35 и состоящего из сферических частиц, диаметры которых имеют границы от 200 мкм до 315 мкм. При этом удельная энергия разряда задавалась $7,5 \times 10^4$ Дж/кг, а длительность импульса – 50 мкс. На основании расчётов получена зависимость температуры от координаты, направленной внутрь частицы через 10–50 мкс после начала разряда, которая приведена на рис. 3. На ней видно, что температурное поле частицы имеет

Масса i -го узла определяется следующим образом:

$$m_i = \frac{\pi \rho_i d_i^2}{4} \Delta x, \quad (9)$$

где ρ_i – плотность материала.

Верхний индекс уравнения (8) означает, что температуры должны рассчитываться в момент времени t . Поскольку нижние индексы отражают положение узлов, они определяют изменение температуры в пространстве или по x , а верхние индексы – изменение температуры во времени.

резко выраженную неоднородность. Температура, по мере удаления от поверхности частицы внутрь металла, убывает и на глубине 50 мкм не отличается от температуры внешней среды. Глубина зоны расплавления (температура выше температуры плавления 167° С) составляет всего 7,5 мкм. Расплавленный металл в этих зонах начинает перетекать под действием сил поверхностного натяжения, образуя контактные шейки. Это приводит к уменьшению диаметра спекаемой частицы. Так как зона расплава не превышает 7,5 мкм, а размеры частиц лежит в пределах (-315...+200) мкм, то значительной усадки порошкового материала при этом не наблюдается.

В зонах контакта частицы возникают силы поверхностного натяжения, которые приводят к перетеканию сюда определённого количества расплавленного вещества и образованию здесь контактных шеек. Его массу (m_0) для сферических частиц, можно определить по формуле:

$$m_0 = \rho V_{cs} \quad (11)$$

где V_{cs} – объём расплавленного слоя.

Если порошковая частица имеет форму сферы, то объём расплавленного слоя связан с толщиной x_{ns} следующим образом

$$V_{cs} = \frac{1}{6} \pi \rho (D^3 - [D - x_{ns}]^3) \quad (12)$$

Объём перенесённого в зоны контакта расплавленного вещества $V_{ки}$ вычисляется исходя из объёма начальной насыпки порошкового материала $V_{ни}$

$$V_{ки} = N_{пр} V_{cs} \quad (13)$$

где

$$N_{пр} = \frac{V_{ни}(1 - \Pi)}{V_{частицы}} \quad (14)$$

Увеличиваясь в объёме, контактные шейки заполняют поровое пространство. Это позволяет оценить относительную величину усадки пористого материала γ при ЭИС:

$$\gamma = \frac{V_{ни}\Pi - V_{ки}}{V_{ни}\Pi} \quad (15)$$

Особый интерес представляет изучение, на основе предложенной модели, процесса теплообмена в порошковой частице непосредственно после окончания разряда и оценка скорости охлаждения разогретых слоёв. При $t > t_c$ процесс теплообмена, описываемый уравнениями (1)–(10), необходимо рассматривать с учётом следующего граничного условия:

$$T_i^o = T_i^{i'}, \quad i = 1, \dots, N \quad (16)$$

Если начальные условия процесса ЭИС оставить прежними, то, как показали расчёты, проведённые с учётом приведённых зависимостей (1) – (10), (16), изменение скорости охлаждения частиц в зависимости от времени будет изменяться в пределах от 10^6 К/с до 10^8 К/с. При таких скоростях охлаждения расплава возможно появление аморфной фазы в зоне контакта. Проведённые экспериментальные исследования подтвердили это предположение.

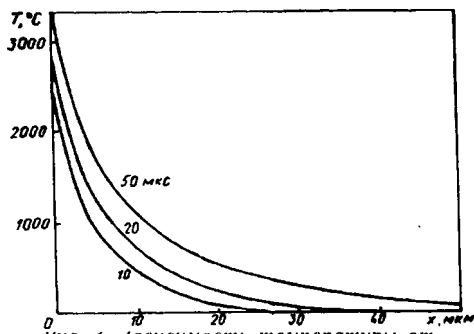


Рис. 3. Зависимость температуры от координаты вглубь частицы через 10...50 мкс после начала разряда.

Выводы

1. Разработанная модель теплообмена в частицах порошка при ЭИС позволяет:

– рассчитать удельную энергию разряда, приходящуюся на сферическую монодисперсную порошковую частицу, определить глубину её разогрева и изменение скорости её охлаждения;

– определить по толщине расплавленного слоя порошковой частицы массу переноса вещества в её контактные зоны и относительную

усадку пористого материала.

2. С помощью модели определены начальные условия спекания, при которых в зонах контакта порошковой частицы появляется аморфная фаза.

3. На основании модели теплообмена можно оптимизировать технологические параметры электроимпульсного спекания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. – М.: Наука – 1964. – 488 с.
2. Kaptzevich V.M., Sheleg V.C., Belyavin K.E., Gurevich A.A. Powder materials sintering by electric discharge // X Intern Conf High Energurate Fabrication. – Lublyana, Yugoslavia, 1989. – P.104–111.
3. Белявин К.Е., Горелик Г.Е., Прежина Т.Е., Кононенко В.Д. О возможности сохранения аморфной структуры при электроимпульсном спекании // Электrofизические технологии в порошковой металлургии Материалы V Республ. науч.-техн. семинара – М.: – 1990. – С. 22.
4. Кипарисов С.С., Либенсон Г.А. Порошковая металлургия. – М. Металлургия, 1972. – 528 с.
5. Крейт Ф., Блэк У. Основы теплопередачи. М.: Мир, 1983. – 512 с.

ТЕПЛОВОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ПОКРЫТИЕ–ОСНОВА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ УПРОЧНЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Практика и теория нанесения упрочняющих покрытий требует четкого представления о характере тепловых процессов происходящих на границе раздела покрытие–основа. При формировании вакуумно-плазменных покрытий, нагрев подложки обусловлен двумя механизмами передачи тепла: путем воздействия ионного потока (ионная бомбардировка) и теплообменом между конденсируемым покрытием и подложкой. В случае ионной бомбардировки, процесс передачи тепла обусловлен механизмом передачи энергии путем упругого удара, а в случае конденсации частиц – тепло передается непосредственно путем теплопередачи от расплавленной частицы к обрабатываемой основе.

Наибольший интерес представляет исследование теплофизических процессов, происходящих при конденсации покрытия. В этом случае должна решаться нестационарная теплопроводная задача, с учетом начальных и граничных условий: частица осаждается на поверхность основы при температуре плавления конденсируемого материала; растекаясь на поверхности основы, частица приобретает форму полусферы, радиус которой определяется объемом падающей капли; лучистым теплообменом пренебрегаем, вследствие очень быстрого остывания частицы; температура подложки принята равной 670–770 К, что соответствует оптимальным режимам конденсации вакуумно-плазменных покрытий. Исследования проводились для частицы титана, осаждающейся на металлическую основу из аустенитной хромоникелевой стали 12Х18Н10Т. Графическая модель кристаллизации расплавленной частицы покрытия, с соответствующим теплообменом, показана на рис. 1.

Частица жидкого титана, попадая на подложку из стали 12Х18Н10Т, растекается, образуя полусферическую поверхность радиуса r_0 . В начальный момент времени тепловой фронт распространяется в основу через слой dx . Механизм передачи тепла, в этом случае, описывается уравнением теплопроводности для плоской задачи x [1]:

$$\rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{\partial j}{\partial x} \quad (1)$$

где ρ – плотность материала; c_v – удельная теплоемкость материала; T – температура; t – время; j – поток тепла; x – глубина проникновения теплового потока.

Минимальный размер слоя dx можно принять за размер кристаллической решетки подложки ($dx=R$), тогда установившаяся температура в слое, равном размеру кристаллической решетки, определится по формуле:

$$T_1 = \frac{c_{v,1} \rho_1 T_{пл} + \frac{3}{2r_0} \rho_2 c_{v,2} T_0}{c_{v,1} \rho_1 + \rho_2 c_{v,2}} \quad (2)$$

где T_1 – температура нагрева подложки покрытием; ρ_1, ρ_2 – плотность материала покрытия и подложки, соответственно; $c_{v,1}, c_{v,2}$ – удельная теплоемкость материала покрытия и подложки, соответственно; $T_{пл}$ – температура плавления материала покрытия; T_0 – температура подложки; R – размер кристаллической решетки материала подложки; r_0 – радиус частицы покрытия.

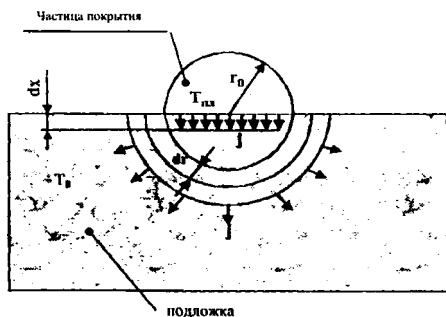
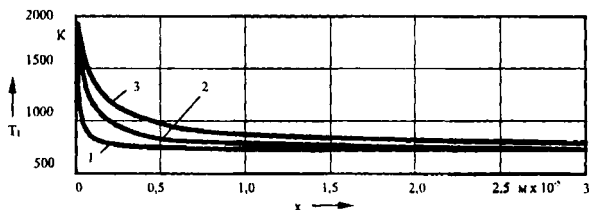


Рис. 1 Схематическое изображение теплопроводной задачи иллюстрирующей разогрев основы частицей

В результате решения дифференциального уравнения (1), получена зависимость изменения температуры подложки от глубины проникновения. (рис. 2).

По прошествии некоторого времени тепловой фронт проникает в глубь основы уже не через плоский слой dx , а через полусферу радиусом r_0 (см. рис. 1).



Диаметр частицы: 1 – $D_k = 1$ мкм; 2 – $D_k = 5$ мкм; 3 – $D_k = 10$ мкм

Рис. 2. Изменение температуры подложки в зависимости от глубины проникновения теплового фронта

С данного момента времени, механизм передачи тепла описывается нестационарным уравнением теплопроводности в сферических координатах, а именно [1]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\chi}{r_0^2} \left(2r_0 \frac{\partial T}{\partial r_0} + r_0^2 \frac{\partial^2 T}{\partial r_0^2} \right) = 0, \quad (3)$$

где r_0 – радиус капли материала покрытия; χ – коэффициент теплопроводности подложки.

Используя метод конечных разностей для решения уравнения (3), можно определить скорость распространения тепла, а также изменение температуры подложки.

$$\frac{d r}{d t} = \frac{\chi C_1}{c_{v,2} \rho_2 r_{cp}^2 (T_1 - T_0)} \quad (4)$$

где $\frac{dr}{dt}$ – скорость распространения фронта разогрева подложки; $r_{cp} = r + dr$; dr – переменный радиус проникновения тепла в глубину подложки; C_1 – постоянная интегрирования.

$$T_1 = \frac{c_{v,1} \rho_1 T_{ns} r_0^3 + \rho_2 c_{v,2} T_0 r_{cp}^3}{c_{v,1} \rho_1 r_0^3 + \rho_2 c_{v,2} r_{cp}^3} \quad (5)$$

В результате решения уравнений (4) и (5) были получены следующие зависимости (1,2,3 – диаметр частицы – 1,5 и 10 мкм, соответственно):

1 – изменение температуры подложки от глубины проникновения теплового фронта (рис. 3);

2 – изменение температуры охлаждения частицы со временем (рис. 4);

3 – скорость распространения теплового фронта в материале подложки (рис.5).

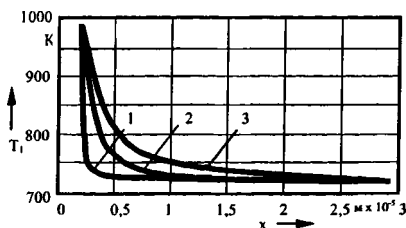


Рис. 3. Изменение температуры подложки от глубины проникновения теплового фронта

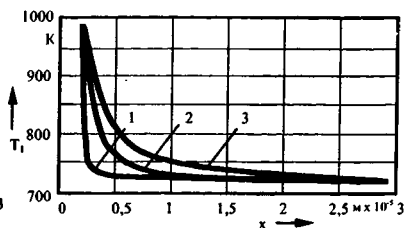


Рис. 4. Изменение температуры частицы во времени

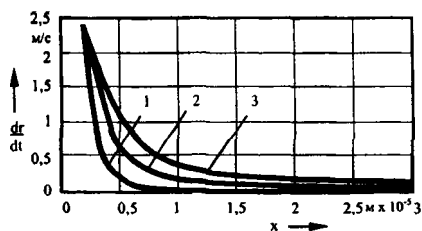


Рис. 5. Скорость распространения теплового фронта в материале подложки

Из полученных зависимостей следует, что на глубине, равной радиусу частицы покрытия, материал основы значительно разогревается и это обуславливает диффузию материала частицы на достаточно большую глубину. Возникает слой композиционного материала, в котором формируются микрогруппировки типа кластерных образований [2]. В этой связи был выполнен конкретный квантово-механический расчет энергии связи ряда металлов с основой из железа. Результаты расчета приведены в табл. 1.

Таблица 1

Энергия связи частиц с железной основой

| Энергия связи, эВ | Материал покрытия | | | |
|-------------------|-------------------|-------|-------|-------|
| | Ti | Cr | Ni | Cu |
| $E_{ков}$ | 4,233 | 4,239 | 4,314 | 4,021 |
| $E_{ион}$ | 0,140 | 0,056 | 0,028 | 0,028 |
| $E_{рез}$ | 4,374 | 4,296 | 4,342 | 4,050 |

Из результатов, приведенных в таблице видно, что наибольшей энергией связи с железом обладают атомы титана, поэтому они должны формировать кластер вида TiFe. Таким образом, формирование на железной основе покрытия из титана позволяет получить упрочняющие поверхности с постепенно уменьшающейся энергией связи и имеющие максимальную адгезию к подложке. Все это создает благоприятные условия для последующего нанесения на подложку износостойкого покрытия из нитрида титана. В итоге реализуется многослойное покрытие с плавно изменяющейся энергией связи вглубь основы, что снимает эффект хрупкости и создает более эластичное покрытие.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сивухин Д.В. Курс общей физики. Термодинамика и молекулярная физика. – М.: Наука, 1975. – 551 с. 2. Зелинская Г.М., Романов А.В., Слуховских О.И. и др. Об атомной структуре трехкомпонентных расплавов на основе металлов группы железа с кремнием и бором // Металлофизика и новейшие технологии. – 2000.– Т. 22, № 7.– С. 45-51.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ КОРОБЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ С ПОКРЫТИЕМ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Процесс получения износостойкого покрытия из самофлюсующегося сплава на поверхности детали можно разделить на четыре основных этапа:

- 1) обработка поверхности заготовки перед нанесением покрытия;
- 2) нанесение покрытия;
- 3) оплавление покрытия (включая операции по снижению коробления);
- 4) механическая обработка покрытия.

При построении технологического процесса упрочнения наибольшее внимание следует уделять этапу осаждения покрытия, поскольку на этом этапе закладывается его толщина, которая в значительной мере определяет трудоемкость последующей механической обработки и себестоимость упрочненной детали. Основными путями снижения себестоимости упрочнения являются: уменьшение массы порошка, расходуемого на создание покрытия, и сокращение затрат на нанесение и последующую обработку покрытия. Получение минимального по величине припуска на механическую обработку обеспечит выполнение этих требований. С другой стороны, назначая припуск на механическую обработку, необходимо учитывать усадку покрытия, возможное коробление детали после оплавления, температурные воздействия на основу и покрытие в процессе эксплуатации и ряд других факторов.

Построение технологического процесса механической обработки деталей с покрытием из самофлюсующихся сплавов в значительной степени зависит от толщины снимаемого слоя покрытия. Снятие увеличенного припуска значительно усложняет и удорожает механическую обработку. Величина припуска под механическую обработку определяется габаритами изделия, способом получения и обработки покрытия, усадкой покрытия, а также возможным короблением детали в процессе получения покрытия. При этом, если потерю геометрической точности цилиндрических деталей после получения покрытия можно компенсировать предварительным изменением размеров заготовки, то коробление плоской детали с покрытием можно устранить лишь механической обработкой слоя покрытия, равного величине деформации детали. Если величина коробления детали с покрытием превышает толщину покрытия, то деталь использоваться не может. Увеличение толщины покрытия не дает положительных результатов. С увеличением толщины покрытия деформация детали также увеличивается. Кроме того, получение покрытий из самофлюсующихся сплавов толщиной более

1–2 мм, во-первых, сопряжено со значительными техническими трудностями, во-вторых, приводит к удорожанию детали, в-третьих, увеличивает трудоемкость последующей механической обработки покрытия. Возникающие при этом в покрытии остаточные напряжения могут привести к его отслаиванию или растрескиванию. Следовательно, величина припуска под механическую обработку зависит и от коробления деталей с покрытием, причем коробление может иметь решающее значение. Поэтому при назначении припуска этот фактор необходимо учитывать наряду с остальными.

Коробление детали с покрытием является следствием того, что образовавшиеся в ней напряжения превысили по величине предел упругости материала основы. Если жесткость основы больше образовавшихся в покрытии напряжений, то релаксация напряжений происходит путем отслаивания или растрескивания покрытия в зависимости от того, что выше – прочность самого покрытия или же его сцепление с основой. Следовательно, технологическое обеспечение получения качественного покрытия, обладающего комплексом требуемых свойств при минимальных затратах на его механическую обработку, должно идти по двум направлениям: во-первых, снижение напряжений в покрытии для того, чтобы предотвратить повреждение покрытия и деформацию детали; во-вторых, регулирование в каждом конкретном случае величины и знака остаточных напряжений исходя из условий эксплуатации детали. Снизить остаточные напряжения в покрытии можно либо уменьшением влияния или устранением отдельных факторов, приводящих к образованию остаточных напряжений; либо – использованием эффекта компенсации напряжений, либо – проведением мероприятий, приводящих к релаксации возникших напряжений.

Рассмотрим основные методы получения покрытий из самофлюсующихся сплавов на плоских деталях, позволяющие уменьшить коробление путем разделения температурных потоков. На рис. 1 показана последовательность получения полосчатого покрытия из самофлюсующихся сплавов на плоских деталях. [1] На предварительно подготовленную поверхность основы 1 (обычно после дробеструйной обработки) сначала наносят через экран с прорезями или механически закрепляют полосы пластичного материала (бронзы, титана и др.), затем на всю поверхность наносят слой покрытия из самофлюсующегося сплава, превышающий по толщине высоту ранее полученных лакирующих полосок на величину припуска под предварительную механическую обработку. Напыленное покрытие подвергают предварительной механической обработке до появления чистой поверхности лакирующих полосок и производят оплавление. Если температура плавления лакирующего материала меньше 1100°C , то на полосы дополнительно наносят термостойкое покрытие, препятствующее растеканию лакирующего материала при оплавлении покрытия из самофлюсующегося сплава. После оплавления покрытия производят его окончательную механическую обработку. Лакирующие полосы могут располагаться или параллельно друг другу, или в шахматном порядке в зависимости от соотношения длины и ширины основы.

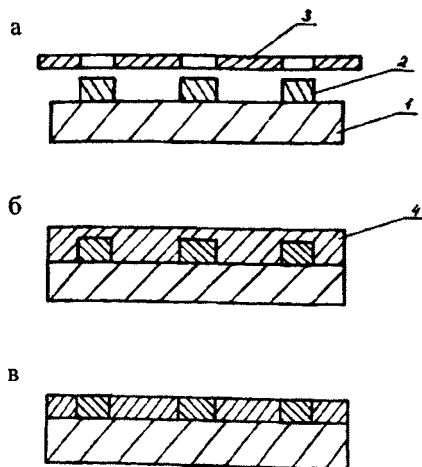


Рис. 1. Схема последовательного получения полосчатого покрытия из самофлюсующихся сплавов на плоских деталях: а – напыление на основу 1 через экран-маску 3 полос пластичного материала 2; б – напыление покрытия из самофлюсующегося сплава 4; в – полосчатое покрытие после механической обработки

Если упрочнению подвергается деталь, длина L которой значительно превышает ширину H ($L > 10 H$), то плакирующие полосы целесообразно располагать поперек упрочняемой поверхности; если же длина и ширина детали соизмеримы, плакирующие полосы располагают в шахматном порядке (рис. 2.)

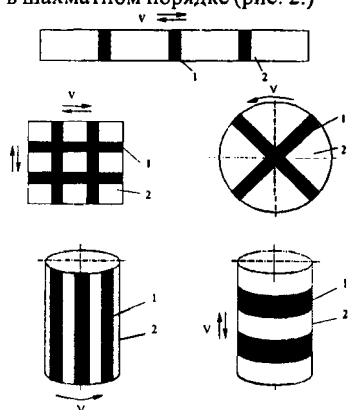


Рис. 2. Схемы расположения полос из антифрикционного материала в полосчатом покрытии: 1 – антифрикционный материал; 2 – износостойкий материал

Уменьшение коробления детали происходит потому, что плакирующие полосы делят оплавленную поверхность на ряд не связанных друг с другом небольших участков. В результате при остывании отдельных участков образуются значительно меньшие по величине напряжения, кроме того, происходит их релаксация. Относительно пластичные плакирующие полосы, выполняя роль деформационных барьеров, одновременно являются демферами, компенсирующими изменения линейных размеров покрытия при его остывании под влиянием разных КТР покрытия и основы и усадки покрытия. Применив метод плакирования покрытия из самофлюсующегося сплава на образцах из аустенитной стали (их длина, ширина и толщина 100; 10 и 3 мм соответственно) с плакирующими полосами шириной 5 мм через каждые 20 мм, удалось уменьшить коробление образцов в 3–4 раза.

Уменьшить коробление плоских деталей можно также полосчатым оплавлением покрытия, при котором сначала производят оплавление наружного контура покрытия, а затем – оплавление полосами, параллельными друг другу или расположенными в шахматном порядке. Роль температурных швов выполняют неоплавленные участки покрытия.

Иногда по условиям эксплуатации детали необходимо иметь монолитное покрытие, для чего требуется производить оплавление всего покрытия. Как известно [2], основной прирост деформации детали приходится на этапе остывания оплавленного покрытия. Для уменьшения деформации детали с монолитным, полностью оплавленным покрытием необходимо применять полосчатое охлаждение покрытия. На рис.3 приведена схема, показывающая реализацию способа полосчатого принудительного охлаждения плоской детали 1 с покрытием 2 из самофлюсующегося сплава. Здесь релаксация возникающих термических напряжений происходит потому, что в покрытии имеются более мягкие (неохлажденные) участки, которые, в свою очередь, делят поверхность детали на ряд отдельно охлаждающихся участков. В результате деформация детали после получения покрытия уменьшается.

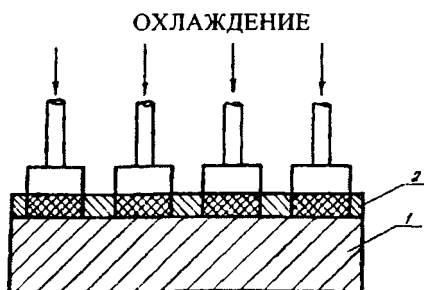


Рис.3. Схема полосчатого принудительного охлаждения покрытия из самофлюсующегося сплава на плоской детали после оплавления

Определенный интерес представляют комбинированные методы, заключающиеся в совместном воздействии различных факторов, уменьшающих напряжения. Например, резкое охлаждение покрытия до температуры 700° С с последующим подстуживанием покрытия или основы для выравнивания скорости уменьшения размеров покрытия и основы или постепенное сглаживание температур основы и покрытия. Резкое охлаждение покрытия приводит к фиксации мелкозернистой структуры металла. Термические напряжения, возникающие при отверждении тугоплавких соединений, релаксируются в самом покрытии, так как оно содержит легкоплавкие соединения никеля и кремния [3]. Последующее подстуживание покрытия осуществляется тогда, когда КТР покрытия меньше КТР основы (например, для биметалла самофлюсующийся сплав – аустенитная сталь). Если КТР покрытия больше КТР основы (например, у пары самофлюсующийся сплав – углеродистая сталь), то подстуживание следует производить со стороны, противоположной покрытию.

В каждом конкретном случае при выборе методов обработки детали с покрытием необходимо учитывать следующие факторы:

- вид материала покрытия и основы;
- габариты упрочняемой детали;
- характер эксплуатации упрочняющего покрытия;
- величину партии упрочняемых деталей;
- технические возможности участка упрочняющей обработки;
- квалификацию обслуживающего персонала и др.

При составлении технологического процесса механической обработки деталей с покрытиями необходимо учитывать возможное коробление детали при получении покрытия и вводить в технологический процесс получения покрытия и механической обработки операции, обеспечивающие уменьшение коробления.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. с. 1147535 СССР, МКИ⁹ В23К 20/00. Способ получения многослойных материалов с полосчатым покрытием/ Бабук В.В., Иващенко С.А., Плахотнюк В.И. (СССР) 3456915/25-27; Заявлено 23.06.82; Оpubл. 30.03.85; Бюл. № 12 // Открытия и изобретения. – 1985. – №12. – С.56. 2. Иващенко С.А. Деформация плоских деталей при нанесении покрытий из самофлюсующихся сплавов // Машиностроение. – Мн.:– 1984, Вып. 9. – С. 42–44. 3. Антонова Е.А., Синай Л.М. Взаимодействие элементов в смеси порошков Ni-Cr-Si-B при нагревании// Высокотемпературная защита металлов: Труды 9-го Всесоюзного совещания по жаростойким покрытиям, Запорожье, 1979. – Л., 1981. – С.196–201.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКРОНАПРЯЖЕНИЙ В ПОКРЫТИИ, СФОРМИРОВАННОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ НАПЛАВКОЙ

Белорусской государственной аграрной технической университет

Минск, Беларусь

Белорусская государственная политехническая академия

Минск, Беларусь

Могилевский машиностроительный университет

Могилев, Беларусь

Белорусский государственный технологический университет

Минск, Беларусь

Остаточные напряжения I-го рода (макронапряжения) в покрытиях существенно влияют на эксплуатационные свойства восстановленных и (или) упрочненных деталей и, прежде всего, на их динамическую прочность при циклических нагрузках [1]. Так, остаточные напряжения сжатия являются резервом повышения прочности деталей, а напряжения растяжения ослабляют их прочность, вызывают возникновение трещин, приводят к разрушениям [2].

Механизм формирования внутренних остаточных напряжений сложен и зависит от соотношения и взаимодействия в покрытии силовых и температурных факторов. При восстановлении или упрочнении деталей электромагнитной наплавкой различными порошками в силу локальных тепловых воздействий на основной металл и быстрого неравномерного охлаждения наплавленного покрытия, в последнем формируются остаточные напряжения растяжения [3]. Поэтому представляет практический интерес определение макронапряжений в покрытиях, полученных ЭМН с поверхностным пластическим деформированием (ППД), а также после их механической обработки. Остаточные макронапряжения в покрытиях определяли рентгеноструктурным анализом, используя метод определения параметров линейно-напряженного состояния металла по смещению линий рентгенограммы.

Рентгеноструктурный анализ проводили на дифрактометре ДРОН-3 в кобальтовом монохроматизированном излучении. Съемка профиля рентгеновской линии выполнялась в автоматическом режиме.

Известно, что по закону Гука относительное изменение длины цилиндра при растяжении составляет

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{\sigma}{E},$$

где σ – напряжение; E – модуль Юнга.

При этом относительное изменение диаметра цилиндра по закону Пуассона равно

$$\frac{\Delta D}{D} = -\mu \frac{\sigma}{E},$$

где μ – коэффициент Пуассона; D – диаметр цилиндра.

С другой стороны, дифференцирование уравнения Вульфа-Бреггов (при монохроматическом излучении $l = \text{const}$) дает

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{\Delta \theta}{\theta},$$

где d – расстояние между кристаллографическими плоскостями; θ – угол Вульфа-Бреггов; λ – длина волны рентгеновского луча.

Считая кристаллографические плоскости, участвующие в отражении, параллельными оси цилиндра, можно приравнять

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{\Delta D}{D}.$$

Тогда

$$\sigma = -\frac{E}{\mu} \frac{\Delta d}{d} = -\frac{E}{\mu} \Delta \theta \operatorname{ctg} \theta,$$

где $\Delta \theta$ – смещение максимума рентгеновской линии, вызванное макронапряжениями, $\Delta \theta = \theta_{\text{эталона}} - \theta_{\text{образца}}$.

Разделение K_{α} -дублета и определение точного положения интерференционной линии проводили по методике, в соответствии с которой

$$2\theta_1 = 2\theta_{\text{ц.т.}} - 0,333 \cdot 2\delta,$$

где θ_1 – положение линии $K_{\alpha 1}$; $\theta_{\text{ц.т.}}$ – положение центра тяжести профиля; δ – междублетное расстояние, определяемое из соотношения

$$\delta = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \operatorname{tg} \theta,$$

где $\Delta \lambda = \lambda_1 - \lambda_2$ – разность длин волн $K_{\alpha 1}$ и $K_{\alpha 2}$ рентгеновских излучений.

Результаты определения остаточных макронапряжений представлены на рис. 1. Анализ эпюр распределения остаточных напряжений в покрытиях показывает, что в результате ППД покрытий, изменения удельных объемов при фазовых превращениях, различия коэффициентов линейного расширения материалов порошков и основы, в системе покрытие-основа возникают остаточные напряжения сжатия с большим гра-

диентом по глубине деформационного слоя покрытий. Данные рис. 1 позволяют сопоставить значения остаточных напряжений в покрытиях в зависимости от химического состава порошков и методов механической обработки. Из рис. 1, а следует, что наибольшие остаточные напряжения сжатия имеют покрытия из порошка Fe-10%V, наименьшие – из порошка С-300. Шлифование покрытий приводит, главным образом, к изменению градиента напряжений (рис. 1, б). Благоприятное воздействие на остаточные напряжения сжатия оказывает магнитно-абразивная обработка, после которой они увеличиваются на поверхности покрытий из порошков Fe – 10%V, Р6М5Ф3 и С-300 и соответственно составляют: –730, –640 и –580 МПа (рис. 1, в).

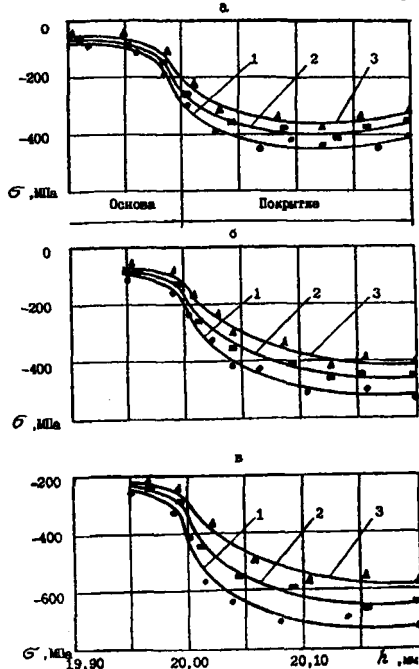


Рис. 1. Распределение остаточных макронапряжений в основе и покрытии, полученном ЭМН с ППД (а); ЭМН с ППД и шлифованием (б); ЭМН с ППЛ, шлифованием и магнитно-абразивной обработкой (в): 1 – Fe – 10%V; 2 – Р6М5Ф3; 3 – С300

По мере механической обработки покрытия происходит рост остаточных напряжений в покрытии и сдвиг максимума напряжений в глубину. Сравнение эпор распределения остаточных напряжений показывает, что, начиная с переходной зоны покрытия, они идентичны.

Таким образом, ППД покрытий формирует в системе покрытие-основа напряжения сжатия. Величина остаточных напряжений сжатия зависит от химического состава порошка. Шлифование и магнитно-абразивная обработка покрытий увеличивают градиент напряжений. Верхние слои покрытий толщиной до 50–100 мкм представляют собой зону с большими градиентами напряжений, средние – толщиной 100–200 мкм – зону с малыми градиентами напряжений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Витязь П.А., Ивашко В.С., Ильющенко А.Ф. и др. Теория и практика нанесения защитных покрытий. – Мн.: Беларуская навука, 1998. – 583 с. 2. Барвинок В.А. Управление напряженным состоянием и свойствами плазменных покрытий. – М.: Машиностроение, 1990. – 384 с. 3. Мрочек Ж.А., Кожуро Л.М., Филонов И.П. Прогрессивные технологии восстановления и упрочнения деталей машин. – Мн.: УП “Технопринт”, 2000. – 268 с.

УДК 621.923.7

С.Л. КОЖУРО, В.Л. ШАДУЯ

ОПТИМИЗАЦИЯ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ПО ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИМ СВОЙСТВАМ ПОКРЫТИЙ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Исследование включало установление влияния основных технологических факторов магнитно-абразивной обработки (МАО) на величину и знак остаточных напряжений I-го рода (макронапряжений) и остаточных напряжений II-го рода (микронапряжений), а также многопараметрическую оптимизацию МАО по макро- и микронапряжениям при обработке покрытий, полученных электромагнитной наплавкой с поверхностным пластическим деформированием (ЭМН с ППД). Определение остаточных напряжений в образцах проводили методом рентгеноструктурного анализа. Использовали дифрактометр ДРОН-3М с ионизационным методом регистрации рентгеновских интерференционных максимумов. Съёмка велась в кобальтовом немонохроматизированном излучении.

Установление влияния технологических факторов МАО на остаточные макро- и микронапряжения, а также определение технологических факторов, обеспечивающих наилучшие физико-механические свойства поверхностного слоя покрытия, проводились при помощи метода математического планирования экспериментов. Применялся центральный композиционный ротатабельный равномерный план (ЦКРУП) второго порядка.

Эксперименты проводились на установке, предназначенной как для ЭМН с ППД, так и для MAO. В качестве образцов использовали кольца из стали 45 с наружным диаметром 40 мм, внутренним – 16 мм и высотой 12 мм, которые подвергали нормализации, а затем на них наносили покрытие из ферропорошка Fe-6,5 % Ст ЭМН с ППД и шлифовали алмазным кругом для получения шероховатости Ra = 1,25 мкм. Режимы наплавки и шлифования были выбраны согласно рекомендациям, представленным в работах [1, 2]. Среднее арифметическое значение знака и величины макронапряжений и микронапряжений десяти образцов соответственно составляло – 0,85 ГПа и 0,13 ГПа.

Независимыми переменными взяты следующие факторы: $X_1 = B$ – величина магнитной индукции в рабочем зазоре, Тл; $X_2 = t$ – время обработки, с; $X_3 = D$ – размер гранул порошка, мкм. Выбор этих факторов обусловлен тем, что, как показали исследования [3], они оказывают наибольшее влияние на физико-механические параметры качества поверхностного слоя, сформированного MAO. Функциями отклика служили параметры $Y_1 = \sigma_1$ – знак и величина напряжений I-го рода, ГПа; $Y_2 = \sigma_2$ – величина напряжений II-го рода. Постоянными опытов были приняты скорость резания $V_p = 1,5$ м/с, скорость осцилляции $V_{осц} = 0,2$ м/с, степень заполнения порошком рабочей зоны $K_3 = 1$; магнитно-абразивный порошок Ж15КТ; СОЖ – 5% водный раствор концентрата Syntilo R4.

Условия экспериментов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Условия экспериментов

| Факторы | | B, Тл | t, с | Δ, мкм |
|-----------------------|---------------------|-------|-------|--------|
| | | X_1 | X_2 | X_3 |
| Уровень | Основной (0) | 1,0 | 30 | 160 |
| | Верхний (+1) | 1,3 | 42 | 200 |
| | Нижний (-1) | 0,7 | 18 | 120 |
| | Звездная точка (+α) | 1,5 | 50 | 280 |
| | Звездная точка (-α) | 0,5 | 10 | 90 |
| Интервал варьирования | Основной | 0,3 | 12 | 40 |
| | По α | 0,5 | 20 | 70 |

Обработку данных, полученных по матрице ЦКРУП второго порядка, производили с помощью пакета прикладных программ MATHCAD PLUS 6.0 и MATHEMATICA 2.2, работающих в среде Windows.

Статистические модели, определяющие зависимость остаточных напряжений I-го и II-го порядка $Y_1 = \sigma_1$ и $Y_2 = \sigma_2$ от технологических факторов B, t, Δ в нормированном виде соответственно X_1, X_2, X_3 имеют следующий вид:

$$Y_1 = s_1 = -1,052 + 0,152X_1 + 0,049X_2 + 0,184X_3 + 0,026X_1X_2 + 0,154X_1X_3 + 0,16X_2X_3 - 0,162X_1^2 - 0,151X_2^2 - 0,054X_3^2; \quad (1)$$

$$Y_2 = \sigma_2 = 0,182 + 0,024X_1 + 0,014X_2 + 0,052X_3 - 0,003 * X_1 X_2 - 0,003 * X_1 X_3 - 0,001 X_2 X_3 - 0,011 X_1^2 - 0,006 * X_2^2 + 0,022 X_3^2. \quad (2)$$

Значимость коэффициентов регрессии (1) и (2) проверяли по критерию Стьюдента: не все коэффициенты значимы с 95 %-ной доверительной вероятностью (* – незначимые коэффициенты). Адекватность уравнений регрессии (1) и (2) проверяли по критерию Фишера. Установлено, что модели адекватны при 10 %-ном уровне значимости.

Анализ статистической модели (1) показывает, что наибольшее влияние на уровень остаточных напряжений I-го рода оказывают магнитная индукция и размер гранул порошка. Обусловлено это тем, что при МАО наблюдается два вида деформирования металла: микрорезание со снятием тончайших стружек и выплаживание. Вследствие того, что при $V > 1$ Тл создается более жесткая и менее проницаемая для СОЖ масса порошка и резко повышается давление его на обрабатываемую поверхность, происходит переход от преобладающего микрорезания к выплаживанию. Это приводит к увеличению сил трения и соответственно количества тепла, выделяющегося в зоне обработки, что стимулирует развитие в поверхности растягивающих напряжений. Этим можно объяснить то, что зависимость $\sigma_1 = f(V)$ носит экстремальный характер.

С увеличением гранул порошка до определенного предела сжимающие напряжения должны возрастать, поскольку увеличиваются радиусы закругления вершин гранул порошка, что приводит к уменьшению глубины их внедрения в поверхность покрытия. В этом случае процесс микрорезания сменяется процессом частичного выплаживания поверхности, что и должно обуславливать повышение остаточных напряжений сжатия до определенного предела. Аналогичная закономерность происходит при увеличении времени обработки. В данном случае, очевидно, увеличение продолжительности обработки стимулирует за счет сил трения повышение температуры обрабатываемой поверхности. Поэтому зависимости $\sigma_1 = f(\Delta)$ и $\sigma_1 = f(t)$ также носят экстремальный характер.

Общезвестно, что остаточные напряжения II-го рода значительно влияют на прочность металлов и сплавов. Состояние высокой прочности сталей и сплавов характеризуется наличием больших искажений решетки. Разупрочнение сопровождается уменьшением искажений решетки. Остаточные напряжения II-го рода вызываются действием разных факторов [4].

Из анализа уравнения (2) следует, что наибольшее влияние на остаточные напряжения II-го рода как и на остаточные напряжения I-го рода оказывают магнитная индукция в рабочем зазоре и размеры гранул порошка, меньшее влияние оказывает время обработки.

Можно предположить, что зависимость остаточных напряжений II-го рода от технологических факторов V , t , Δ носит экстремальный характер, так как эта закономерность может быть объяснена действием рассмотренных выше явлений.

По степени влияния технологических факторов на параметры оптимизации их можно в порядке убывания значимости расположить в следующий ряд: $\Delta \rightarrow B \rightarrow t$.

Полученные уравнения регрессии (1) и (2) позволили методом многопараметрической оптимизации, используя обобщенную функцию желательности Харрингтона, определить следующий оптимальный режим МАО: $B = 1,2$ Тл, $t = 34$ с, $D = 200$ мкм, который обеспечивает в покрытии, полученном ЭМН с ППД ферропорошка Fe-6,5%Cr, остаточные напряжения сжатия I-го рода, равные 1,52 ГПа, и остаточные напряжения II-го рода, равные 0,29 ГПа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ящерицын П.И., Кожуро Л.М., Ракомсин А.П. и др. Технологические основы обработки изделий в магнитном поле. – Мн.: ФТИ НАНБ, 1997. – 416 с. 2. Кожуро Л.М., Чистосердов П.С., Ремизовский Э.И. и др. Шлифование металлов. – Мн.: Дизайн ПРО, 2000. – 352 с. 3. Кожуро Л.М., Чемисов Б.П. Обработка деталей машин в магнитном поле. – Мн.: Навука і тэхніка, 1995. – 232 с. 4. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.

УДК 621.620.193

Ж. А. Мрочек, В. И. Арбузов, В. Л. Хартон

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТОРМОЗНЫХ ЦИЛИНДРОВ АВТОМОБИЛЕЙ

Белорусская государственная политехническая академия

НПО "Фенокс"

Минск, Беларусь

Одной из многих проблем автомобилестроения является задача определения оптимальных методов защиты деталей и узлов автомобилей, работающих в агрессивной среде. Наибольшую ответственность за правильное решение этой задачи налагает выбор методов коррозионной защиты для деталей и узлов, обеспечивающих безопасность транспортного средства и человека, в т.ч. узлов тормозной системы. Решение этой задачи должно соответствовать требованиям обеспечения предусмотренной стандартами коррозионной стойкости узла, экономической целесообразности использования выбранного метода защиты деталей, увеличения их долговечности в условиях агрессивной среды, трения и износа. Решению этой задачи должны сопутствовать высокая производительность операций по осаждению защитных покрытий и невысокая стоимость расходных материалов.

Известно, что коррозионная защита ответственных деталей автомобилей осуществляется путем оксидирования, фосфатирования, цинкования, кадмирования, меднения, никелирования, хромирования и других способов.

Анализ коррозионной стойкости различных видов покрытий в агрессивной среде осуществляется по результатам испытаний на коррозионную стойкость деталей и узлов тормозных цилиндров в сборе при воздействии нейтрального соляного тумана согласно ГОСТ 9.308-85.

Сущность метода заключается в ускорении коррозионного процесса при повышении температуры испытательной среды и выведении в атмосферу раствора хлористого натрия.

Испытания на коррозионную стойкость различных видов покрытий проводятся в камере тепла и соляного тумана с автоматическим поддержанием температуры концентрации соляного тумана. Постоянство параметров испытательной среды в камере обеспечивается измерительной и регулирующей аппаратурой.

Для проведения испытаний используются следующие реактивы и растворы:

- натрий хлористый (ГОСТ 42233-77), содержащий примесей не более 0,4%;
- вода дистиллированная (ГОСТ 6709-72);
- раствор хлористого натрия с концентрацией 50г/дм³.

Образцы для испытаний помещали в камеру, которую нагревали до температуры 35° С, и подвергали воздействию соляного тумана. Продолжительность испытаний составила 72 часа. Отсчет времени испытаний начинали с момента достижения заданных значений контролируемых параметров. Испытания проводили при непрерывном распылении раствора. Показатели коррозии и коррозионной стойкости устанавливали по ГОСТ 9.308-85. Площадь коррозионных поражений определяли непосредственным измерением площади коррозионных поражений и оценивали величину коррозии в баллах (табл. 1).

Таблица 1

| Площадь коррозионного поражения, % | Оценочный балл |
|------------------------------------|----------------|
| Поражения отсутствуют | 10 |
| Св. 0 до 0,2 включительно | 9 |
| «0,2 « 0,5 « | 8 |
| «0,5 « 1,0 « | 7 |
| «1,0 « 2,5 « | 6 |
| «2,5 « 5,0 « | 5 |
| «5,0 « 10,0 « | 4 |
| «10,0 « 25,0 « | 3 |
| «25,0 « 50,0 « | 2 |
| «50,0 « 100,0 « | 1 |

Коррозионное поражение определяли для разных деталей тормозных цилиндров. Результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2

| Образец | Корпус | | Поршень | | Штуцер | |
|------------------------|---------|------|---------|------|---------|------|
| | Скор.,% | Балл | Скор.,% | Балл | Скор.,% | Балл |
| Без покрытия | 0 | 10 | 80 | 1 | 90 | 1 |
| С цинковым покрытием | 0 | 10 | 40 | 2 | 90 | 1 |
| С оксидированным слоем | 0 | 10 | 80 | 1 | 0 | 10 |

Анализ результатов исследований показывает, что изделия, изготовленные из чугуна практически имеют одинаковую коррозионную стойкость без покрытия и с исследуемыми покрытиями. В этом случае основную роль играет их декоративность, а на эксплуатационные свойства изделий покрытие влияния не оказывает. Образцы, изготовленные из стали Ст 5 (поршень) оценивается низкой коррозионной стойкостью при любых видах покрытия, но наиболее лучший результат получен при использовании цинкового покрытия. Испытуемые образцы типа “штуцер”, изготовленные из автомобильной стали показали наибольшую стойкость после оксидирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 9.308.85 Испытания на коррозионную стойкость. 2. Новые методы исследований коррозии металлов / Под ред. И.Л. Розенфельда. – М.: Наука, 1983. 3. Михайловский Ю.Н. Коррозия металлов в атмосферных условиях // Коррозия и защита от коррозии. – М.: ВИНТИ, 1984.

УДК 621.793.1

Ж.А. Мрочек, И.А. Иванов, В.А. Соколовский

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫХ СПОСОБОВ ОСАЖДЕНИЯ ПОКРЫТИЙ В ИНСТРУМЕНТАЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Белорусская государственная политехническая академия

Минск, Беларусь

Борисовский завод агрегатов

Борисов, Беларусь

По данным специальных исследований мирового рынка режущего инструмента (РИ), проведенных американской фирмой “Frost and Sullivan”, в ближайшие 4-5 лет среднегодовые темпы роста мировых продаж РИ составят 4,8%. Ожидается, что в 2003 году они составят 22 млрд долларов против 15,8 млрд долларов в 1996 году [1]. Только в Германии – признанного лидера в области машиностроения – общее производство инструмента (режущего, измерительного, зажимного) в 1998 году выросло на 9,5% [2]. Большое внимание уделяется разработке и производству РИ для скорос-

тного резания. Значительная роль в производстве такого инструмента отводится технологиям упрочнения его рабочих поверхностей. Анализ показывает, что наибольший интерес в последнее время вызывают способы нанесения многокомпонентных композиционных покрытий использующих в качестве рабочего вещества ионно-плазменные потоки, а в качестве рабочей среды – вакуум. Это связано с такими свойствами ионно-плазменных потоков, как высокие степень ионизации и энергия конденсирующихся частиц; нахождение элементов в потоке в атомарном возбужденном состоянии, что определяет управляемость потоком; высокой адгезией осаждаемых покрытий с основой и формированием плотных конденсатов. Среди этих методов всё более широкое распространение получают методы осаждения в вакууме, обладающие, кроме уже перечисленных, такими основными преимуществами как технологическая и экологическая чистота процесса, нанесение покрытий, отличающихся по своему химическому составу от материала подложки, возможность комбинирования методов осаждения и простота управления ими, низкие температуры подложки. Кроме этого, вакуумные технологии находятся на переднем крае научно-технического прогресса, следовательно, их освоение в инструментальном производстве будет способствовать повышению конкурентоспособности изготавливаемого РИ [3]. Для более эффективного использования данных методов упрочнения в инструментальном производстве надо знать не только их технологические возможности, но и сравнительные экономические показатели.

Цель работы – систематизировать имеющиеся в технической литературе сведения по эффективности использования вакуумно-плазменных технологий в машиностроении и инструментальном производстве.

В научной и технической литературе существующие вакуумно-плазменные методы нанесения покрытий в вакууме делят на методы катодного распыления, ионного осаждения и электродугового испарения в вакууме.

Катодное распыление. Суть метода состоит в распылении катода-мишени ионами газоразрядной плазмы с последующим осаждением атомов распыленного материала на поверхность детали. Коэффициент ионизации потока порядка 1%, энергия распыляемых частиц 1–3 эВ. Коэффициент использования материала близок к 100%. Однако, расстояние между мишенью и деталью должно быть небольшим, что накладывает ограничения на размеры обрабатываемой заготовки. Плазмообразующим газом, давление которого в разрядном промежутке составляет 10^{-1} Па, являются инертные газы (например, аргон) или смесь инертного и реакционного газа (например, смесь азота или ацетилен с аргонном), что позволяет получать на поверхности конденсации как металлические покрытия так и покрытия из карбидов или нитридов. Адгезия получаемых покрытий существенно выше адгезии вакуумных конденсатов. Недостатком способа является низкая скорость осаждения покрытий 0,005–0,3 мкм/мин (10^{-9} м/с). Разновидностью катодного распыления является магнетронный метод, позволяющий увеличить скорость осаждения покрытий до 10^{-7} м/с.

Ионное осаждение. Разновидность термического испарения в вакууме с ионизацией паров в плазме тлеющего разряда, поддерживаемого между испарителем и подложкой, сочетает в себе высокие производительность (до 20 мкм/мин) и хорошую адгезионную прочность к основе получаемых покрытий. Плотность ионного тока до 2 мА/см². Напряжение на разрядном промежутке от 1 до 10кВ, давление аргона в вакуумной камере 0,1–6 Па. Коэффициент ионизации –0,035–2%. Энергия нейтральных частиц превышает энергию таких же частиц при вакуумном осаждении покрытий. К недостаткам способа стоит отнести использование относительно громоздкого и дорогостоящего высоковольтного оборудования для испарения мишени, дополнительной ионизации парового потока и активации поверхности основы перед нанесением покрытий. Метод требует учета фракционирования компонентов при испарении многокомпонентных сплавов. Для преодоления этих трудностей при нанесении многокомпонентных покрытий разрабатываются методы взрывного испарения малых навесок и диффузионный отжиг предварительно нанесенных многослойных композиций [4].

Электродуговое испарение в вакууме. Стадия генерации в рассматриваемом способе нанесения покрытий обеспечивается за счёт эрозии одного из электродов в вакуумной электрической дуге. При этом имеет место самогенерация, т.е. среда необходимая для поддержания разряда возникает вследствие испарения материала электрода и дуга горит в его парах. Процесс испарения сопровождается интенсивной ионизацией, степень которой зависит от материала эродирующего электрода, и может составлять от 12–15% для легкоплавких металлов, до 50–100% для тугоплавких металлов. Процесс вакуумного электродугового нанесения покрытий включает две основные операции: ионную очистку поверхности детали и конденсацию материала покрытия. Процесс конденсации осуществляется сразу после ионной очистки путем уменьшения значения ускоряющего потенциала, т.е. снижения энергии конденсирующихся ионов [3]. Основные сравнительные показатели рассмотренных методов сведены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительная характеристика вакуумно-плазменных методов

| Сравниваемые параметры | Катодное распыление | Ионное осаждение | Электродуговое испарение |
|-----------------------------|---|--|--|
| Рабочее давление, Па | $10^{-1} \dots 10^0$ | 0.1...6 | $10^{-3} \dots 10^{-2}$ |
| Степень ионизации потока, % | 1...10 | 2 | 10...100 |
| Энергия частиц, эВ | 1...20 | 1...3 | 10...1000 |
| Состав потока | Ионы, атомы | Ионы, атомы | Ионы, атомы капли |
| Производительность, мкм/мин | $5 \times 10^{-3} \dots 3$ | До 20 | 0.1...1 |
| Другие особенности | Ограничения на размер подложки, коэф. использования 100%, использование реакционного газа | Использование дополнительных источников энергии для ионизации потока | Высокая управляемость потоком, использование реакционного газа |

Рядом исследователей был проведен сравнительный анализ вакуумных ионно-плазменных методов нанесения покрытий как друг с другом так и с другими методами получения защитных покрытий широко используемых в различных отраслях машиностроения. Так, в [5] проведено сравнение по плотностям потока осаждаемых частиц (j , ат/(см².с)) и средним кинетическим энергиям направленного движения конденсирующихся частиц (E , эВ) для способов термического испарения, катодного и магнетронного распыления, ионного и плазменного осаждения, металлургических и газотермических методов. Показано, что методы ионно-плазменного осаждения имеют наибольшие значения сравниваемых величин ($j = 10^{17} - 10^{23}$ ат/(см².с); $E = 10 - 1000$ эВ). Способ магнетронного распыления при тех же плотностях потока осаждаемых частиц имеет значительно меньшее значение средней кинетической энергии направленного движения конденсирующихся частиц ($E = 0,1 - 10$ эВ). Газотермические и металлургические способы, превосходящие все другие по плотностям потока осаждаемых частиц (j до 10^{26} ат/(см².с)), значительно уступают плазменным методам по энергиям частиц потока (E менее 10^{-2} эВ).

В [6] было проведено сравнение некоторых свойств покрытий формируемых разными способами. Показано, что покрытия из хрома осаждаемые способом магнетронного распыления имеют значительно более высокую прочность сцепления с основой чем покрытия полученные газоплазменным, электрохимическим методами или наплавкой. При этом коэффициент использования материала может достигать 0,95 [7]. В сравнении с гальваническими методами нанесения металлических пленок, электродуговые методы обладают лучшими экономическими показателями по производительности и затратам электроэнергии (табл. 2).

Таблица 2.

Сравнение параметров различных методов осаждения покрытий

| сравниваемые параметры | гальванический способ | Электродуговой способ |
|---|-----------------------|-----------------------|
| скорость нанесения никеля, (мкм/мин) | 0.24 | 0.4 |
| толщина покрытия, (мкм) | 40 | 15 |
| время нанесения покрытия, (ч) | 3 | 1 |
| потребляемая мощность, (кВт) | 15 | 8 |
| удельный расход электроэнергии, (кВт.ч/дм ²) | 0.3 | 0.15 |
| удельный расход электроэнергии на перенос 1 г вещества, (кВт.ч/г) | 90 | 45 |

Представляет интерес систематизация данных по количественному сравнению различных способов нанесения покрытий в вакууме (по пятибалльной системе) [8]. Сравнения проводились по свойствам формируемых покрытий, по особенностям технологии, по материалу покрытия и по стоимости оборудования. Наибольший балл присваивался наиболее технологичному параметру, а наименьший параметру, с точки

зрения которого оцениваемый метод неприемлем. Анализ показывает, что наиболее дорогими среди методов нанесения покрытий в вакууме являются технологии ионного осаждения, которые однако по свойствам формируемых покрытий и по материалу покрытия имеют наибольшее преимущество.

Приведенные данные говорят о том, что чем более высокую степень ионизации и энергию частиц потока допускает метод, тем более перспективным и универсальным является он для машиностроения. В сравнении с традиционно используемыми в инструментальном производстве металлургическими методами (ХТО) и методами химического осаждения, вакуумно-плазменные способы осаждения поверхности наиболее полно отвечают требованиям формирования на рабочих покрытиях РИ плотных конденсатов с высокими эксплуатационными свойствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Спрос на металлорежущие инструменты будет расти// Деловой визит. – 1999. – № 5. – С.54.
2. Stagnation auf hohem Niveau/ Sengebusck W.// Werkzeuge. – 1999. – Sonderpubl. № 1. – P.70, 72.
3. Емельянов В.А., Иванов И.А., Мрочек Ж.А. Вакуумно-плазменные способы формирования защитных и упрочняющих покрытий. – Мн.: БЕС-ТПРИНТ, 1998. – 284 с.
4. Вакуумные покрытия в машиностроении. – 1981. – 40 с.
5. Барвинок В.А. Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий. – М: Машиностроение, 1990. – 383 с.
6. Зеленин В.А., Миньков А.Л. Перспективы развития и использования вакуумных методов нанесения покрытий// Ресурсосберегающие технологии/Под ред. А.И.Свириденко, Гродно, БИТА, 1995. – Ч. 2. С. 103–109.
7. Плазменные и лазерные методы упрочнения деталей машин/Н.В.Спиридонов и др. Под ред. В.Н.Чачина. – Мн.: Выш.шк., 1988. – 56 с.
8. Костржицкий А.И., Лебединский О.В. Многокомпонентные вакуумные покрытия. – М.: Машиностроение, 1987. – 207 с.

УДК 621.785.048:669

Н.В. Спиридонов, А.С. Володько, В.В. Зенкевич, Л.И. Пилецкая

УПРОЧНЕНИЕ НИКЕЛЬ-ТИТАНОВЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

Белорусская государственная политехническая академия

Минск, Беларусь

К основным контролируемым параметрам газотермических покрытий относится адгезия покрытий к основе – одна из наиболее важных прочностных характеристик, влияющих на эксплуатационные свойства поверхности деталей машин и оборудования. Она определяется характером механо-физико-химических процессов взаимодействия

ствия материалов покрытия и подложки в процессе формирования поверхности. Роль каждого из этих процессов меняется в зависимости от многих факторов, свойств материалов покрытия и подложки, способа и режимов нанесения покрытия. Как правило, прочность сцепления напыленных газотермических покрытий невелика и не превышает 50–10 МПа. Прочность сцепления можно значительно повысить последующей обработкой покрытий высококонцентрированными потоками энергии. Поэтому большой практический интерес представляет определение влияния на прочностные характеристики покрытий высококонцентрированной энергии, такой как лазерной.

В качестве исходного материала для покрытий использован порошок марки ПН55Т45, представляющий собой интерметаллическое соединение никеля с титаном с гранулометрическим составом частиц до 160 мкм. В качестве материалов основы выбраны стали 20 и 45. Нанесение покрытий проводилось с использованием плазменной установки УПУ-3Д, последующая лазерная обработка – на технологической установке непрерывного действия ЛНГ-702. Адгезия покрытий сцепления определялась на разрывной машине МР-0,9-1.

Режимы лазерной обработки выбирались таким образом, чтобы термоупрочнение происходило без оплавления и с оплавлением покрытий. При толщине покрытия 0,4 мм глубина проплавления варьировалась от 0,2 до 0,6 мм, т.е. до подплавления материала основы. При этом происходило химическое взаимодействие по всей границе “покрытие-подложка”, а затем конвективное перемешивание контактирующих материалов. В результате оплавления образуется металлическая связь между покрытием и подложкой с увеличенной переходной диффузионной зоной. При этом структура покрытия уплотняется. Если химическое взаимодействие не получило достаточного развития из-за низкой прочности сцепления и наличия несплошностей на границе “покрытие-подложка” на стадии формирования покрытий, повысить прочность сцепления оплавлением не удастся.

Рентгеноструктурный анализ покрытий, обработанных лазерным излучением, показал изменение фазового состава их структуры (табл. 1). При этом прочность сцепления покрытия с подложкой увеличивается в результате развития процессов взаимодействия между напыленным материалом и подложкой. С ростом температуры образуются новые очаги химического взаимодействия в зоне контакта материалов, что особенно заметно при подготовке поверхности перед напылением в форме “рваной резьбы”.

При нагреве покрытия лазерным излучением до температуры, близкой к температуре плавления материала покрытия, происходит значительное увеличение прочности сцепления покрытия с подложкой (до 130 МПа), т.к. при этом формируется диффузионная зона между покрытием и подложкой. При дальнейшем нагреве покрытия лазерным излучением до температуры, близкой к началу плавления материала подложки, отмечается максимальная прочность сцепления с подложкой (190 МПа и выше).

**Изменение фазового состава структуры покрытий,
обработанных лазерным излучением**

| Температура поверхностного слоя, °С | Прочность сцепления, МПа | Основная фаза |
|---|-----------------------------|--|
| 800 | 60-65 | Ti ₂ Ni + TiNi ₃ |
| 1200 | 100-130 | TiO ₂ + TiNi ₃ |
| 1300 | 190 | TiO ₂ |

Рентгеноструктурным анализом установлено появление фазы TiO₂ и практически исчезновение TiNi-фазы в покрытии при температуре, близкой к температуре плавления подложки.

Таким образом, при обработке лазерным лучом плазменных покрытий из сплава ПН55Т45 происходит увеличение прочности сцепления с подложкой от 60 до 190 МПа, т.е. до 3 раз и более.

Данную технологию получения покрытий можно использовать для высоконагруженных пар трения – деталей машин и оборудования металлургического, энергетического, химического, нефтедобывающего и других производств, где требуются высокая износостойкость, устойчивость к коррозии.

При использовании технологии нанесения плазменных никель-титановых покрытий с последующей лазерной обработкой на шейки крупногабаритных валов – типа роторов нефтяных насосов износостойкость повышается в 1,5–2 раза.

УДК 621.793

Н. В. Спиридонов, В. В. Зенкевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАЗЕРНОГО УПРОЧНЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ИЗ ОКИСИ АЛЮМИНИЯ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Основными требованиями к режимам лазерной обработки осажденных покрытий из окиси Al являются создание условий перехода g- в α-модификацию кристаллической решетки, получение плотной, беспористой структуры и прочной связи с подложкой, исходя из чего и должны задаваться параметры теплового процесса.

Анализ явлений, протескающих при обработке покрытий концентрированными потоками энергии, показал, что для получения качественных поверхностных слоев из керамических материалов тепловой процесс должен протекать в режиме спекания без

расплавления подложки и покрытия. В противном случае будет происходить сворачивание покрытия из-за большого краевого угла смачивания. Вследствие инертности материала по отношению к подложке, отсутствия диффузионных процессов на границе “покрытие-подложка”, большого различия коэффициентов линейного расширения, необходимо вводить промежуточный слой материала для активизации контакта.

Так как в рассматриваемой модели отсутствует расплавление и затвердевание материалов покрытия и подложки, была поставлена упрощенная плоская тепловая задача, относящаяся к прямым граничным задачам теплопроводности со следующими условиями:

- материал покрытия – оксид алюминия (Al_2O_3);
- материал основы – сталь 45;
- пористость покрытия (Π) – 0,1–0,2;
- толщина покрытия (δ) – 0,5 мм;
- плотность мощности лазерного излучения в пятне нагрева (q_0) – 1,6–3,4 кВт/см²;
- скорость перемещения луча (V) – 11,7–20 мм/с;
- мощность лазерного излучения (P) – 800 Вт.

При постановке задачи сделаны следующие допущения:

а) теплофизические свойства оксида алюминия и стали не зависят от температуры;

б) распределение плотностей мощности на поверхности покрытия в пределах зоны воздействия лазерного луча – равномерное;

в) в связи с допущением б) и большим значением отношения $D/\delta \geq 12$ (D – диаметр пятна напыления на поверхности покрытия), тепловой поток вглубь материала считаем плоско-параллельным;

г) в связи с малой толщиной подслоя из сплава ПХ20Н80 или терморезирующего порошка ПТ-НА-01, считаем покрытие нанесенным непосредственно на основу из стали 45.

Таким образом, трехмерная в общем случае тепловая задача сводится к одномерной задаче теплопроводности с граничными условиями 3-го рода и дискретным изменением теплофизических свойств среды (Al_2O_3 -сталь) по координате. Граничным условием в данном случае является действие на поверхности покрытия поверхностного источника тепла, время действия которого в каждой из точек поверхности эквивалентно времени нахождения этой точки в зоне воздействия лазерного излучения.

В связи с большим числом варьируемых параметров (плотность мощности лазерного излучения – q ; скорость передвижения луча – V ; пористость – Π ; теплопроводность – λ ; температуропроводность – a), вычислительный эксперимент организован по типу полного факторного эксперимента 2^4 в методе ортогонального планирования. Число варьируемых – факторов равно четырем (Π ; λ , a); q ; V). Функцией отклика является температура T .

Согласно [1], температура в покрытии толщиной δ определяется уравнением:

$$T = T_0 + \theta \frac{q \cdot \delta}{\lambda} \quad (1)$$

где T – температура в покрытии, К; T_0 – постоянная температура, установившаяся при нагреве на границе основы и слоя Al_2O_3 , К; δ – толщина покрытия, м; θ – параметр температуры.

Температура, установившаяся на границе основы и слоя Al_2O_3 при лазерной обработке, определенная экспериментально с помощью термопары, составляет $T_0 = 558\text{--}573$ К. Для последующих расчетов принимаем значения $T_0 = 573$ К.

Параметр температуры θ определяем согласно [1] с использованием следующих уравнений:

$$\theta = 1 - \eta - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \times \sin[\mu_n(1 - \eta)] \exp(-\mu_n F_0) \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \mu_n &= (2n - 1) \times \frac{\pi}{2} \\ A_n &= (-1)^{n+1} \times \frac{2}{\mu_n^2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$F_0 = \frac{a \cdot \tau}{\delta} \quad (4)$$

$$\eta = \frac{x}{\delta} \quad (5)$$

где τ – время с момента начала воздействия поверхностного источника тепла, с; x – расстояние точки внутри слоя покрытия от поверхности, м; F_0 – безразмерный критерий Фурье.

Задаваясь значениями x и t , по уравнениям (2)–(5) рассчитываем параметр q и по уравнению (1) определяем значение температуры: $T = f(x, \tau)$.

Полученные зависимости температуры от глубины слоя оксида алюминия (рис. 1) имеют линейный характер. При различных режимах лазерной обработки можно получить в покрытии достаточно широкий диапазон температур. Исходя из поставленных задач исследований, были исключены из рассмотрения режимы, при которых на большой глубине достигалась температура выше температуры плавления оксида алюминия – 2323 К, а также режимы, при которых не достигалась вообще, либо достигалась на небольшой глубине температура нижней границы перехода $\gamma\text{-}Al_2O_3$ в $\alpha\text{-}Al_2O_3$ и спекания оксида алюминия. При остальных режимах обработки в покрытии до глубины 0,2–0,35 мм достигаются температуры, достаточные для спекания оксида алюминия и перехода $\gamma\text{-}Al_2O_3$ в $\alpha\text{-}Al_2O_3$, т. е. 1223–1753 К.

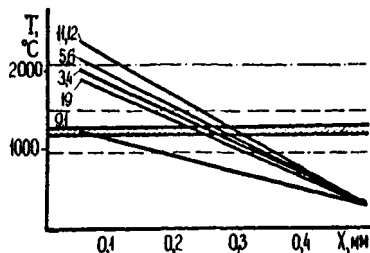


Рис. 1. Зависимость температуры (T) в слое Al_2O_3 от глубины (x) ($\tau=1c$):

- — линия температуры плавления Al_2O_3 ($2050^\circ C$);
- — линии граничных температур, при которых происходит переход $\gamma-Al_2O_3$ в $\alpha-Al_2O_3$ и спекание оксида алюминия (950 и $1480^\circ C$);
- ///////** — зона оптимальной температуры перехода $\gamma-Al_2O_3$ в $\alpha-Al_2O_3$ и спекания оксида алюминия ($1200-1300^\circ C$);

Зависимости температуры покрытия из оксида алюминия на глубине $0,2$ мм от времени, начиная с момента воздействия луча лазера, показывают, что нагрев покрытия наиболее интенсивно происходит в первые $0,2-0,4$ с, и затем в пределах до 1 с температура покрытия остается практически постоянной. Для режимов, когда в покрытии до глубины $0,2-0,35$ мм достигаются температуры, достаточные для спекания оксида алюминия и перехода $\gamma-Al_2O_3$ в $\alpha-Al_2O_3$, скорости нагрева покрытия изменяются от $3,5 \cdot 10^3$ до $6,9 \cdot 10^3$ град/с, т.е. составляют в среднем $5 \cdot 10^3$ град/с.

Таким образом, при лазерной обработке в покрытии достигаются температуры, достаточные для спекания оксида алюминия и перехода $\gamma-Al_2O_3$ в $\alpha-Al_2O_3$. Согласно литературным данным, процесс спекания оксида алюминия и перехода $\gamma-Al_2O_3$ в $\alpha-Al_2O_3$ достаточно длителен. Так, спекание оксида алюминия при 1573 К [2] продолжается 8 часов, а $\gamma-Al_2O_3$ переходит в $\alpha-Al_2O_3$ при $1733-1753$ К за 45 минут [3]. Однако известно [4], что спекание прессованных образцов, их усадка и переход $\gamma-Al_2O_3$ в $\alpha-Al_2O_3$ происходит тем эффективнее, чем быстрее достигается конечная температура.

Высокая скорость нагрева покрытия при лазерной обработке приводит к значительному ускорению процесса спекания и уплотнения покрытий из $\gamma-Al_2O_3$. То же самое можно сказать и о времени перехода $\gamma-Al_2O_3$ в $\alpha-Al_2O_3$, которое при высоких скоростях лазерного нагрева стремится ко времени, затрачиваемому на нагрев. Более того, т.к. скорость охлаждения после лазерной обработки также весьма велика, при охлаждении в покрытии должна фиксироваться высокотемпературная а-модификация оксида алюминия.

Для уточнения режимов лазерной обработки были построены зависимости температуры нагрева покрытия из оксида алюминия на глубине $x = 0,2$ мм при времени,

начиная с момента воздействия луча лазера $t = 1$ с, от плотности мощности поверхностного теплового источника (рис. 2).

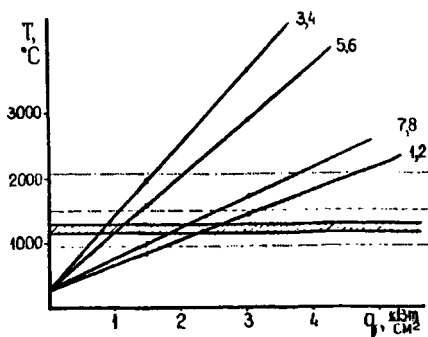


Рис. 2. Зависимость температуры покрытия из оксида алюминия (T) от плотности мощности поверхностного теплового источника (q) ($x=0,2$ мм; $\tau=1$ с):

----- — линия температуры плавления Al_2O_3 ($2050^\circ C$);

----- — линии граничных температур, при которых происходит переход $\gamma-Al_2O_3$ в $\alpha-Al_2O_3$ и спекание оксида алюминия (950 и $1480^\circ C$);

/////// — зона оптимальной температуры перехода $\gamma-Al_2O_3$ в $\alpha-Al_2O_3$ и спекания оксида алюминия ($1200-1300^\circ C$);

Используя зависимости рис. 1 и рис. 2, был произведен выбор режимов лазерной обработки, которые позволяют произвести спекание покрытия из Al_2O_3 и добиться перехода $\gamma-Al_2O_3$ в $\alpha-Al_2O_3$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пехович А.И., Жидких В.М. Расчеты теплового режима твердых тел. — Л.: Энергия, 1976. — 352 с.
2. Вяльцев А.М. Исследование условий получения и свойств плазменных окисных покрытий. // Исследования в обл. новых материалов. — Киев, 1977. — С.149–153.
3. Аппен А.А. Температуроустойчивые неорганические покрытия. — М.-Л.: Химия, 1976. — 296 с.
4. Некоторые аспекты спекания чистых окислов /С.Тейхнер, Р.Кейла, Дж.Эльстон, Ф.Жуле, А.Буррас, Б.Франсуа, П.Вернон//Керамика. Сборник трудов 1 и 2 конференций британского голландского керамических обществ. Металлургия. — М., 1967. — 228 с.

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ОСАЖДЕНИИ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ НА НЕМАГНИТНЫЕ ПОДЛОЖКИ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Как известно, вакуумно-плазменные электродуговые покрытия формируются в результате взаимодействия плазменного потока материала катода с подложкой, что определяет топографию ее поверхности. Несмотря на большое количество работ, посвященных свойствам вакуумных конденсатов [1–4] до сих пор не выяснены основные закономерности формирования шероховатости покрытий на немагнитных подложках. Поэтому выявление основных факторов, влияющих на шероховатость вакуумно-плазменных покрытий, а также изыскание технологических методов, обеспечивающих стабилизацию шероховатости поверхности в процессе нанесения покрытий представляется актуальным.

Формирование покрытий на подложках из немагнитных материалов проводилось с использованием вакуумной установки УРМЗ.279.048, оснащенной дополнительно импульсным генератором плазмы для получения покрытий из углеродной алмазоподобной пленки (УАП). Эксперименты проводились с использованием образцов из аустенитной стали 12Х18Н10Т, бронзы БрА10 и алюминиевого сплава Д16Т, имевших различную исходную шероховатость поверхности. Параметры шероховатости (R_a , R_{\max} , t_p) измерялись профилографом-профилометром модели 252. Режимы очистки и формирования покрытий TiN были следующими: ионная бомбардировка проводилась при ускоряющем напряжении 1000В и токи дуги 90А; осаждение покрытия осуществлялось при напряжении на образцах 100В, токе дуги 90А и давлении реакционного газа (азота) в камере 9×10^{-2} Па. Режимы осаждения УАП: напряжение разряда генератора (импульсного) $U = 300$ В, емкость накопителя $C = 5000$ мкф, число импульсов разрядов $N = 50 \cdot 10^3$. В качестве материала катода служил графит марки МПГ-6.

На рис. 1 показано изменение параметра шероховатости R_a поверхности образцов из аустенитной стали после нанесения покрытия из нитрида титана. Установлено, что при одинаковых условиях нанесения покрытий увеличение исходной шероховатости подложки (R_a) приводит к возрастанию шероховатости покрытия (R_a'). Анализ зависимостей позволяет выделить две характерные зоны. При исходном $R_a < 0,4-0,5$ мкм с нанесением покрытия среднее арифметическое отклонение профиля поверхностей увеличивается. Если $R_a = 0,5-1$ мкм, то нанесение покрытия не приводит к существенному изменению параметров шероховатости образцов, а отношение R_a/R_a' стре-

мится к 100%. Таким образом, при Ra более 0,5 мкм шероховатость покрытия будет определяться исключительно величиной шероховатости подложки.

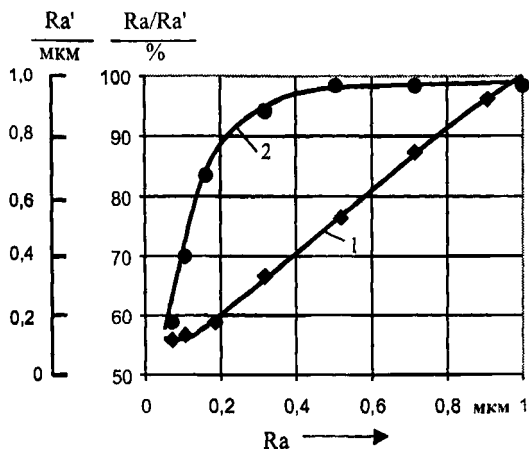


Рис. 1. Изменение шероховатости (Ra) поверхности (1) и относительной величины Ra/Ra' (2) покрытия из нитрида титана (подложка – сталь 12X18H10T; Ra – исходный параметр шероховатости; Ra' – после нанесения покрытия)

Аналогичное влияние на характер изменения высоты микронеровностей образцов оказывает нанесение покрытия из УАПП (рис. 2).

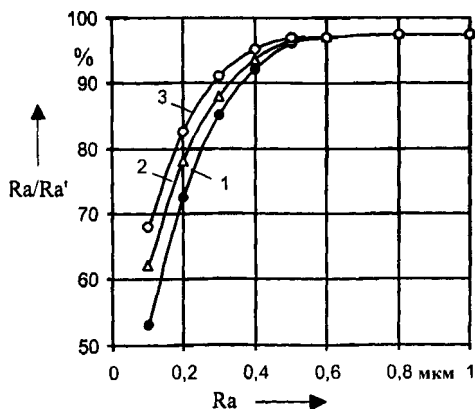


Рис. 2. Изменение шероховатости (Ra) поверхности при формировании покрытий из углеродной алмазоподобной пленки (1 – сплав Д16Т; 2 – бронза BrA10; 3 – сталь 12X18H10T; Ra – исходный параметр шероховатости; Ra' – после нанесения покрытия)

Следует отметить, что при исходной шероховатости $Ra > 1,5-2$ мкм шероховатость покрытия оказывается меньше исходной шероховатости подложки, что объясняется частичным разрушением пиков микронеровностей при ионной бомбардировке. Однако при шероховатости более $Ra 2-2,5$ мкм добиться сплошности покрытия практически невозможно из-за эффекта затенения, что не позволяет использовать такие защитные покрытия на практике. В то же время исходная шероховатость ниже $Ra 0,1 \dots 0,12$ мкм практически не влияет на конечную шероховатость покрытий, т.е. в этой области на шероховатость превалирующее влияние оказывают параметры процесса формирования покрытия.

Изменение относительной опорной длины профиля для образцов из аустенитной стали 12X18H10T после нанесения углеродной алмазоподобной пленки и TiN при различных исходных параметрах шероховатости показано на рис.3.

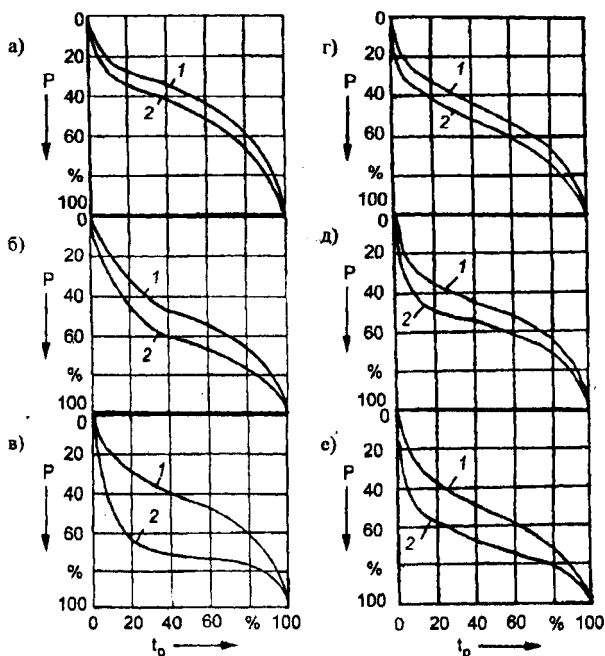


Рис.3. Изменение относительной опорной длины профиля t_p образцов из стали 12X18H10T в процессе осаждения углеродной алмазоподобной пленки (а-в) и нитрида титана (г-е) при исходном параметре шероховатости: а, г – $Ra 0,6$ мкм; б, д – $Ra 0,36$ мкм; в, е – $Ra 0,13$ мкм; 1 – до нанесения покрытия; 2 – после нанесения покрытия

Нанесение покрытий приводит к уменьшению относительной опорной длины профиля при любых исходных параметрах шероховатости образцов. Особенно значительно снижается t_p при минимальных исходных параметрах их шероховатости. Аналогичная картина наблюдается и для образцов из других исследуемых материалов. Значительное уменьшение t_p связано, по-видимому, с особенностями осаждения покрытия на образцах. Поскольку при нанесении покрытия подложка находится под напряжением, заряженные частицы осаждаются в первую очередь на выступах поверхности образца. Это приводит к увеличению параметров шероховатости R_a , R_{max} поверхности образцов после нанесения покрытия и к уменьшению относительной опорной длины профиля.

Для определения зависимости шероховатости поверхностей с покрытием TiN от исходной шероховатости подложки и толщины покрытия были подготовлены образцы из стали 12X18H10T после точения, шлифования и полирования. При этом исходная шероховатость составляла R_a 3,2–0,16 мкм. Осаждение покрытия проводилось при следующих режимах: $I=90$ А, $U_{\text{н}}=120$ В, $P=9 \times 10^{-2}$ Па. Толщина покрытия изменялась в пределах 3–15 мкм. Результаты эксперимента представлены на рис. 4.

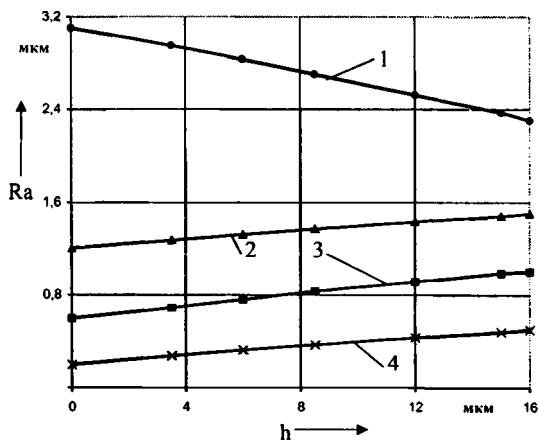


Рис.4 Зависимость шероховатости (R_a) поверхности образцов с покрытием TiN от толщины покрытия и шероховатости подложки: 1 – R_a 3,2 мкм (чистовое точение); 2 – R_a 1,25 мкм (тонкое точение); 3 – R_a 0,63 мкм (шлифование); 4 – R_a 0,16 мкм (полирование)

Анализ полученных зависимостей показывает, что шероховатость покрытия зависит как от толщины покрытия, так и от исходной шероховатости R_a и может либо

уменьшаться (при $Ra > 1,6$ мкм), либо увеличиваться (при $Ra < 1,6$ мкм) с увеличением толщины покрытия.

Для определения зависимости шероховатости покрытий от технологических параметров процесса (тока дуги I , напряжения на подложке U_n , давления реакционного газа P) были подготовлены образцы из стали 12X18H10T с различной исходной шероховатостью поверхности. Режимы осаждения покрытия изменялись в следующих пределах: $I = 80-130$ А, $U_n = 0-200$ В, $P = (2-14) \times 10^{-2}$ Па.

Зависимость шероховатости покрытия от тока дуги и напряжения на подложке представлена на рис.5. Установлено, что с ростом потенциала на подложке шероховатость покрытия уменьшается, особенно при большей исходной шероховатости. Это связано с увеличением энергии ионов, прибывающих на подложку, что интенсифицирует процесс самораспыления поверхности. При этом наиболее активно распыляются вершины микронеровностей, являющиеся концентраторами напряженности электрического поля. В результате происходит сглаживание микрорельефа поверхности и общее снижение ее шероховатости.

Увеличение тока дуги способствует росту количества капель и макроблоков материала катода в плазменном потоке, а, следовательно, и в покрытии. Поскольку капли и макроблоки являются своеобразными затравками для роста пиков микронеровностей, то при увеличении тока дуги шероховатость покрытия должна увеличиваться, что подтверждается результатами эксперимента (рис.5, зависимости 3 и 4).

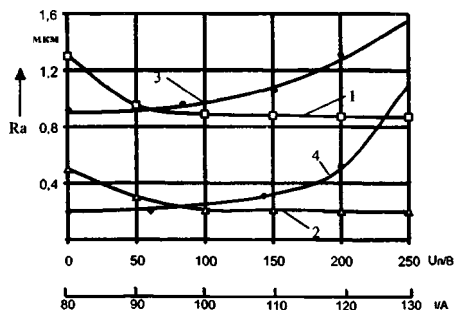


Рис. 5. Зависимость шероховатости (Ra) образцов с покрытием TiN от напряжения на подложке U_n (1 и 2) и тока дуги I (3 и 4) при исходной шероховатости образцов: 1, 3 – Ra 0,8 мкм; 2, 4 – Ra 0,1 мкм

Для определения влияния на шероховатость покрытия капельной фазы и давления реакционного газа была разработана специальная методика. В одном цикле напыления в камеру устанавливалось по 4 образца таким образом, чтобы 2 образца находились при очистке и напылении под открытым потоком плазмы, а 2 образца находились

при очистке и напылении под экраном. Полученные зависимости представлены на рис. 6. Анализ результатов экспериментов показывает, что шероховатость образцов, находившихся под открытым потоком, с ростом давления уменьшается, что вызвано, очевидно, уменьшением количества капельной фазы в плазменном потоке. Шероховатость образцов, находившихся под экраном (капельная фаза отсутствует), от давления реакционного газа не зависит и определяется исходной шероховатостью поверхности подложки.

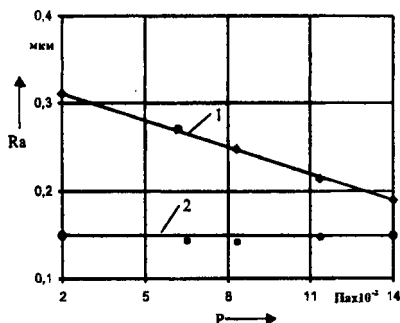


Рис. 6. Зависимость шероховатости (Ra) образцов с покрытием TiN от давления P при расположении образцов: 1 — под открытым потоком плазмы; 2 — под экраном (исходная шероховатость Ra 0,1 мкм)

Таким образом, основными факторами, определяющими шероховатость покрытия, являются: исходная шероховатость подложки, материал катода, режимы осаждения и толщина покрытия. Наибольшее влияние на шероховатость покрытия оказывают факторы, связанные с процессом испарения катода (ток дуги и давление реакционного газа) и практически не влияют факторы, связанные с процессом конденсации (напряжение на подложке). При устранении капельной фазы шероховатость покрытия определяется исходной шероховатостью подложки и практически не зависит от режимов осаждения покрытия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Витязь П.А., Дубровская Г.Н., Кирилук Л.М. Газофазное осаждение покрытий из нитрида титана. — Мн.: Наука и техника, 1983. — 96 с.
2. Ройх И.Л., Колтунова Л.Н., Федосов С.Н. Нанесение защитных покрытий в вакууме. — М.: Машиностроение, 1976. — 368 с.
3. Ройх И.Л., Колтунова Л.Н. Защитные вакуумные покрытия на стали. — М.: Машиностроение, 1971. — 280 с.
4. Костржицкий А.И., Лебединский О.В. Многокомпонентные вакуумные покрытия. — М.: Машиностроение, 1987. — 207 с.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И СРЕДСТВА ОПТИМАТИЗАЦИИ

УДК 621.757

Е.Б. Вериго, Л.В. Курч, И.А. Политов

МЕТОДИКА УЧЕТА ВЛИЯНИЯ ОШИБКИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ СХВАТА ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА НА ВЕРОЯТНОСТЬ СБОРКИ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Характерной особенностью технологических процессов сборки является их серийный или массовый характер. Поэтому при моделировании сборочных процессов на первом плане стоит формирование требований к точности позиционирования схвата манипулятора промышленного робота на основе анализа размерных цепей сборочных соединений [1, 2].

Результатом расчетов размерных цепей является поле рассеивания замыкающего звена, обеспечивающее заданный зазор при соединениях с зазором. Значение поля рассеивания замыкающего звена является определяющим при оценке требуемой точности позиционирования схвата манипулятора промышленного робота. Очевидно, что использование промышленного робота с точностью позиционирования схвата значительно превышающей требуемую точность к соединению деталей сборочного комплекта является неэффективным, поэтому встает задача подбора наиболее рационального, с точки зрения точности, сборочного манипулятора на выполнение заданной сборочной операции [3]. На практике по техническому паспорту выбирается модель промышленного робота, обеспечивающая требуемую точность позиционирования схвата для успешного соединения деталей сборочного комплекта. В ряде случаев, когда на предприятии отсутствуют промышленные роботы, обеспечивающие заданную номинальную точность позиционирования схвата и требуется покупка оборудования с более высокими точностными характеристиками, или когда имеющиеся промышленные роботы имеют значительно более высокую номинальную точность позиционирования рабочего органа, чем требуемая для обеспечения заданных сборочных операций, требуется проводить дополнительные исследования точностных характеристик сборочных манипуляторов в соответствии с стандартом ISO 9283 [4]. Целью таких исследований является получение экспериментальных данных точности позиционирования и позиционной повторяемости имеющихся в наличии сборочных манипуляторов для возможности обеспечения требуемой точности сборочных операций. При этом, как показывают экспериментальные данные, значения точности позиционирования

ния и позиционной повторяемости в некоторых точках рабочей зоны робота в несколько раз превышают номинальное значение точности позиционирования схвата робота, указанное в паспортных данных на это оборудование [3]. Таким образом, перед проектированием заданных сборочных операций необходимо построить карты статистических оценок точностных характеристик схвата промышленного робота для имеющихся на предприятии сборочных манипуляторов в рабочих точках и при выборе сборочного манипулятора проводить сравнение с экспериментальными характеристиками, полученными в соответствии со стандартом ISO 9283 [4].

Так как для оценки собираемости сборочных комплектов в массовом и серийном производстве используются статистические оценки, то собираемость сборочных комплектов оценивается вероятностью сборки. На рис. 1 представлена блок-схема методики учета точности позиционирования схвата сборочного манипулятора при моделировании сборочного процесса.

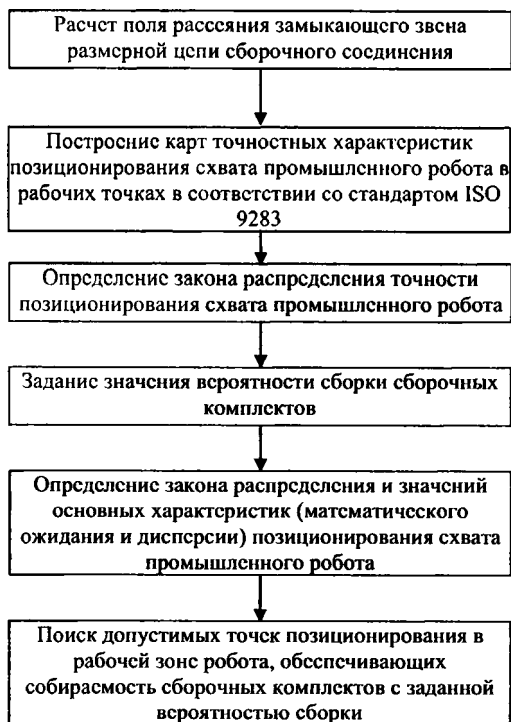


Рис. 1. Блок-схема методики учета точности позиционирования схвата промышленного робота при автоматизированной сборке

При проектировании сборочных процессов по принципу полной взаимозаменяемости производится расчет размерных цепей на максимум и минимум, учитывая только предельные отклонения звеньев и самые неблагоприятные их сочетания.

Рассмотрим автоматическую сборку с зазором сборочного комплекта вал – втулка с наружным диаметром вала x_1 , внутренним диаметром втулки x_2 и ошибкой позиционирования схвата промышленного робота ω . Значения x_1 и x_2 определены по принципу полной взаимозаменяемости и являются постоянными величинами. Величина ошибки позиционирования схвата ω промышленного робота принимается случайной величиной. Анализ законов распределения точности позиционирования рабочего органа манипулятора промышленного робота показал, что наиболее часто имеют место закон Гаусса и закон Рэля [1]. Условие собираемости, т.е. возможности совместить вал и втулку, в общем случае при отсутствии у деталей фасок записывается как:

$$x_2 - x_1 \geq 2 \omega.$$

Пусть $f(\omega)$ и $F(\omega)$ являются соответственно плотностью вероятности и функцией распределения случайной ошибки позиционирования рабочего органа ω . Тогда вероятность сборки p_c сборочных комплектов вал – втулка при заданных условиях определяется выражением:

$$p_c = F\left(\frac{x_2 - x_1}{2}\right).$$

В случае закона распределения Рэля у ошибки позиционирования схвата робота вероятность сборки p_c сборочных комплектов принимает вид:

$$p_c = 1 - e^{-\frac{(x_2 - x_1)^2}{8\sigma_\omega^2}} \quad (1)$$

где σ_ω^2 – дисперсия ошибки позиционирования схвата промышленного робота ω .

На основе формулы (1) определяется дисперсия ошибки позиционирования:

$$\sigma_\omega^2 = -\frac{(x_2 - x_1)^2}{8 \ln(1 - p_c)} \quad (2)$$

При моделировании сборки в формулу (2) необходимо вводить эмпирический коэффициент риска k_p для заданных условий сборки:

$$\sigma_\omega^2 = -\frac{(x_2 - x_1)^2}{8 \ln(1 - p_c)} k_p \quad (3)$$

Формула (3) позволяет определить требование к точности позиционирования схвата манипулятора промышленного робота при законе распределения Рэля ошибки позиционирования схвата робота.

В случае закона распределения Гаусса случайной ошибки позиционирования схвата ω с математическим ожиданием m_ω и среднеквадратическим отклонением σ_ω , вероятность сборки записывается в форме:

$$p_c = \Phi\left(\frac{x_2 - x_1 - m_\omega}{\sigma_\omega}\right),$$

где $\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ – нормированная функция Лапласа; t – параметр функции Лапласа.

Компьютерное моделирование формулы (4) позволяет сформировать область допустимых значений $D(m_\omega, \sigma_\omega)$, обеспечивающих требуемую вероятность сборки p_c с учетом коэффициента риска k_p .

Использование формул (3) и (4) позволяет сформировать наиболее рациональные требования к точностным характеристикам позиционирования схвата сборочного манипулятора при расчете размерных цепей по принципу полной взаимозаменяемости для сборки соединений типа вал – втулка и на практике позволяет наиболее рационально планировать собираемость сборочных комплектов за счет оптимального использования точностных характеристик имеющегося сборочного оборудования.

Аналогичные вероятностные модели собираемости сборочных комплектов могут быть сформированы и для сборки методом неполной взаимозаменяемости.

В работе представлена методика учета точности позиционирования рабочего органа сборочного манипулятора, позволяющая наиболее точно планировать собираемость сборочных комплектов при наиболее рациональном выборе точностных характеристик автоматизированного сборочного оборудования на основе вероятностной модели сборки с зазором и расчете размерных цепей методами полной и неполной взаимозаменяемости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гусев А.А. Расчет режимов сборочного процесса для автоматизации сборки деталей по поверхностям вращения// Автоматизация и современные технологии. – 1995. – № 5. – С. 13–23.
2. Катковник В.Я., Савченко А.И. Основы теории селективной сборки. – Л.: Политехника, 1991. – 303 с.
3. Вериго Е.Б., Курч Л.В. Повышение точности проведения сборочных операций с использованием промышленных роботов//Автоматизация и современные технологии. – 2000. – № 7. – С. 8–11.
4. ISO 9283. Manipulating industrial robots – Performance criteria and related test methods. – ISO, 1998. – 60 p.

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТАНОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

*Полоцкий государственный университет
Новополоцк, Беларусь*

Обработка резанием является основным процессом формообразования рабочих поверхностей изделий, поэтому повышение ее эффективности имеет важное практическое значение. Данная проблема наиболее актуальна при производстве изделий со сложнопрофильными поверхностями, достигнутый уровень технологии формообразования которых зачастую ниже, чем поверхностей простой геометрической формы. Это обстоятельство и широкое применение в технике сложнопрофильных изделий обуславливают необходимость интенсификации процессов их обработки. Целесообразен комплексный подход к решению данной проблемы, основанный на представлении технологии формообразования как совокупности схемы формообразования поверхности, метода ее обработки и обрабатывающей системы. Поэтому интенсификация процессов обработки при разработке технологий формообразования связана с синтезом и оптимизацией указанных ее структурных компонентов с учетом их взаимосвязи.

Ведущая роль в обеспечении эффективности создаваемых объектов принадлежит концептуальному проектированию. Применительно к рассматриваемой проблеме оно связано, в первую очередь, с анализом и синтезом схем формообразования, методов обработки, а также структуры реализующих их формообразующих систем, что относится к основным задачам концептуального проектирования металлорежущих станков [1]. Допущенные здесь ошибки, как показывает практика, не могут быть компенсированы на последующих этапах проектирования.

Научно-обоснованное решение указанных задач обеспечивает интенсификацию процессов обработки резанием. Следует отметить, что данное направление менее исследовано по сравнению с традиционными направлениями интенсификации процессов обработки. В этой связи актуальна разработка основ синтеза эффективных технологий формообразования сложных поверхностей. Ей посвящена работа [2], выполненная по заданию межвузовской программы фундаментальных исследований “Машиностроение”. Ниже рассмотрены некоторые аспекты данной проблемы.

Возможность обработки любой поверхности разными технологическими методами обуславливает необходимость проведения на этапе проектирования станка их сравнительного анализа для выбора более эффективного. Невыполнение такого анализа

является, видимо, причиной создания для предварительной обработки однотипных по форме и размерам поверхностей, например лопастей гребных винтов, станков, работающих торовой, концевой сферической, наклоненной торцевой фрезами или строганием. Выбор метода обработки сложной поверхности должен осуществляться исходя из разрешающей возможности режущего инструмента по критериям, учитывающим особенности процесса ее формообразования и характеристики процесса резания, определяющие эксплуатационные требования к проектируемому станку [3].

Основой сравнительного анализа служат геометрический и кинематический анализ методов обработки, при котором определяются:

– кинематические и геометрические параметры схемы резания, в частности, ширина b и толщина a среза, их средние b_{cp} , a_{cp} и максимальные b_{max} , a_{max} значения;

$$– \text{ время обработки } T_0 = Ft(1 + \mu) (V a_p m_0)^{-1}$$

где F – площадь формируемой поверхности, t – припуск, μ – отношение скоростей рабочего и холостого ходов при цикловой обработке, V – скорость резания, m_0 – длина образующих поверхностей резания, создаваемых одновременно работающими зубьями;

– показатели неравномерности $K_a = a_{cp}/a_{max}$, $K_b = b_{cp}/b_{max}$, $K_{ab} = K_a K_b$ соответственно по толщине, ширине и площади среза, характеризующие динамику процесса резания;

– коэффициент непрерывности P процесса резания, отражающий соотношение времени контакта режущих элементов с заготовкой и общего времени обработки;

– погрешность формообразования, равная максимальному отклонению h обработанной поверхности от номинальной поверхности изделия.

Исходя из указанных показателей сравнительный анализ методов обработки проводится по критериям производительности $K_T = T_{in}/T_{aj}$, неравномерности $K_{ab} = K_{abi}/K_{abj}$ и непрерывности $K_p = P_i/P_j$, процесса резания, точности формообразования $K_h = h_i/h_j$ с учетом решающей возможности инструментов, параметров номинальной поверхности изделия и схемы ее обработки.

Данная методика является универсальной, позволяет на основе сравнительного анализа установить область рационального применения возможных методов обработки и выявить наиболее эффективные из них для реализации проектируемым станком.

Заданная поверхность может быть обработана принятым методом по множеству схем формообразования, различающихся расположением инструмента и заготовки, траекторией их относительного перемещения, формой инструментальной поверхности, методом генерации поверхности изделия, кинематикой формообразования. Схема формообразования, как основа кинематической схемы станка, определяет координатные перемещения его исполнительных органов и влияет на эффективность способа обработки [4], что обуславливает необходимость ее обоснования на стадии проектирования обрабатываемой системы. Синтез схемы формообразования состоит в определении

лении указанных ее компонентов, исходя из их влияния на производительность и точность формообразования.

Особенностью обработки сложных поверхностей является возможность зачистую только циклового генерирования образующих, что характерно для способов строчечной обработки. В этом случае при межстрочечной подаче S и скорости V движения формообразования производительность формообразования $Q = K_u V S$, где $K_u = (1 + \mu + V t_n / F)^{-1}$ – коэффициент цикловой непрерывности [4]. Он зависит от отношения m скоростей рабочего и холостого ходов в цикле, потери времени t_n между циклами, длины образующей l и площади F номинальной поверхности обрабатываемого изделия. Значение K_u и следовательно, производительности зависит от направления движения формообразования. Поэтому данный коэффициент служит количественной оценкой совершенства схем обработки по критерию непрерывности процесса формообразования.

При обработке сложных поверхностей характеристический образ инструмента обычно не конгруэнтен образующей номинальной поверхности изделия, т.е. имеет место приближенное формообразование с максимальным отклонением обработанной поверхности от номинальной, равным высоте h межстрочечных гребней. Она зависит от формы контакта производящей поверхности инструмента с номинальной поверхностью изделия и ширины строчек (элементарных поверхностей). Управление точностью профилирования за счет регулирования межстрочечной подачи снижает технологическую производительность, поэтому более эффективным является стабилизация формы контакта данных поверхностей за счет управления характеристическим образом инструмента [5] для обеспечения постоянства величины $|K_1 + K_2|$ где K_1, K_2 – кривизна образующей номинальной (элементарной) поверхностей. В этом случае производительность формообразования зависит от степени приближения элементарных поверхностей к номинальной, так как межстрочечная подача $S = (8h(|K_1 + K_2|)^{-1})^{0.5}$

Величина $|K_1 + K_2|$ численно определяет соответствие форм образующих указанных поверхностей и является количественной характеристикой критерия оптимального контакта. Минимизация и стабилизация величины $|K_1 + K_2|$ при обработке поверхности переменной кривизны обеспечивается управлением характеристическим образом инструмента (величиной K_2) за счет параметров настройки или введения дополнительного корректирующего или ориентирующего движения. Фактором, ограничивающим значение $|K_1 + K_2|$ является условие проходимости инструмента, исключающее пересечение его исходной инструментальной поверхности с номинальной поверхностью изделия. В этой связи основой для определения параметров схемы формообразования является исследование геометрии и условий контактирования данных поверхностей. При невыполнимости обоих критериев выбор общих схем обработки должен осуществляться по обобщенному критерию, оптимальному значению которого соответствует максимум выражения $K_u / |K_1 + K_2|$ Указанные критерии позво-

ляют обоснованно подойти к выбору направления и траектории движения формообразования и оптимизировать схему обработки.

Таким образом, выбор схемы формообразования включает исследование геометрии номинальной поверхности изделия, определение с учетом проходимости формы характеристического образа и производящей поверхности инструмента, задание его положения, направления и траекторий перемещения относительно формируемой поверхности, введение движений для управления характеристическим образом инструмента.

Кинематика формообразования, являясь основой кинематической схемы обработки, в значительной степени определяет кинематику станка, его производительность, универсальность и другие показатели эффективности. Поэтому ее разработка относится к основным этапам концептуального проектирования станка. Кинематика формообразования сложных поверхностей обусловлена одновременностью множества взаимосвязанных элементарных движений, создающих исполнительные движения с переменными параметрами их траекторий. Задачами синтеза кинематики формообразования являются определение количества, структуры и параметров исполнительных движений исходя из реализуемого метода формообразования поверхности и рационального распределения функции формообразования между инструментом и кинематикой станка. Следует учитывать, что перенесение функции формообразования на инструмент позволяет существенно упростить кинематику станка, однако ограничивает его универсальность и возможность управления процессом резания.

В структуре исполнительных движений предпочтительны комбинации нереверсивных движений, обеспечивающих лучшие динамические условия работы механизмов станка. Исключение реверсивных движений возможно конструктивными и кинематическими методами. На этом основаны прогрессивные способы обработки некруглых поверхностей и зубчатых колес с бочкообразными зубьями [6,7]. Сложная структура исполнительных движений обуславливает множество возможных кинематических схем обработки и соответствующих им кинематических схем проектируемого станка. Общие приемы оптимизации кинематики формообразования сложных поверхностей и построения кинематических схем обработки рассмотрены в [1, 8].

Принятая кинематическая схема обработки поверхности реализуется кинематической структурой станка, представляющей основу для проектирования его кинематики и компоновки, в значительной степени определяющих производительность, точность, универсальность и другие технико-экономические показатели. Поэтому синтез оптимальной кинематической структуры является важным условием обеспечения высокой эффективности станка. Синтез включает построение внешних и внутренних связей кинематических групп и рациональное размещение в них органов настройки с учетом принятого способа соединения групп [9]. Оптимизация кинематической структуры станков для обработки сложных поверхностей предполагает обоснованность решений по каждому этапу синтеза [10], исходя из неравномерности движений испол-

нительных органов и наличия ориентирующих движений, необходимости обеспечения как процесса формообразования, так и оптимальных условий резания. Синтез кинематической структуры упрощается при использовании типовых кинематических модулей [11]. На этой основе разработаны структуры станков, реализующих прогрессивные способы формообразования винтовых поверхностей переменного шага, некруглых зубчатых колес и колес с бочкообразными зубьями, профильных и прерывистых моментопередающих поверхностей [8, 10, 12, 13].

Изложенные принципы интенсификации процессов формообразования использованы при создании выпускаемого Витебским станкостроительным заводом им. Коминтерна широкоуниверсального станка модели ВС-50 и инструментального оснащения к нему для обработки сложнопрофильных изделий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев Г.Н. Автоматизация проектирования металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1987. – 280 с.
2. Разработка и моделирование эффективных способов формообразования и процессов резания непрерывных и прерывистых поверхностей деталей машин в условиях автоматизированного производства: Отчет о НИР (заключ.) / Полоцкий гос. ун-т.; Руководитель работы В.А. Данилов; №ГР19974051. – Новополоцк, 1999. – 220 с.
3. Данилов В.А. Сравнительный анализ методов фрезерования сложных поверхностей // Машиностроение. – Мн., 1985. – Вып. 10. – С. 102-106.
4. Данилов В.А. Влияние схем формообразования на эффективность обработки резанием сложных поверхностей // Изв. вузов. Машиностроение. – 1982. – № 6. – С. 105–108.
5. Данилов В.А., Данилова Л.А. Определение рациональных схем профилирования сложных поверхностей // Машиностроение. – Мн., 1986. – Вып. 11. – С. 63–67.
6. Данилов В.А. Схемы формообразования некруглых цилиндрических поверхностей при обработке резанием // Изв. вузов. Машиностроение. – 1984. – № 12. – С. 100–104.
7. Данилов В.А. Прогрессивные способы обработки колес с бочкообразными зубьями // Вестник машиностроения, 1996. – № 6. – С. 12–14.
8. Данилов В.А. Формообразующая обработка сложных поверхностей резанием. – Мн.: Наука і тэхніка, 1995. – 264 с.
9. Федотенок А.А. Кинематическая структура металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1970. – 403 с.
10. Данилов В.А. Некоторые пути совершенствования кинематической структуры станков для обработки сложных поверхностей // Изв. вузов. Машиностроение. – 1984. – № 8. – С. 152–157.
11. Данилов В.А. Синтез и оптимизация кинематической структуры станков с использованием типовых модулей // СТИН. – 1999. – № 7. – С. 9–15.
12. Данилов В.А. Усовершенствованные станки для нарезания колес с бочкообразными зубьями // Машиностроитель. – 1990. – № 15. – С. 14–15.
13. Данилов В.А. Станки для обработки профильных поверхностей, передающих момент // Техника машиностроения. – 1998. – № 4. – С. 102–105.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ И ГЕОМЕТРИИ ЧЕРВЯЧНОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОЙ ОБРАБОТКИ ПЛОСКОГО ЗУБЧАТОГО КОНТУРА

*Полоцкий государственный университет
Новополоцк, Беларусь*

Интенсификация процессов обработки плоских зубчатых контуров на торцах деталей типа храповых муфт, индукторов и т.п. имеет важное практическое значение, так как применяемые схемы формообразования и станочное оборудование зачастую не обеспечивают требуемые производительность и точность. Это относится и к наиболее распространенной технологии обработки пазов по методу единичного деления на универсальных фрезерных станках. В этой связи заслуживают внимания схемы обработки, основанные на совмещении движений формообразования и деления, что обеспечивает одновременно повышение производительности и точности нарезания зубчатых контуров.

Анализ кинематической структуры и компоновки существующих станков показывает возможность реализации таких схем на универсальных зубо- и шлицефрезерных станках при оснащении их специальными инструментами дискового или червячного типов, соответственно в виде резовых головок и червячных фрез. Последние обеспечивают более высокую производительность процесса нарезания пазов при расположении режущих зубьев на конической винтовой линии [1]. Изготовление и заточка таких фрез представляет определенные технологические трудности, поэтому разработана более простая в реализации схема нарезания зубчатых контуров цилиндрической червячной фрезой (рис. 1), ось вращения которой наклонена к плоскости вращения заготовки. Определим параметры схемы формообразования и геометрии инструмента, необходимые для ее реализации.

При обработке плоских зубчатых контуров наклоненной червячной фрезой заготовке и инструменту сообщают согласованные вращательные движения, соответственно V_1 и V_2 , с частотами n_1 и n_2 вокруг скрещивающихся под углом ϵ осей. При этом инструмент устанавливают так, чтобы образовался определенный угол λ между плоскостью вращения формообразующих элементов и плоскостью, проходящей через ось вращения заготовки и точку пересечения оси вращения инструмента с плоскостью вращения его режущих элементов. Величина этого угла должна удовлетворять зависимости

$$\lambda = \arcsin \frac{R_{cp}}{R_m}, \quad (1)$$

где R_{CP} – средний радиус расположения пазов; R – радиус червячного инструмента; m – число формируемых пазов.

Угол скрещивания осей ϵ , задаваемый при настройке станка, рассчитывается по формуле

$$\epsilon = \frac{\pi}{2} + \operatorname{arctg} \frac{f}{L \cos \lambda \sin(\lambda + \delta) - R_{CP} \sin \lambda}, \quad (2)$$

где f – глубина формируемых пазов; δ – угловой шаг расположения пазов; L – параметр установки инструмента относительно оси заготовки.

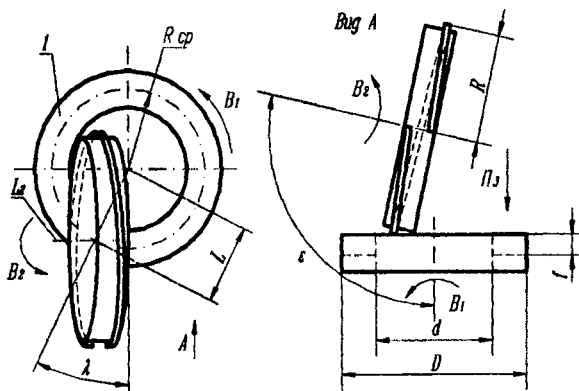


Рис. 1 Схема формообразования прерывистых поверхностей червячным инструментом

При наклоне червячного инструмента для образования угла скрещивания ϵ имеет место искажение номинального расположения режущих элементов. Для обеспечения попадания их в формируемые пазы величина k_1 , определяющая относительное расположение режущих элементов вдоль оси вращения инструмента должна удовлетворять условию

$$k_1 = \frac{L \cos \lambda \sin \left(\lambda + \frac{\beta_1 \delta}{2\pi} \right) - R_{CP} \sin \lambda}{\sin \epsilon}, \quad (3)$$

где β_1 – величина, задающая угловое относительное расположение режущих элементов.

Для выполнения в процессе формообразования операции деления требуется соответствующая настройка отношения частот вращения инструмента и заготовки

$$n_2/n_1 = m \quad (4)$$

Затирание по левой и правой сторонам режущих элементов исключается, если

$$\alpha_{вл} \geq 90 - \operatorname{arctg} \frac{2(k_l \sin \varepsilon + 0.5t + R_{cp} \sin \lambda)}{\sqrt{d^2 - (k_l \sin \varepsilon + 0.5t + R_{cp} \sin \lambda)^2}} + \alpha_3 \quad (5)$$

$$\alpha_{вл} \geq 90 - \operatorname{arctg} \frac{2(k_l \sin \varepsilon - 0.5t + R_{cp} \sin \lambda)}{\sqrt{D^2 - (k_l \sin \varepsilon - 0.5t + R_{cp} \sin \lambda)^2}} + \alpha_3, \quad (6)$$

где $\alpha_{вл}$, $\alpha_{вл}$ – задние вспомогательные углы режущих элементов по указанным сторонам; t – ширина пазов.

Производительность формообразования Q для рассматриваемой схемы обработки

$$Q = \frac{fS n_2}{m}, \quad (7)$$

где S – подача инструмента за один оборот заготовки.

Достоинством рассмотренной схемы является более простое, по сравнению с обработкой пазов спиральным червячным инструментом, относительное расположение режущих элементов за счет установки инструмента под углом ε к оси вращения заготовки. Для компенсации наклона необходима соответствующая ориентация режущих элементов относительно корпуса инструмента. Вследствие скрещивания осей под углом ε также изменяется характеристический образ инструмента, что учитывается при определении его геометрических параметров.

Выбор радиуса инструмента при заданных параметрах обрабатываемой детали по условию непересечения формируемой поверхности с поверхностью резания осуществляется из неравенства

$$R_1 \leq \frac{\frac{f^2}{\cos^2(\varepsilon - 0.5\pi)} + \left(\sqrt{(0.5d)^2 - (0.5t + R_{cp} \sin \lambda + f \operatorname{tg}(\varepsilon - 0.5\pi))^2} + R_{cp} \cos \lambda \right)^2}{2 \frac{f}{\cos(\varepsilon - 0.5\pi)}}, \quad (8)$$

где d – внутренний диаметр зубчатого контура.

На величину радиуса инструмента влияет также допускаемое отклонение от прямолинейности дна формируемых пазов. На рис. 2 изображена траектория относительного движения точки, принадлежащей режущей кромке реза в проекции на плоскость, проходящую через ось вращения заготовки и перпендикулярно оси вращения инструмента. Согласно рис. 2, если допускаемое отклонение от прямолинейности составляет Δ_1 , то радиус инструмента

$$R_2 \geq \frac{\left(\frac{\Delta_1}{\cos(\varepsilon - 0.5\pi)} \right)^2 + (0.5c)^2}{2 \left(\frac{\Delta_1}{\cos(\varepsilon - 0.5\pi)} \right)}. \quad (9)$$

где c – ширина формируемого зубчатого венца.

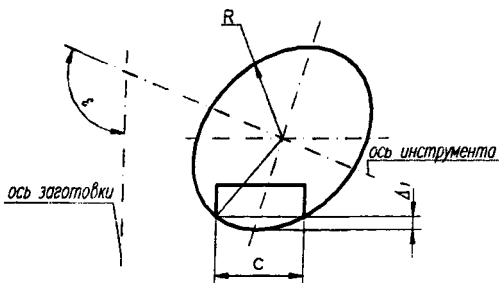


Рис. 2 Схема для определения радиуса инструмента по непрямолинейности дна формируемых пазов

Из (9) следует, что радиус инструмента зависит не только от непрямолинейности дна пазов, но и от угла его наклона.

Исходя из математической модели формообразования прерывистых поверхностей наклонным червячным инструментом

$$\begin{cases} x_1 = L \cos \alpha + R \sin(\alpha m + \beta_1) \cos(\alpha + \lambda) + (k_1 - R \cos(\alpha m + \beta_1) \operatorname{tg} \epsilon) \cos \epsilon \sin(\alpha + \lambda) \\ y_1 = L \sin \alpha + R \sin(\alpha m + \beta_1) \sin(\alpha + \lambda) - (k_1 - R \cos(\alpha m + \beta_1) \operatorname{tg} \epsilon) \sin \epsilon \cos(\alpha + \lambda) \end{cases} \quad (10)$$

условие для определения радиуса инструмента, обеспечивающего формообразование боковых поверхностей пазов с допуском Δ_2 выражается системой уравнений

$$\begin{cases} x_1 = L \cos \alpha + R_3 \sin(\alpha m) \cos\left(\alpha + \arcsin\left(\frac{R_{CP}}{R_m}\right)\right) - R_3 \cos(\alpha m) \operatorname{tg} \epsilon \cos \epsilon \sin\left(\alpha + \arcsin\left(\frac{R_{CP}}{R_m}\right)\right) \\ y_1 = L \sin \alpha + R_3 \sin(\alpha m) \sin\left(\alpha + \arcsin\left(\frac{R_{CP}}{R_m}\right)\right) + R_3 \cos(\alpha m) \operatorname{tg} \epsilon \cos \epsilon \sin\left(\alpha + \arcsin\left(\frac{R_{CP}}{R_m}\right)\right) \\ x_1^2 + y_1^2 = \left(\frac{D}{2}\right)^2 \\ x_2 = y_2 \cdot \operatorname{tg} \arcsin\left(\frac{R_{CP}}{R_3 m}\right) \\ x_2^2 + y_2^2 = \left(\frac{D}{2}\right)^2 \\ \Delta_2 \geq k \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \end{cases}$$

Таким образом, радиус инструмента должен определяться исходя из четырех условий: $R \leq R_1$ (условие непересечения поверхности детали поверхностью резания); $R \geq R_2$ (условие качественного формирования дна пазов); $R \geq R_3$, условие качественного формирования боковых граней пазов) и соответствия инструмента параметрам рабочей зоны технологического оборудования.

Рассмотренная схема формообразования реализована на зубофрезерном станке модели 5А308 для обработки храповой зубчатой муфты с многократным повышенным производительности по сравнению с применяемой технологией.

ЛИТЕРАТУРА

1. Данилов В.А., Киселев Р.А. Высокопроизводительный способ обработки плоских зубчатых контуров // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения. Сборн. научн. трудов / Под ред. С.А.Астапчика, П.А. Витязя. – Мн.: Технопринт, ПГУ, 2001. – С. 681–685.

УДК 621.91.04:621.824.42

В.А. Данилов, А.И. Костюченко, С.В. Спиридонов

КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОФИЛЬНЫХ МОМЕНТОПЕРЕДАЮЩИХ СОЕДИНЕНИЙ В ТРАНСМИССИЯХ МАШИН

Полоцкий государственный университет.

Новополоцк

Минский завод “Ударник”.

Минск Беларусь

Совершенствование конструкций и технологии изготовления моментопередающих соединений представляет актуальную научно-техническую проблему. Одно из направлений ее решения связано с применением профильных (бесшпоночных) соединений, которые, благодаря эксплуатационным и технологическим преимуществам, все шире применяются вместо шлицевых в технологическом оборудовании, различных машинах и механизмах [1].

В отечественном машиностроении применение профильных соединений сдерживается недостаточным практическим опытом их эксплуатации, а также нерешенностью конструкторских и технологических задач, связанных с их проектированием и изготовлением. В этой связи Полоцким государственным университетом совместно с Минским заводом “Ударник” проведена научно-исследовательская и опытно-конструктор-

ская работа, задачами которой являлись: разработка конструкции профильных моментопередающих соединений исходя из возможности их изготовления на имеющемся оборудовании; модернизация одного из агрегатов серийно изготавливаемых заводом машин путем замены шлицевых соединений на профильные; разработка технологии обработки профильных соединений; изготовление и испытание модернизированных агрегатов.

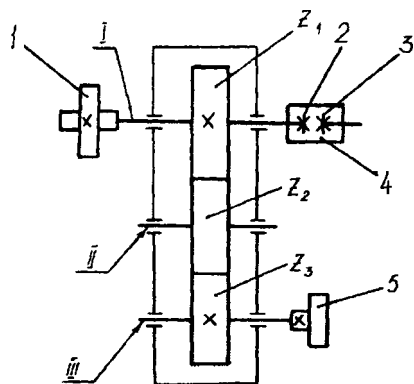


Рис. 1. Кинематическая схема редуктора отбора мощности

В качестве объекта модернизации принят основной агрегат трансмиссии погрузчика ТО-18Б – редуктор отбора мощности (рис. 1). Он имеет шлицевые соединения между ступицей 1 и валом I, шестерней Z1 и валом I, зубчатой муфтой 4 и полу муфтами 2, 3, валом-шестерней III и втулкой 5. При модернизации редуктора решены задачи выбора геометрии профильных соединений, определены их размеры, допуски и посадки, разработана технология изготовления соединений.

Форма поперечного сечения профильного соединения зависит от количества m выступов и вида контурной линии. При $m = 1$ моментопередающее соединение представляет собой вал с лыской, сопряженный с соответствующей втулкой, или эксцентрично расположенное относительно оси вала цилиндрическое соединение. При $m = 2$ они имеют две лыски или овальный профиль. Чаще применяются профильные соединения с 3–5 выступами.

Для модернизации редуктора применены профильные соединения с $m = 3$ между всеми указанными деталями за исключением муфты 4, в которой полу муфты 2 и 3 выполнены овальными и повернуты относительно друг друга на 90° . Это обеспечивает более широкие возможности компенсации несоосности и непараллельности соединяемых валов. Форма профиля остальных соединений обусловлена тем, что при $m=3$ обеспечивается самоцентрирование и заклинивание их деталей при действии крутящего момента, благодаря чему соединения с зазором переходят в соединения с натягом и повышается их точность [1].

Контурными линиями, ограничивающими профиль соединения, могут быть прямые, синусоидальные и циклоидальные кривые, линии равной ширины и др. Выбор вида кривой во многом зависит от имеющегося оборудования для обработки моментопередающего соединения. В настоящее время преимущественно применяются профили с равноосным контуром (РК-профиль) [1]. Аналогично синусоидальные контуры можно обозначить СК, циклоидальные – ЦК.

Для профильных соединений модернизируемого редуктора принят СК профиль. Прочность синусоидальных соединений в 2–3 раза выше, чем шпоночных и превышает прочность шлицевых соединений [2]. Преимуществом СК профиля является то, что отпадает необходимость в специальном станочном оборудовании, так как наружные и внутренние поверхности с таким профилем могут быть обработаны на токарно-заточных и модернизированных универсальных токарных станках.

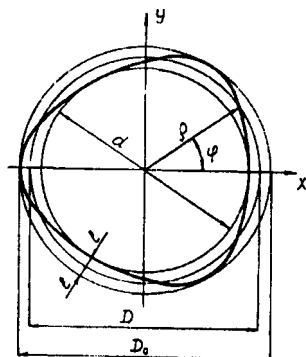


Рис. 2. Форма некруглого профиля

Некруглый профиль определяют следующие геометрические параметры (рис. 2): диаметр (радиус) вписанной окружности – $d(r)$, средний диаметр (радиус) профиля – $D(R)$, диаметр (радиус) описанной окружности – $D_0(R_0)$, эксцентриситет профиля e , радиус-вектор профиля ρ , угловой параметр профиля φ , количество выступов m . Зависимость ρ от других параметров синусоидального профиля определяется уравнением

$$\rho = R - e \cos m\varphi \quad (1)$$

Форма профиля зависит от параметров R , e , m . Для заданного числа выступов m в зависимости от отношения e/R она может быть выпуклой или вогнутой. В любой точке профиля кривизна K выражается известной зависимостью

$$K = \frac{\rho^2 + 2\rho'^2 + \rho\rho''}{(\rho^2 + \rho'^2)^{3/2}}, \quad (2)$$

где ρ определяется уравнением (1).

Из технологических соображений желательно, чтобы профиль не имел вогнутых участков, что возможно, если в каждой точке $K \geq 0$. Из (1) и (2) следует, что в этом случае

$$\frac{e}{R} \leq \frac{1}{m^2 + 1}, \quad (3)$$

поэтому величина эксцентриситета профиля должна задаваться из условия

$$e \leq R / (m^2 + 1) \quad (4)$$

Размер профильного соединения определяется параметрами D и e . Для них используется та же система посадок, что и для круглых цилиндрических соединений, при этом точность изготовления профильного вала на один квалитет выше, чем сопряженной с ним втулки и задается по 6–10 квалитетам [1]. В настоящее время не существует единого подхода к нормированию допусков отдельных параметров профиля, за ис-

ключением среднего диаметра D . Рекомендуется [1] диаметры вписанной и описанной окружностей, а также величину двойного эксцентриситета выполнять по тому же качеству, что и параметр D . Из технологических соображений предпочтителен иной подход, когда допуск на параметры d , D_0 и величину $2e$ устанавливается равным допуску на параметр D [3]. В этом случае параметры D и $2e$ имеют разную точность, большую для D и меньшую на $2e$, что упрощает настройку станка.

Требования к точности выполнения параметров профильного соединения указываются в его условном обозначении, которое должно содержать данные о виде контурной кривой, количестве граней, среднем диаметре, двойном эксцентриситете профиля и точности выполнения параметров. Например, запись

$$CK-3-50H7/g6/3.6H8/f7$$

обозначает трехгранное профильное соединение с синусоидальным профилем, средний диаметр которого $D=50$ мм, а двойной эксцентриситет $2e=3,6$ мм, $H7/g6$ и $H8/f7$ определяют допуски соответственно на D и $2e$.

Значения D для профильных соединений должны соответствовать рядам диаметров круглых цилиндрических соединений. Величина же e существующими нормативными документами однозначно не регламентируется. Например, в нормальном ряде соединений с РК – профилем, применяемом в ФРГ и Австрии [4], принято $e=(0,031-0,045)D$, причем отношение e/D возрастает при увеличении D . Согласно же [5] нормальный ряд размеров основан на постоянстве величины $e = D/32$. В обоих случаях каждому значению D соответствует определенная величина e , что с технологической точки зрения неудобно из-за необходимости переналадки станка при любом изменении D . Поэтому из технологических соображений более предпочтителен принцип нормирования величины e [6], когда она постоянна при изменении параметра D в определенном диапазоне. Благодаря этому сокращается количество перенастроек станка и имеется возможность применения групповой технологии для обработки профильных деталей. Исходя из этого данный принцип задания e принят в конструкции профильных соединений модернизируемого редуктора. Размер D профильных соединений установлен на основе прочностных расчетов и условий сборки редуктора.

С учетом изложенного выше все шлицевые соединения редуктора заменены на профильные, параметры которых указаны в табл. 1.

Обработка профильных деталей осуществлена по схеме (рис. 3), реализованной на токарно-заточном станке 1Б811. Синусоидальный профиль образуется при помощи круглого кулачка 5, который установлен с эксцентриситетом e относительно оси L_2 его вращения. При повороте кулачка на угол $\psi = m\phi$ где ϕ -угол поворота заготовки 1, толкатель 4 с резцом 2 перемещается в радиальном направлении на величину

$$\delta = e(1 - \cos \psi)$$

поэтому образуется синусоидальный профиль (1).

Таблица 1

Параметры моментопередающих соединений редуктора отбора мощности

| Соединяемые детали | Параметры до модернизации | Параметры после модернизации |
|--------------------|------------------------------|------------------------------|
| I-1 | Эв. 60×3,5 11Н/10d | СК-3-56 Н9/е8 14,0 Н10/е9 |
| I-Z ₁ | D8×62×72 Js10/е8 ×12 F10/d10 | СК-3-70 Н9/е8 14,8 Н10/е9 |
| I(2)-4 | Эв. 60×3,5 11Н/10d | СК-2-55 Н9/е8 16,0 Н10/е9 |
| 4-3 | Эв. 60×3,5 11Н/10d | СК-2-55 Н9/е8 16,0 Н10/е9 |
| III-5 | D8×46×54 Js10/е8 ×9 F10/d10 | СК-3-50 Н9/е8 14,0 Н10/е9 |

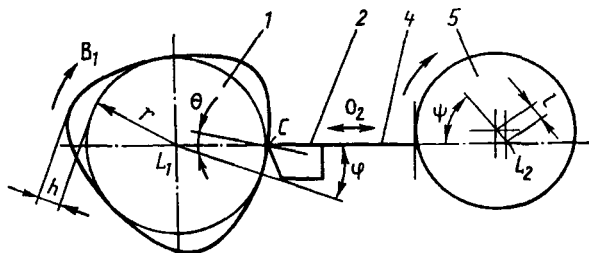


Рис. 3. Схема обработки профильных деталей

При точении некруглого профиля передний и задний рабочие углы резца изменяются в диапазоне, равном удвоенному максимальному значению угла θ между направлением радиуса-вектора и нормалью к формируемому профилю. Для кривой, заданной в полярных координатах, величина этого угла

$$\theta = \left| \operatorname{arctg} \frac{(d\rho/d\varphi)}{\rho} \right| \quad (6)$$

Для синусоидального профиля

$$\theta = \operatorname{arctg} \frac{em \sin m\varphi}{R + e \cos m\varphi} \quad (7)$$

Из (7) следует, что максимальное значение θ_{\max} имеет место при

$$\varphi = \frac{1}{m} \arccos \frac{e}{R} \quad (8)$$

С учетом 0_{\max} задается задний угол реза для исключения возможности затирания по задней поверхности.

Наличие возвратно-поступательного движения ограничивает производительность обработки из-за переменных инерционных нагрузок в суппортной группе станка. Поэтому при серийном изготовлении некруглых валов синусоидального профиля целесообразно использовать ротационное точение эксцентрично установленным круглым резцом [7]. Для этого могут использоваться зубошлицефрезерные станки, например, широкоуниверсальный станок модели ВС-50, производства Витебского станкостроительного завода им. Коминтерна. При соответствующем инструментальном оснащении эти станки обеспечивают также высокопроизводительную обработку некруглых поверхностей с циклоидальным и другими типами контуров [8].

По описанной схеме модернизированы два редуктора отбора мощности, которые после их стендовых испытаний были установлены на серийные погрузчики модели ТО-18Б. При испытаниях установлено снижение уровня шума, создаваемого редуктором при обеспечении всех требуемых характеристик. Длительная эксплуатация обоих погрузчиков показала нормальную работоспособность профильных моментопередающих соединений и правильность принятых при модернизации технических решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тимченко А.И. Профильные бесшпоночные соединения с равноосным контуром, их достоинства, недостатки, область применения и этапы внедрения// Вестник машиностроения. – 1990. – № 11. – С. 43–50.
2. Синкевич В.М., Микитюк Е.П. Новый вид профильных соединений в узлах судовых механизмов// Вестник машиностроения. – 1990. – № 11. – С. 60–63.
3. Аликулов Д.Е., Луидор Н.И. Применение РК-профильных соединений в сельскохозяйственном машиностроении// Вестник машиностроения. – 1990. – № 11. – С. 56–60.
4. Детали машин. Расчет и конструирование. Справочник в 3-х т. Том 1/Под ред. Н.С. Ачеркана. – М.: Машиностроение – 1968. – 440 с.
5. ОСТ 92-4742-86. Соединения профильные. Типы и основные размеры.
6. Детали машин. Атлас конструкций /Под ред. Д.Н. Решетова. М.: Машиностроение, 1970. – 360 с.
7. Данилов В.А. Механическая обработка некруглых валов ротационным инструментом// Машинист-строитель. – 1993. – № 7-8. – С. 20–21.
8. Данилов В.А., Бажин М.В., Костюченко А.И. Расширение технологических возможностей шлицефрезерных станков//СТИН. – 1996. – С. 24–29.

ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ СКОРОСТНОЙ ШТАМПОВКИ МАТЕРИАЛОВ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

В настоящее время в металлообработке начинают внедряться технологии, основанные на ударном воздействии инструмента на деформируемый объект (скоростная штамповка, резка, брикетирование стружки и т.д.). Практика показала, что наиболее эффективно разгон инструмента осуществляется в машинах (установках), приводная часть которых работает по принципу двигателя внутреннего сгорания. Рабочим телом в этих машинах являются продукты сгорания смеси воздуха с топливом – газообразным [1, 2] или жидким [3].

Критический анализ, проведенный в работе [4], показывает, что конструктивные схемы машин [1–3] и используемые в них энергоносители не в полной мере отвечают современным требованиям по надежности, энергоемкости, безопасности труда, автономности, габаритным размером, экологии.

Учитывая актуальность отмеченных требований, в НИЛ “Энергострой” БГПА была разработана и создана на базе технических решений [4, 5] газодинамическая установка ГДУ-1, предназначенная для скоростной штамповки материалов. Принцип работы этой установки основан на разгоне ударных частей за счет сгорания энергоносителя, в качестве которого используется водородно-кислородная смесь (ВКС) с соотношением компонентов 2:1 ($2\text{H}_2 + \text{O}_2$). Для получения ВКС в установке применяется процесс электролиза электролита (20% р-р КОН).

Принципиальная схема ГДУ-1 представлена на рис. 1. Установка выполнена по бесшатунной схеме и состоит из рамы 1, жестко соединенной с основанием 2. В верхней части рамы 1 имеются оси 3, на которых смонтирована камера 4 сгорания (в дальнейшем просто “камера”). В свою очередь камера 4 через промежуточные фланцы 5, 6 соединена с корпусом 7 электролизера и стволом 8. Корпус 7 электролизера частично заполнен электролитом и в нем на газоотводной трубке 9 смонтированы чашевидные электроды 10, изолированные от трубки 9 и друг от друга посредством диэлектрической втулки 11. Для пропуска горючей смеси из электролизера 7 в камеру 4 в верхнем фланце 5 выполнено отверстие 12. Для устранения обратного течения горючей смеси в отверстии 12 и в верхней части трубки 9 смонтированы обратные клапаны 13, 14. В нижнем фланце 6 выполнено отверстие 15, которое предназначено для сообщения полостей камеры 4 и ствола 8 при разгоне ударника 16. При установке ударника 16 в исходном верхнем положении полости камеры 4 и

ствола 8 разобьются за счет того, что меньшая ступень А ударника 16 перекрывает отверстие 15.

Фиксация ударника 16 в верхнем положении осуществляется с помощью подпружиненных шариков 17, которые защелкиваются в кольцевую проточку Б, выполненную на его большей ступени В. Подача напряжения на электроды 10 осуществляется через центральный токоввод 18. Для поджига горючей смеси в камере 4 предусмотрена запальная свеча 19, смонтированная в ее верхней части и подключенная к источнику электропитания (на рис. 1 не показан).

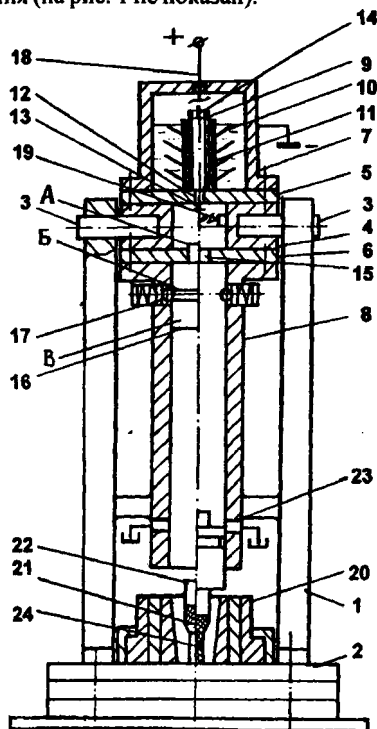


Рис. 1. Схема газодинамической установки для скоростной штамповки материалов

При работе установки ГДУ-1 энергия ударника 16 расходуется в штампе 20 на скоростную штамповку заготовки 21 (ударный импульс на заготовку 21 передается со стороны ударника 16 через мастер-боек 22). Для слива конденсата, образующегося в результате охлаждения рабочего тела – перегретого водяного пара в нижней части ствола 8 выполнены отверстия 23, связанные с дренажной системой.

Работа установки ГДУ-1 осуществляется следующим образом. При подаче постоянного напряжения через токоввод 18 на электроды 10 в электролизере 7 происхо-

дит процесс разложения воды, находящейся в р-ре КОН, с образованием ВКС, которая накапливается под возрастающим давлением сжатия в верхней части электролизера 7 над поверхностью электролита. При достижении в полости электролизера 7 давления открытия клапанов 13, 14 ВКС через газоотводную трубку 9 поступает в полость камеры 4. Продолжительность электролиза определяется количеством ВКС, необходимым для получения заданной энергии удара. В момент достижения нужной величины давления в камере 4 процесс электролиза прекращается и напряжение питания подается на запальную свечу 19, с помощью которой осуществляется поджиг энергоносителя, переходящий в горение по всему объему. Образующиеся при этом продукты горения (в дальнейшем рабочее тело) в основном состоят из перегретого водяного пара, состояние которого характеризуется высокими значениями давления и температуры. Под действием высокого давления со стороны рабочего тела на малое сечение А ударника 16, последний смещается вниз, преодолевая сопротивление пружинных шариков 17. При этом происходит разгерметизация полости 4 и высокое давление перегретого пара, действуя на всю площадь В ударника 16, разгоняет его в стволе 8 до заданной скорости. При соударении ударника 16 с заготовкой 21 происходит ее пластическая деформация в штампе 20, которая завершается формированием готового изделия 24.

При этом, на завершающей стадии процесса, в результате смещения ударника за границу отверстий 23, последние сообщаются с дренажной системой, что позволяет обеспечить слив конденсата (конденсат образуется в результате охлаждения рабочего тела – перегретого водяного пара) из ствола 8 установки ГДУ-1.

После осуществления процесса деформации ударник 16 перемещается вверх по стволу 8 (на данной установке перемещение ударника 16 по стволу 8 без особых усилий осуществляется вручную, но, при необходимости, для этой цели можно использовать пневмоцилиндр) и фиксируется в крайнем верхнем положении с помощью шариков 17.

Испытания опытного образца ГДУ-1 показали достаточно высокую эффективность применения ВКС в качестве энергоносителя и метода электролиза как источника его получения и сжатия.

Повышенная эффективность ВКС обусловлена высокой теплотворной способностью водорода (теплота сгорания H_2 в пересчете на массу в 3 раза больше, чем у органического горючего [6]) и отсутствием вредного воздействия продуктов сгорания (конечным продуктом реакции горения ВКС является вода) на окружающую среду.

Оценивая эффективность электролизного метода, необходимо отметить то, что он позволяет практически бесплатно сжимать энергоноситель в рабочей камере. Эксперименты с электролизером показали, что интенсивность нарастания давления P_0 в рабочей камере зависит от напряжения питания. Из рис. 2 видно, что с увеличением напряжения от 24 до 42 В время нарастания давления P_0 до заданного значения уменьшится в 1,5÷1,7 раза.

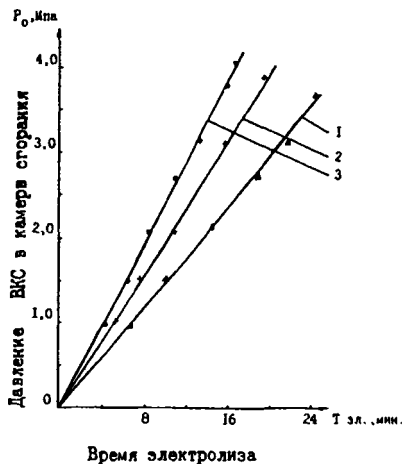


Рис. 2. Характер изменения давления P_0 в камере сгорания в зависимости от напряжения питания U ; 1 – $U = 24$ В; 2 – $U = 36$ В; 3 – $U = 42$ В

Таким образом, конструктивная схема ГДУ-1 была разработана без использования насосно-компрессорного оборудования и сложных электро-пневмосистем, что позволило повысить ее надежность, энергоемкость, безопасность (для осуществления электролиза использовалось безопасное напряжение питания, изменяемое от 24 до 42 В).

Из описания принципа действия ГДУ-1 видно, что термодинамические процессы, протекающие в энергоузле установки, относятся к рабочему циклу с подводом тепла при постоянном объеме. Принимая допущения об отсутствии сил трения и теплообмена, а также используя в качестве рабочего тела идеальный газ, для установки ГДУ-1 была построена диаграмма идеального цикла с подводом тепла при постоянном объеме (рис. 3). Из диаграммы, построенной в P - v координатах (P – давление, v – удельный объем), видно, что рабочее тело с начальными параметрами P_n ($P_n = P_{атм}$) и $v_{он}$ ($v_{он}$ – начальный удельный объем в камере сгорания) сжимается в камере сгорания по изотерме “ $O_n - O$ ” до состояния, характеризуемого точкой “ O ” с параметрами v_0 и P_0 . Затем рабочему телу по изохоре $0-1$ сообщается количество теплоты q_1 , приводящее к возрастанию давления от P_0 до P_1 , (в этом процессе $v_0 = v_1$). В процессе $1-2$ рабочее тело расширяется по адиабате, совершая разгон ударника 16 в стволе 8 установки. В конце стадии разгона при сообщении отверстий 23 с дренажной системой рабочее тело отдает тепло в количестве q_2 по изохоре $2-3$, что приводит к снижению давления от P_2 до $P_n = P_{атм}$. Последний отрезок диаграммы $3-O_n$ соответствует возврату ударника 16 в исходное верхнее положение, после чего установка ГДУ-1 готова к осуществлению очередного рабочего цикла.

где V_1 – объем камеры сгорания; S_1 – площадь большого сечения В ударника 16; h – перемещение ударника 16 в стволе 8 установки; P_A – атмосферное давление окружающей среды ($P_A = 10^5$ Па); K – показатель адиабаты (для ВКС $K=1,17$ при режиме горения и $K=1,21$ при режиме детонации [7]).

Полный кпд η установки определяется из отношения

$$\eta = \frac{E_n}{E_{эл}}, \quad (4)$$

где $E_{эл}$ – электрическая энергия, затраченная на производство ВКС в процессе электролиза.

Величина $E_{эл}$ в (4) определяется из выражения

$$E_{эл} = U \cdot J \cdot t_{эл}, \quad (5)$$

где U – напряжение питания электролизера; J – сила тока, проходящего через электролит; $t_{эл}$ – время электролиза.

Лабораторные испытания показали, что работа установки ГДУ-1 характеризуется следующими параметрами: полезная энергия $E_n = 4+20$ кДж, скорость ударника $V = 45+105$ м/с; давление $P_0 = 2+10$ МПа (давление P_0 в камере сгорания создается чисто электролизным путем); время цикла $t_{ц} = 10+24$ мин; энергоемкость $e = 10+57$ Дж/кг; полный кпд $\eta = 9,7\%$ [4].

Оценивая приведенные значения параметров и учитывая дополнительные факторы (отсутствие вредных выбросов в окружающую среду; исключение из приводной части насосно-компрессорного оборудования и сложных систем электро-пневмоавтоматики, высокая степень автономности, малые габаритные размеры) можно сделать вывод о высокой перспективности машин данного типа в условиях индивидуального и мелкосерийного производства, например, инструментального. Использование импульсных машин в данной сфере промышленного производства позволяет за счет замены операций резания на точную скоростную штамповку повысить коэффициент использования металла до значений $0,95+0,98$ и обеспечить выпуск качественного, износостойкого инструмента с высоким физико-механическими и эксплуатационными свойствами [8].

ЛИТЕРАТУРА

1. Согришин Ю.П., Гришин Л.Г., Воробьев В.М. Штамповка на высокоскоростных молотах. – М.: Машиностроение, 1978. – 167 с.
2. Степанов В.Г., Шавров И.А. Высокоэнергетические импульсные методы обработки металлов. – М.: Машиностроение, 1975. – 278 с.
3. Барановский М.А., Подрабинник И.М. Новая технология и оборудование штамповочного производства. - Мн.: Беларусь, 1981. – 191с.
4. Разработка способа повышения эффективности работы газодинамических машин ударного

действия: Отчет о НИР/БГПА: Рук. И.В. Качанов; №ГР20001157: – Мн.: 2000. – 94с.
5. Качанов И.В., Кондратович А.Н., Ивашечкин В.В. Высокоскоростной молот; заявка № И20010024 от 31.01.2001 на выдачу патента РБ на полезную модель. 6. Водород. Свойства, получение, хранение, транспортировка, применение. Справ. изд.; Под ред. Д.Ю. Гамбурга, Н.Ф. Дубовкина. – М.: Химия, 1989. – 672 с. 7. Андреев К.К., Беляев А.Ф. Теория взрывчатых веществ. – М.: Оборонгиз, 1960.– 595 с. 8. Исаевич Л.А., Качанов И.В. Новые технологии изготовления стержневого инструмента с упрочненной рабочей поверхностью.//Тез. докл. Международной научной конф. “Новые конкурентноспособные и прогрессивные технологии, машины и механизмы в условиях современного рынка”. 18–19 мая 2000 г. Могилев.– С.72–73.

УДК 621.9.06-52

И. А. Каштальян, П. К. Жуковский

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТОКАРНЫМ СТАНКОМ С ЧПУ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Одной из важнейших задач современного машиностроения является автоматизация мелкосерийного и серийного производства, выпускающего около 75% всей машиностроительной продукции. В настоящее время эта задача решается посредством создания и использования станков с ЧПУ (числовым программным управлением), значительная часть которых составляет группа токарных станков. Несмотря на известные преимущества токарных станков с ЧПУ, точность обработки деталей на них без периодической поднастройки не превышает 8–9 квалитетов и при этом за рабочим-оператором, так же как и на обычном станке, остается один из важнейших этапов обработки – процесс размерной настройки и поднастройки технологической системы [1]. Трудоемкость этого процесса достигает 80% от общего подготовительно-заключительного времени и составляет в среднем 20–30 минут.

В ряде случаев повышения точности обработки добиваются либо методом коррекции управляющих программ по результатам измерений обработанных деталей, либо методом их предсказания на этапе подготовки. Однако широкое использование этих методов сдерживается простоями станков при измерении деталей и коррекции программ, а также большой трудоемкостью их разработки. Поэтому для повышения производительности и точности обработки на токарных станках с ЧПУ находят применение системы управления, основанные на использовании информации, получаемой в ходе обработки резанием (адаптивные системы). Такие системы строятся на базе техно-

логического программного обеспечения систем ЧПУ [2]. При этом в качестве управляющего воздействия чаще используется подача. Регулированием подачи добиваются стабилизации тангенциальной составляющей силы резания P_z .

Недостатком таких адаптивных систем является возможность стабилизации силы резания только на некотором заданном уровне. Этот недостаток не позволяет использовать систему, когда возникает необходимость поддержания текущего значения силы резания, изменяющейся по некоторой заданной закономерности в функции пути, например, при точении нежестких деталей.

Разработанная адаптивная система позволяет реализовать практически любую закономерность изменения силы резания в функции пути и поддерживать ее при периодических случайных колебаниях глубины резания t и твердости материала детали НВ. При этом настройка системы фактически выполняется при вводе соответствующей закономерности изменения составляющей силы резания P_z в функции пути, которая определяется заранее расчетным либо экспериментальным путем.

Вследствие технических трудностей непосредственного измерения величины P_z на многоинструментальных станках в качестве измеряемого параметра выбрана потребляемая двигателем шпинделя станка активная мощность N_d , которая связана с тангенциальной составляющей силы резания P_z зависимостью.

$$N_d = N_x + \omega_m R, \quad (1)$$

где N_x – активная мощность, потребляемая двигателем шпинделя в режиме холостого хода; ω_m – угловая скорость вращения шпинделя; R – радиус обработки (расстояние от вершины режущей кромки резца до оси вращения детали).

Система содержит блок 1 задания программы (рис. 1); блок 2 интерполяции; блок 3 задания скорости подачи; станок 4; привод 5 продольной подачи; привод 6 поперечной подачи; привод 7 шпинделя; датчик 8 мощности; компенсатор 9; реверсивный счетчик 10; ключ 11; вычислительный блок 12; блок 13 сравнения; регулятор подачи 14; устройство 15 коррекции (его образуют блоки 9, 12, 13), блок 16 реализации закономерности преобразования силы резания с устройством ввода, блок 17 изменения тактовой частоты, второй ключ 18.

Компенсатор 9 предназначен для формирования и запоминания после каждого включения двигателя привода шпинделя напряжения пропорционального активной мощности, потребляемой этим двигателем в режиме холостого хода; реверсивный счетчик 10 служит для фиксации текущего значения радиуса обработки и его хранения в виде двоичного кода (память положения); ключ 11 предназначен для блокирования прохождения приводных импульсов на привод поперечной координаты; вычислительный блок 12 служит для формирования на своем выходе напряжения, пропорционального заданной мощности резания; блок 13 сравнения служит для формирования на своем выходе напряжения рассогласования; регулятор подачи 14, воздействуя на блок

3 задания скорости, меняет тактовую частоту работы блока 2 интерполяции таким образом, чтобы напряжение рассогласования на выходе блока 13 сравнения было равно нулю; устройство 15 коррекции, которое включает в себя компенсатор 9, вычислительный блок 12 и блок 13 сравнения, предназначено для расчета и формирования напряжения рассогласования, поступающего на вход блока 14 регулирования подачи; блок 16 реализации закономерности преобразования силы резания с устройством ввода предназначен для подачи на вход вычислительного блока 12 текущего значения кода силы резания в соответствии с заданной закономерностью изменения силы резания в функции пути; блок 17 изменения тактовой частоты формирует текущее значение кода тактовой частоты в соответствии с текущим значением напряжения, сформированного на выходе вычислительного блока 12; второй ключ 18 предназначен для подачи на вход блока 3 задания скорости текущего значения кода тактовой частоты, сформированной в блоке 17, или кода тактовой частоты, соответствующей скорости быстрого хода, образованного под воздействием управляющей программы в блоке 1 задания программы.

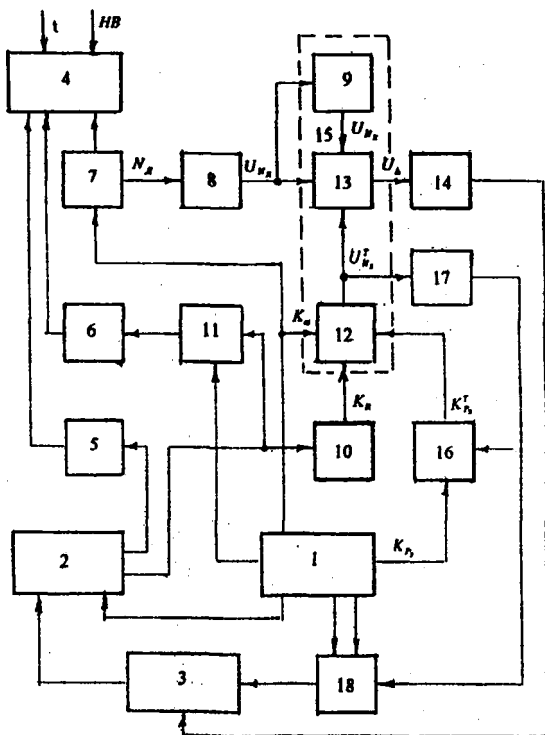


Рис. 1. Схема адаптивной системы управления токарным станком с ЧПУ.

Система, включающая в себя блок 1 задания программы, блок интерполяции 2 и блок 3 задания скорости подачи, управляет станком 4 путем воздействия на привод 5 продольной подачи, привод 6 поперечной подачи и двигатель привода 7 шпинделя. Кроме того, на процесс резания оказывают возмущающие воздействия глубина резания t и твердость материала детали НВ. Активная мощность N_d , потребляемая двигателем привода 7 шпинделя, измеряется датчиком 8 и преобразуется им в напряжение U_{N_d} , пропорциональное величине N_d . Компенсатор 9 после каждого включения двигателя привода 7 формирует на своем выходе и запоминает напряжение U_{N_x} , пропорциональное активной мощности N_x , потребляемой этим двигателем в режиме холостого хода. Счетчик 10 содержит в виде двоичного кода информацию о радиусе обработки. Начальная информация записывается в счетчик при нахождении суппорта поперечной координаты в опорной точке. Изменение этой информации происходит под действием приводных импульсов поперечной координаты, поступающих с одного из выходов блока 2 интерполяции на вход счетчика 10. Ввод в счетчик 10 информации, соответствующей величине вылета резца, осуществляется под действием управляющей программы, формируемой блоком 1. Для этого в программе записывается специальная команда вылета резца (номер коррекции) и необходимая величина перемещения по поперечной координате. Под действием команды вылета резца блок 1 задания программы блокирует прохождение приводных импульсов через ключ 11, в результате чего информация счетчика 10 изменится при неподвижном суппорте поперечной координаты (приводится в соответствие с истинным радиусом обработки).

Код радиуса обработки K_R с выхода счетчика 10 поступает на вход вычислительного блока 12, на другие входы которого из блока 1 задания программы поступает код угловой скорости вращения шпинделя K_ω , который образуется под воздействием управляющей программы, и текущее значение заданной силы резания K_P^T которое формируется в блоке 16 реализации закономерности преобразования силы резания с устройством ввода. Начальное значение K_{P_3} образуется под воздействием управляющей программы и поступает на вход блока 16 реализации закономерности преобразования силы резания с устройством ввода. В этом блоке она изменяется в соответствии с закономерностью, информация о которой поступает с устройства ввода.

На выходе блока 12 формируется напряжение $U_{N_3}^T$ пропорциональное текущему произведению значений кодов K_P^T , K_ω , K_R , а следовательно, пропорциональное и заданной текущей мощности резания N_3^T которая определяется из равенства (1) при условии $P_2 = P_3^T$

$$N_3^T = P_3^T \omega_\omega R \quad (2)$$

Напряжение пропорциональное текущему значению мощности резания с выхода вычислительного блока 12 поступает на вход блока 17 изменения тактовой частоты и на вход блока 13 сравнения. На выходе блока 17 формируется текущее значение кода

тактовой частоты, которое поступает на вход блока 3 задания скорости при условии, что на вход второго ключа 18, связанного с одним из выходов блока 1 задания программы, не поступит команда блокировки (признак быстрого хода). В противном случае ключ 18 пропускает на вход блока 3 задания скорости код тактовой частоты, соответствующий быстрому ходу, сформированный в блоке 1 задания программы.

Блок 13 сравнения формирует на своем выходе напряжение рассогласования U_{Δ} в соответствии с равенством.

$$U_{\Delta} = U_{N_d} - U_{N_x} - U_{N_r} \quad (3)$$

Анализируя равенства (3), (2) и (1), можно заключить, что $U_{\Delta} = 0$ при $P_z = P_z^r$

Регулятор подачи 14, воздействуя на блок 3 задания скорости, корректирует тактовую частоту работы блока 2 интерполяции таким образом, чтобы U_{Δ} было равно нулю. При этом блок 3 задания скорости формирует результирующее значение тактовой частоты.

Схема алгоритма ввода закономерности изменения силы резания в функции пути представлена на рис. 2. На схеме приняты следующие обозначения: К – режим работы устройства ввода (форма задания закономерности изменения силы резания в функции пути); z_n, z_k, z_i – соответственно начальное, конечное и текущее значение координаты z (точки приложения силы резания). Δz – приращение координаты z ; P_{z_n}, P_{z_i} – соответственно начальное и текущее значение тангенциальной составляющей силы резания P_z ; n – количество точек, описывающих заданную закономерность изменения силы резания; A, ω, φ – соответственно амплитуда, частота и начальная фаза колебаний силы резания; $a_3, a_2, a_1, a_0, b_3, b_2, b_1, b_0$ – коэффициенты полинома; i – вспомогательная переменная.

В алгоритме предусмотрена возможность задания закономерностей по табличным значениям координат опорных точек ($K = 1$ и $K = 2$), а также аналитически, например в виде синусоиды синусоиды ($K = 3$) и в виде полинома.

В результате ряда экспериментов, проведенных на станке мод. СМ1756Ф3, оснащенном разработанной адаптивной системой управления, установлено следующее.

1. Уменьшение рассеивания диаметральных размеров более чем в два раза при обработке деталей из стали 40ХН с колебаниями припуска от 2 до 4 мм на сторону.

2. Повышение точности формы нежестких деталей в осевом сечении в 2–3 раза за счет уменьшения влияния совокупного действия ряд систематических и случайных факторов. К таким факторам прежде всего относятся: изменение положения точки приложения силы резания по длине детали; непрямолинейность направляющих; колебание припуска по длине детали; колебание твердости материала заготовки; затупление режущего инструмента.

3. Увеличение стойкости режущего инструмента на 40–60% за счет работы с оптимальными режимами резания и снижения уровня вибраций.

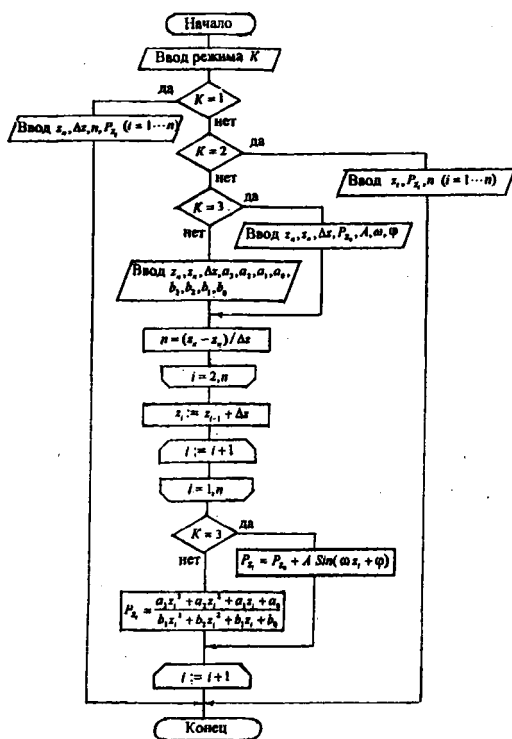


Рис. 2. Схема алгоритма ввода закономерности изменения тангенциальной составляющей силы резания P_z в функции пути

ЛИТЕРАТУРА

1. Сосонкин В.Л. Программное управление технологическим оборудованием. – М.: Машиностроение, 1991. – 512 с.
2. Kashtalyan I. A. Improvement of Manufacturing Software for Microprocessor Program Controllers // Micro and Precision Mechanics: Proceeding of the 41TH International Colloquium. – Ilmenau, 1996. V. 1. P. 441–444.

РОТОРНЫЙ СТАНОК ДЛЯ ПОЛИРОВАНИЯ ФАСОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВРАЩЕНИЯ

Белорусский государственный аграрный технический университет

Минск, Беларусь

Белорусская государственная политехническая академия

Минск, Беларусь

Применяемая в настоящее время в качестве финишной обработки поверхностей вращения с криволинейной образующей ручное полирование не отвечает требованиям современного производства с рыночной экономикой, так как для него характерны малая производительность, большая трудоемкость, зависимость производительности и качества обработки от субъективных качеств исполнителя, невозможность применения стабильно поддерживаемых и управляемых режимов.

Механизация процессов финишной обработки фасонных поверхностей вращения требует непрерывного поиска новых технологических решений, расширяющих возможности современных методов, повышающих производительность труда и культуру производства, устраняющих однообразные, монотонные, физически трудоемкие ручные операции.

Перспективным, способствующим решению задачи механизации финишных операций, является способ магнитно-абразивной обработки (МАО) на роторных станках поверхностей вращения с криволинейной образующей из магнитных и немагнитных материалов диаметром 4–25 мм [1].

Несмотря на свои технологические возможности, МАО не получила еще широкого производственного внедрения. Это объясняется, на наш взгляд, во-первых, отсутствием возможности организации в масштабах страны централизованного производства оборудования, реализующего метод, и, во-вторых, сравнительно слабой изученностью особенностей МАО, что не позволяет научно обоснованно подойти к выбору рационального оборудования.

Применяемые для полирования фасонных поверхностей вращения изделий магнитно-абразивные роторные станки (МАРС) комплектуются из следующих основных систем:

1. Магнитной, состоящей из электрического магнита на постоянном или выпрямленном токе и предназначенной для удержания элементов (зерен) магнитно-абразивного порошка в рабочей зоне, прижима их к обрабатываемой поверхности и сообщением им необходимых сил резания;

2. Механической, предназначенной для крепления заготовок в зоне обработки и сообщения последним относительных движений, а также несущей на себе все необходимые узлы и механизмы;

3. Электрической, обеспечивающей питание магнитной системы и управление механизмами станка;

4. Системы подачи в зону обработки СОЖ.

Магнитная система станков модели МАРС является наиболее ответственным узлом. Материал для ее изготовления должен выбираться с точки зрения удовлетворения магнитных свойств, эксплуатационных характеристик, а также экологических показателей. Однако основное внимание необходимо уделять магнитным свойствам применяемых материалов, так как от них зависит основная характеристика магнитной системы – магнитная индукция в рабочей зоне.

С учетом всех требований технического, технологического и экономического плана для магнитных систем станков модели МАРС в качестве материалов магнитопровода могут быть рекомендованы стали Ст 3, 10, 20 и сталь типа Армко. Для изготовления электромагнитных катушек магнитной системы рекомендуется выбирать провода марки ПЭВ–2, которые имеют эмалевую изоляцию на поливинилацетатной основе. По существующим нормам она обеспечивает пробивное напряжение в пределах 1200–1300 В (для диаметра провода 0,2–0,8 мм), что очень важно для обеспечения надежности катушки. Кроме того, изоляция провода марки ПЭВ–2 сохраняет свои свойства при достаточно высоких температурах нагрева (120–130° С). Все это способствует повышению надежности работы катушки. Провод марки ПЭВ–2 с учетом свойств, стоимости и дефицитности может быть заменен проводами марок ПЭВД, ПЭМ–2 и, в крайнем случае, проводом марки ПЭВ–1 [2].

Магнито-абразивные роторные станки для полирования поверхностей вращения с криволинейной образующей могут создаваться как самостоятельно, так и на базе различных металлорежущих станков. В последнем случае разрабатывается навесное оборудование для привода заготовок с использованием приводов базового станка, а также рабочая зона – разветвленная с коаксиальным расположением полюсных наконечников или броневая с коаксиальным расположением полюсных наконечников [3, 4]. Многошпиндельные станки модели МАРС предусматривают работу непрерывного и периодического действия в полуавтоматическом и наладочном режимах. При наличии загрузочно-разгрузочного устройства они могут работать в автоматическом режиме.

Ниже дано описание наиболее типичной схемы станка модели МАРС [5] (рис. 1).

Станок состоит из станины, на которой смонтированы механизмы привода обрабатываемых заготовок, магнитная система, механизм перемещения магнитной системы и установка для подачи СОЖ. Электроаппаратура и контрольно-измерительные приборы станка размещены автономно в пульте управления.

При обработке заготовок на станке модели МАРС последние вращаются вокруг своей оси и совершают осциллирующее и круговое движения. Эти движения обеспечиваются простым эпициклическим трехвальным механизмом с цилиндрическим диф-

ференциалом, который состоит из центрального вала 1, установленного на подшипниках 2 в полый опоре 3, верхний конец которого соединен с двигателем 4 клиноременной передачи 5, а нижний – жестко с ротором 6. Средний вал 7 установлен на подшипниках 8 на полый опоре. Верхний конец вала через клиноременную передачу 9 соединен с двигателем 10, нижний через конические шестерни 11 и 12, клиноременную передачу 13 и кривошипно-шатунный механизм 14 – с ползуном 15, установленным на роторе в блоке 16. В ползуне вмонтирован на подшипниках 17 шпindelь 18, в центробежном цапговом патроне которого крепится заготовка 19. Наружный вал 20 установлен на среднем валу в подшипниках 21. Верхний конец его через клиноременную передачу 22 соединен с двигателем 23, нижний через центральную и сателлитную шестерни 24 и 25 – со шпинделем.

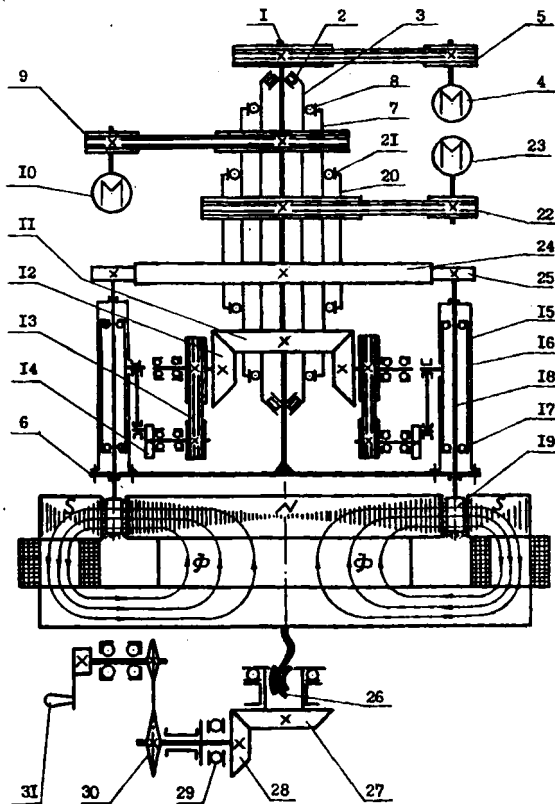


Рис. 1. Кинематическая схема магнитно-абразивного роторного станка модели MARC

Магнитная система станка (рис. 2) представляет собой разветвленный симметричный магнитопровод с коаксиальным расположением полюсных наконечников 1 и 2, состоящий из центрального 3 и боковых 4 сердечников. Катушки 5 электромагнитов на боковых сердечниках соединены последовательно таким образом, что их крайние полюсы имеют одинаковую полярность, например S – S, а центральный – противоположную N. Такое расположение полюсных электромагнитов обеспечивает равномерное распределение магнитной индукции В по всей рабочей зоне и прижим магнитно-абразивного порошка по всей обрабатываемой поверхности заготовки 6.

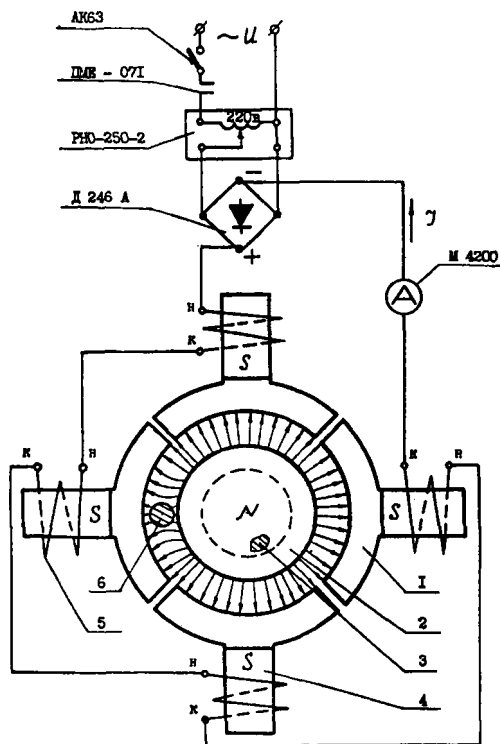


Рис. 2. Разветвленная симметричная магнитная система с коаксиальным расположением полюсных наконечников

Конструкция станка позволяет одновременно обрабатывать несколько заготовок с полным использованием режущих свойств магнитно-абразивного порошка, поскольку последний постоянно перемешивается в рабочей зоне при динамическом воздей-

ствии заготовок. Механизм перемещения магнитной системы включает винтовую пару 26 (рис. 1), конические шестерни 27 и 28, установленные на подшипниках 29, цепную передачу 30 и рукоятку 31, обеспечивает перемещение магнитной системы при вводе и выводе обрабатываемых деталей из рабочей зоны.

Станок работает следующим образом. Закрепленные в патронах заготовки вводятся в рабочую зону подъемом магнитной системы; подается напряжение на катушки электромагнитов; последовательно включаются электродвигатели, работающие на постоянном токе и сообщающие заготовкам вращение вокруг своей оси, осциллирующее и круговое движения; в зону обработки подается СОЖ для улучшения резания и удаления из зоны контакта порошка с обрабатываемой поверхностью отходов абразива.

При включении магнитной системы в рабочей зоне создается постоянное магнитное поле заданной напряженности и зерна порошка, ориентируясь своей большей осью вдоль магнитных силовых линий, прижимаются к обрабатываемой поверхности, плотно охватывая профиль заготовки. При относительном движении заготовки режущие зерна снимают металл с обрабатываемой поверхности и выглаживают последнюю. При этом снимаемый припуск пропорционален времени обработки. Электродвигатели обеспечивают плавное регулирование частотой вращения заготовки.

Станки модели МАРС обеспечивают:

- непрерывный контакт магнитно-абразивного порошка 1 (рис. 3) с обрабатываемой поверхностью заготовки 2 при полировании сложнопрофильных изделий типа тел вращения, что снижает циклические нагрузки на систему СПИД и способствует улучшению точности геометрических размеров и формы обрабатываемой поверхности;
- отсутствие жесткого крепления зерен порошка в рабочей зоне, способствующее самопроизвольному нивелированию режущего инструмента относительно сложной формы обрабатываемой поверхности и устраняющее вероятность появления в зоне резания критических давлений и температур, а также увеличивающее стойкость зерен и повышающее физико-механические показатели качества поверхностного слоя материала детали;
- возможность совмещения черновой, чистовой и финишной обработки без переустановки заготовки за счет изменения магнитной индукции в рабочей зоне;
- резание всегда наиболее острой кромкой зерна порошка (при этом отпадает необходимость периодической перезаточки абразивного инструмента);
- осуществление размерной и безразмерной (декоративной) обработки, обеспечивающей за 10–120 с съём металла 0,002–0,5 мм на диаметр;
- уменьшение шероховатости поверхности с $Ra = 1,25–0,32$ до $Ra = 0,08–0,01$ мкм или с $Ra = 10–2,5$ до $Ra = 0,32–0,08$ мкм;
- сохранение геометрических размеров и формы в пределах допуска, оставленного для операции шлифования;
- увеличение относительной опорной длины профиля поверхности до 75–85 %.

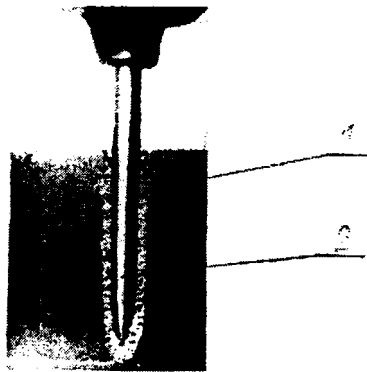


Рис. 3. Обрабатываемая заготовка в рабочей зоне: 1 – ферропорошок; 2 – заготовка

Техническая характеристика станка модели МАРС

| | |
|--|--------------------|
| Максимальные размеры обрабатываемой заготовки (диаметр, длина), мм | 25; 60 |
| Максимальная частота вращения, мин ⁻¹ | |
| шпинделя | 2400 |
| ротора | 12 |
| Число шпинделей, шт | 8 |
| Максимальная частота осцилляции заготовки, дв.ход/мин | 1250 |
| Максимальная амплитуда осцилляции, мм | 4 |
| Число катушек, шт. | 4 |
| Максимальный ток, подаваемый на катушки, А | 6 |
| Тип магнитной системы – разветвленная симметричная с коаксиальным расположением полюсных наконечников | |
| Максимальная магнитная индукция в рабочем зазоре, Тл | 1,2 |
| Установленная мощность, кВт | 3,25 |
| Габаритные размеры, мм | 1400 x 1250 x 1850 |
| Масса, кг | 850 |

ЛИТЕРАТУРА

1. Кожуро Л.М., Чемисов Б.П. Обработка деталей машин в магнитном поле. – Мн.: Навука і тэхніка, 1995. – 232 с.
2. Привезенцев В.А., Пешков И.Б. Обмоточные и монтажные провода. – М.: Энергия, 1991. – 172 с.
3. Авторское свидетельство СССР № 403537.
4. Авторское свидетельство СССР № 508389.
5. Авторское свидетельство СССР № 462707.

РАЦИОНАЛЬНОЕ ИНСТРУМЕНТООБЕСПЕЧЕНИЕ ПРЕДПРИЯТИЙ НА ОСНОВЕ СОЗДАНИЯ БЛОЧНО-МОДУЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Полоцкий государственный университет

Новополоцк, Беларусь

Большой резерв ресурсосбережения в машиностроении заложен в создании рациональной системы инструментального обеспечения отечественных предприятий по опыту ведущих зарубежных фирм, например, “Sandvik Coromant”, “Hertel” и других [1, 2]. Предложенная фирмами система предусматривает проектирование широкой гаммы режущих инструментов с унифицированными конструктивными элементами для каждого типа инструмента, применение прогрессивных технологий их изготовления, включающих нанесение износостойких покрытий на лезвия, разработку рекомендаций по режиму работы режущих инструментов с учетом свойств обрабатываемого и инструментального материалов, диагностику и ремонт инструмента в процессе эксплуатации. Такой подход к инструментальному обеспечению предприятий позволяет уменьшить номенклатуру режущих инструментов, повысить срок их службы и, в конечном итоге, сократить материальные и финансовые затраты на проектирование, производство и эксплуатацию режущих инструментов.

Подобного рода система инструментального обеспечения предприятий отечественной промышленности, благодаря усилиям, прежде всего, ВНИИ инструмента, была создана в бывшем Советском Союзе. Она включала: конструкторскую, технологическую и исследовательскую базы по проектированию типовых режущих инструментов и технологий их изготовления, по методикам исследований и испытаний режущих инструментов; базу организации применения инструментов и обеспечения им предприятий; производственную базу по изготовлению режущих инструментов, охватывающую сеть инструментальных заводов и цехов союзных республик, в том числе по добыче сырья и производству инструментальных материалов.

В связи с распадом хозяйственной системы СССР оказалась разрушенной и система инструментального обеспечения машиностроительных производств. В новых условиях промышленности, в частности Республики Беларусь, как впрочем и других республик, оказалась не готова к самостоятельной и результативной деятельности в этой области. Анализ конструирования и производства режущих инструментов на машиностроительных предприятиях республики и его применения в основном производстве позволяет выявить общие проблемы и тенденции, к которым можно отнести следующие [3]:

1. На машиностроительных предприятиях Республики Беларусь используется большое многообразие видов, типов конструкций и размеров режущих инструмен-

тов. Это многообразие инструментов сложилось исторически с определенной ориентацией на союзные стандарты и инструментальные заводы, не учитывает специфику нередко узкоспециализированных республиканских производств и сейчас его применение зачастую технически и экономически не обосновано и не является оптимальным для конкретного предприятия. Кроме того, при освоении предприятием новых изделий не проводятся на должном уровне унификация используемых при этом режущих инструментов (типоразмеров, деталей, соединений и узлов инструмента, инструментальных материалов и т.п.) и универсализация их по функциональному назначению, что приводит к неоправданному расширению номенклатуры и дефициту режущих инструментов.

2. В республике отсутствует научно-обоснованный системный подход к организации применения, конструированию и производству режущих инструментов. Работы, проводимые в этом направлении отраслевыми и академическими институтами, вузами, конструкторскими бюро заводов и других организаций не носят системного характера и связаны в основном с выполнением заданий государственных научно-технических программ.

3. Отсутствие единого координирующего начала в вопросах инструментообеспечения и производства инструментальных материалов, недостаточная мощность республиканских инструментальных заводов, вынуждает машиностроительные предприятия развивать собственные конструкторские и инструментальные отделы и цехи по выпуску инструмента для своих нужд или покупать режущий инструмент у коммерческих и зарубежных фирм, что приводит к дублированию и параллелизму в проектировании и производстве одних и тех же типоразмеров инструментов, росту затрат на инструмент и, в конечном итоге, к удорожанию выпускаемой предприятием продукции.

Выход из создавшегося положения может быть найден на пути создания гаммы предельно унифицированных блочно-модульных режущих инструментов (БМРИ). В основу разрабатываемой гаммы инструментов могут быть положены следующие принципы [4]:

1. Конструктивная схема инструмента гаммы включает режущий блок и корпусной модуль, конструктивно связанные между собой и с приспособлением станка.

2. Режущие блоки располагаются в корпусном модуле согласно функционального назначения инструмента и схемы резания.

3. Конструктивные элементы связи корпусного модуля и режущих блоков выполняются унифицированными и обеспечивают многовариантность ориентации и крепления блоков.

4. Конструкции режущего блока и корпусного модуля обеспечивают возможность построения конструктивных схем различных типов инструментов, т.е. обладают достаточной степенью внутри- и межтиповой универсальности.

5. Конструктивная схема БМРИ даст возможность быстрой перенастройки с целью изменения схемы резания, т.е. обладает достаточной для этого гибкостью.

6. Блоки и модули инструмента конструктивно просты и технологичны в изготовлении.

Блочно-модульность конструкции предлагаемой гаммы режущих инструментов строится в первую очередь на использовании универсальных режущих блоков [5]. Для построения гаммы БМРИ используется набор блоков с различными режущими пластинами и механизмами их зажима. БМРИ может включать, в зависимости от назначения инструмента и схемы резания, одинаковые или различные блоки. Все режущие блоки имеют унифицированные базирующие, фиксирующие и крепежные элементы, состав которых обеспечивает несколько вариантов крепления блоков в корпусном модуле, а также изменение их ориентации (поворот, осевое смещение). Одной из главных особенностей режущих блоков гаммы является возможность использования их в конструктивных схемах инструментов различного типа, например, резцах и фрезах. Кроме того, режущие блоки с соответствующими режущими пластинами могут применяться в конструкциях специального инструмента, например, зуборезного или резьбонарезного.

На рис. 1 в качестве примера представлена конструктивная схема многолезвийного режущего инструмента – торцевой фрезы. Торцевая фреза включает в себя корпус 1 (корпусной модуль), в базирующих отверстиях которого установлены четыре одинаковых группы режущих блоков 2, 3, 4. Каждый режущий блок группы установлен на различном диаметральном расстоянии, например D_2 , от центральной оси инструмента, а также с различной величиной вылета, например L_2 , вдоль оси.

Корпуса блоков выполнены в виде ступенчатой цилиндрической вставки, имеющей цилиндрическую базирующую поверхность и цилиндрический выступающий пояс. На цилиндрическом пояске выполнены треугольные мелко модульные шлицы. На цилиндрической базирующей поверхности располагаются параллельно оси вставки, диаметрально противоположно друг другу два прямоугольных паза. На заднем конце вставки выполнен плоский поперечный срез и кольцевая проточка, которые служат компонентами байонетного соединения. Все перечисленные конструктивные элементы являются унифицированными крепежными и фиксирующими элементами механизмов установки режущих блоков. Они одинаковы для всех блоков и не зависят от конструкции механизма зажима режущих пластин на блоках.

Унифицированные крепежные и фиксирующие элементы механизмов установки режущих блоков, например, в виде фиксирующей пластины с треугольными мелко модульными шлицами 5, прихвата 6 и винта 7 обеспечивают им многовариантное базирование и крепление.

При обработке торцевой фрезой реализуется известная прогрессивная схема ступенчатого срезания припуска (рис. 2). При данной схеме деления площадей среза наиболее нагруженным силами резания является блок 2. Этим обосновывается использование более надежного механизма крепления режущей пластины на блоке и

более надежной схемы крепления самого блока в сравнении с блоками 3 и 4. Соотношение параметров t_3 и t_4 срезаемых зубьями слоев осуществляется с помощью установочных винтов 10 и 12.

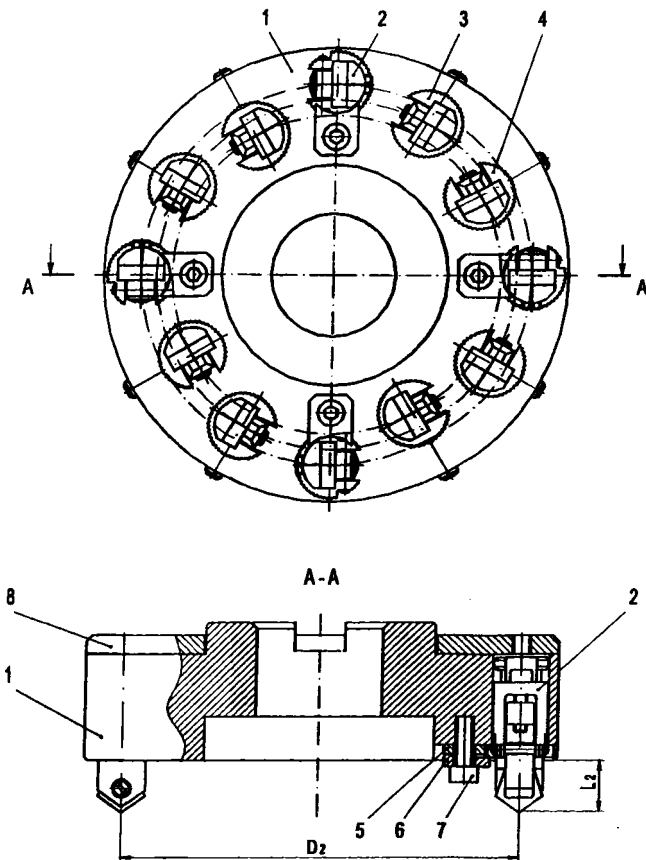


Рис.1. Конструктивная схема торцовой фрезы

Снабжение режущих блоков многолезвийного БМРИ несколькими разнотипными унифицированными крепежными и фиксирующими элементами позволяет производить установку блоков в корпусном модуле с различными схемами их фиксации и зажима. Обеспечивается относительно большая степень независимости конструкций режущего и корпусного модуля, что определяется расширением возможностей их конструктивной связи, а это, как следствие, делает возможным построения на одной

модульной базе разнообразных и более рациональных конструктивных схем инструмента. Вместе с этим резовые блоки, снабженные несколькими разнотипными крепежными и фиксирующими элементами, могут быть использованы как модули при построении гамм (наборов) одно- и разнотипных инструментов, а также в комбинированных и специальных инструментах. Все это в итоге расширяет эксплуатационные возможности предлагаемого технического решения.

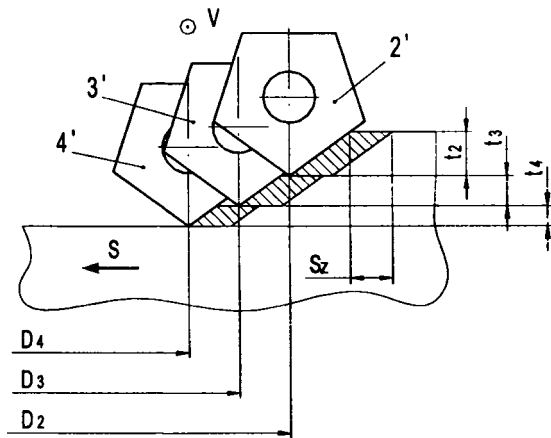


Рис.2. Схема срезания припуска

Снабжение многолезвийного БМРИ взаимозаменяемыми резовыми блоками с разнотипными механизмами зажима режущих пластин, а также механизмами регулирования и фиксации осевого смещения и поворота режущих блоков позволяет, во-первых, использовать режущие пластины с различным количеством граней и различными углами установки и заточки, а, во-вторых, в широких пределах регулировать положение режущих лезвий относительно друг друга с одновременной настройкой углов поворота режущих кромок. Все это вместе с рассмотренным выше разнотипным креплением режущих блоков позволяет реализовывать прогрессивные схемы резания, например, срезание припуска по схеме комбинированного деления толщины среза, связанное с действием неуравновешенных сил.

Таким образом, предлагаемый подход к проектированию режущих инструментов с использованием блочно-модульного принципа построения из отдельных унифицированных его конструктивных элементов позволяет создавать универсальные инструменты различного назначения и тем самым наладить единую систему производства унифицированных режущих инструментов широкого применения, сократить номенклатуру режущих инструментов и затраты на него.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rotating Tools and Inserts. AB Sandvik Coromant. – 1991. – 528 с. 2. Справочник инструментальщика / И.А. Ординарцев, Г.Ф. Филиппов, А.Н. Шевченко и др.; Под общ. ред. И.А. Ординарцева. – Л.: Машиностроение, 1987. – 846 с. 3. Попок Н.Н. Инструментообеспечение машиностроительных предприятий региона / Мат. науч.-практ. конф. – Витебск – Минск, НИЭИ Минэкономики РБ. – 1999. – С. 50–52.
4. Попок Н.Н., Терентьев В.А. Универсальные блочно-модульные режущие инструменты / Современные направления развития производственных технологий и робототехники: Мат. междунауч.-техн. конф. – Могилев, ММИ. – 1999. – С. 146.
5. Н.Н. Попок, В.А. Терентьев, А.В. Сидикевич. Разработка гаммы блочно-модульного режущего инструмента. / Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения: сб. научных трудов. – УП “Технопринт”, ПГУ, 2001. – С. 699–703.

УДК 621.793

А.Л. Худoley, О.О. Кузнецик

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКИ

Институт надежности машин НАН Беларуси,

Минск, Беларусь

НИИ порошковой металлургии с ОП,

Минск, Беларусь

Введение

Детали с внутренними цилиндрическими поверхностями (подшипники скольжения, направляющие втулки, гильзы и т.д.) относятся наиболее распространенными быстроизнашивающимися деталями трения машин. В настоящее время разработаны двухкомпонентные и многокомпонентные порошковые материалы, позволяющие повысить износостойкость этих деталей за счёт создания биметаллических конструкций, обладающих улучшенными антифрикционными и демпфирующими свойствами по сравнению с однокомпонентными [1,2]. Перспективным методом для их изготовления является центробежная индукционная наплавка. Однако одной из причин, ограничивающей её широкое внедрение в производство, является отсутствие эффективных систем управления, которые позволяют поддерживать оптимальный технологический режим. Такие системы должны включать в себя модули контроля, которые учитывают также скорости спекания и наплавки покрытий.

Целью работы является описание принципа действия адаптивной системы контроля и её структурной схемы, позволяющей изменять среду воздействия на объект

управления - порошковый материал при его наплавке, и тем самым оптимизировать технологический режим технологического процесса.

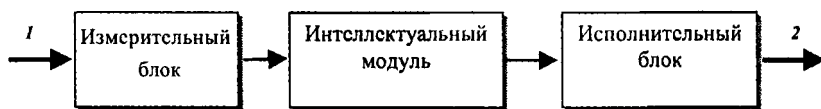
1. Принцип действия адаптивной системы контроля и её блок-схема

Как следует из работ [3,4], процесс центробежной индукционной наплавки порошковых материалов на внутреннюю поверхность стальной цилиндрической заготовки определяются термодинамической теорией активирующих факторов. Из неё вытекает необходимость в разграничении этих процессов и строгого выполнения двух технологических режимов – температурного и центробежного.

Температурный режим определяет скорость наплавки покрытия. Под ним следует понимать следующие три состояния заготовки с порошком: разогрев, изотермическая выдержка и охлаждение. При составлении температурного режима учитываются явления в порошковом слое (диффузия, ликвация, окисление) и заготовке (термические напряжения, величина зерна и т.д.), которые оказывают влияние на физико-механические свойства получаемого покрытия и изделия в целом.

При наплавке двухкомпонентной или многокомпонентной порошковой смеси необходимо также учитывать такое явление, как ликвация. На скорость её протекания оказывают влияние такие факторы, как различие плотностей между компонентами, разность температуры слоёв покрытия, которая обусловлена различным положением их от разогревающей поверхности, разность значений центробежных сил, действующих на материал покрытия. Чтобы снизить степень влияния ликвации на качество получаемого покрытия, необходимо, кроме температурного режима, задать и выдерживать режим формования, который связан с вращением заготовки.

Для обеспечения двух выделенных технологических режимов предлагается использовать систему контроля, имеющую адаптивную связь с промышленным оборудованием, под которым понимается центробежная установка, основу которой составляет электромеханический привод с системой бесступенчатого регулирования частоты вращения электрического двигателя, и установка ТВЧ с имеющейся системой её управления. Такая система должна включать в себя измерительный блок, исполнительный блок для управления технологическим оборудованием и интеллектуальное ядро. Блок-схема такой системы управления приведена на рис. 1

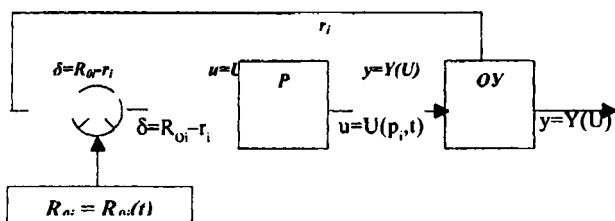


1 – сигналы с датчиков контроля;

2 – управляющие сигналы для технологического оборудования

Рис.1 Блок-схема адаптивной системы управления

Измерительный блок должен включить в себя первичные преобразователи физических величин и позволять производить их опрос и первичную обработку полученной информации, например преобразования аналогового сигнала в цифровой код. Интеллектуальное ядро должно производить операции сравнения, которые определяют отклонения полученных значений от заданных и, на основе этих результатов, выполнять операции выборки значений для исполнительного блока. Последний, в зависимости от полученных от интеллектуального ядра значений, должен активировать технологические процессы или прекращать их. Такая блок-схема позволяет реализовать следующий алгоритм управления процессом наплавки. Сначала, в интеллектуальное ядро заносится программа, содержащая временной массив установочных значений параметров возмущения $R_i = R_{oi}(t)$, и производится опрос датчиков блоком измерения, которые определяют текущие значения r_i . Затем, интеллектуальное ядро выполняет операцию сравнения и, на основании полученных результатов, определяются параметры отклонения δ . Исходя из значений δ , выбираются параметры, активизирующие технологический процесс, который продолжится до тех пор, пока не установится тождество между расчётными величинами и получаемыми при измерении. Схема адаптивного управления приведена на рис.2



P – регулятор (технологическая установка); OY – объект управления (порошок);
 r_i – текущие параметры возмущения, R_{oi} – установочные параметры возмущения;
 $u = U(p, t)$ – параметры воздействия на OY , активизирующие техпроцесс;
 $y = Y(U)$ – выходные параметры OY .

Рис. 2. Схема управления технологическим процессом
индукционной наплавки

К параметрам возмущения относятся температура и скорость вращения детали, время поддержания режима.

К параметрам воздействия относятся сила тока в индукторе и его частота, сила тока в ядре электродвигателя.

Схема управления (рис. 2), позволяет выполнять технологический процесс с точностью, которая зависит от чувствительности и инерционности датчиков, а также от точности и инерционности рабочих органов технологического оборудования.

2. Структурная схема адаптивной системы

Структурная схема адаптивной системы (рис.3) составлялась с учётом решения задачи осуществления адаптивной связи с промышленной установкой ТВЧ. Она состоит из четырёх основных блоков: измерительного, исполнительного, управления, записи и вычислений. Три последних блока составляют интеллектуальное ядро этой системы.

Измерительный блок в свою очередь состоит из измерительного канала, аналогового селектора мультиплексора, аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) и последовательного счётчика импульсов. Измерительный канал включает в себя четыре датчика, три из которых (два датчика температуры и датчик тока) имеют аналоговые унифицированные токовые выходы, а один (датчик оборотов) – уровень ТТЛ.

Измерительный блок работает следующим образом. С датчиков тока и температуры сигналы поступают на три входа аналогового селектора-мультиплексора, который переключается с двух каналов на один блоком управления, и таким образом осуществляет опрос двух датчиков. С выхода аналогового селектора мультиплексора сигнал поступает на вход АЦП и преобразовывается с его помощью в цифровой код.

С датчика оборотов сигнал поступает на вход счётчика импульсов, который формирует из них цифровой код.

Считывание информационных кодов осуществляется через блок управления в блок записи и вычислений, в котором производятся операции сравнения. В зависимости от результатов, блоком управления из блока записи и вычислений извлекаются цифровые коды, посылаемые в исполнительный блок, которые выбираются из временных массивов температурного и центробежного режимов.

Исполнительный блок состоит из двух цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП) и двух триггеров. Использование двух ЦАП позволяет преобразовывать цифровые коды управления, вырабатываемыми блоком записи и вычисления, в уровни аналогового напряжения и тем самым осуществлять регулировку тока индуктора ТВЧ и частоту вращения двигателя центробежной установки. Два триггера позволяют преобразовывать уровни ТТЛ блока записи и вычислений в уровни напряжений, необходимых для включения (выключения) индуктора ТВЧ или двигателя, вращающего заготовку с порошком.

Заключение

Спроектирована, по предложенным на рис. 1–3 схемам, адаптивная система управления технологическим процессом индукционной наплавки, реализуемом на установках ТВЧ, имеющих центробежный привод, которая позволяет ускорить процесс внедрения перспективных технологий изготовления биметаллических конструкций, обладающих антифрикционными и демпфирующими свойствами в машиностроительном производстве.

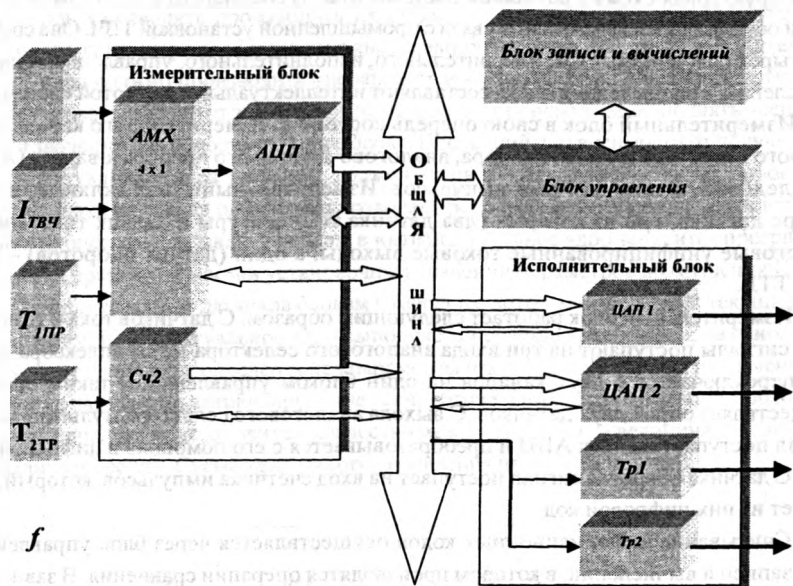


Рис. 3. Структурная схема адаптивной системы управления:

$I_{ТВЧ}$ – датчик тока; $T_{ПР}$ – датчик температуры пирометрический; $T_{ТР}$ – датчик температуры (термопара); $f_{об/мин}$ – датчик частоты вращения вала (цифровой тахометр); АМХ – аналоговый селектор мультиплексор; АЦП – цифроаналоговый преобразователь; Ст2 – двоичный счётчик импульсов; ЦАП 1, ЦАП 2 – цифроаналоговые преобразователи для упр. токами ВЧ и вращением двигателя; Тр1, Тр2 – триггеры для вкл./выкл. индуктора и эл. двигателя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дорожкин Н.Н., Абрамович Т.М., Жорник А.И. Получение покрытий методом припекания. – Мн.: Наука и техника, 1980 – 176 с.
2. Дорожкин Н.Н., Кашицин Л.П., Абрамович Т.М., Кирпиченко И.А. Центробежное припекание порошковых покрытий при переменных силовых воздействиях / Под ред. В.Г. Горбцова. – Мн.: Наука и техника, 1993. – 159 с.
3. Трилисский В.О., Коган М.И., Панчурин В.В. К определению формы потока обрабатывающей среды в центробежно-ротационных машинах // Изв. вузов. Машиностроение. – 1984, – № 9. – С. 137–141.
4. Гегузин Я.Е. Физика спекания. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1985. – 312 с.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТОЙКОСТИ ЧЕРВЯЧНЫХ ФРЕЗ НА ОСНОВЕ УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ

*Министерство образования
Минск, Беларусь*

В ходе проведения лабораторных и производственных испытаний режущих инструментов для математического описания их изнашивания весьма важным и определяющим является установление и исследование статистических параметров этого процесса. К ним относятся, прежде всего, стойкость инструмента и его надежность.

Для определения статистических характеристик распределения стойкости инструмента и его надежности необходимо иметь большой экспериментальный материал. Такие испытания отличаются высокой трудоемкостью и стоимостью. Вместе с тем, оперативное определение статистических характеристик инструмента и его надежности как в момент его изготовления, так и в период эксплуатации приобретает большую актуальность.

Одним из методов получения указанных характеристик при стойкостных исследованиях является проведение ускоренных испытаний. Сокращение длительности испытаний достигается чаще всего двумя путями: применением форсированных режимов обработки при проведении экспериментов или получением исследуемых параметров на коротком участке с последующей их аппроксимацией на более длительный период. Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки.

Применительно к режущему инструменту при изучении его износа наибольшее распространение получил второй метод ускорения экспериментальных работ. Накопившийся к настоящему времени экспериментальный материал подтверждает правомерность его применения. Следует подчеркнуть, что особое значение приобретают ускоренные испытания при статистическом исследовании процесса изнашивания износостойких режущих инструментов (червячных фрез, протяжек, зуборезных головок, долбяков и др.).

Результаты статистического анализа полученных нами реализаций износа червячных фрез позволяют сделать вывод о возможности применения ускоренных испытаний для получения средней стойкости и ее среднего квадратического отклонения [1]. Предпосылками этому являются:

1. Реализации износа червячных фрез представляют собой случайные последовательности асимптотически независимых приращений износа. Практически на протяжении всей реализации износа закон его распределения является нормальным уже начиная с начального периода изнашивания. Зона приработки незначительна.

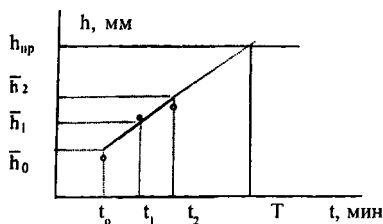


Рис. 1 Схема проведения ускоренных испытаний

2. Изменение среднего накопленного износа и его дисперсии с течением времени происходит по линейному закону.

В таком случае нет необходимости доводить червячные фрезы до установленного критерия износа. Достаточно получить 2–3 значения износа червячных фрез в моменты времени \$t_0, t_1\$ или \$t_0, t_1, t_2\$ (рис. 1).

При определении средней стойкости (\$\bar{T}\$) и дисперсии (\$\sigma\$) по двум точкам спра-

ведливы следующие формулы:

$$\bar{\alpha} = \frac{\bar{h}_1 - \bar{h}_0}{t_1 - t_0} \quad (1)$$

$$\bar{h}_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_{0i} \quad (2)$$

$$\bar{h}_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_{1i}, \quad (3)$$

где \$\bar{\alpha}\$ – средняя скорость износа; \$\bar{h}_0, \bar{h}_1\$ – средняя величина накопленного износа соответственно за время \$t_0\$ и \$t_1\$; \$n\$ – количество испытываемых инструментов.

Положение точки \$t_0\$ должно выбираться при этом в начале зоны нормального износа. Положение точки \$t_1\$ определяется в зависимости от задаваемой длительности испытаний. При зубофрезеровании приработка червячных фрез производится, как правило, за время обработки одного, двух зубчатых колес, т.е. за время \$t_0 = 2 t_0\$. Как показывают эксперименты, можно принять за время \$t_1 = 2 t_0\$. Тогда

$$\bar{T}^* = t_0 + \frac{h_{нр} - \bar{h}_0}{\delta_1} \tau, \quad (4)$$

где \$\bar{T}^*\$ – среднее значение стойкости по результатам ускоренных испытаний; \$\tau = t_1 - t_0\$ – время между замерами износа; \$\delta_1 = \bar{h}_1 - \bar{h}_0\$ – приращение износа червячных фрез за время \$\tau\$, \$h_{нр}\$ – предельное значение износа (критерий износа).

Для нашего случая

$$\bar{T}^* = t_0 \left(1 + \frac{\bar{h}_{нр} - \bar{h}_0}{\bar{h}_1 - \bar{h}_0} \right) \quad (5)$$

Для определения дисперсии стойкости воспользуемся приближенной формулой для определения дисперсии функции независимых случайных аргументов \bar{h} , и α [2]

$$\sigma_{T^*}^2 \approx \left(\frac{\partial T^*}{\partial \bar{h}_0} \right)^2 \sigma_{\bar{h}_0}^2 + \left(\frac{\partial T^*}{\partial \alpha} \right)^2 \sigma_{\alpha}^2 \quad (6)$$

Тогда

$$S_{T^*} = \frac{1}{\alpha} \sqrt{S_{\bar{h}_0}^2 + (\bar{T}^* - t_0)^2 S_{\alpha}^2} \quad (7)$$

и надежность червячных фрез определится как

$$T_{zp} = \bar{T}^* - \frac{U_p}{\alpha} \sqrt{S_{\bar{h}_0}^2 + (\bar{T}^* - t_0)^2 S_{\alpha}^2}, \quad (8)$$

где S_{T^*} – среднее квадратическое отклонение стойкости по результатам ускоренных испытаний; $S_{\bar{h}_0}^2$ – среднее квадратическое отклонение приращений начального износа за время t_0 ; S_{α}^2 – среднее квадратическое отклонение скорости износа за интервал времени τ ; U_p – квантиль нормального распределения, соответствующая вероятности p достижения гарантированного значения стойкости T_{zp} [3].

Точность определения \bar{T}^* по ускоренным испытаниям вычисляется по методике интервальной оценки. При этом

$$S_{\bar{T}^*} = \frac{1}{n\alpha} \sqrt{S_{\bar{h}_0}^2 + (\bar{T}^* - t_0)^2 S_{\alpha}^2}, \quad (9)$$

где n – количество испытываемых фрез.

При определении статистических характеристик по результатам измерений износа в трех точках t_0, t_1, t_2 проводим аналитический вывод уравнений прямой линии по методу наименьших квадратов для накопленного износа и его дисперсии вида

$$\bar{h} = a + bt \quad (10)$$

где \bar{h} – средняя величина износа за время t ; a, b – коэффициенты, зависящие от условий зубофрезерования,

$$S_h^2 = c + d \cdot t, \quad (11)$$

где S_h^2 – среднее квадратическое отклонение значений износа, c и d – коэффициенты, зависящие от условий зубофрезерования.

Для этого в каждом из взятых моментов времени определяем \bar{h} и S_h^2 как

$$\bar{h} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i \quad (12)$$

$$S_h^2 = \frac{(h_i - \bar{h})^2}{n-1} \quad (13)$$

Затем, используя числовые значения коэффициентов a , b , c , d в уравнениях (10), (11), вычисляются средняя стойкость червячных фрез и ее среднее квадратическое отклонение. Точность определения \bar{T} как и в первом случае, задается интервалом ее изменения.

При равных промежутках t между замерами ускоренные испытания по второму методу занимают в 1,5 раза больше времени. Однако большее количество экспериментальных точек, по которым проводится вывод уравнений прямой линии, позволяет предположить более высокую точность определения \bar{T} и σ по сравнению с первым методом.

Определение статистических характеристик распределения стойкости червячных фрез по результатам ускоренных испытаний по второму методу при $n = 30-50$ фрез дало хорошие результаты при продолжительности испытаний, равной $3t_0$. Однако точность и трудоемкость ускоренных испытаний зависит не только от их продолжительности, но и от количества испытываемых инструментов.

Проведенные ранее работы [4], [5] в отношении определения необходимого количества инструмента показывают, что с достаточной для практики точностью можно принимать 10–15 штук. Однако эти исследования проводились для инструментов низкой износостойкости (резцов, сверл, метчиков).

Учитывая однородность условий проведения экспериментов, высокую износостойкость червячных фрез, большое, в отличие от других инструментов, число зубьев, участвующих в резании, можно предположить, что число инструментов при проведении такого рода экспериментов уменьшится без существенной потери точности выходных результатов. Правомерность таких предположений была проверена расчетным методом. Для этого были взяты комбинации, определенные по таблице случайных чисел, из 30, 20, 15, 10, 5 реализаций износов фрез и по трем значениям накопленного износа в трех первых сечениях времени определены зависимости $\bar{h} = f(t)$, $S_h^2 = f(t)$. И далее, используя приведенные выше формулы (10), (11), были вычислены \bar{T} и σ .

В результате таких исследований выяснилось, что расчетные значения статистических характеристик стойкости червячных фрез практически для всех вариантов накрываются диапазоном допустимых значений этих характеристик, полученных в результате полных испытаний. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что приведенная методика ускоренных испытаний применима к износостойкому инструменту, в том числе к червячным фрезам. Статистические характеристики стойкости червячных фрез и их надежности с достаточной точностью могут быть определены при значительном сокращении продолжительности их испытаний (до $3t_0$) при использовании до 10 исследуемых фрез.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов Б.В. Стойкость инструмента как случайная величина//Республ. межведом. сб. "Машиностроение и приборостроение" –Мн.: Высшая школа, 1975. – Вып. 7. – 130 с.
2. Налимов В.В., Чернова Н.А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. – М.: Наука, 1965. – 340 с.
3. Щиголев Б.М. Математическая обработка наблюдений. – М.: Наука, 1969. – 344 с.
4. Кордонский Х.Б. и др. Вероятностный анализ процессов изнашивания. / Харач Г.М., Артамоновский В.П., Непомнящий Е.Ф. – М.: Наука, 1968. – 56 с.
5. Невельсон Р.А. Ускоренные испытания режущего инструмента на надежность. – Л., 1971.

ДИНАМИКА И ПРОЧНОСТЬ МАШИН

УДК 539.3

В.А. Акимов

СИМВОЛИЧЕСКИЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ РАВНОВЕСИЯ УПРУГОЙ ПОЛОСЫ ЖЕСТКО СЦЕПЛЕННОЙ С ТВЕРДЫМ ТЕЛОМ

Белорусская государственная политехническая академия

Минск, Беларусь

Рассмотрим равновесие упругой изотропной полосы жестко сцепленной основанием $z=0$ с неподвижным твердым телом, т.е. когда перемещения $U_0 = U|_{z=0}$ и $W_0 = W|_{z=0}$ тождественно равны нулю $U_0=0, W_0=0$. (рис. 1)

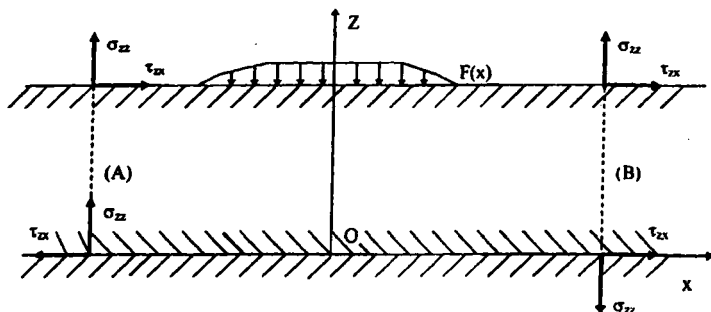


Рис. 1

Предположим, что на верхней кромке полосы $z=h$ перпендикулярно к поверхности приложена некоторая нагрузка $F(x)$, допускающая разложение в ряд Фурье

$$F(x) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos \delta_n x + B_n \sin \delta_n x),$$

где A_0, A_n, B_n, δ_n – известные величины.

Уравнения равновесия упругой среды имеют вид [1]:

$$\nabla^2 U + (\gamma - 1) \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0, \quad \nabla^2 W + (\gamma - 1) \frac{\partial \theta}{\partial z} = 0$$

где U и W – соответственно горизонтальное и вертикальное перемещение частиц упругой среды,

$$\theta = \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial z}; \quad \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

Для удобства разложения разобьем общую смешанную задачу на две: симметричную относительно срединной плоскости $z=h/2$ (задача А) и антисимметричную (задача В) [1].

Представим решение поставленной задачи в виде:

$$\text{Задача А: } U = -\frac{1}{2}[(\gamma-1)z \sin(z\partial_1)]f(x);$$

$$W = \frac{1}{2}\left[(\gamma+1)\frac{\sin(z\partial_1)}{\partial_1} - (\gamma-1)z \cos(z\partial_1)\right]f(x) \quad (1)$$

$$\text{Задача В: } U = \frac{1}{2}\left[(\gamma-1)z \cos(z\partial_1) + (\gamma+1)\frac{\sin(z\partial_1)}{\partial_1}\right]g(x);$$

$$W = -\frac{1}{2}[(\gamma-1)z \sin z\partial_1]g(x), \quad (2)$$

где $\gamma = \frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}$, $\nu_2 = \nu - 2$; ν – коэффициент Пуассона, $\partial_1 = \frac{\partial}{\partial x}f(x)$ и $g(x)$ – произвольные функции. Формулы (1) и (2) тождественно удовлетворяют граничному условию $U|_{z=0} = 0$, $W|_{z=0} = 0$ и уравнениям равновесия внутри области.

Составим выражения для напряжений

$$\tau_{xz} = G\left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x}\right) \quad \text{и} \quad \sigma_{zz} = G\left(\gamma \frac{\partial W}{\partial z} + \gamma_2 \frac{\partial U}{\partial x}\right)$$

Задача А:

$$\tau_{xz} = G[\sin z\partial_1 - (\gamma-1)z\partial_1 \cos z\partial_1]f(x);$$

$$\sigma_{zz} = G[\gamma \cos z\partial_1 + (\gamma-1)z\partial_1 \sin z\partial_1]f(x) \quad (3)$$

Задача В:

$$\tau_{xz} = G[\gamma \cos z\partial_1 - (\gamma-1)z\partial_1 \sin z\partial_1]g(x);$$

$$\sigma_{zz} = -G[\sin z\partial_1 + (\gamma-1)z\partial_1 \cos z\partial_1]g(x) \quad (4)$$

Теперь надо удовлетворить граничным условиям в напряжениях на верхнем основании

$$z = h: \tau_{zx}|_{z=h} = 0, \sigma_{zz}|_{z=h} = F(x)$$

Полагаем

$$f(x) = \sum_{k=0}^{\infty} (a_k \cos \lambda_k x + b_n \sin \lambda_n x), \quad g(x) = \sum_{k=0}^{\infty} (c_k \cos \mu_k x + d_n \sin \mu_n x) \quad (5)$$

С учетом (5) уравнения (1), (2), (3), (4) примут вид:

$$\text{Задача А:} \quad U = \frac{\gamma-1}{2} z \sum_{k=1}^{\infty} sh(z\lambda_k) (a_k \sin \lambda_k x - b_n \cos \lambda_n x);$$

$$W = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{\infty} \left[(\gamma+1) \frac{sh(z\lambda_k)}{\lambda_k} - (\gamma-1) z ch(z\lambda_k) \right] (a_k \cos \lambda_k x + b_k \sin \lambda_k x) + a_0 z; \quad (6)$$

$$\tau_{zx} = G \sum_{k=1}^{\infty} [sh(z\lambda_k) - (\gamma-1) z \lambda_k ch(z\lambda_k)] (a_k \cos \lambda_k x - b_k \sin \lambda_k x);$$

$$\sigma_{zz} = G \sum_{k=1}^{\infty} [\gamma ch(z\lambda_k) - (\gamma-1) z \lambda_k sh(z\lambda_k)] (a_k \cos \lambda_k x + b_k \sin \lambda_k x) + G \gamma a_0$$

Задача В:

$$U = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} \left[(\gamma-1) z ch(z\mu_k) + (\gamma+1) \frac{sh(z\mu_k)}{\mu_k} \right] (c_k \cos \mu_k x + d_k \sin \mu_k x) + z \gamma c_0;$$

$$W = \frac{\gamma-1}{2} z \sum_{k=1}^{\infty} sh(z\mu_k) (c_k \sin \mu_k x - d_k \cos \mu_k x);$$

$$\tau_{zx} = G \sum_{k=1}^{\infty} [\gamma ch(z\mu_k) + (\gamma-1) z \mu_k sh(z\mu_k)] (c_k \cos \mu_k x + d_k \sin \mu_k x) + G \gamma c_0; \quad (7)$$

$$\sigma_{zz} = G \sum_{k=1}^{\infty} [sh(z\mu_k) + (\gamma+1) z \mu_k ch(z\mu_k)] (c_k \sin \mu_k x - d_k \cos \mu_k x)$$

Слагаемые a_0 и c_0 в (6) и (7) являются частью элементарного решения, позволяющего получить точное решение задачи для слоя при равномерном его обжатии и сдвиге. Формальным основанием для включения этих слагаемых служит то обстоятельство, что полные системы функций $\cos \lambda_k x$ и $\cos \mu_k x$ содержат константы.

Вводя обозначения

$$D_{1k} = -(\gamma-1) h \lambda_k ch(h\lambda_k) + sh(h\lambda_k), \quad D_{2k} = \gamma ch(h\lambda_k) - (\gamma-1) h \lambda_k sh(h\lambda_k)$$

$$D_{3k} = \gamma ch(h\mu_k) + (\gamma-1) h \mu_k sh(h\mu_k), \quad D_{4k} = sh(h\mu_k) + (\gamma+1) h \mu_k ch(h\mu_k)$$

запишем граничные условия $t_{zx}|_{z=h} = 0, s_{zz}|_{z=h} = F(x)$ в виде:

$$\sum_{k=1}^{\infty} D_{1k} (a_k \cos \lambda_k x - b_k \sin \lambda_k x) + \sum_{k=1}^{\infty} D_{3k} (c_k \cos \mu_k x + d_k \sin \mu_k x) + G\gamma c_0 = 0; \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^{\infty} D_{2k} (a_k \cos \lambda_k x + b_k \sin \lambda_k x) + \sum_{k=1}^{\infty} D_{4k} (c_k \sin \mu_k x - d_k \cos \mu_k x) + G\gamma a_0 = \\ & = A_0 + \sum_{n=0}^{\infty} (A_n \cos \delta_n x + B_n \sin \delta_n x) \end{aligned} \quad (9)$$

Если решение разыскивается в ортогональных рядах, то следует положить:

$$\lambda_n = \mu_n = \delta_n = \frac{\pi n}{h}$$

В этом случае

$$c_0 = 0; \quad D_{1k} a_k = -D_{3k} c_k, \quad D_{1k} b_k = D_{3k} d_k; \quad G\gamma a_0 = A_0,$$

$$D_{2k} a_k - D_{4k} d_k = A_k; \quad D_{2k} b_k + D_{4k} c_k = B_k.$$

Отсюда находим:

$$a_0 = \frac{A_0}{G\gamma}, \quad a_k = \frac{D_{2k} D_{3k} A_k + D_{1k} D_{4k} B_k}{\Delta \cdot D_3}, \quad b_k = \frac{D_{2k} D_{3k} B_k + D_{1k} D_{4k} A_k}{\Delta \cdot D_3}$$

$$c_k = -\frac{D_{1k}}{D_{3k}} a_k, \quad d_k = \frac{D_{1k}}{D_{3k}} b_k$$

где $\Delta = D_{2k}^2 - (D_{1k} D_{4k} / D_{3k})^2$

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что предложенный метод является достаточно универсальным. Он позволяет получить новые аналитические решения, удобные для проведения инженерных расчетов. Использование общих операторно-символических решений в большинстве случаев требует в дальнейшем меньших вычислительных работ и выигрывает с точки зрения представления вида решения. За счет надлежащего выбора входящих в решение произвольных аналитических функций можно получить более полную и точную информацию о физической сущности решаемой задачи, а в ряде случаев дать оценку приближенным численным методам и той математической модели, которая положена в основу расчета.

ЛИТЕРАТУРА

1. Я.С. Уфлянд. Интегральные преобразования в задачах теории упругости. // АН СССР, М. - Л., 1963. - 367 с.

ПРИМЕНЕНИЕ НЕСОБСТВЕННЫХ ИНТЕГРАЛОВ И НЕОРТОГОНАЛЬНЫХ РЯДОВ ДЛЯ РАСЧЕТА УПРУГОЙ ПОЛОСЫ НА ЖЕСТКОМ ОСНОВАНИИ

*Белорусская государственная политехническая академия,
Минск, Беларусь*

Решение рассматриваемой задачи, как и предыдущей, записано в символическом виде, содержащем операторы бесконечно высокого порядка. Аргументом этих операторов является произведение продольной координаты полосы на поперечную производную. Представленное таким образом решение тождественно удовлетворяет уравнениям равновесия внутри области. Часть граничных условий выполняется за счет операторных коэффициентов, а оставшаяся часть – за счет входящих в решение двух произвольных аналитических функций. Построим два новых решения, соответствующих двум классам произвольно выбранных функций, представленных в виде несобственных интегралов и неортогональных рядов.

Рассмотрим равновесие упругой изотропной полосы жестко сцепленной основанием $z=0$ с неподвижным твердым телом, т.е. когда перемещения $U_0 = U|_{z=0}$ и $W_0 = W|_{z=0}$ тождественно равны нулю $U_0=0, W_0=0$.

Общее решение этой задачи, как и предыдущей, представим в виде:

$$\text{Задача А: } U = -\frac{1}{2}[(\gamma-1)z \sin(z\partial_1)]f(x);$$

$$W = \frac{1}{2}\left[(\gamma+1)\frac{\sin(z\partial_1)}{\partial_1} - (\gamma-1)z \cos(z\partial_1)\right]f(x)$$

$$\text{Задача В: } U = \frac{1}{2}\left[(\gamma-1)z \cos(z\partial_1) + (\gamma+1)\frac{\sin(z\partial_1)}{\partial_1}\right]g(x);$$

$$W = -\frac{1}{2}[(\gamma-1)z \sin z\partial_1]g(x),$$

где $\gamma = \frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}$, $\nu_2 = \nu - 2$; ν – коэффициент Пуассона, $\partial_1 = \frac{\partial}{\partial x}f(x)$ и $g(x)$ – произвольные функции.

Полагая $f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} A e^{-i\lambda x} d\lambda$, $g(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} B e^{-i\lambda x} d\lambda$ и используя теорему о дифференцировании под знаком интеграла по параметру x , получим

$$f^{(n)}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} (-i\lambda)^n A e^{-i\lambda x} d\lambda, \quad g^{(n)}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} (-i\lambda)^n B e^{-i\lambda x} d\lambda$$

На основании этих формул устанавливаем

$$[\sin(z\partial_1)]f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \sin(iz\lambda) A e^{-i\lambda x} d\lambda = \frac{-i}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} A \operatorname{sh}(z\lambda) e^{-i\lambda x} d\lambda$$

$$[\cos(z\partial_1)]f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} A \operatorname{ch}(z\lambda) e^{-i\lambda x} d\lambda \quad (1)$$

$$[z\partial_1, \sin(z\partial_1)]f(x) = -\frac{i}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} A z \cdot \operatorname{sh}(z\lambda) \frac{d}{dx} (e^{-i\lambda x}) d\lambda = -\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} A \lambda z \cdot \operatorname{sh}(z\lambda) e^{-i\lambda x} d\lambda$$

$$[z\partial_1, \cos(z\partial_1)]f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} A z \cdot \operatorname{ch}(z\lambda) \frac{d}{dx} (e^{-i\lambda x}) d\lambda = -\frac{i}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} A z \lambda \cdot \operatorname{ch}(z\lambda) e^{-i\lambda x} d\lambda$$

Аналогичные формулы получаются и для функции $g(x)$. Используя (1), запишем выражения для напряжений

$$\begin{aligned} \frac{\tau_{xz}}{G} &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} A i [(\gamma - 1) z \lambda \cdot \operatorname{ch} z \lambda - \operatorname{sh}(z \lambda)] \cdot e^{-i \lambda x} d \lambda + \\ &+ \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} B [\gamma \cos(z \lambda) + (\gamma - 1) z \lambda \cdot \operatorname{sh}(z \lambda)] \cdot e^{-i \lambda x} d \lambda, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{xz}}{G} &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} A [\gamma \operatorname{ch}(z \lambda) - (\gamma - 1) z \lambda \cdot \operatorname{sh}(z \lambda)] \cdot e^{-i \lambda x} d \lambda + \\ &+ \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} B i [\operatorname{sh}(z \lambda) + (\gamma - 1) z \lambda \cdot \operatorname{ch}(z \lambda)] \cdot e^{-i \lambda x} d \lambda \end{aligned}$$

Рассмотрим случай сжатия полосы сосредоточенной силой P , приложенной в точке $x=0$, $z=h$ перпендикулярно верхнему основанию. Тогда $\tau_{xz}(z=h)=0$; $\sigma_{xz}(z=h)=-P\delta(x)$ где $\delta(x)$ – дельта функция. Умножим уравнение (2) на $e^{i\lambda x}$ и проинтегрируем по всей длине полосы. Используя основную формулу интегрального преобразования Фурье

$$f(\lambda) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-i\lambda x} dx \right\} e^{i\lambda x} dx$$

и свойство дельта функции $\int_{-\infty}^{\infty} \delta(x) e^{i\lambda x} dx = 1$, получим для определения $A(\lambda)$ и $B(\lambda)$

систему уравнений при $z = h$:

$$\begin{cases} Ai[(\gamma-1)h\lambda \cdot ch(h\lambda) - sh(h\lambda)] + B[\gamma \cdot ch(h\lambda) + (\gamma-1)h\lambda \cdot sh(h\lambda)] = 0 \\ A[\gamma \cdot ch(h\lambda) - (\gamma-1)h\lambda \cdot sh(h\lambda)] + Bi[sh(h\lambda) + (\gamma-1)h\lambda \cdot ch(h\lambda)] = -\frac{P}{\sqrt{2\pi G}} \end{cases}$$

Вычисляем определитель полученной системы

$$\Delta = sh^2(h\lambda) - \gamma^2 ch^2(h\lambda) - (\gamma-1)^2 h^2 \lambda^2$$

и находим А и В:

$$A = -\frac{[\gamma \cdot ch(h\lambda) + (\gamma-1)h\lambda \cdot sh(h\lambda)]P}{\sqrt{2\pi G\Delta}}, \quad B = \frac{[(\gamma-1)h\lambda \cdot ch(h\lambda) - sh(h\lambda)]Pi}{\sqrt{2\pi G\Delta}}$$

Приведем расчетные формулы для напряжений в заделанном основании $z=0$:

$$\tau_{xz} = \frac{2\gamma P}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{(\gamma-1)h\lambda \cdot ch(h\lambda) - \gamma sh(h\lambda)}{sh^2(h\lambda) - \gamma^2 ch^2(h\lambda) - (\gamma-1)^2 h^2 \lambda^2} \sin(\lambda x) d\lambda,$$

$$\sigma_{xz} = -\frac{2\gamma P}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\gamma ch(h\lambda) + (\gamma-1)h\lambda \cdot sh(h\lambda)}{sh^2(h\lambda) - \gamma^2 ch^2(h\lambda) - (\gamma-1)^2 h^2 \lambda^2} \cos(\lambda x) d\lambda$$

С учетом $\left(\frac{1}{\gamma-1}\right)^2 = (1-2\nu)^2$, $\left(\frac{\gamma}{\gamma-1}\right)^2 = 4(1-\nu)^2$ определяем:

$$\begin{aligned} \Delta &= sh^2(h\lambda) - \gamma^2 ch^2(h\lambda) - (\gamma-1)^2 h^2 \lambda^2 = (\gamma-1)^2 [(1/(\gamma-1))^2 sh^2(h\lambda) - (\gamma/(\gamma-1))^2 * \\ &* ch^2(h\lambda) - h^2 \lambda^2] = (\gamma-1)^2 [(1-2\nu)^2 sh^2(h\lambda) - 4(1-\nu)^2 (sh^2(h\lambda) + 1) - h^2 \lambda^2] = \\ &= -(\gamma-1)^2 [(3-4\nu)sh^2(h\lambda) + h^2 \lambda^2 + 4(1-\nu)^2] \end{aligned}$$

Внося в числителе выражений τ_{xz} и σ_{xz} за скобки $(\gamma-1)$, после элементарных преобразований получим

$$\tau_{xz}(z=0) = \frac{2(1-\nu)P}{\pi h} \int_0^{\infty} \frac{\mu \cdot ch(\mu) - (1-2\nu)sh(\mu)}{(3-4\nu)sh^2(\mu) + \mu^2 + 4(1-\nu)^2} \sin\left(\frac{x}{h}\right) d\mu$$

$$\sigma_{xz}(z=0) = -\frac{2(1-\nu)P}{\pi h} \int_0^{\infty} \frac{\mu \cdot sh(\mu) + 2(1-\nu)ch(\mu)}{(3-4\nu)sh^2(\mu) + \mu^2 + 4(1-\nu)^2} \cos\left(\frac{x}{h}\right) d\mu$$

где принято $\mu = \lambda h$

Полученный результат совпадает с [1, стр. 40–41].

Численные результаты здесь обычно получают с помощью теоремы о вычетах [1].

Вернемся к представлению функций $f(x)$ и $g(x)$ в виде рядов

$$f(x) = \sum_{k=0}^{\infty} (a_k \cos \lambda_n x + b_n \sin \lambda_n x), \quad g(x) = \sum_{k=0}^{\infty} (c_k \cos \mu_n x + d_n \sin \mu_n x)$$

Условию $\tau_{zz}|_{z=h} = 0$ можно удовлетворить, если в задаче *A* в качестве λ_n взять корни трансцендентного уравнения $th(h\lambda) = (\gamma - 1)h\lambda$. Тогда μ_n в задаче *B* будут корнями трансцендентного уравнения $cth(h\mu) = -\frac{\gamma - 1}{\gamma}h\mu$ и $c_n = 0$. Не умоляя общности, а лишь для упрощения выкладок, считаем внешнюю нагрузку $F(x)$ симметричной, т.е.

$$F(x) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos \delta_k x,$$

где δ_k, A_0, A_k – известные величины.

Вводя новые переменные

$$X_k = G[\gamma ch(h\lambda_k) - (\gamma - 1)h\lambda_k sh(h\lambda_k)] a_k = G[\gamma - (\gamma - 1)^2 h^2 \lambda_k^2] a_k ch(h\lambda_k) \quad (3)$$

$$Y_k = G[\sin(h\mu_k) + (\gamma - 1)z\mu_k ch(z\mu_k)] d_k = \frac{G}{\gamma} [\gamma - (\gamma - 1)^2 h^2 \mu_k^2] d_k sh(h\mu_k)$$

запишем граничное условие $\sigma_{zz}(z = h) = F(x)$ в виде

$$\sum_{n=1}^{\infty} X_n \cos \lambda_n x - \sum_{n=1}^{\infty} Y_n \cos \mu_n x + G\gamma a_0 = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos \delta_k x$$

Для нахождения коэффициентов разложения (4) будем использовать операторы

$$D_0(d_x) = [tg(hd_x) - (\gamma - 1)hd_x] \cdot [\gamma \cdot ctg(hd_x) + (\gamma - 1)hd_x] / d_x,$$

$$D_1(d_x) = \frac{\lambda_n^2 d_x^2}{\lambda_n^2 + d_x^2} D_0(d_x), \quad D_2(d_x) = \frac{\mu_n^2 d_x^2}{\mu_n^2 + d_x^2} D_0(d_x), \quad \text{где } d_x = \frac{d}{dx}$$

Применяя метод, подробно изложенный в [2], находим

$$a_0 = \frac{1}{\gamma G} \left(A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k D(\delta_k) \right), \quad X_n = \frac{2\mu_n ch^2 h\lambda_n}{h[(\gamma - 1)ch^2 h\lambda_n - 1]} \sum_{k=1}^{\infty} A_k \frac{\delta_k^2 D(\delta_k)}{(\lambda_n^2 - \delta_k^2)(\lambda_n^2 - \mu_k^2)},$$

$$Y_n = \frac{2\lambda_n^2 sh^2 h\mu_n}{h[(\gamma - 1)sh^2 h\mu_n - 1]} \sum_{k=1}^{\infty} A_k \frac{\delta_k^2 D(\delta_k)}{(\lambda_n^2 - \delta_k^2)(\lambda_n^2 - \mu_k^2)},$$

где $D(\delta_k) = [th(h\delta_k) - (\gamma - 1)h\delta_k] \cdot [\gamma \cdot cth(h\delta_k) + (\gamma - 1)h\delta_k] / \delta_k$, $\lambda_n \neq \delta_n$, $\mu_n \neq \delta_n$.

После этого из (3) находим коэффициенты a_n, d_n и тем самым окончательно получаем решение поставленной задачи в виде неортогональных рядов. Полагая $z = 0$, получим формулы для расчета напряжений и деформаций в месте сцепления подложки с основанием.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Я.С. Уфлянд. Интегральные преобразования в задачах теории упругости. // АН СССР, М. – Л., 1963. – 367 с. 2. В.А. Акимов. Операторный метод решения задач теории упругости. //Диссертация канд. физ.-мат. наук, Минск, 1992. – 136 с.

УДК 546.621:621.785

Е. Ю. Василевич, В. Г. Шепелевич

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШИХ ФОЛЫГ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ АЛЮМИНИЙ-НИКЕЛЬ

*Белорусский государственный университет
Минск, Беларусь*

Сверхбыстрая закалка сплавов из жидкой фазы позволяет создать структуру, которую невозможно получить, используя традиционные методы термической обработки [1]. В последние три десятилетия активно ведутся исследования алюминиевых сплавов, получаемых при скоростях охлаждения жидкой фазы 10^5 К/с и выше. При этом особый интерес представляют сплавы алюминия с переходными элементами [2]. В связи с этим в данной работе представлены результаты исследования структуры и свойств системы алюминий-никель, содержащих до 1,2 ат. % легирующего элемента.

Быстрозатвердевшие фольги сплавов системы алюминий-никель, содержащих 0,15, 0,3, 0,6 и 1,2 ат. % Ni, получены выплескиванием капли расплава ($\approx 0,2$ г) на полированную внутреннюю поверхность медного цилиндра диаметром 20 см, вращающегося с частотой 25 об/с. Толщина получаемых фольг находилась в пределах от 10 до 100 мкм. Для исследования структуры и свойств использовались фольги толщиной 30...50 мкм. Скорость охлаждения расплава, как показал расчет [3], была выше 10^6 К/с. Исследование текстуры осуществлялось с помощью рентгеноструктурного анализа. Полюсные плотности дифракционных линий 111, 200, 220, 311, 331 и 420 рассчитывались по методу Харриса [4]. Параметр элементарной ячейки твердого раствора на основе алюминия рассчитывался по положению дифракционной линии 420. Также осуществлялось определение физического уширения данной линии. Микротвердость измерялась на приборе ПМТ-3 с использованием нагрузки 20 г. Изохронный отжиг проводился в интервале от комнатной температуры до 540 °С через 40 °С с выдержкой по 20 мин при каждой температуре.

Быстрозатвердевшие фольги сплавов системы алюминий-никель имеют мелкокристаллическую структуру. Средний размер зерна составляет несколько микрон и уменьшается с увеличением концентрации никеля в сплаве.

В таблице 1 приведены значения полюсных плотностей дифракционных линий фольг сплавов системы алюминий-никель, полученных сверхбыстрой закалкой из жидкой фазы.

Наибольшим значением полюсной плотности характеризуется дифракционная линия 111 для фольг всех исследуемых сплавов, что указывает на формирование текстуры (111). Аналогичная текстура в быстрозатвердевших фольгах чистого алюминия [5]. Никель способствует усилению текстуры в быстрозатвердевших фольгах. Также известно, что при сильно неравновесных условиях получения пленок алюминия и его сплавов образуется текстура (111) [6], а не текстура (100), которая формируется в массивных слитках при условиях кристаллизации, близких к равновесным [4].

Таблица 1

**Полюсные плотности дифракционных линий
быстрозатвердевших фольг сплавов системы алюминий-никель.**

| Концентрация никеля в сплаве (ат. %) | Дифракционные линии | | | | | |
|--|---------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 111 | 200 | 220 | 311 | 331 | 420 |
| 0,15 | 3,1 | 0,5 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 |
| 0,3 | 2,6 | 0,8 | 0,7 | 0,7 | 0,6 | 0,6 |
| 0,6 | 3,2 | 0,5 | 0,6 | 0,6 | 0,5 | 0,5 |
| 1,2 | 3,8 | 0,4 | 0,6 | 0,6 | 0,4 | 0,4 |

Из плоскостей {111} и {100} наиболее плотно упакованными являются плоскости {111}, а наименьшим значением удельной поверхностной энергией характеризуются плоскости {100}. Поэтому при условиях кристаллизации, близких к равновесным, энергетически выгодным является формирование текстуры (100). При затвердевании в сильно неравновесных условиях текстура определяется теми зернами, у которых при плоском фронте кристаллизации межфазная граница кристалл-жидкость совпадает с кристаллографическими плоскостями, перемещающимися с наибольшей скоростью. Такими плоскостями, как показали расчеты [7], являются плоскости {111}.

Рентгеноструктурные исследования показали, что основной фазой быстрозатвердевших фольг сплавов системы алюминий-никель является твердый раствор на основе алюминия. Также наблюдались очень слабые дифракционные отражения от кристаллографических плоскостей {111}, (200), (002), (031), (112), (131) и (311) интерметаллического соединения Al_3Ni . На рис. 1 представлен график зависимости относительного изменения параметра элементарной ячейки $\Delta a/a$ от концентрации. Увеличение параметра элементарной ячейки свидетельствует об образовании пересыщенных твердых растворов при получении фольг сверхбыстрой закалкой из расплава.

На рис. 1 также представлен график зависимости физического уширения дифракционной линии 420 от концентрации никеля в исследуемых сплавах. По данным работы [8] в быстрозатвердевших фольгах до 2 ат. % легирующих элементов, плотность дислокаций находится в пределах $10^8 \dots 10^9 \text{ см}^{-2}$. Поэтому вкладом областей когерентного рассеяния в физическое уширение дифракционных линий можно пренебречь [9]. Наблюдаемое физической уширение дифракционных линий 420 можно связать с воз-

никновением микронапряжений. Расчет показывает [10], что их величина изменяется от $1 \cdot 10^{-4}$ до $4 \cdot 10^{-4}$ при изменении концентрации никеля в интервале от 0,15 до 1,2 ат. % в быстрозатвердевших фольгах исследуемых сплавов.

Зависимость микротвердости H_{μ} массивных литых образцов, подвергнутых гомогенизационному отжигу, и быстрозатвердевших фольг сплавов системы алюминий-никель в зависимости от концентрации легирующего элемента, приведенные на рис. 1, существенно различаются. С увеличением концентрации никеля в сплавах H_{μ} быстрозатвердевших фольг монотонно увеличивается и превосходит микротвердость массивных образцов в несколько раз. Такое различие целесообразно связать прежде всего с образованием пересыщенного твердого раствора никеля в алюминии, а также с образованием микрокристаллической структуры и мелкодисперсных частиц алюминида никеля.

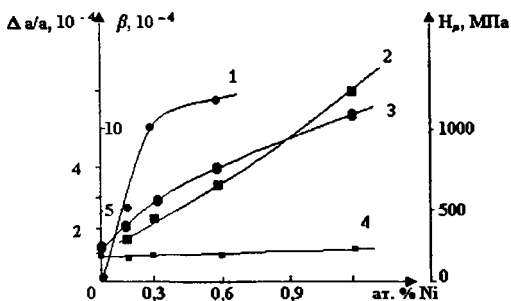


Рис. 1. Зависимости $\Delta a/a$ (1), β (2), H_{μ} (3) быстрозатвердевших фольг и H_{μ} (4) массивного литого образца сплавов системы алюминий-никель от концентрации никеля.

Быстрозатвердевшие фольги исследуемых сплавов находятся в неустойчивом состоянии. При их нагреве происходят изменения структуры и свойств. На рис. 2 представлены кривые изменения микротвердости фольг сплавов системы алюминий-никель, содержащих 0,3, 0,6 и 1,2 ат. % Ni при изохронном отжиге. Например, для фольги сплава Al-0,6 ат. % Ni наблюдается три этапа изменения H_{μ} в следующих температурных интервалах: 100...180, 260...380 и 420...540°С. Аналогичные этапы изменения микротвердости с некоторым смещением температурных границ наблюдаются и для фольг с другим содержанием никеля. Графики изменения микротвердости быстрозатвердевших фольг сплава Al-0,6 ат. % Ni в течение нескольких часов изотермического отжига при 180, 350 и 460°С приведены на рис. 3. Изохронный и изотермический отжиги вызывают уменьшение микротвердости.

При отжиге быстрозатвердевших фольг происходит изменение параметра элементарной ячейки твердого раствора на основе алюминия и физического уширения дифракционных линий. На первых двух этапах отжига происходит уменьшение пара-

метра элементарной ячейки твердого раствора, что указывает на уменьшение в нем концентрации никеля. Физическое уширение дифракционной линии 420, как видно из табл. 2, изменяется при отжиге, проводимом в течение 1 часа при температурах 180, 340 и 480° С. Отжиг при температурах 180 и 340° С не вызывает существенного перераспределения полюсных плотностей дифракционных линий твердого раствора на основе алюминия. Но при отжиге 480° С имеет место ослабление одних и усиление других дифракционных линий как твердого раствора, так и фазы Al_3Ni .

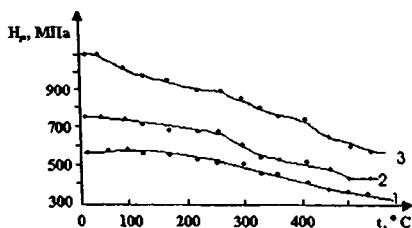


Рис. 2. Изменение H_{μ} при изохронном отжиге фольг сплавов системы алюминий-никель, содержащих 0,3 (1), 0,6 (2) и 1,2 ат. % Ni (3).

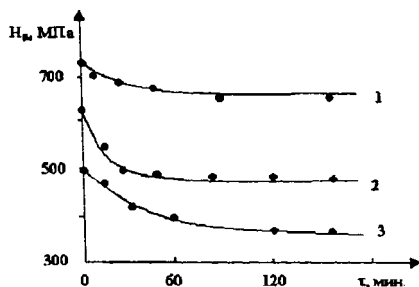


Рис. 3. Изменение H_{μ} в течение изотермического отжига при 180 (1), 350 (2) и 460°С (3).

Таблица 2

Физическое уширение (в мкрад) дифракционной линии 420 при отжиге быстрозатвердевших фольг сплавов системы алюминий-никель.

| Концентрация никеля в сплаве (ат. %) | Температура отжига, °С | | | |
|--------------------------------------|------------------------|-----|------|-----|
| | 20 | 180 | 340 | 480 |
| 0,3 | 470 | 340 | 540 | 160 |
| 0,6 | 660 | 400 | 740 | 330 |
| 1,2 | 1200 | 930 | 1000 | 810 |

Наблюдаемые изменения в структуре и микротвердости можно объяснить следующим образом. Диффузионные процессы в течение отжига при 180°С незначитель-

ны и могут приводить к миграции легирующих атомов к межзерненным границам, что обуславливает уменьшение параметра элементарной ячейки твердого раствора и релаксацию напряжений, ответственных за физическое уширение дифракционной линии 420. Диффузионные процессы в интервале 260...380° С происходят активно, что вызывает образование мелкодисперсных частиц Al_3Ni при распаде пересыщенного твердого раствора, которые создают в матрице микронапряжения, обуславливающих физическое уширение дифракционной линии. Дальнейший отжиг при 480° С приводит к коалесценции частиц второй фазы, что позволяет протекать рекристаллизационным процессам [11], уменьшающих физическое уширение дифракционных линий и вызывающих изменение полюсных плотностей дифракционных линий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Метастабильные и неравновесные сплавы // Ефимов Ю. В., Варлимонт Г., Мухин Г. Г. и др.: Под ред. Ю. В. Ефимова. – М.: Металлургия, 1988. – 383 с.
2. Мондольфо Л. Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1979. – 640 с.
3. Мирошниченко И. С. Закалка из жидкого состояния. – М.: Металлургия, 1982. – 168 с.
4. Вассерман Г., Гревен И. Текстуры металлических материалов. – М.: Металлургия, 1969. – 654 с.
5. Шепелевич В. Г., Ташлыкова-Бушкевич И. И., Анисович А. Г. Зеренная структура быстротвердевших фольг низколегированных Fe, Cu, Sb и Ge сплавов алюминия // Физика химия обработки материалов. – 1999, № 4. – С. 86–91.
6. Астахов О. Ф., Горелик С.С., Сагалова Т. Б., Сафонов Ю. С. Влияние легирования на текстуру, структуру, фазовый состав и свойства тонких поликристаллических пленок алюминия // ФММ. – 1994. Т. 77, № 1. – С. 83–89.
7. Li D. Y., Szpunar I. A. A possible role for surface packing density in the formation of (111) texture in solidified FCC metals // J. Mater. Sci. Lett. – 1994. V. 13, № 21. – P. 1521–1523.
8. Шепелевич В. Г., Ташлыкова-Бушкевич И. И., Васильева Л. А. Структура и микротвердость быстротвердевших сплавов системы Al-Ge // Перспективные материалы 1999. № 5. – С. 85–90.
9. Захарова М.Н. Атомно-кристаллическая структура и свойства металлов и сплавов. – М.: Изд. МГУ, 1972. – 216 с.
10. Русаков А. А. Рентгенография металлов. – М.: Атомиздат, 1977. – 480 с.
11. Колачев Б.А., Габидулин Р. М., Пигузов Ю. В. Технология термической обработка цветных металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1980. – 280 с.

РЕШЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЗАДАЧИ ТЕРМОУПРУГОСТИ МЕТОДОМ ПОТЕНЦИАЛА

Белорусская государственная политехническая академия

Минск, Беларусь

Термонапряженное состояние в анизотропном полупространстве, обладающем тремя плоскостями упругой симметрии, в зависимости от действия силовой нагрузки и температурного поля определяется по формулам [1,2,3]:

$$\begin{aligned}
 \sigma_x &= \left(\frac{\partial^2}{\partial y^2} + \xi_k \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \Phi_k + \frac{\partial^2 F_1}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 F_3}{\partial z^2}; \\
 \sigma_y &= \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \eta_k \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \Phi_k + \frac{\partial^2 F_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F_2}{\partial z^2}; \\
 \sigma_z &= \left(\xi_k \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \eta_k \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \Phi_k + \frac{\partial^2 F_3}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F_2}{\partial y^2}; \\
 \tau_{xy} &= -\frac{\partial^2 \Phi_k}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 F_1}{\partial x \partial y}; \\
 \tau_{xz} &= -\xi_k \frac{\partial^2 \Phi_k}{\partial x \partial z} - \frac{\partial^2 F_3}{\partial x \partial z}; \\
 \tau_{yz} &= -\eta_k \frac{\partial^2 \Phi_k}{\partial y \partial z} - \frac{\partial^2 F_2}{\partial y \partial z}; \\
 u &= P_{k1} \frac{\partial \Phi_k}{\partial x} - 0,5 \frac{\partial}{\partial x} (a_{66} F_1 - a_{44} F_2 + a_{55} F_3); \\
 v &= P_{k2} \frac{\partial \Phi_k}{\partial y} - 0,5 \frac{\partial}{\partial y} (a_{66} F_1 + a_{44} F_2 - a_{55} F_3); \\
 w &= P_{k3} \frac{\partial \Phi_k}{\partial z} - 0,5 \frac{\partial}{\partial z} (-a_{66} F_1 + a_{44} F_2 + a_{55} F_3),
 \end{aligned} \tag{1}$$

где

$$P_{k1} = 0,5(\eta_k a_{44} - \xi_k a_{55} - a_{66}), \quad P_{k2} = 0,5(\xi_k a_{55} - \eta_k a_{44} - a_{66}), \quad P_{k3} = 0,5(a_{66} - \eta_k a_{44} - \xi_k a_{55})$$

k – индекс суммирования, принимающий значения 1,2,3; u, v, w – компоненты перемещений, отнесенные к осям координат x, y, z , при этом оси x, y расположены на граничной плоскости полупространства; a_{ij} – постоянные упругости; $\Phi_k = \Phi_k(x, \mu_k y, \lambda_k z)$ – произвольные квазигармонические функции, явный вид которых определяется при решении конкретной граничной задачи; $F_i = F_i(x, y_i, z_i)$ – некоторые дифференцируемые функции, через которые определяются компоненты термонапряженного состояния, вызванным температурным полем; $\eta_k, \xi_k, \mu_k, \lambda_k$ – выражаются через постоянные упругости [1,2]. Остальные обозначения общеприняты.

Пусть в анизотропное полупространство внедряется на заданную величину w_0 абсолютно жесткий произвольный в плане плоский штамп, нагретый до температуры T_0 . Область контакта обозначим S_1 .

Граничные условия для температурного поля на поверхности S полупространства запишем в виде

$$T = T_0(x, y) \text{ в } S_1, \quad T = 0 \text{ в } S_2 = S - S_1 \quad (2)$$

В области D , занятой телом, температура удовлетворяет уравнению

$$k_1 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_2 \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_3 \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (3)$$

где $k_i (i = \overline{1,3})$ – коэффициенты теплопроводности в главных направлениях упругости тела.

Решение задачи (1),(2) имеет вид

$$T(x, \bar{y}, \bar{z}) = \frac{1}{2\pi} \iint_{S_1} \frac{\bar{z} T_0(\beta, \beta) d\alpha d\beta}{[(x-\alpha)^2 + (\bar{y}-\beta)^2 + \bar{z}]^{3/2}} \quad (4)$$

где $\bar{y} = \mu y$, $\bar{z} = \lambda z$, $\mu = \sqrt{\frac{k_1}{k_2}}$, $\lambda = \sqrt{\frac{k_1}{k_3}}$.

Зная потенциал T температурного поля, функции F_i определим по формулам

$$\begin{aligned} F_1(x, y_1, z_1) &= \frac{1}{4\pi n_1} \iiint_D \frac{T(\gamma, \beta_1, \theta_1) d\gamma d\beta_1 d\theta_1}{\sqrt{(x-\gamma)^2 + (y_1-\beta_1)^2 + (z_1-\theta_1)^2}} \\ F_2(x, y_2, z_2) &= \frac{1}{4\pi n_2'} \iiint_D \frac{T(\gamma, \beta_2, \theta_2) d\gamma d\beta_2 d\theta_2}{\sqrt{(x-\gamma)^2 + (y_2-\beta_2)^2 + (z_2-\theta_2)^2}} \\ F_3(x, y_3, z_3) &= \frac{1}{4\pi \bar{n}_3} \iiint_D \frac{T(\gamma, \beta_3, \theta_3) d\gamma d\beta_3 d\theta_3}{\sqrt{(x-\gamma)^2 + (y_3-\beta_3)^2 + (z_3-\theta_3)^2}} \end{aligned} \quad (5)$$

где $y_i = \mu_i y$, $z_i = \lambda_i z$, $\beta_i = \frac{\mu}{\mu_i} y_i$, $\theta_i = \frac{\lambda}{\lambda_i} z_i$, $(i = \overline{1,3})$

$$\begin{aligned} \mu_1 &= \sqrt{\frac{n_1}{n_2}}, \quad \mu_2 = \sqrt{\frac{n_1'}{n_2'}}, \quad \mu_3 = \sqrt{\frac{\bar{n}_1}{\bar{n}_2}}; \\ \lambda_1 &= \sqrt{\frac{n_1}{n_3}}, \quad \lambda_2 = \sqrt{\frac{n_1'}{n_3'}}, \quad \lambda_3 = \sqrt{\frac{\bar{n}_1}{\bar{n}_3}}; \end{aligned}$$

n_i, n_i', \bar{n}_i – выражены через постоянные упругости a_j

Запишем граничные условия задачи

$$\tau_{xz1} + \tau_{xz2} = 0, \tau_{yz1} + \tau_{yz2} = 0 \text{ в } S, \sigma_{x1} + \sigma_{x2} = 0 \text{ в } S_2, w_1 + w_2 = w_0(x, y) \text{ в } S_1$$

Здесь индекс 2 относится к компонентам напряжения и осадке, вызванным температурным полем, а 1 – к компонентам упругого состояния.

Решение задачи (6) методом потенциала дано в работе [1]. В упомянутой работе определены функции Φ_k , через которые выражаются компоненты напряжений и перемещений в анизотропном полупространстве.

Таким образом, напряженно-деформированное состояние в анизотропном полупространстве находится из решения задачи термоупругости, а затем методом потенциала из решения задачи теории упругости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Прусов И.А., Василевич Ю.В. Новое представление общих формул теории упругости ортотропного тела, подверженного действию нормальной нагрузки // Вестник Белгосуниверситета. – Сер.1 – 1991. – № 2. – С.42–46. 2. Василевич Ю.В. Об одном методе решения задач термоупругости для трехмерных ортотропных тел // Изв. АН БССР. – Сер. Физ.-тех.н. – 1990.– № 1. – С. 114. 3. Василевич Ю.В., Беляева Г.И. Влияние анизотропии материала на деформацию упругих тел. // Материалы международной 53 научн.-тех. конф. БГПА. – Ч.1 – 1999. – С. 126.

УДК 629.11.011.38

И. А. Ворожун

МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ КРЕПЛЕНИЯ ТРУБ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ПЛАТФОРМЕ ПРИ СОУДАРЕНИЯХ ВАГОНОВ

*Белорусский государственный университет транспорта
Гомель, Беларусь*

Для перевозки стальных труб диаметром 1420 мм длиной до 11,8 м используются как полувагоны так платформы. Существующие технические условия погрузки и крепления грузов предусматривают размещение и крепление четырех стальных труб диаметром 1420 мм в четырехосном полувагоне и трех таких труб на четырехосной платформе [1]. Однако габарит погрузки позволяет разместить на платформе пять труб диаметром 1420 мм. Поэтому вполне актуальны вопросы создания устройств для размещения и крепления пяти труб диаметром 1420 мм на железнодорожной платформе. Решение этих вопросов позволит увеличить коэффициент использования грузоподъемности платформы и снизить затраты на транспортировку труб. Целью

настоящей работы является исследование влияния предварительного натяжения упругих элементов крепления труб на железнодорожной платформе на величину продольных перемещений труб в процессе соударения вагонов.

В рассматриваемой математической модели процесса соударения платформы, нагруженной тремя ярусами труб, с группой из трех неподвижных полногрузых вагонов все тела считаются абсолютно твердыми, а элементы продольных и поперечных обвязок, а также междувагонных связей обладают упругими свойствами и имеют линейные характеристики (рис. 1). Изменением углов наклона элементов продольного крепления труб в процессе соударения вагонов пренебрегаем. Движение механической системы рассматривается в продольной вертикальной плоскости на прямом горизонтальном участке пути.

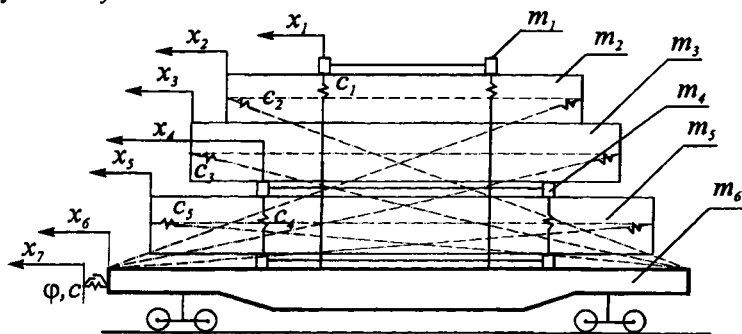


Рис. 1. Расчетная схема платформы с трубами

Расчетная схема имеет девять независимых координат x_1, \dots, x_9 . С учетом принятых допущений и использованием принципа Даламбера [2] составлены дифференциальные уравнения движения масс механической системы:

$$\left. \begin{aligned}
 m_1 \ddot{x}_1 + T_1 \sin \alpha_1 - F_1 \operatorname{sgn}(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) &= 0; \\
 m_2 \ddot{x}_2 + T_2 \cos \alpha_2 + F_1 \operatorname{sgn}(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + F_2 \operatorname{sgn}(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) &= 0; \\
 m_3 \ddot{x}_3 + T_3 \cos \alpha_3 - F_2 \operatorname{sgn}(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + F_3 \operatorname{sgn}(\dot{x}_3 - \dot{x}_4) &= 0; \\
 m_4 \ddot{x}_4 + T_4 \sin \alpha_4 - F_3 \operatorname{sgn}(\dot{x}_3 - \dot{x}_4) - F_4 \operatorname{sgn}(\dot{x}_5 - \dot{x}_4) &= 0; \\
 m_5 \ddot{x}_5 + T_5 \cos \alpha_5 + F_4 \operatorname{sgn}(\dot{x}_5 - \dot{x}_4) + F_5 \operatorname{sgn}(\dot{x}_5 - \dot{x}_6) &= 0; \\
 m_6 \ddot{x}_6 - T_1 \sin \alpha_1 - T_2 \cos \alpha_2 - T_3 \cos \alpha_3 - T_4 \sin \alpha_4 - T_5 \cos \alpha_5 - \\
 - F_5 \operatorname{sgn}(\dot{x}_5 - \dot{x}_6) + R_1 &= 0; \\
 m_7 \ddot{x}_7 - R_1 + R_2 &= 0; \\
 m_8 \ddot{x}_8 - R_2 + R_3 &= 0; \\
 m_9 \ddot{x}_9 - R_3 + R_4 &= 0.
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Входящие в уравнения системы (1) силы упругости элементов крепления труб, значения функций углов и силы сухого трения определяются следующими выражениями:

$$T_1 = c_1(\sqrt{(l_{01} + \lambda_1)^2 + (x_1 - x_6)^2} - l_{01});$$

$$T_2 = c_2(\sqrt{(l_{02} + \lambda_2)^2 - l_1^2 + (l_1(x_2 - x_6))^2} - l_{02});$$

$$T_3 = c_3(\sqrt{(l_{03} + \lambda_3)^2 - l_2^2 + (l_2 + (x_3 - x_6))^2} - l_{03});$$

$$T_4 = c_4(\sqrt{(l_{04} + \lambda_4)^2 + (x_4 - x_6)^2} - l_{04});$$

$$T_5 = c_5(\sqrt{(l_{05} + \lambda_5)^2 - l_3^2 + (l_3 + (x_5 - x_6))^2} - l_{05});$$

$$\sin \alpha_1 = \frac{x_1 - x_6}{\sqrt{(l_{01} + \lambda_1)^2 + (x_1 - x_6)^2}}; \quad \cos \alpha_1 = \frac{l_{01} + \lambda_1}{\sqrt{(l_{01} + \lambda_1)^2 + (x_1 - x_6)^2}};$$

$$\sin \alpha_4 = \frac{x_4 - x_6}{\sqrt{(l_{04} + \lambda_4)^2 + (x_4 - x_6)^2}}; \quad \cos \alpha_4 = \frac{l_{04} + \lambda_4}{\sqrt{(l_{04} + \lambda_4)^2 + (x_4 - x_6)^2}}$$

$$F_1 = f_1(m_1 g + T_1 \cos \alpha_1);$$

$$F_2 = f_2((m_1 + m_2)g + T_1 \cos \alpha_1 + T_2 \sin \alpha_2);$$

$$F_3 = f_3((m_1 + m_2 + m_3)g + T_1 \cos \alpha_1 + T_2 \sin \alpha_{2,x} + T_3 \sin \alpha_3);$$

$$F_4 = f_4((m_1 + m_2 + m_3 + m_4)g + T_1 \cos \alpha_1 + T_2 \sin \alpha_2 + T_3 \sin \alpha_3 + T_4 \cos \alpha_4);$$

$$F_5 = f_5((m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5)g + T_1 \cos \alpha_1 + T_2 \sin \alpha_2 + T_3 \sin \alpha_3 + T_4 \cos \alpha_4 + T_5 \sin \alpha_5).$$

Силы в междувагонных связях с пружинно-фрикционными поглощающими аппаратами при перемещениях вагонов не превышающих ход поглощающих аппаратов представлены в виде [3]:

$$R_1 = c(x_6 - x_7)[1 + \varphi \operatorname{sgn}(\dot{x}_6 - \dot{x}_7)];$$

$$R_2 = c(x_7 - x_8)[1 + \varphi \operatorname{sgn}(\dot{x}_7 - \dot{x}_8)];$$

$$R_3 = c(x_8 - x_9)[1 + \varphi \operatorname{sgn}(\dot{x}_8 - \dot{x}_9)];$$

$$R_4 = cx_9(1 + \varphi \operatorname{sgn} \dot{x}_9).$$

В представленных выражениях приняты следующие обозначения:

m_1, \dots, m_9 – соответственно массы поперечной обвязки, верхней трубы, двух труб среднего яруса, промежуточных опор, двух труб нижнего яруса, платформы и трех вагонов;

T_1, T_2, T_3, T_4, T_5 – соответственно силы упругости элементов поперечной обвязки, продольного крепления верхней трубы, продольного крепления труб среднего яруса, крепления промежуточных опор и продольного крепления труб нижнего яруса;

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ – соответственно углы отклонения элементов поперечной обвязки от вертикали, наклона элементов продольного крепления верхней трубы и труб среднего яруса к горизонту, отклонения элементов крепления промежуточных опор от вертикали и наклона элементов продольного крепления труб нижнего яруса к горизонту;

F_1, \dots, F_5 – соответственно силы сухого трения между элементами поперечной обвязки и верхней трубой, верхней трубой и трубами среднего яруса, трубами среднего яруса и промежуточными опорами, трубами нижнего яруса и промежуточными опорами, а также опорами платформы;

R_1, \dots, R_4 – силы в междувагонных связях;

c, c_1, \dots, c_5 – жесткости упругих элементов междувагонных связей и крепления труб;

l_{01}, \dots, l_{05} – длины элементов крепления в свободном (недеформированном) состоянии;

φ, f_1, \dots, f_5 – коэффициенты трения в элементах междувагонных связей и крепления труб;

g – ускорение свободного падения;

$\text{sgn}(\dot{x}_i - \dot{x}_{i+1})$ – знак “+” или “-” ($i=1, \dots, 8$).

Численное интегрирование уравнений системы (1) проводилось для диапазона скоростей соударения вагонов 0,5...3 м/с при следующих исходных данных: $m_1 = 10$ кг; $m_2 = 6800$ кг; $m_3 = m_5 = 13600$ кг; $m_4 = 100$ кг; $m_6 = 21000$ кг; $m_7 = m_8 = m_9 = 84000$ кг; $l_{01} = 4,2$ м; $l_{02} = 12,9$ м; $l_{03} = 12,7$ м; $l_{04} = 1,4$ м; $l_{05} = 12,6$ м; $l_1 = l_2 = l_3 = 12,6$ м $c = 9 \cdot 10^6$ Н/м; $c_2 = c_3 = c_5 = 0,5 \cdot 10^6$ Н/м; $c_1 = c_4 = 1 \cdot 10^6$ Н/м; $f_1 = f_2 = f_3 = f_4 = f_5 = 0,4$; $\varphi = 0,25$ $\lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_5 = 0$; $\alpha_2 = 12,4^\circ$; $\alpha_3 = 7,2^\circ$; $\alpha_5 = 0$.

Значения λ_1 и λ_4 варьировались в пределах от 0 до 0,2 м.

Результаты расчетов для скорости соударения вагонов 2 м/с представлены в виде графиков перемещений труб и платформы.

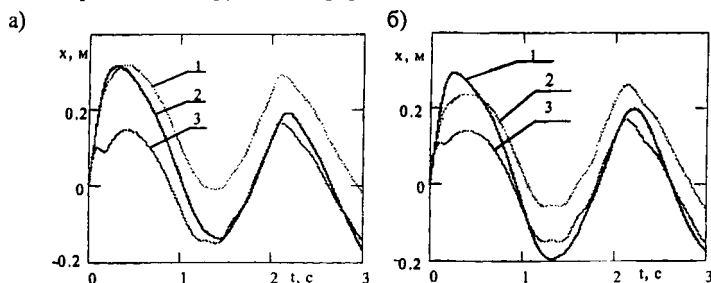


Рис. 2. Продольные перемещения нижнего (1), среднего (2) ярусов труб и платформы (3): а) при $\lambda_1 = \lambda_4 = 0$; б) при $\lambda_1 = \lambda_4 = 0,1$ м

На представленных графиках (рис. 2) продольные перемещения труб относительно платформы не превышают 0,2 м, что вполне согласуется с результатами натурных испытаний на соударение платформы, загруженной четырьмя трубами диаметром 1420 мм, с группой из трех вагонов.

Сравнительный анализ полученных результатов позволяет сделать заключение, что предварительное натяжение упругих элементов поперечной обвязки труб, созданное в процессе выполнения погрузочных работ, уменьшает продольное перемещение труб относительно платформы при соударениях вагонов.

Таким образом, разработанная математическая модель позволяет учитывать предварительное натяжение упругих элементов крепления труб на железнодорожной платформе при выборе рациональных параметров элементов крепления как продольной, так и поперечной обвязок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технические условия погрузки и крепления грузов. – М.: Транспорт 1990. – 408 с.
2. Соколов М.М., Хусидов В.Д., Минкин Ю.Г. Динамическая нагруженность вагона. – М.: Транспорт 1981. – 207 с.
3. Вершинский С.В., Данилов В.Н., Челноков И.И. Динамика вагонов. – М.: Транспорт 1978. – 352 с.

УДК 621.831

П.Н. Громыко, Д.М. Макаревич, А. И. Титенков

АНАЛИЗ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ СКОРОСТЕЙ СКОЛЬЖЕНИЯ В КОНТАКТИРУЮЩИХ ЗВЕНЬЯХ КОНИЧЕСКО-ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПЛАНЕТАРНОЙ ПРЕЦЕССИОННОЙ ПЕРЕДАЧИ ТИПА КНУ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Механические привода получили большое распространение в различных отраслях народного хозяйства. Составной частью данных приводов является редуцирующий механизм, построенный на базе различных механических передач. В качестве одной из таких передач может послужить коническо-цилиндрическая планетарная прецессионная передача (КЦПП). К достоинствам данной передачи можно отнести низкую себестоимость изготовления, небольшие массогабаритные показатели, а также, возможность достижения высоких значений передаточных отношений.

Одной из основных задач для выяснения работоспособности КЦПП является определение скорости износа контактирующих поверхностей неподвижного и прецессионного диска. Решение данной задачи позволит оптимизировать геометрические параметры зубчатых венцов с точки зрения минимального износа их поверхностей. Ниже будут

рассмотрены особенности анализа относительных скоростей скольжения в контактирующих звеньях коническо-цилиндрической планетарной прецессионной передачи.

КЦПП – это передача со сложной пространственной структурой. Поэтому ее исследование предполагает введение в ее структуру некоторых упрощающих условий, которые не должны вызвать существенных погрешностей при расчете передачи [2]. На рис. 1 показана условная кинематическая схема КЦПП.

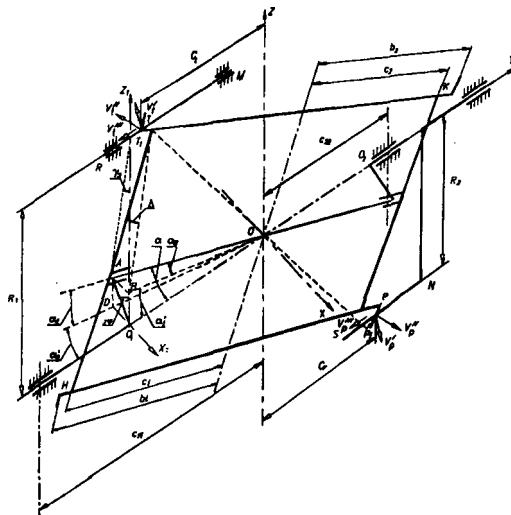


Рис. 1. Обобщенная структурная схема КЦПП

Всю структурную схему можно условно разбить на две части: наклонный кривошип и рамка. Наклонный кривошип передачи состоит из кривошипа непосредственно O_1A и стержня наклонного кривошипа AO . Угловое положение стержня наклонного кривошипа относительно оси OY характеризуется углом нутации α . Другим углом, фиксирующим положение наклонного кривошипа в пространстве, является угол прецессии z_j , отсчитываемый против часовой стрелки от оси O_1Z_1 до положения кривошипа O_1A в плоскости $Z_1O_1X_1$. Основными линейными параметрами, определяющими размеры кривошипа, являются длина наклонного стержня OA , обозначим ее " a_1 " и длина кривошипа O_1A , обозначим ее " b_1 ".

Наклонный стержень кривошипа OA пересекает ось передачи в точке прецессии O и имеет свое продолжение, что приводит к необходимости ввода обозначений " a_2 " и " b_2 ", имеющих смысл аналогичный обозначениям " a_1 ", " b_1 ".

Положение точек контакта T и P относительно внутренних зубчатых венцов неподвижного и ведомого звеньев передачи будет определяться из следующих выражений [2]:

$$\begin{aligned} C_T &= b_1 \cos \alpha - R_1 \operatorname{tg} \alpha \cos(z\varphi) + b_1 \sin \alpha \operatorname{tg} \alpha \cos^2(z\varphi); \\ C_P &= b_2 \cos \alpha - R_2 \operatorname{tg} \alpha \cos(z\varphi) + b_2 \sin \alpha \operatorname{tg} \alpha \cos^2(z\varphi). \end{aligned} \quad (1)$$

Продифференцировав выражения (1) по dt , получим формулу для расчета скорости скольжения зубьев прецессионного колеса относительно неподвижного, которая запишется следующим образом:

$$\begin{aligned} V_T'' &= z \frac{d\varphi}{dt} (R_1 \operatorname{tg} \alpha \sin(z\varphi) - b_1 \sin \alpha \operatorname{tg} \alpha \cos(2z\varphi)); \\ V_P'' &= z \frac{d\varphi}{dt} (R_2 \operatorname{tg} \alpha \sin(z\varphi) - b_2 \sin \alpha \operatorname{tg} \alpha \cos(2z\varphi)). \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} d\varphi / dt &= \omega; \\ z d\varphi / dt &= \omega_{\text{крин}}. \end{aligned} \quad (3)$$

где ω – угловая скорость вращения ведомого вала; $\omega_{\text{крин}}$ – угловая скорость вращения ведущего вала (кривошипа); V_T'' и V_P'' – относительные скорости скольжения контактирующих поверхностей зубьев (в первом случае – в точке T – скорость скольжения зубьев прецессионного колеса относительно неподвижного стержня (венца), во втором случае в точке P – скорость скольжения зубьев прецессионного колеса относительно ведомого стержня).

Определим скорость V_T' – вертикальную составляющую тангенциальной скорости кривошипа в точке T .

$$V_T' = V_{\text{ман}}^T \sin(z\varphi) = b_1 \sin \alpha \sin(z\varphi) \omega_{\text{крин}}; \quad (4)$$

Определим скорость V_P' – вертикальную составляющую тангенциальной скорости в точке P :

$$V_P' = V_{\text{ман}}^P \sin(z\varphi) = b_2 \sin \alpha \sin(z\varphi) \omega_{\text{крин}}; \quad (5)$$

Определим горизонтальную составляющую скорости V_T''' . Она также может быть определена из тангенциальной $V_{T(1)}^T$:

$$V_{T(1)}''' = V_{\text{ман}}^T \cos(z\varphi) = b_1 \sin \alpha \cos(z\varphi) \omega_{\text{крин}}; \quad (6)$$

$$V_{T(2)}''' = \frac{\omega_{\text{крин}}}{u_{1сш}} R_{сш}^{(1)} = \omega_{\text{крин}} \left(1 - \frac{z_1}{z_2} \right) R_{сш}^{(1)}; \quad (7)$$

где $u_{1сш}$ – передаточное отношение 1^{ой} ступени редуктора, $R_{сш}$ – радиус выступов шестерни /2/.

$$R_{сш}^{(1)} = \sqrt{\left(\frac{R_1 - \cos(z\varphi) b_1 \sin \alpha}{\cos \alpha_1} \right)^2 + (\sin(z\varphi) b_1 \sin \alpha)^2}; \quad (8)$$

Результирующая скорость:

$$V_T''' = V_{T(1)}''' + V_{T(2)}''' ; \quad (9)$$

Результирующая скорость скольжения в точке T :

$$V_T = \sqrt{(V_T')^2 + (V_T'')^2 + (V_T''')^2} ; \quad (10)$$

Аналогично находим составляющие скорости скольжения в точке P . Результирующая скорость V_P''' в точке P определяется выражением:

$$V_P''' = V_{P(1)}''' + V_{P(2)}''' + V_{P(3)}''' ; \quad (11)$$

Определим горизонтальную составляющую скорости V_P''' . Аналогично как и в предыдущем случае:

$$V_{P(1)}''' = b_2 \sin \alpha \cos(z\varphi) \omega_{крив} ; \quad (12)$$

$$V_{P(2)}''' = \frac{\omega_{крив}}{u_{1cm}} R_{сш}^{(II)} = \omega_{крив} \left(1 - \frac{z_1}{z_2} \right) R_{сш}^{(II)} ; \quad (13)$$

$$V_{P(3)}''' = \frac{\omega_{крив}}{u_{1cm}} R_{сш}^{(II)} = \omega_{крив} \left(1 - \frac{z_1}{z_2} \frac{z_3}{z_4} \right) R_{сш}^{(II)} ; \quad (14)$$

Результирующая скорость скольжения в точке P :

$$V_P = \sqrt{(V_P')^2 + (V_P'')^2 + (V_P''')^2} ; \quad (15)$$

На основании приведенных выше формул была составлена программа на языке программирования VisualBasic for Applications для табличного процессора Excel 7.0, которая позволяет определять численные значения относительных скоростей скольжения V_T', V_T'', V_T''', V_T . Результаты исследований, выраженные графиками, отражающими зависимость скоростей в контакте зубьев зубчатых венцов для первой ступени передачи от угла наклона кривошипа $z\varphi$ при различных конструктивных параметрах КЦПП, приведены на рис. 2.

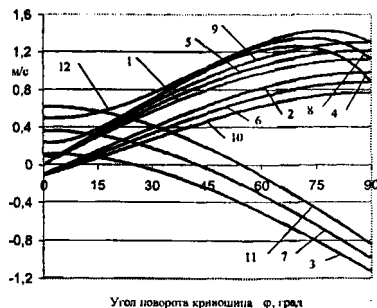


Рис. 2. График зависимости скоростей скольжения от углового положения кривошипа при различных расстояниях $b=OA$ (рис. 1), причем $b_1 < b_2 < b_3$: 1, 2, 3, 4 – V_T', V_T'', V_T''', V_T соответственно при b_1 ; 5, 6, 7, 8 – V_T', V_T'', V_T''', V_T соответственно при b_2 ; 9, 10, 11, 12 – V_T', V_T'', V_T''', V_T соответственно при b_3

Проанализировав график (рис. 2), можно сделать вывод, что при увеличении расстояния OA относительные скорости скольжения возрастают. Причем оптимальное соотношение составляющих скоростей скольжения достигается при углах положения кривошипа, $\alpha\varphi$ в диапазоне 0° – 30° . Следовательно, необходимо добиваться того, чтобы взаимодействие контактирующих поверхностей неподвижного и прецессионного дисков происходило при угловом положении кривошипа $\alpha\varphi = 0^\circ$ – 30° или близком к нему, а при других положениях кривошипа необходимо исключить данное взаимодействие. Это можно достичь, если зубчатый венец неподвижного диска расположить на определенном расстоянии от точки прецессии O и его ширину сделать минимальной, необходимой для обеспечения контактной прочности.

Проведенный анализ позволил использовать значения относительных скоростей скольжения для определения срока службы коническо-цилиндрических планетарных редукторов, изготовленных на РУП Могилевский завод “Электродвигатель”

ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 2029170 Россия, МКИ⁶ F16 H1/32. Планетарная прецессионная передача / П. Н. Громыко - № 5004739/28; Заявлено 01.07.91; Оpubл. 20.02.95., Бюл. № 5. – 4 с. Планетарные прецессионные передачи (КЦПП). Кинематический, силовой и технологический аспекты их создания / П. Н. Громыко, А. А. Жолобов, А. А. Стаценко и др.; Под общ. ред. А. Т. Скойбеды. – Мн.: БГПА, 2000. – 252 с.

УДК 519.10: 539.3

О.В. Громыко

ИСХОДНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ И ЖЕСТКОСТИ МЯГКОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

В начальном недеформированном состоянии оболочка представляет цилиндр с жесткими дисками в торцах. Материал оболочки изотропен и допускает большие деформации. Связь между погонными усилиями и деформациями линейна, при этом коэффициенты, характеризующие эту связь (Eh) и μ считаются постоянными. Введем систему координат x, r , связанную с одним из торцов. Оболочка нагружена внутренним давлением p .

Введем следующие обозначения: R – радиус жесткого днища; L_n – начальная длина оболочки; L_k – конечная длина оболочки; R_r – радиус кривизны меридиана оболочки; R_θ – окружной радиус кривизны оболочки; θ – угол между нормалью и про-

дольной осью оболочки; T_1, T_2 – соответственно меридиональное и окружное погонные усилия; θ – угол поворота нормали; w – перемещение в направлении; p – давление внутри оболочки; ϵ_1, ϵ_2 – главные удлинения.

Геометрические соотношения получаем из рассмотрения рис. 1 и 2 [1–3]:

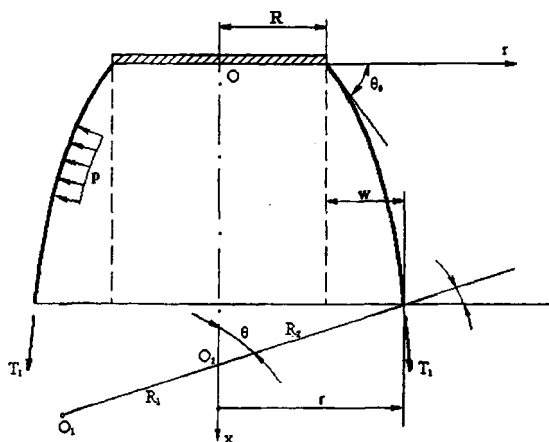


Рис. 1. Условные обозначения в расчетной схеме.

$$\frac{1}{R_2} = \frac{\sin \theta}{r}; \quad \frac{1}{R_1} = \frac{d\theta}{dr} \cos \theta; \quad \frac{dr}{dx} = \operatorname{ctg} \theta; \quad \epsilon_2 = \frac{w}{R}; \quad \epsilon_1 = \frac{r}{R} - 1 \quad (1)$$

Уравнения равновесия для осесимметричной нагруженной безмоментной оболочки имеют следующий вид [3]:

$$T_1 = \frac{pr}{2 \sin \theta} \quad (2); \quad \frac{T_1}{R_1} + \frac{T_2}{R_2} = p \quad (3)$$

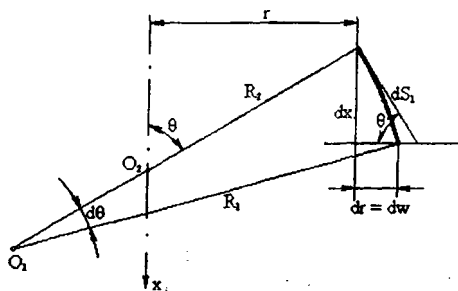


Рис. 2. Элемент мягкой оболочки

Связь погонных усилий с деформациями имеет вид закона Гука

$$T_1 = (Eh)(\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2) \frac{1}{1-\mu^2}; \quad T_2 = (Eh)(\varepsilon_2 + \mu\varepsilon_1) \frac{1}{1-\mu^2}$$

Отсюда можно записать, что $T_2 = Eh \cdot \varepsilon_2 + \mu T_1$ (4)

Подставим выражения для кривизны в уравнение (3): $T_1 \frac{d\theta}{dx} \cdot \sin\theta + T_2 \cdot \frac{\sin\theta}{r} = p$

Отсюда следует, что

$$\frac{dx}{d\theta} = \frac{T_1 \cdot \sin\theta}{p - T_2 \cdot \frac{\sin\theta}{r}} \quad (5)$$

Полная система уравнений, необходимых для отыскания деформированной формы оболочки, имеет вид (заметим, что $dr = dw$ и $\varepsilon_2 = \frac{w}{r}$):

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{d\theta} &= \frac{T_1 \cdot \sin\theta}{p - T_2 \cdot \frac{\sin\theta}{r}}; \\ \frac{dr}{dx} &= \operatorname{ctg}\theta; \\ \frac{r}{R} &= 1 + \varepsilon_2; \\ T_2 &= Eh \cdot \varepsilon_2 + \mu T_1 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Запишем исходную систему (6) в безразмерном виде, вводя следующие обозначения: $\Phi_1 = \frac{T_1}{pR}$; $\Phi_2 = \frac{T_2}{pR}$; $\rho = \frac{r}{R}$; $\xi = \frac{x}{R}$; $B = \frac{Eh}{pR}$. Тогда полная система уравнений (6) запишется в виде (заметим, что $d\rho = d\eta$ и $\varepsilon_2 = \eta$)

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\xi}{d\theta} &= \frac{\Phi_1 \cdot \sin\theta}{1 - \Phi_2 \cdot \frac{\sin\theta}{\rho}}; \\ \frac{d\rho}{d\xi} &= \operatorname{ctg}\theta; \\ \rho &= 1 + \varepsilon_2; \\ \Phi_1 &= \frac{\rho}{2 \sin\theta}; \\ \Phi_2 &= B\varepsilon_2 + \mu\Phi_1 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Интегрирование системы уравнений (7) проводилось по параметру θ ($\theta_0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$)

Условия на границе: 1) $\theta = \theta_0$, $\rho = 1$, $\xi = 0$ 2) $\theta = \frac{\pi}{2}$; $\xi = \xi_k$

Численное интегрирование системы уравнений (7) проводилось на ПК в пакете Mathcad.

Алгоритм решения

Задаемся начальным углом $\theta = \theta_0$ и шагом интегрирования $\Delta\theta$. При этом началу расчетов соответствует система

$$\left. \begin{aligned} \xi &= 0; \\ \rho_0 &= 1; \\ \Phi_{10} &= \frac{1}{2 \sin \theta_0}; \\ \varepsilon_{20} &= 0; \\ \Phi_{20} &= \mu \Phi_{10}. \end{aligned} \right\}$$

Запишем систему уравнений (7) в конечных разностях:

$$\Delta \xi_i = \frac{\Phi_{1i-1} \cdot \sin \theta_{i-1}}{1 - \Phi_{2i-1} \cdot \frac{\sin \theta_{i-1}}{\rho_{i-1}}} \cdot \Delta \theta;$$

$$\Delta \rho_i = \frac{\cos \theta_{i-1}}{\sin \theta_{i-1}} \cdot \Delta \xi_i;$$

$$\varepsilon_{2i} = \varepsilon_{2i-1} + \Delta \rho_i;$$

$$\xi_{i+1} = \xi_i + \Delta \xi_i;$$

$$\theta_i = \theta_{i-1} + \Delta \theta;$$

$$\rho_i = 1 + \varepsilon_{2i};$$

$$\Phi_{1i} = \frac{\rho_i}{2 \sin \theta_i};$$

$$\Phi_{2i} = \mu \left(\frac{B \varepsilon_{2i}}{\mu} + \Phi_{1i} \right)$$

Проведем линеаризацию геометрических соотношений (1). Пусть угол поворота нормали – малая величина и равен $\vartheta = \frac{\pi}{2} - \theta$. Тогда можно считать, что $\cos \vartheta \approx 1$; $\sin \vartheta \approx \vartheta$ при этом $\sin \theta = \cos \vartheta \approx 1$; $\cos \theta = -\sin \vartheta \approx -\vartheta$. Из рис. 2 очевидно соотношения $\frac{dw}{d\theta} = \vartheta$. Тогда выражения для кривизн будут иметь вид:

$$\frac{1}{R_1} = -\frac{d^2 w}{d\theta^2}; \quad \frac{1}{R_2} = \frac{1}{R \left(1 + \frac{w}{R} \right)} \quad (8)$$

Представим погонные усилия деформированного состояния оболочки в виде двух составляющих: $T_1 = T_{10} + t_1$; $T_2 = T_{20} + t_2$. Здесь усилия T_{10} , T_{20} соответствуют основному напряженному состоянию оболочки. Они определяются для начальной недеформированной формы из статических уравнений безмоментной линейной теории [3]:

$$T_{10} = \frac{pR}{2}; \quad T_{20} = pR.$$

t_1, t_2 – возмущенные значения усилий.

$$\text{Из уравнения (2) найдем возмущенное значение } t_1: T_1 = \frac{pr}{2 \sin \theta} \rightarrow T_1 = \frac{pR}{2} + \frac{pw}{2} \quad (9)$$

$$\text{следовательно, } t_1 = \frac{pw}{2}.$$

Подстановка полученных значений (8), (9) в уравнения (3) и (4) дает следующую систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} & - \left(\frac{pR}{2} + \frac{pw}{2} \right) \cdot \frac{d^2 w}{d\theta^2} + T_2 \cdot \frac{1}{R \left(1 + \frac{w}{R} \right)} = p \\ & T_2 = Eh \cdot \frac{w}{R} + \mu \left(\frac{pR}{2} + \frac{pw}{2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Решая совместно эти два уравнения и опустив члены более высокого порядка малости, получим следующее дифференциальное уравнение

$$\frac{d^2 w}{dx^2} - \frac{2}{R^2} \left[\frac{Eh}{pR} + \frac{\mu}{2} - 1 \right] \cdot w = -\frac{2}{R} \left(1 - \frac{\mu}{2} \right) \quad (11)$$

В случае, когда параметр нагрузки $\frac{Eh}{pR} \gg (1 - \frac{\mu}{2})$ имеем

$$\frac{d^2 w}{dx^2} - \frac{2Eh}{pR^3} w = -\frac{2}{R} \left(1 - \frac{\mu}{2} \right) \quad (12)$$

Решения этих уравнений имеют вид $w = w_r + c_1 e^{\alpha x} + c_2 e^{-\alpha x}$.

Граничные условия на торцах: 1) $x = 0, w = 0$ 2) $x = L_r, w = 0$.

Получим решение для оболочки конечной длины

$$w = w_r \left[1 - \frac{\operatorname{ch} \alpha \left(x - \frac{L_r}{2} \right)}{\operatorname{ch} \alpha \frac{L_r}{2}} \right] \quad (13)$$

Здесь для уравнения (11)

$$w_r = \frac{\left(1 - \frac{\mu}{2}\right) \cdot R}{\frac{Eh}{pR} - \left(1 - \frac{\mu}{2}\right)}; \quad \alpha^2 = \frac{2}{R^2} \left[\frac{Eh}{pR} - \left(1 - \frac{\mu}{2}\right) \right] \quad (14)$$

В случае уравнения (12) решение соответствует решению линейной безмоментной теории

$$w_r = \frac{pR^2}{Eh} \left(1 - \frac{\mu}{2}\right); \quad \alpha^2 = 2 \frac{Eh}{pR^3} \quad (15)$$

В случае, когда длина краевой зоны меньше $\frac{L}{2}$ для участка вне краевой зоны и $\frac{d^2w}{dx^2} = 0$ решением уравнений (11) и (12) будут частные решения (14) и (15). Отметим,

что решение (14) является точным решением.

ЛИТЕРАТУРА

1. Усюкин В. И. Строительная механика конструкций космической техники: Учебник для студентов вузов. – М.: Машиностроение, 1988. – 392 с.
2. Усюкин В. И. Техническая теория мягких оболочек и ее применение для расчета пневматических конструкций // Пневматические строительные конструкции. – М.: Стройиздат, 1983. – С. 299–333.
3. Бидерман В.Л. Механика тонкостенных конструкций. Статика. – М.: Машиностроение, 1977.
4. Громыко О.В., Громыко А.О. Ландау М.Э. Конечно-разностная прогонка в анализе напряженно-деформированного состояния надувных оболочек вращения // Материалы II Белорусского конгресса по теоретической и прикладной механике. – Мн.: – 1999, С. 68–69.

УДК 539.3

О.В. Громыко

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ МЯГКОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Численное интегрирование системы уравнений (7) из работы [5] проводилось на ПЭВМ с использованием пакета математических расчетов Mathcad 2000 при $\mu := 0.5$

Приведем входной файл, соответствующий изложенному алгоритму. Входными параметрами функций являлись: число разбиений оболочки на участки NUM (этим параметром можно определять точность решения) и комплексный параметр $B = \frac{Eh}{\rho R}$.

```

calc ( NUM , B ) :=
   $\theta_0 \leftarrow 0.521$ 
   $\Delta\theta \leftarrow \frac{\left(\frac{\pi}{2} - \theta_0\right)}{\text{NUM}}$ 
   $\Phi 1_0 \leftarrow \frac{1}{2 \cdot \sin(\theta_0)}$ 
   $\Phi 2_0 \leftarrow \mu \cdot \Phi 1_0$ 
   $\xi_0 \leftarrow 0$ 
   $\rho_0 \leftarrow 1$ 
   $\varepsilon 2_0 \leftarrow 0$ 
  for i ∈ 1.. NUM
     $\Delta\xi_i \leftarrow \frac{\Phi 1_{i-1} \cdot \sin(\theta_{i-1})}{1 - \Phi 2_{i-1} \cdot \frac{\sin(\theta_{i-1})}{\rho_{i-1}}} \cdot \Delta\theta$ 
     $\Delta\rho_i \leftarrow \frac{\cos(\theta_{i-1})}{\sin(\theta_{i-1})} \cdot \Delta\xi_i$ 
     $\varepsilon 2_i \leftarrow \varepsilon 2_{i-1} + \Delta\rho_i$ 
     $\xi_i \leftarrow \xi_{i-1} + \Delta\xi_i$ 
     $\theta_i \leftarrow \theta_{i-1} + \Delta\theta$ 
     $\rho_i \leftarrow 1 + \varepsilon 2_i$ 
     $\Phi 1_i \leftarrow \frac{\rho_i}{2 \cdot \sin(\theta_i)}$ 
     $\Phi 2_i \leftarrow \mu \cdot \left( \frac{B \cdot \varepsilon 2_i}{\mu} + \Phi 1_i \right)$ 
  RES 1 ←  $\xi$ 
  RES 2 ←  $\theta$ 
  RES 3 ←  $\varepsilon 2$ 
  RES 4 ←  $\Phi 1$ 
  RES 5 ←  $\Phi 2$ 
  RES

```

Результаты расчетов помещаются в массив, в столбцах которого находятся интересующие нас величины: составляющие деформации и нагрузки, соответствующие координате, либо углу поворота нормали.

На рис. 1 и 2 приведены результаты для прогиба w , полученные с помощью уравнений (14) и (15) [5] при различных значениях B .

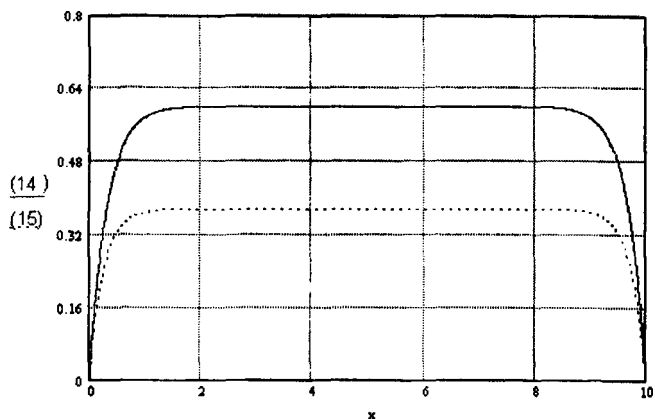


Рис. 1. Сравнение результатов, полученных с помощью уравнений (14) и (15) при $B = 2$

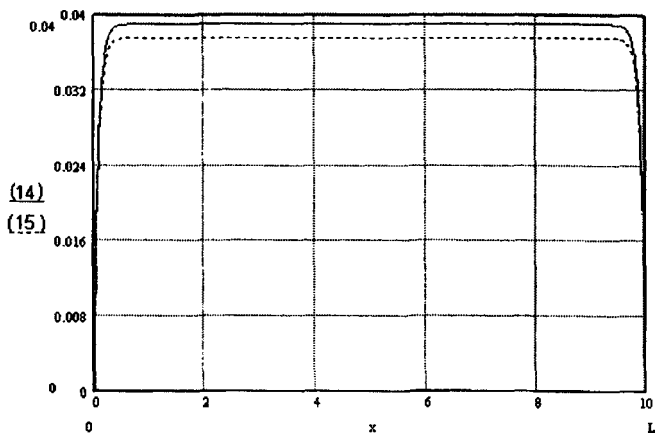


Рис. 2. Сравнение результатов, полученных с помощью уравнений (14) и (15) при $B = 20$

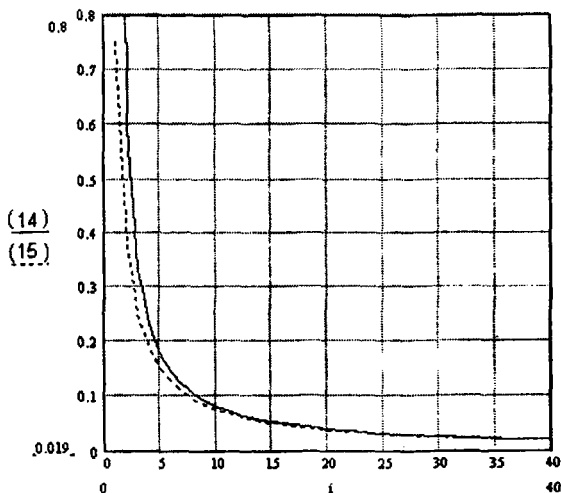


Рис. 3 Зависимость максимальных перемещений w от параметра нагрузки B

Проводилось также сравнение полученных приближенных решений с точным, полученным на ЭВМ для $\mu = 0.5$. На рис. 4 представлены зависимости максимальных перемещений $\eta = \frac{w}{R}$ от параметра нагрузки B .

перемещений $\eta = \frac{w}{R}$ от параметра нагрузки B .

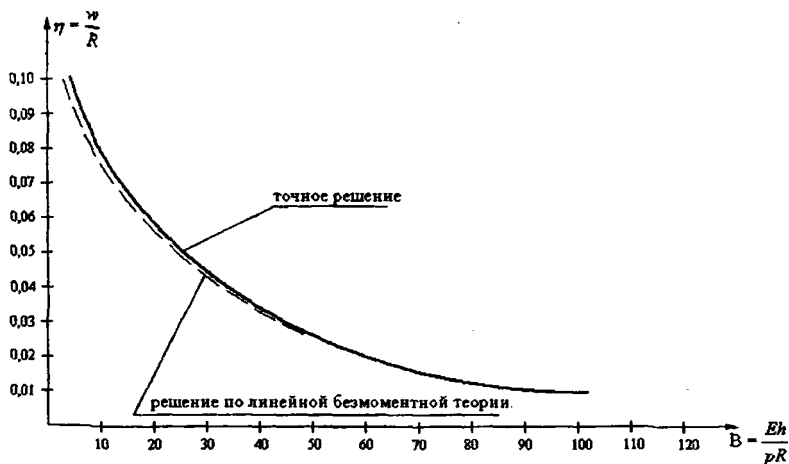


Рис. 4. Зависимость $\eta = f(B)$ для длинной оболочки

Выводы

Для оболочек большой длины, когда длины зоны краевого эффекта меньше $\frac{L}{2}$, можно найти простые выражения для ошибок в определении погонных усилий и деформаций.

Точное решение для перемещения w в безразмерном виде можно записать (см. (14) в работе [5]) в следующем виде:

$$\eta_r = \frac{1 - \frac{\mu}{2}}{B - \left(1 - \frac{\mu}{2}\right)}; \quad \eta_r = \left(\frac{w_r}{R}\right)_r$$

Решение по линейной безмоментной теории (см. (15), [5]):

$$\eta_{ll} = \frac{1}{B} \left(1 - \frac{\mu}{2}\right); \quad \eta_{ll} = \left(\frac{w_r}{R}\right)_l$$

Связь между точным и приближенным решением:

$$\eta_r = \frac{\eta_{ll}}{1 - \eta_{ll}}$$

Ошибка $\Delta\eta$ в определении перемещения по линейной безмоментной теории будет:

$$\Delta\eta = \frac{\eta_r - \eta_{ll}}{\eta_r} = \eta_{ll} \quad \text{или} \quad \Delta\eta = \eta_{ll}$$

Таким образом, определив по линейной безмоментной теории перемещение w , можно установить, какова при этом допущенная ошибка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Усюкин В. И. Строительная механика конструкций космической техники: Учебник для студентов вузов. – М.: Машиностроение, 1988. – 392с.
2. Усюкин В. И. Техническая теория мягких оболочек и ее применение для расчета пневматических конструкций // Пневматические строительные конструкции. – М.: Стройиздат, 1983. С.299-333.
3. Бидерман В.Л. Механика тонкостенных конструкций. Статика. – М.: Машиностроение, 1977.
4. Громыко О.В., Громыко А.О. Ландау М.Э. Конечно-разностная прогонка в анализе напряженно-деформированного состояния надувных оболочек вращения // Материалы II Белорусского конгресса по теоретической и прикладной механике. – Мн., 1999. – С. 68–69.
5. Громыко О.В. Исходные соотношения для расчета прочности и жесткости мягкой цилиндрической оболочки // Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып.17 (см. настоящий сборник).

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПОДКРЕПЛЕННОЙ ПАНЕЛИ

Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь

На основе разработанных алгоритмов [1–4] и программ выполнено исследование напряженно-деформированного состояния цилиндрической панели, подкрепленной ребром (рис. 4, 5), при действии равномерно распределенной по поверхности нагрузки q . При расчетах приняты следующие исходные данные: отношение длины панели к ее ширине $l/b = 2$, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$. Результаты вычислений прогиба и изгибающих моментов приведены на рис. 1–3.

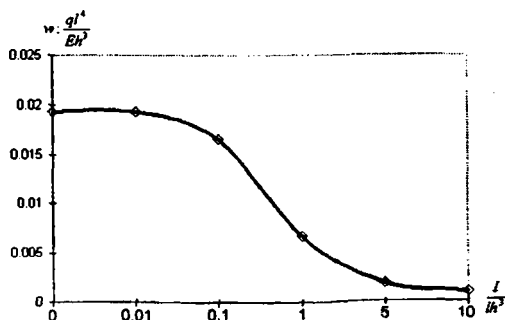


Рис. 1

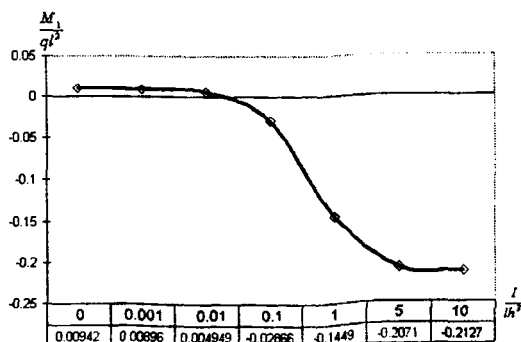


Рис. 2

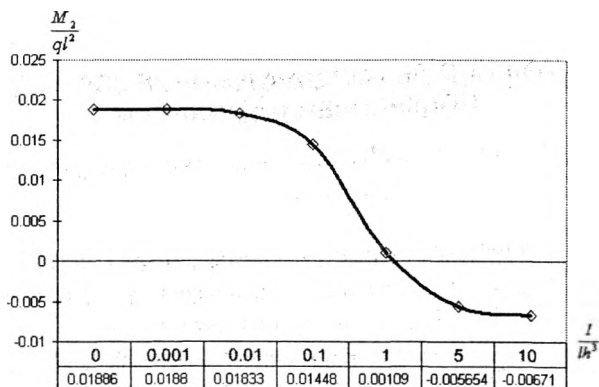


Рис. 3

Анализируя результаты, приходим к выводу, что цилиндрическую панель, у которой $b > l$, целесообразно подкреплять ребрами жесткости только при жесткости, удовлетворяющей неравенству $\frac{I}{lh^3} < 0,1$ (I – момент инерции поперечного сечения подкрепляющего ребра), т.к. увеличение жесткости ребра ведет к резкому возрастанию изгибающего момента M_1 , что влечет за собой появление местных перенапряжений, возникающих в оболочке вблизи ребра.

Аналогичная задача решена с помощью системы научного и инженерного анализа статики и динамики механических систем ANSYS 5.5. Рассматривалась цилиндрическая панель, подкрепленная ребрами под воздействием гидростатического давления. При расчетах приняты следующие исходные данные: $h=0,01$ м, $l=2$ м, $r=1$ м, расстояние между ребрами равно 1 м (рис. 4).

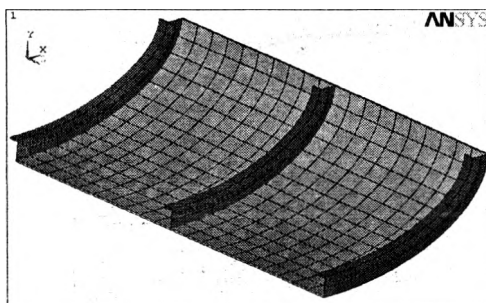


Рис. 4

Соответствующая расчетная схема и результаты исследования напряженно-деформированного состояния панели представлены на рис. 5–7.

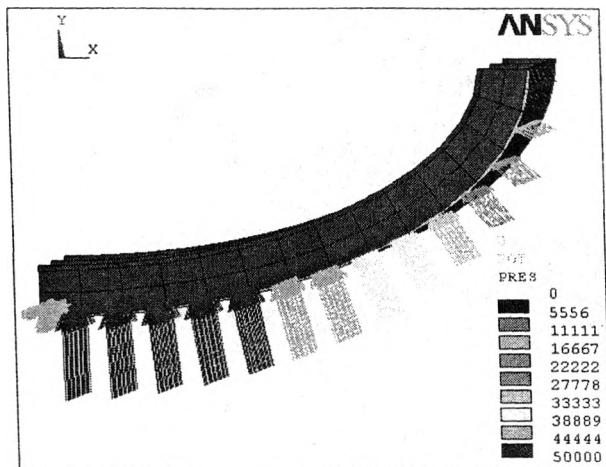


Рис. 5

Так, на рис. 5 представлена схема приложения усилий к половине панели, а на рис. 6 – качественная картина деформированной формы панели под действием распределенной по поверхности нагрузки.

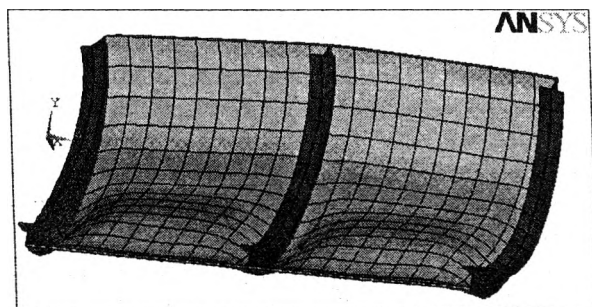


Рис. 6

Анализ полученных результатов позволяет утверждать, что решения на основе разработанного подхода [3,4] и соответствующей вычислительной программы достоверны и получены с высокой степенью точности.

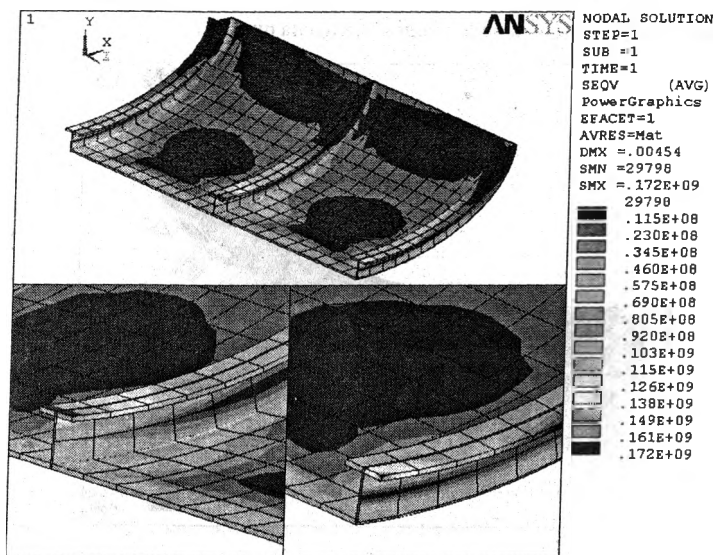


Рис. 7.

ЛИТЕРАТУРА

1. Скойбеда А.Т., Громыко О.В. Матричная форма уравнений для расчета оболочек с конечной сдвиговой поперечной жесткостью. I. Исходные соотношения. – Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сер. фізіка-тэхнічных навук. Выпуск 2. – 1999. – С. 98–102.
2. Скойбеда А.Т., Громыко О.В. Матричная форма уравнений для расчета оболочек с конечной сдвиговой поперечной жесткостью. II. Система уравнений равновесия в перемещениях и их решение. – Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сер. фізіка-тэхнічных навук. Выпуск 2. – 1999. – С. 103–108.
3. Громыко О.В., Виноградов Ю.И. Матричный алгоритм одного метода решения задач о локальном нагружении пластин и оболочек// Механика твердого тела. Известия АН СССР, 1980, № 3.
4. Громыко О.В. Метод расчета напряженно-деформированного состояния двумерных тонкостенных элементов конструкций//Тезисы докл. VI НТК проф.-преп. состава. – Гомель: ГПИ, 1992.
5. Попов Б.Г. Расчет многослойных конструкций вариационно-матричными методами. – М.: МГТУ им.Н.Э.Баумана, 1993. – 294 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРЕДАЧИ С ПЕРЕМЕННЫМ ПЕРЕДАТОЧНЫМ ОТНОШЕНИЕМ НА БАЗЕ СОСТАВНЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

*Могилевский государственный технический университет
Могилев, Беларусь*

Передаточные механизмы, спроектированные для режима функционирования с постоянным передаточным отношением, не в полной мере удовлетворяют требованию экономичности и энергосбережения, так как часто функционируют с параметрами режима нагрузки, отличными от номинальных.

Будучи рассчитанными для работы с определенными скоростями и нагрузками (массой поднимаемого груза, моментом на выходном валу), они при уменьшении нагрузки на рабочем органе в процессе функционирования вынуждают двигатель потреблять излишнюю энергию (расходовать излишнее топливо) или ухудшать энергетические характеристики. При перегрузках они не предохраняют двигатель от непредусмотренной остановки или выхода из строя. То есть весьма желательно, чтобы передаточный механизм был приспособлен к переменным условиям функционирования, а именно, имел переменное передаточное отношение.

Перспективной альтернативой современным механизмам с переменным передаточным отношением (коробкам скоростей) могут служить плавнорегулируемые зубчатые передачи нового типа – передачи с составными зубчатыми колесами, образованными набором зубчатых секторов. Однако, эта альтернатива может быть реализована в результате решения ряда технических задач, основными из которых являются: создание компактной конструкции передачи, обеспечение требуемого диапазона регулирования передаточного отношения и приемлемых кинематических характеристик передачи [1–3].

Конструкция передачи предполагает, что на каждом из двух стационарно смонтированных валов передачи установлены составные зубчатые колеса, взаимодействующие с одним цельным (промежуточным) зубчатым колесом, причем вылет зубчатых секторов составных зубчатых колес изменяется строго синхронно, но в противоположных направлениях.

Такая передача может иметь диапазон регулирования передаточного отношения $D = 6 \dots 7$ в одной ступени и способна конкурировать с современными коробками передач по материалоемкости, количеству передающих полезную нагрузку деталей, автоматизации работы, а также может использоваться в других ответственных передаточных механизмах.

Если зубчатые венцы секторов выполнены на упругом основании, позволяющем при любом значении передаточного отношения (при любом вылете сектора) обеспечивать равенство

$$d_2' = d_{02}, \quad (1)$$

где d_2' – делительный диаметр зубчатого сектора ведомого составного зубчатого колеса, d_{02} – делительный диаметр условного сплошного (цельного) зубчатого колеса, эквивалентного ведомому составному,

то такая передача особенностей кинематики не имеет. Если составное колесо образовано жесткими зубчатыми секторами то, процесс взаимодействия зубчатого сектора с зубчатым венцом внутреннего зацепления графически можно представить в виде линии зацепления, имеющей непрямолинейные участки в начале и в конце зацепления.

Наличие на линии зацепления непрямолинейных участков свидетельствует о том, что в начальной и конечной стадиях взаимодействия зубчатых секторов с цельным (промежуточным) зубчатым колесом, когда эвольвентные профили зубьев взаимодействуют с кромками сопряженных зубьев, не сохраняется постоянство отношения угловых скоростей или перемещений ведущего и ведомого элементов передачи, то есть имеет место неравномерность вращения ведомого вала передачи.

При этом прямолинейный участок линии зацепления не имеет фиксированного положения и величина угла α_{wt} зацепления изменяется от минимального α_{wn} до максимального α_{wk} значения, что свидетельствует о непостоянстве передаточного отношения передачи даже в течение всего времени взаимодействия зубьев секторов и промежуточного зубчатого колеса по общей нормали. Несложными вычислениями установлено, что текущее значение передаточного отношения u_1 будет определяться положением полюса зацепления на межосевой линии и может быть найдено из выражения:

$$u_1 = d_4 \cdot (\cos \alpha / \cos \alpha_{wt}) / (d_{02} - d_4 \cdot [1 - (\cos \alpha / \cos \alpha_{wt})]), \quad (2)$$

где d_4 – делительный диаметр промежуточного зубчатого колеса, α – угол главного профиля исходного контура.

Только в одном случае, а именно когда линия зацепления проходит через абсолютный полюс зацепления, текущее значение u_1 передаточного отношения совпадает с номинальным $u_n = d_4 / d_{02}$. Во всех остальных случаях имеет место погрешность передаточного отношения:

$$\Delta u = 1 - (d_{02} \cdot \cos \alpha / \cos \alpha_{wt}) / (d_{02} - d_4 \cdot (1 - (\cos \alpha / \cos \alpha_{wt}))). \quad (3)$$

Следует также отметить, что непостоянство угла зацепления свидетельствует также о непостоянстве торцового коэффициента перекрытия зубьев зубчатых секторов.

По вышеприведенным зависимостям для передачи, образованной зубчатыми колесами с модулем 3 мм, при числах зубьев спаренных промежуточных зубчатых колес

$z_{\text{внутр}} = 68$ и $z_{\text{внеш}} = 88$ определены погрешности передаточного отношения для различных чисел зубьев составных зубчатых колес. При числах зубьев ведущего z_1 и ведомого z_2 составных колес 24 и 60, 30 и 54, 42 и 42 эта погрешность составила соответственно 3,3; 3,1 и 2,7 процента, что соответствует характеру полученных выше зависимостей.

Оптимальный синтез составного зубчатого колеса позволяет уменьшить относительную продолжительность стадий кромочного зацепления. Таким образом, основной источник неравномерности движения передачи с составными зубчатыми колесами – изменение положения линии зацепления. Вышеприведенные зависимости, позволяют оценить величину погрешности передаточного отношения передачи. Однако теоретические оценки, полученные к тому же для фрагмента передачи (пары зацепляющихся зубьев), не могут служить окончательной характеристикой функциональных свойств передачи в целом. Заниматься же теоретическим определением кинематических характеристик передачи с составными зубчатыми колесами на данном этапе ее создания нецелесообразно. Поэтому обоснованно судить о функциональных свойствах этой передачи можно только по результатам ее стендовых испытаний.

Учитывая вышеизложенные особенности кинематики передачи с составными зубчатыми колесами, целью таких испытаний должно являться получение динамических характеристик передачи, а именно ее амплитудно – частотных характеристик, представляющих собой зависимость амплитуды вынужденных колебаний ведущего вала передачи от частоты приложенного к ведомому валу синусоидально изменяющегося нагружающего момента.

Стенд включает электродвигатель, исследуемый объект (передачу с составными зубчатыми колесами, взаимодействующими с охватывающими каждый вал промежуточными колесами с внутренними зубьями, снабженными внешними зубьями для взаимодействия друг с другом), нагружатель и датчик крутящего момента, связанный с ведущим валом передачи. Датчик включает торсионный вал, на концах которого установлены перфорированные диски. По разные стороны каждого перфорированного диска установлены светодиод и фоторезистор. При прохождении между фоторезистором и светодиодом перфорации вырабатывается сигнал. Датчик настраивается таким образом, что при отсутствии закручивания торсионного вала, величина которого пропорциональна приложенному к валу момента, датчик не вырабатывает импульса. При наличии на вращающемся валу крутящего момента датчик формирует импульс, длина которого пропорциональна углу закручивания торсионного вала или величине крутящего момента. Вырабатываемые датчиками импульсы фиксируются ЭВМ, которая и определяет их длину в условных единицах, что вполне приемлемо для качественной оценки испытываемого объекта.

На описанном стенде испытаниям была подвергнута передача с составными зубчатыми колесами, имеющими фиксированные числа зубьев 24 и 60, 42 и 42. Кроме того, испытаниям подвергалась передача, в которой составные зубчатые колеса заме-

нялись целными с числами зубьев $z_1 = 24$ и $z_2 = 60$. На рис. 1 приведены амплитудно-частотные характеристики, полученные в результате испытаний указанных передач, а на рис. 2 – уровни вынужденных колебаний ведущих валов этих же передач.

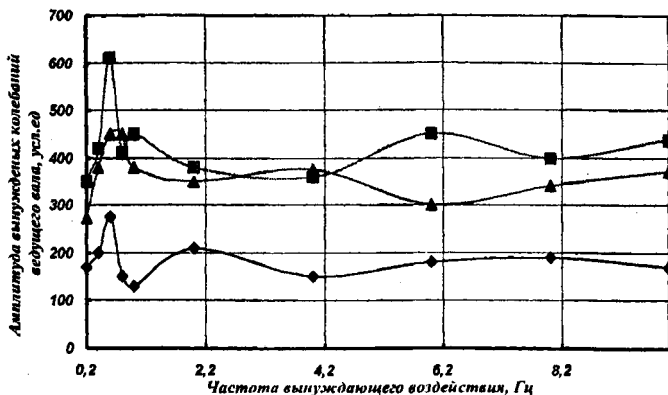


Рис. 1. Амплитудно-частотные характеристики

—◆— с цельными зубчатыми колесами —■— с составными зубчатыми колесами, $z_1/z_2=24/60$ —▲— с составными зубчатыми колесами, $z_1/z_2=42/42$

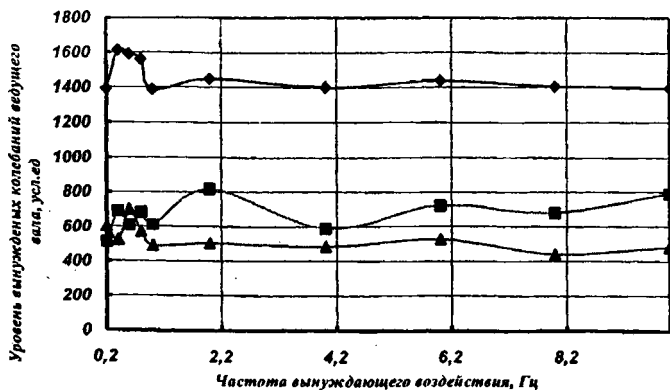


Рис. 2. Уровень вынужденных колебаний ведущего вала передачи

—◆— с цельными зубчатыми колесами —■— с составными зубчатыми колесами, $z_1/z_2=24/60$ —▲— с составными зубчатыми колесами, $z_1/z_2=42/42$

Указанные характеристики испытывавшихся на стенде передач были получены следующим образом. Приводной двигатель сообщает ведущему валу передаточного механизма равномерное вращение. Отсутствие размыкания рабочих профилей зубьев в процессе испытаний обеспечивается правильно выбранной величиной нагружающего момента на выходном валу, создаваемого порошковым тормозом. Крутящие моменты на входном и выходном валу связаны выражением:

$$T_2 = T_1 \cdot u \cdot \eta, \quad (4)$$

где T_1 – крутящий момент на ведущем валу, T_2 – крутящий момент на ведомом валу, u – передаточное отношение испытываемого механизма, η – коэффициент полезного действия испытываемого механизма.

Коэффициент полезного действия механизма в процессе испытания остается постоянным, а передаточное отношение может меняться в соответствии с вышеизложенным, что вызовет колебания момента на ведомом валу. Эти колебания преобразуются в электрические импульсы, длина которых фиксируется ЭВМ. При этом выходной вал передачи и нагружающее устройство жестко связаны между собой с целью исключения возможных дополнительных погрешностей, которые могли бы возникнуть при их упругом соединении.

Приведенные на рисунках 1 и 2 графики позволяют сделать следующие выводы. Амплитуда колебаний ведущего вала испытанных передач определяется, главным образом, погрешностью передаточного отношения, которая в силу изложенных выше причин гораздо более значительна у составных колес по сравнению с цельными. При уменьшении условного числа зубьев составного колеса эта погрешность уменьшается, что подтверждается графиком на рис. 1.

По этой же причине уровень вынужденных колебаний ведущего вала испытывавшихся передач с составными колесами должен быть выше, чем у передачи с цельными колесами. Однако, в силу того, что составные зубчатые колеса имеют, в отличие от цельных, два силовых потока, каждый из которых образован половиной составляющих зубчатый венец секторов, уровень колебаний ведущего вала образованной ими передачи значительно ниже.

ЛИТЕРАТУРА

1. Даньков А.М. Передаточные механизмы с составными зубчатыми колесами. Весті Акадэміі навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 1998. № 4. С. 84–90.
2. Даньков А.М. Особенности конструкции и функционирования передаточных механизмов с составными зубчатыми колесами; Могилев. Машиностр. Ин-т.-Могилев, 1996.– 16 с.: ил.-Библиогр.: 3 назв.–Деп. в ин-те Белинформпрогноз 16. 04. 96, № Д199616.
3. Скойбеда А.Т., Даньков А.М. Передаточные механизмы на основе составных зубчатых колес.– Мн.: БГПА, 2000.– 96 с.

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ РАБОТЫ И МОНТАЖА ПОДШИПНИКОВ НА ДЕФОРМАЦИЮ ТЕЛ КАЧЕНИЯ

Белорусская государственная политехническая академия

Минск, Беларусь

При монтаже подшипников необходимо соблюдать чистоту рабочего места, так как попадание твердых частиц или грязи в подшипник влияет на его долговечность и, в некоторых случаях, приводит к преждевременному выходу его из строя.

Практика показывает, что, несмотря на увеличение грузоподъемности подшипников за счет улучшения качества стали и конструкции, срок их службы в реальных машинах повышается в гораздо меньшей степени. Принято считать, что одна из причин этого – наличие загрязняющих веществ. Суть указанного явления заключается в том, что вследствие воздействия загрязняющих веществ и увеличения абразивного износа происходит местное повышение контактного напряжения между телом качения и кольцом, что в результате приводит к изменению формы беговой дорожки. Кроме того, мельчайшие выступы на поверхности контакта и риски, образующиеся в результате износа, становятся источником концентрации напряжения. Это приводит к локальным перегрузкам, т.е. к пластическим деформациям и разрушению поверхностного слоя. При большой загрязненности крупной фракцией наблюдается интенсивный абразивный износ контактирующих поверхностей, увеличение зазоров и искажение первоначальной внутренней геометрии контакта.

Сопрягаемые с подшипником поверхности вала и корпуса должны быть тщательно промыты, протерты, просушены и смазаны тонким слоем смазочного материала. Точность размеров и форм всех деталей, сопряженных с подшипником, должна быть проверена и соответствовать требованиям ГОСТ 3325-85.[1].

Если монтаж производится из деталей, имеющих погрешности размеров или формы, то эти погрешности переносятся на собираемый узел и в дальнейшем становятся главной причиной выхода подшипника из строя. Это приводит не только к возникновению биения вала при вращении, но и к искажениям формы дорожек качения подшипниковых колец, установленных на валах.

Погрешности собираемых деталей, и, прежде всего, их пространственные отклонения и отклонения формы, приводят к упругим перемещениям сопрягаемых деталей и нарушению условий контакта поверхностей. При этом возникают изменения формы эпюры давлений, кромочные взаимодействия между дорожками и телами качения подшипников и пр.

Можно утверждать, что погрешности монтажа во многих случаях превышают допустимые отклонения при изготовлении высокоточных узлов- например, шпинделей прецизионных станков [2].

Закрепление на корпусах стаканов под подшипники винтами приводит к появлению местных выпучиваний на цилиндрической поверхности, предназначенной для установки подшипников. В ряде случаев эти выпучивания передаются на дорожки качения подшипников. По аналогичным причинам возникает неравномерное прилегание торцов гаек или регулировочных колец к торцовым поверхностям подшипников, что также вызывает искажение дорожек качения.

К дефектам монтажа можно отнести несоблюдение посадок подшипников, неправильное назначение регулировочных зазоров, неравномерную натяжку подшипников, установку подшипников с перекосом, запрессовку подшипников недопустимыми методами, механические повреждения подшипников при их монтаже и др. Указанные дефекты приводят к нарушению нормальной работы деталей и узлов, к перегрузке подшипников и, в ряде случаев, к аварийному выходу из строя узла или машины в целом.

При назначении тугих посадок возможна выборка в подшипнике внутренних зазоров, что затрудняет его вращение и в некоторых случаях вызывает защемление тел качения. Кроме того, тугие посадки могут привести к износу посадочных мест.

Если же посадка подшипника в корпусе не настолько туга, чтобы вызвать защемление тел качения, она может стать причиной повышенного износа сепаратора, так как в этом случае он теряет ориентировку относительно тел качения и попеременно прижимается к одному из бортов кольца подшипника.

При слишком свободной посадке колец подшипников может происходить их проворот. Вращение внутреннего кольца по валу или наружного кольца в корпусе происходит при недостаточной смазке. От высокого местного нагрева кольца отпусаются, вследствие чего увеличивается их износ, появляются раковины и трещины.

Свободная посадка опасна преимущественно по причине образования дополнительных динамических нагрузок, не допускаемых при нормальной работе подшипникового узла. [3]

Величина зазора (натяга) в подшипниковых узлах оказывает существенное влияние на работоспособность шпиндельных узлов: точность вращения, жесткость, нагрев опор, долговечность и др.

При установке шпиндельных валов на роликоподшипниках необходимо помнить, что уменьшение зазора и увеличение предварительного натяга всегда вызывает возрастание момента трения и соответственно тепловыделения в опорах. В то же время для повышения точности подшипников допустимый предварительный натяг необходимо увеличивать. Для обеспечения заданной жесткости в более точных подшипниках нужен меньший натяг, чем в подшипниках менее точных [4].

Для роликовых подшипников также опасен монтаж с перекосом внутреннего кольца относительно наружного. У этих подшипников перекос приводит к повышенным удельным нагрузкам в местах касания кромок роликов с дорожкой качения, вызывая при этом выкрашивание материала кольца.

При взаимном перекосе колец шариковых подшипников происходит повышенный износ трущихся поверхностей и прежде всего износ сепараторов, что может явиться причиной их разрушения. Известно, что значительная часть поломок сепараторов в однорядных шариковых подшипниках происходит по этой причине. Само разрушение вызывается разностью скоростей шариков на различных участках пути, в результате чего шарики неравномерно воздействуют на гнезда сепараторов.

Повышенный износ сепараторов происходит вследствие того, что шарики попеременно отжимаются в обе стороны от плоскости, проходящей через середину дорожки качения одного из колец, отжимая во взаимопротивоположные стороны отдельные звенья сепаратора.

Такая ненормальная работа шарикового подшипника приводит к усталостной поломке сепаратора большей частью по заклепочным отверстиям. Поверхность его излома, как правило, оказывается заполированной после поломки, что не позволяет выявить усталостный характер разрушения сепаратора.

Поэтому основными отличительными признаками при разрушении подшипников вследствие взаимного перекоса колец являются: односторонний неравномерный износ, одностороннее боковое выкрашивание, следы неравномерного одностороннего смятия на посадочных и торцовых поверхностях колец.

Иногда монтаж подшипника с взаимным перекосом колец приводит к задирам, которые впоследствии являются очагами усталостного разрушения колец.

Установка подшипника в дефектный корпус, имеющий, например, овальное отверстие, приводит к перекосу осей наружного и внутреннего колец т.е. создает условия для взаимного перекоса колец подшипника. С другой стороны, при овальном отверстии в корпусе наружное кольцо приобретает эллиптическую форму, что часто приводит к разрушению сепаратора.

Вследствие монтажа подшипника в гнездах овальной или другой (не круглой) формы происходит предварительная резко неравномерная нагрузка тел качения.

Во всех случаях метод установки подшипников зависит от их типа и размера. Очень важно, чтобы кольца сепаратора или тела качения не подвергались прямым ударам. Основным правилом при монтаже подшипника является недопустимость передачи усилия запрессовки через тела качения. При монтаже необходимо обеспечить точность положения колец подшипников относительно оси вращения. Перекос колец является одной из причин первоначального повреждения подшипников и концентрации контактных напряжений.

Эксплуатационный перекос колец не должен превышать 0,7 максимального значения конструктивно допускаемого угла взаимного перекоса колец при нормальных условиях эксплуатации. Если натяг при посадке не слишком велик, небольшие подшипники можно установить легким ударами молотка по втулке, установленной на передний торец кольца подшипника. Удары следует равномерно распределять по кругу, чтобы подшипник не перекосялся.

Однако механический способ монтажа подшипника не дает точного распределения усилия на пресованное кольцо, особенно, когда монтаж осуществляется механическим ударом. Непараллельность терцев втулок, используемых при монтаже, и их несоосность относительно оси вала не дают точного распределения усилия на пресованное кольцо. Все это приводит к перекосу колец подшипника одного относительно другого (рис.1).

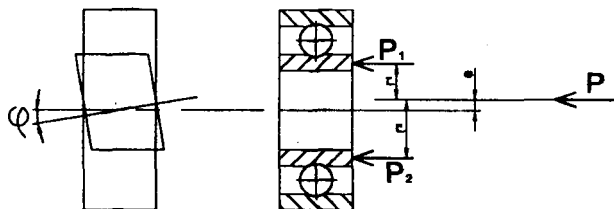


Рис. 1

Перекос кольца подшипника относительно корпуса или вала влияет на характер распределения нагрузки[5].

На рис.2 показана зона нагруженности: а) перекос внутреннего кольца относительно корпуса. в) перекос наружного кольца относительно вала.

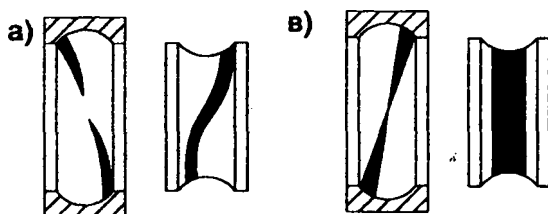


Рис. 2.

Чтобы избежать повреждений во время установки подшипников с натягом, можно использовать индукционный нагреватель, который позволяет быстро и равномерно

но нагреть кольцо подшипника и с небольшим усилием посадить его в корпус или на вал [6].

ЛИТЕРАТУРА

1. Каталог подшипников: каталог 004.Р ООО “Biring”, 1998 – 302 с. 2. Дальский А.М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин – М.: Машиностроение, 1975. – 223 с. 3. Зайцев А.М. Авиационные подшипники качения. – М, 1963. – 339 с. 4. Комиссар А.Г. Опоры качения в тяжелых режимах эксплуатации – М, 1987. – 384с. 5. Jean Dhers . Le diagnostic du roulement. I.S.O import standard office-1985. – 48 p. 6. Георг Фишер. Легкий и быстрый монтаж подшипников качения с индуктивным нагревательным аппаратом// Подшипники. – 1987. – 8–16 апреля. – С. 89.

УДК 621.88.084

Д. Эльмессауди

ВЛИЯНИЕ НЕКОТОРЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ ФАКТОРОВ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗКИ МЕЖДУ ТЕЛАМИ КАЧЕНИЯ ПОДШИПНИКОВ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Точность геометрических размеров деталей подшипников оказывает значительное влияние на долговечность их работы. Разноразмерность тел качения по диаметру оказывает определенное влияние на изменение распределения радиальной нагрузки в зависимости от расположения ролика или шарика, имеющих больший по сравнению с другими телами качения размер. При вращении подшипника ролик или шарик с большим диаметром непрерывно вызывает перераспределение нагрузки между другими телами качения от минимальных до максимальных значений. При этом процесс качения роликов или шариков сопровождается дополнительным скольжением. Повышенное скольжение тел качения ускоряет процесс их износа, а также дорожек качения, что приводит к уменьшению срока службы подшипника в целом.

Рассмотрим, как влияют конструкционные факторы на распределение нагрузки между телами качения при неподвижном подшипнике, т. е. в статике.

Основным расчетным параметром, определяющим работоспособность подшипников качения по критериям статической прочности и усталостной выносливости рабочих поверхностей, является контактное напряжение, возникающее на площадках контакта наиболее нагруженных шариков или роликов с беговыми дорожками колец [1].

При изучении данного вопроса принимаем некоторые допущения: в подшипнике отсутствует радиальный зазор, учитываем только контактные деформации, а изгиб колец подшипника во внимание не принимаем. Рассмотрение данного вопроса касается подшипников с первоначальным точечным контактом рабочей поверхности колец и тел качения [2].

Учитывая разноразмерность тел качения можно предположить, что контакт между телами качения и дорожками неодинаков, т. е. влияют отклонения геометрических параметров тел качения, неравномерность распределения смазочного материала между ними и нахождения в зоне контакта твердых частиц, которые попадают в подшипник (когда он недостаточно защищён) или они являются продуктами износа.

Поэтому условия равновесия внутреннего кольца, описываемое уравнением

$$Q = P_0 + 2 P_1 \cos \alpha + 2 P_2 \cos 2\alpha + \dots + 2 P_n \cos n\alpha,$$

принимает следующий вид:

$$Q = P_0 + P_1 \cos \alpha + P'_1 \cos \alpha + P_2 \cos 2\alpha + P'_2 \cos 2\alpha \dots + P_n \cos n\alpha + P'_n \cos n\alpha - R \sin \varphi,$$

где: $P'_1 = q_1 P_1$; $P'_2 = q_2 P_2$; ... $P'_n = q_n P_n$;

$$Q = P_0 + P_1 \cos \alpha + q_1 P_1 \cos \alpha + P_2 \cos 2\alpha + q_2 P_2 \cos 2\alpha \dots + P_n \cos n\alpha + q_n P_n \cos n\alpha - R \sin \varphi;$$

$$Q = P_0 + (q_1 + 1) P_1 \cos \alpha + (q_2 + 1) P_2 \cos 2\alpha \dots + (q_n + 1) P_n \cos n\alpha - R \sin \varphi.$$

В этих уравнениях:

где: P_0 – наибольшая нагрузка, которую несет шарик или ролик, расположенный на линии действия усилия Q ; R – реакция со стороны наружной обоймы против ролика или шарика наибольшего диаметра; n – половина числа тел качения в нагруженной зоне. $q_1 \dots q_n$ – коэффициент неравномерности распределения нагрузки между телами качения; $0 < q_i \leq 1$ (рис. 1)

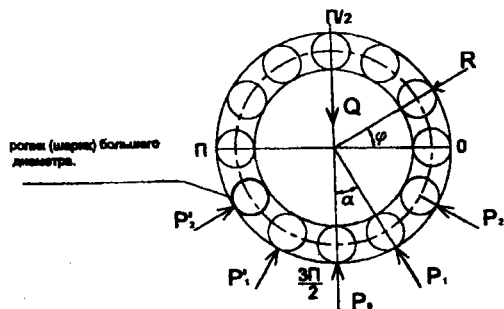


Рис. 1. Распределение нагрузки между телами качения

Распределение внешней нагрузки между роликами можно определить по величине упругой деформации контактирующих поверхностей роликов (шариков) и дорожек качения колец подшипника. Поэтому на величину R оказывает влияние деформация элемента качения и обоих колец в местах их соприкосновения в радиальном направлении.

Особенно заметно влияние разности диаметральных размеров Δdw на значение силы R в случаях, когда эта разность относится к шарикам (роликам) противоположно расположенным. Если Δdw увеличивается, R возрастает.

В зависимости от положения ролика большего диаметра рассмотрим возможное увеличение нагрузки.

При $\varphi = 0$, $R \sin \varphi = 0$ то на подшипник действует только сила Q ;

$\varphi \in]0, \pi/2[$ то на подшипник действует только сила $Q + R \sin \varphi$;

$\varphi = \pi/2$ — $Q + R$;

$\varphi = \pi$ — Q ;

$\varphi \in]\pi/2, \pi[$ — $Q + R \sin \varphi$;

$\varphi \in]\pi, 3\pi/2[$ — $Q - R \sin \varphi$;

$\varphi = 3\pi/2$ — $Q - R$;

$\varphi \in]3\pi/2, 2\pi[$ — $Q - R \sin \varphi$;

Из выше можно сделать вывод что, при $\varphi = \pi/2$ на подшипник кроме радиальной силы Q действует еще сила R . В данном положении сила, действующая на подшипник, достигает максимума т.е. $Q + R$; при $\varphi = 3\pi/2$ сила, действующая на подшипник, будет минимальная т.е. $Q - R$ (рис.2).

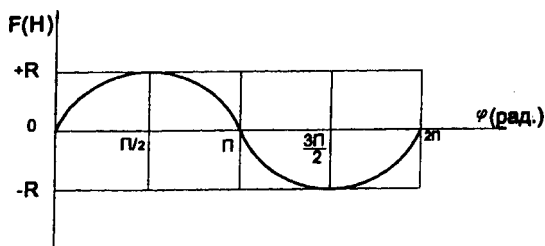


Рис. 2. Распределение нагрузки между телами качения в зависимости от положение ролика (шарика) большего диаметра

Анализ изменения нагрузки, действующей на тела качения, при имеющейся их разноразмерности, показывает, что при проектировании, изготовлении и сборке подшипников необходимо учитывать разноразмерность тел качения, которая не должна превышать допустимое значение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриев В.А. Детали машин. – Л., 1970. – 792 с. 2. Кошель В.М. Подшипники качения – Мн., 1993 – 255 с.

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ УПРУГИХ СВЯЗЕЙ РЕССОРНОГО ПОДВЕШИВАНИЯ ТЕЛЕЖЕК ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ С УЧЕТОМ ДВУХ РЕЖИМОВ СКОЛЬЖЕНИЯ КОЛЕС ПО РЕЛЬСАМ

*Белорусский государственный университет транспорта
Гомель, Беларусь*

В процессе движения железнодорожных экипажей по рельсовому пути изменяются вертикальные и боковые силы, действующие на рессорные комплекты их ходовых частей. Эти изменения обусловлены неровностями пути, нестабильностью состояния контактирующих поверхностей, колебаниями обрессоренных масс, параметрами рессорного подвешивания тележек и т.д.

Кроме этого на боковые колебания вагона существенное влияние оказывают величины касательных реакций T_p , возникающих между i -м колесом и рельсом в горизонтальной плоскости, которые в режиме упругого скольжения зависят от коэффициента псевдоскольжения γ , определяемого по формуле [1]:

$$\gamma = K \sqrt{Nr} \quad (1)$$

где K – коэффициент, учитывающий физические свойства материалов колес и рельсов; N – вертикальная нагрузка от колеса на рельс; r – радиус круга катания колеса.

В режиме упругого скольжения сохраняется прямо пропорциональная зависимость между касательными реакциями T_p , возникающими между каждым i -м колесом и рельсом от относительной скорости упругого скольжения ε .

Однако на практике линейная теория упругого скольжения не всегда выполняется, а взаимодействие колес с рельсами происходит в режимах как упругого, так и неупругого скольжения, которые существенно отличаются по физическому смыслу. Режим неупругого скольжения начинается при достижении величиной T_{max} значения, равного силе сцепления между колесом и рельсом

$$T_{max} = N f \quad (2)$$

где f – коэффициент сцепления между колесом и рельсом.

В данной работе ставится задача уточнения рациональных параметров упругих связей рессорного подвешивания тележки вагона в вертикальной и горизонтальной плоскостях с учетом двух режимов скольжения колес по рельсам.

Для этого исследуются пространственные колебания грузового четырехосного вагона на тележках с жесткой рамой движущегося по пути с детерминированными вертикальными и горизонтальными неровностями с учетом режимов упругого и не-

упругого скольжения колеса по рельсу. Составлена система дифференциальных уравнений 18 порядка, учитывающая основные закономерности пути и подвижного состава. Эта система имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned}
 m\ddot{z} + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 - mg &= 0; \\
 I_y\ddot{\Phi} + (P_1 + P_2 - P_3 - P_4)\frac{L}{2} &= 0; \\
 I_z\ddot{\Psi} + (Q_1 - Q_2)\frac{L}{2} + M_{T1}\text{sign}(\dot{\Psi} - \dot{\phi}_1) + M_{T2}\text{sign}(\dot{\Psi} - \dot{\phi}_2) &= 0; \\
 m\ddot{y} + Q_1 + Q_2 &= 0; \\
 I_x\ddot{\Theta} + mh\ddot{y} + (-P_1 + P_2 - P_3 + P_4)\frac{b}{2} &= 0; \\
 m_T\ddot{y}_1 - Q_1 - (T_{y1} + T_{y2} + T_{y3} + T_{y4}) &= 0; \\
 m_T\ddot{y}_2 - Q_2 - (T_{y5} + T_{y6} + T_{y7} + T_{y8}) &= 0; \\
 I_T\ddot{\phi}_1 + (T_{y1} + T_{y2} - T_{y3} - T_{y4})\frac{l}{2} - (T_{x1} - T_{x2} + T_{x3} - T_{x4})\frac{s}{2} + \\
 + M_{T1}\text{sign}(\dot{\phi}_1 - \dot{\Psi}) &= 0; \\
 I_T\ddot{\phi}_2 - (T_{y5} + T_{y6} - T_{y7} - T_{y8})\frac{l}{2} - (T_{x5} - T_{x6} + T_{x7} - T_{x8})\frac{s}{2} + \\
 + M_{T2}\text{sign}(\dot{\phi}_2 - \dot{\Psi}) &= 0.
 \end{aligned} \right\}$$

В уравнениях системы (3) приняты следующие обозначения:

y, z – ордината и аппликата точки пересечения вертикальной оси симметрии кузова с плоскостью его опоры на пятник тележки; Φ, Ψ, Q – углы поворота кузова вокруг поперечной OY , вертикальной OZ и продольной OX осей соответственно; y_1, y_2 – боковой относ центров тяжести первой и второй тележек соответственно; j_1, j_2 – угол поворота первой и второй тележек соответственно относительно вертикальной оси; m, m_T – масса подрессоренных элементов вагона и неподдресоренных частей тележки соответственно; I_y, I_z, I_x – моменты инерции подрессоренных элементов вагона относительно осей OY и OZ и момент инерции кузова относительно оси OX , проходящей на уровне пятников вагона; I_T – момент инерции тележки относительно центральной вертикальной оси; b – расстояние между серединами рессорных комплектов тележки; L, l – база вагона и тележки соответственно; s – расстояние между средними радиусами кругов катания колесной пары; h – высота центра тяжести кузова над пятником; P_i – вертикальные реакции каждого рессорного комплекта тележек вагонов ($i = 1, \dots, 4$); Q_1, Q_2 – горизонтальные боковые реакции рессорных комплектов первой и второй тележек соответственно; T_{xy}, T_{yj} – продольные и поперечные составляющие касательных реакций между каждым колесом вагона и рельсом соответственно ($j = 1, \dots, 8$); $M_{T1},$

M_{T2} – момент сил сухого трения в пятниковом узле первой и второй тележек соответственно; g – ускорение свободного падения.

Режение полученной системы осуществлялось на ЭВМ методом численного интегрирования системы дифференциальных уравнений с использованием программы “MathCAD”. Определялись вертикальные и горизонтальные силы, действующие на рессорные комплекты тележек, в зависимости от коэффициентов вертикальной и горизонтальной жесткостей рессорных комплектов тележки. В соответствии с рекомендациями [2] при выборе рациональных значений параметров рессорного подвешивания принимаются минимальные значения вертикальных P_{max} и горизонтальных Q_{max} максимальных сил, возникающих в рессорном подвешивании тележки, то есть

$$P_{max} \longrightarrow min; Q_{max} \longrightarrow min$$

Расчеты по определению максимальных значений сил P_{max} и Q_{max} выполнялись путем численного интегрирования составленных систем дифференциальных уравнений.

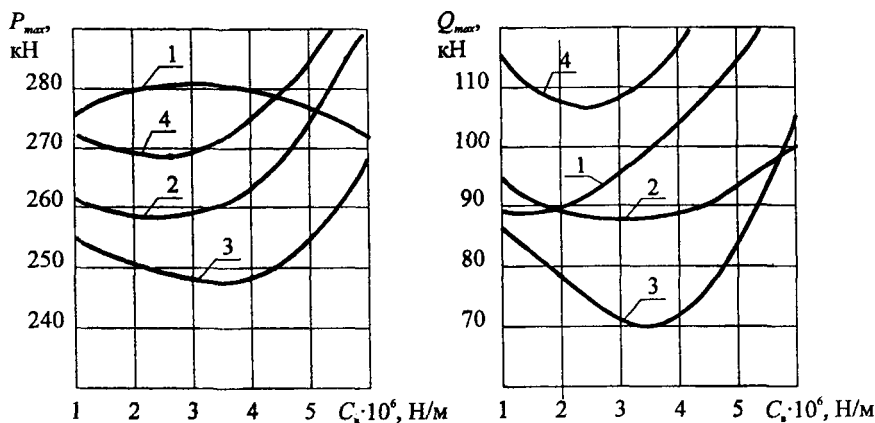
Значения C_r и C_a варьировались в следующих пределах:

$$C_r = 1 \cdot 10^6 \dots 6 \cdot 10^6 \text{ Н/м};$$

$$C_a = 2 \cdot 10^6 \dots 6 \cdot 10^6 \text{ Н/м}.$$

По результатам расчетов построены графики зависимостей максимальных вертикальных P_{max} и горизонтальных Q_{max} сил от величины вертикальной жесткости C_r рессорного подвешивания тележки при различных значениях его горизонтальной жесткости C_a , которые приведены на рис. 1.

а) режим упругого скольжения колес по рельсу



б) чередование режимов упругого и неупругого скольжения

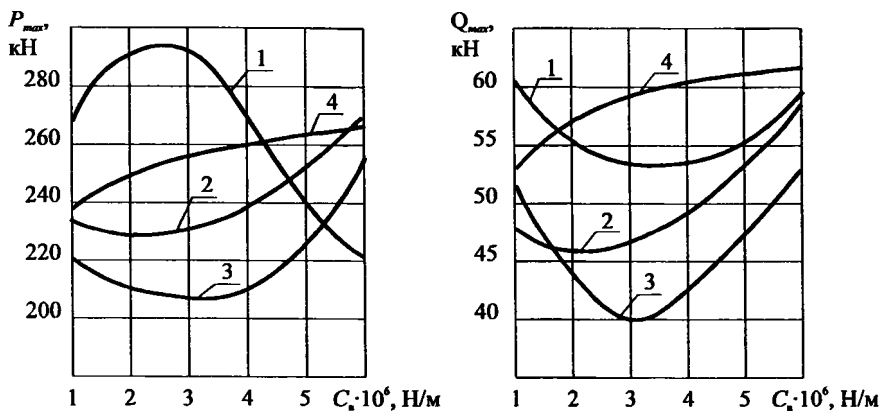


Рис. 1. Зависимость максимальных вертикальных P_{max} и боковых Q_{max} сил от параметров пружин рессорного подвешивания тележки: 1 – $C_v = 2 \cdot 10^6$ Н/м; 2 – $C_v = 3 \cdot 10^6$ Н/м; 3 – $C_v = 4 \cdot 10^6$ Н/м; $C_r = 5 \cdot 10^6$ Н/м.

Из графиков (см. рис. 1, а) видно, что при упругом скольжении колеса по рельсу минимальное значение вертикальных сил P_{max} соответствует $C_v = (3,5 \dots 4) \cdot 10^6$ Н/м и $C_r = 3,5 \cdot 10^6$ Н/м. Минимальное значение горизонтальных сил Q_{max} соответствует коэффициентам жесткости $C_v = (3 \dots 4) \cdot 10^6$ Н/м и $C_r = 3,5 \cdot 10^6$ Н/м.

При чередовании режимов упругого и неупругого скольжения (см. рис. 1, б) минимальное значение сил P_{max} и Q_{max} возникают при $C_v = 3,2 \cdot 10^6$ Н/м и $C_r = 3,3 \cdot 10^6$ Н/м.

Таким образом, из приведенных на рисунке графиков рациональные значения вертикальных и горизонтальных коэффициентов жесткости рессорных комплектов целесообразно выбирать в следующих пределах: $C_v = (3,8 \dots 4) \cdot 10^6$ Н/м; $C_r = 3,5 \cdot 10^6$ Н/м.

Как показывают проведенные теоретические исследования, учет двух режимов скольжения колес по рельсам не оказывает существенного влияния на значение параметров упругих связей тележек вагона. Однако в ходе расчетов выявлено, что в результате учета неупругого скольжения между колесом и рельсом значения вертикальных сил P_{max} оказались меньше на 15% чем при упругом скольжении, а горизонтальные Q_{max} – на 25%.

Таким образом, для повышения точности расчетов при динамических исследованиях боковых колебаний подвижного состава необходимо учитывать чередование режимов упругого и неупругого скольжения колес по рельсам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ковалев Н.А. Боковые колебания подвижного состава. – М.: Трансжелдориздат, 1957. – 247 с.
2. Вершинский С.В., Данилов В.Н., Челноков И.И. Динамика вагонов. – М.: Транспорт, 1978. – 252 с.

УДК 621.793

В.Э.Завистовский

ФОРМИРОВАНИЕ ЗОНЫ СПЛАВЛЕНИЯ И ХАРАКТЕР РАЗРУШЕНИЯ ПОКРЫТИЯ ИЗ СПЛАВА ПГ-СР4-ОМ НА СТАЛИ 20

Полоцкий государственный университет

Новополоцк, Бсларусь

Любой металлический многокомпонентный сплав имеет сложную структуру, формирующуюся из многочисленных групп однотипных или разнотипных атомов. Свойства сплава определяются его структурой, которая зависит от химического состава сплава, технологии его получения и последующей обработки посредством механических, термических, электрохимических и других методов воздействия. Зона сплавления формируется в условиях значительных температурных и концентрационных градиентов и представляет собой комплекс толщиной до 0,5 мм переменного химического и фазового состава.

Исследовались особенности формирования структуры зоны сплавления при наплавке самофлюсующегося никелевого сплава ПГ-СР4-ОМ на малоуглеродистую Сталь 20 и изучалась прочность сцепления наплавленного слоя и основного металла в зависимости от температурно-временных режимов наплавки. В качестве материала для исследования был взят сплав ПГ-СР4-ОМ в виде гранулированного порошка, производства Торезского завода наплавочных твердых сплавов, фракции меньше 200 мкм следующего химического состава: (мас. %) С – 0,8; Cr – 16; В – 3; Si – 4; Ni – основа. Наплавку проводили в высокотемпературной печи СУОЛ-0,25.1/12-М. За оптимальную продолжительность нагрева принимали время до полного расплавления порошка, о чем судили по его “проседанию” на наплавляемой поверхности. Образцы наплавливали с недогревом и перегревом. Скорость нагрева составляла 18 град/с; скорость охлаждения на воздухе – 3 град/с; температура в диапазоне 1000–1200 °С; время изотермической выдержки $t = 0-600$ с.

Для определения прочности сцепления самофлюсующихся никелевых сплавов со сталью по методике [1] были изготовлены образцы двух типоразмеров. Фрактографический анализ изломов проводили при темнопольном освещении и увеличении до 800 крат по принятой в металловедении методике [2]. Металлографическое исследование проводили на микроскопе ММР-2М при увеличениях от 70 до 800 крат. Фотосъемки

производили на репродукционные контрастные пластины. Печать контактная. Фотообработка стандартная.

Металлографическим исследованием установлено, что при наплавке самофлюсующимися никелевыми сплавами линия сплавления выявляется четко. Со стороны основного металла к линии сплавления непосредственно примыкает прослойка перлита, ширина и зернистость которой зависят от режима наплавки. При недогреве она практически отсутствует, при оптимальном режиме составляет порядка 25 мкм, при перегреве достигает 150 мкм и имеет типичную видманштеттовую структуру (балл В2). Со стороны наплавки по линии сплавления образуется прослойка толщиной до 12 мкм твердого никелевого раствора. Покрытие из сплава ПГ-СР4-ОМ, наплавленное по оптимальному режиму, имеет заэвтектическую микроструктуру, представленную эвтектикой боридов никеля и твердого никелевого раствора с мелкодисперсными карбидами и карбоборидами хрома [3].

Повышение температуры либо увеличение времени наплавки приводит к уменьшению содержания карбидной фазы и формированию доэвтектической структуры с характерными столбчатыми дендритами твердого никелевого раствора и колониями боридной эвтектики между его ветвями. Соотношение доэвтектической (HRC, 32–40) и заэвтектической (HRC, 50–55) зон по высоте покрытия при этом меняется и может достигать 1:1 при сильном перегреве.

Результаты стереометрического анализа показали, что размер, количество и распределение микропор в покрытии существенно изменяются в зависимости от режима наплавки. Покрытия, наплавленные при температуре 1000–1050 °С и малых выдержках, имеют пористость до 10 %. Поры мелкие, не более 0,2 мм, равномерно распределены по толщине наплавленного слоя. При температурах 1050 °С и выше и времени более одной минуты формируется практически беспористое покрытие. Редкие поры размером 0,3–0,6 мм встречаются вблизи поверхности. Трещины и шлаковые включения не обнаружены [4].

Прочность сцепления и морфология излома весьма чувствительны к режиму наплавки самофлюсующимися сплавами [5]. На рис. 1 показаны типичные виды разрушения при отрыве покрытия в различных зонах сцепления. При относительно низких температурах наплавки и малых выдержках прочность сцепления составляет 40–150 МПа. Излом при этом мелкозернистый, на многих участках поверхности излома имеются темно-серые обнажения шлаковых включений. Разрушение происходит, как правило, по металлу наплавки на расстоянии 0,05–0,2 мм от линии сплавления.

Максимальное значение прочности сцепления ($\sigma_{\text{сц}} = 500 \pm 20$ МПа) имели образцы, наплавленные при $T = 1150$ °С, $t = 150$ с. Излом в этом случае хрупкий. При небольших увеличениях просматриваются фасетки с характерным лепесткообразным узором. Трещины развиваются только в наплавленном металле в основном по границе между эвтектической и заэвтектической зонами. При перегреве прочность сцепления

несколько снижается и составляет 300–400 МПа. Траектория излома при этом контролируется γ -фазой и трещины развиваются по прослойке твердого никелевого раствора. Уменьшение содержания карбидной и боридной фаз в зоне сплавления способствует пластической деформации микрообъемов перед разрушением. На это указывает появление гладких поверхностей разрушения с крупнолестчатыми фасетками. На некоторых образцах, наплавленных по режиму сильного перегрева, наблюдается межзёрненный отрыв по перлитной прослойке ($\sigma_{\text{сн}} = 210 \pm 15$ МПа). Математический анализ результатов испытаний не выявил устойчивых корреляционных связей между твердостью наплавленного металла и прочностью сцепления. Только для образцов наплавленных по оптимальному режиму и недогреву ($T \leq 1100^\circ\text{C}$, t до 180 с), существует корреляция между этими величинами, которая удовлетворительно описывается линейной регрессией вида $\sigma = 1,32 \cdot \text{HRC} - 35$ с коэффициентом корреляции $r = 0,85$.

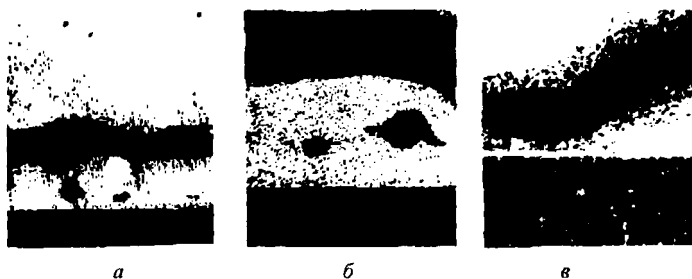


Рис. 1. Характер разрушения образцов при отрыве покрытия ($\times 100$):
а – разрушение по границе между эвтектической и доэвтектической зонами;
б – разрушение по γ -слою; *в* – смешанное разрушение

Проанализировав полученные экспериментальные результаты и сравнив их с имеющимися литературными данными, можно сделать вывод, что основным процессом, определяющим структурообразование зоны сплавления, является диффузия атомов углерода и бора из никелевого сплава ПГ-СР4-ОМ и встречная диффузия атомов железа из основного металла.

При наплавке диффузионные процессы по границам зерен идут значительно активнее, чем по телу зерна. Связано это с большой плотностью различного рода несовершенств кристаллического строения по границам зерен. Так как процесс диффундирования связан с энергетическими характеристиками материала, большое влияние на процесс оказывают температура и строение кристаллической решетки. Для реактивной диффузии характерно образование химических соединений и эвтектоидной составляющей. В материалах, соединенных путем сплавления, эти зоны располагаются не обязательно в плоскости контакта. Их сосредоточение возможно в области с соответствующей концентрацией компонентов, в зависимости от относительной скорости диффузии при данной температуре.

Для металлов, соединенных сплавлением, характерен еще один вид диффузионного процесса. Его механизм связан с разницей в термодинамической активности элементов. Механизм протекания этого процесса следующий: если у атомов легирующего элемента силы связи с атомами углерода меньше, чем у атомов железа, то атомы углерода оттесняются от атомов такого элемента и стремятся попасть в область влияния атомов железа. Значит, в результате этого процесса легирующий элемент увеличивает термодинамическую активность атомов углерода к перемещению их в те области, где их концентрация меньше. К элементам, увеличивающим термодинамическую активность углерода в железе, относятся кремний и никель.

В настоящее время отсутствуют расчетные формулы для оценки диффузионных процессов при наплавке твердых самофлюсующихся сплавов на малоуглеродистую сталь. Однако можно считать, что размер диффузионной зоны определяется следующими факторами: природой взаимодействующих металлов; их концентрацией; температурой наплавки; продолжительностью взаимодействия. При разработке технологии нанесения износостойкого покрытия важно обеспечить высокие физические и механические характеристики зоны сплавления основного металла и покрытия, так как именно они зачастую определяют работоспособность восстановленных и упрочненных деталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ткачев В.Н., Фиштейн Б.М. Индукционная наплавка твердых сплавов. – М.: Машиностроение, 1970. – 184 с. 2. Богомолова Н.А. Практическая металлография. – М.: Высшая школа, 1978. – 360 с. 3. Комплексное исследование природы разрушения материалов с покрытиями: Отчет о НИР (заключ.) / Полоцкий государственный университет (ПГУ): Руководитель В.Э. Завистовский. – ГБ 13-95. – Новополоцк, 1996. – 97 с. (с приложением) 4. Завистовский В.Э. Механика разрушения и прочность материалов с покрытиями. – Новополоцк: ПГУ, 1999. – 144 с. 5. Завистовский В.Э., Холодильников О.В., Богданович П.Н. Физика отказов механических систем. – Мн.: Технопринт, 1999. – 212 с.

УДК 621.81.408

С.А. Иващенко

РАСЧЕТ ВЕЛИЧИНЫ ДЕФОРМАЦИИ ПЛОСКИХ ДЕТАЛЕЙ С ПОКРЫТИЕМ ИЗ САМОФЛЮСУЮЩЕГО СПЛАВА

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Получение, а в некоторых случаях и эксплуатация износостойких покрытий, неизбежно связаны с возникновением в них остаточных термических напряжений, которые оказывают решающее влияние на прочность покрытия и его сцепление с основой.

При недостаточном сцеплении может произойти отслаивание покрытия; если же прочность сцепления больше отрывного усилия, например, при напылении покрытий с последующим оплавлением, то возникающие напряжения могут привести к деформации детали или к повреждению (растрескиванию) покрытия [1]. Растрескивание и отслаивание покрытия ухудшают его качество и в ряде случаев приводят к браку. Деформация детали приводит к потере геометрической точности. Если потерю точности цилиндрических деталей после получения покрытия можно компенсировать, например, изменением размера сопрягаемой детали, то влияние деформации при упрочнении плоской детали можно устранить только механической обработкой слоя покрытия, равного по величине прогибу детали.

Поэтому при проектировании технологических процессов нанесения упрочняющих покрытий, необходимо прогнозировать коробление плоскостных деталей.

Ранее [2] было установлено, что деформация деталей при нанесении покрытий из самофлюсующихся сплавов зависит от следующих основных факторов:

- температуры процесса;
- усадки покрытия при оплавлении;
- соотношения коэффициентов термического расширения материалов основы и покрытия;
- соотношения геометрических параметров основы и покрытия;
- способа предварительной обработки основы под напыление.

Цель настоящей работы – установить количественное влияние отдельных факторов и получить зависимости для расчета величины деформации плоской детали с покрытием из самофлюсующегося сплава.

На первом этапе работы определялся характер влияния отдельных факторов на величину коробления плоских образцов с покрытием.

На рис. 1 показана зависимость величины коробления плоских образцов из стали 12Х18Н10Т с покрытием из самофлюсующегося сплава ПГ-СРЗ от толщины покрытия и подложки. Соотношение длины и ширины образцов в соответствии с рекомендациями [3] принято равным 10:1.

Из результатов, представленных на графике, следует, что с увеличением толщины основы деформация образцов с различной толщиной покрытия уменьшается; при толщине основы порядка 10 мм деформация образцов практически одинакова и составляет менее 0,2 мм. При этом в покрытии возникают остаточные напряжения сжатия, о чем свидетельствует положительный (покрытием вверх) прогиб образцов. При одинаковой толщине основы более толстое покрытие приводит к большей деформации образцов. Это объясняется тем, что при одной и той же жесткости основы в покрытии большей толщины возникают большие по величине напряжения. Деформация образцов с толщиной покрытия 0,5 и 1 мм практически одинакова и значительно меньше, чем у образцов с толщиной покрытия 2 и 3 мм. Поэтому при упрочнении плоских

деталей из аустенитной стали нецелесообразно использование покрытий толщиной более 1 мм, так как при этом значительно увеличивается деформация деталей.

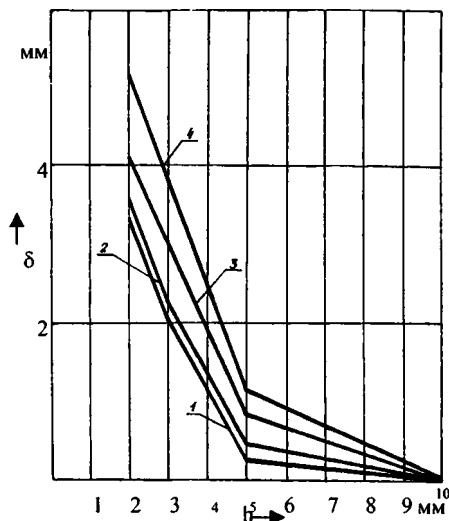


Рис. 1. Зависимость величины деформации плоских образцов из стали 12Х18Н10Т с покрытием из самофлюсующегося сплава ПГ-СР3 от толщины основы при различных толщинах покрытия: 1-4-толщина покрытия 0, 0,5, 1, 2, 3 мм, соответственно.

На рис.2 показана зависимость величины деформации свободнзакрепленных образцов из стали 12Х18Н10Т от изменения толщины основы на этапах получения покрытия (дробеструйная обработка, нанесение покрытий, оплавление) при разных соотношениях коэффициентов термического расширения основы и покрытия. Из анализа результатов исследований следует, что нанесение и оплавление покрытия ПГ-СР3 последовательно увеличивают величину деформации образцов (зависимости 2 и 3). Это значит, что напряжения, вызванные дробеструйной обработкой, осаждением покрытий и оплавлением, суммируются. Анализ полученных зависимостей показывает, что при толщине образцов до 3...4 мм основное влияние на коробление оказывает дробеструйная обработка. С увеличением толщины основы влияние дробеструйной обработки ослабевает. При напылении на основу из стали 12Х18Н10Т бронзового покрытия (зависимость 4, рис.2) уменьшается прогиб образцов, а при толщине основы свыше 4...5 мм изменяется и направление прогиба. Это значит, что изменился знак напряжений в покрытии. Таким образом, на величину коробления плоского образца влияют все этапы получения покрытия: и дробеструйная обработка, и осаждение, и оплавление.

Определенный интерес представляет рассмотрение количественного соотношения факторов, влияющих на коробление плоских деталей с покрытием из самофлюсующегося сплава. В результате экспериментальных исследований установлено, что влияние операций технологического процесса формирования покрытия на деформацию образцов толщиной 3...5 мм следующее (при общей величине деформации 100%) : дробеструйная обработка около 60%, напыление покрытия – около 20%, оплавление – около 20%. При большей толщине основы дробеструйная обработка и напыление практически не приводят к деформации образца, однако нельзя считать, что эти операции не влияют на величину конечной деформации образцов. Их влияние может сказываться в совокупности с другими факторами.

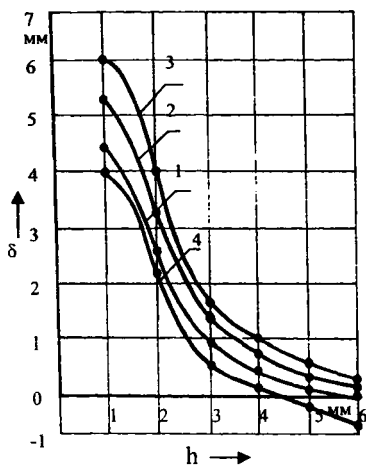


Рис.2 Зависимость величины деформации образцов из стали 12Х17Н10Т от толщины основы: 1- деформация после дробеструйной обработки; 2 и 3 – деформация после плазменного напыления и оплавления самофлюсующегося сплава ПРГ-СРЗ, соответственно; 4 – деформация после плазменного напыления бронзы БРОФ10-1

Деформация плоских деталей из аустенитной стали с покрытием из самофлюсующегося сплава, возникающая в результате температурных напряжений, определяется из формулы Тимошенко для биметаллической полосы, которая после соответствующих преобразований приведена к зависимости [4]

$$\delta = \frac{3(\alpha_2 - \alpha_1) (1 + m^2) TL^2}{4h \left[3 (1 + m^2) + \left(m^2 + \frac{1}{mn} \right) (1 + \mu_1 + mn + \mu_2 m n) \right]} \quad (1)$$

где α_1 и α_2 – коэффициенты термического расширения материалов основы и покрытия соответственно; T – температура детали; L – длина плоской детали; h – толщина детали с покрытием ($h = h_1 + h_2$); μ_1 и μ_2 – коэффициенты Пуассона материала основы и покрытия, соответственно; $m = h_1/h_2$ – отношение толщин материалов основы и покрытия соответственно ($h_2 = 1$ мм); $n = E_1/E_2$ – отношение модулей упругости материалов основы и покрытия соответственно.

Для нас представляет интерес зависимость величины деформации δ_T образца с покрытием от толщины h_1 и длины L основы при заданной толщине покрытия h_2 . Анализ аналитической зависимости (1) с этой точки зрения показывает, что она с высокой степенью точности аппроксимируется:

$$\delta_T = \frac{AL^2}{h_1^2 + Bh_1 + C} \quad (2)$$

где A, B, C – постоянные, зависящие от температуры образца и физико-механических свойств материалов основы и покрытия.

Например, деформация плоского образца из стали 12Х18Н10Т с покрытием из самофлюсующегося сплава ПГ-СРЗ толщиной 1 мм определяется выражением:

$$\delta_T = \frac{1,326 \cdot 10^{-3} L^2}{h_1^2 + 0,166h_1 + 7,2} \quad (3)$$

При этом значения деформации δ_T , рассчитанные по (3), отличаются не более чем на 3% от значений, рассчитанных по (1) (рис.3 (зависимость 1)). Проведенные экспериментальные исследования показали, что реальная деформация образцов с покрытием из самофлюсующегося сплава ПГ-СРЗ (рис. 3 – показана точками) существенно отличается от расчетной (рис. 3, зависимость 1). Это связано с тем, что источником деформации образцов с покрытием из самофлюсующегося сплава, кроме термических напряжений, являются также напряжения, вызванные усадкой материала покрытия, и напряжения, возникающие в результате предварительной (в данном исследовании дробеструйной) обработки изделия перед нанесением покрытия.

Как следует из рис. 2, напряжения, возникающие в материале изделия и покрытия при усадке, аналогичны термоупругим напряжениям, так что деформация должна определяться зависимостью, аналогичной выражению (2). Это позволяет предположить, что и суммарная деформация, возникающая в результате воздействия трех основных факторов (температура, усадка, наклеп), должна иметь такую же зависимость. Действительно, деформация образцов после оплавления покрытия, приведенная на рис. 3 (обозначена кружочками), с точностью лучше 10% подчиняется зависимости

$$\delta = \frac{2,7 \cdot 10^{-4} L^2}{h_1^2 - 4,7h_1 + 6} \quad (4)$$

Таким образом, зависимость (4) указывает на общий характер деформации плоской детали с нанесенным покрытием. Ее можно использовать для расчета величины коробления плоских деталей из аустенитной стали 12X18H10T (и аналогичных) с покрытием из самофлюсующегося сплава, поскольку приведенные численные значения коэффициентов А, В и С (формула 2) относятся к конкретному материалу основы и покрытия.

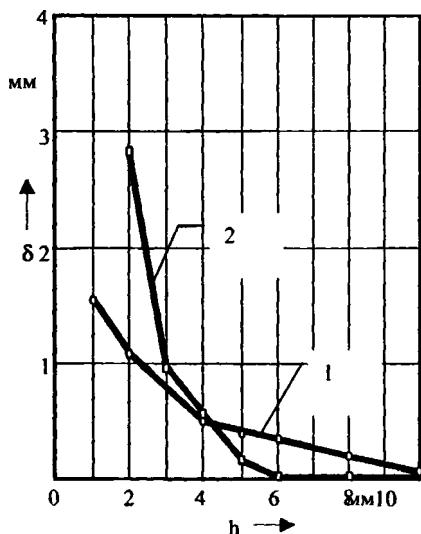


Рис. 3 Расчетные и экспериментальные зависимости величины деформации плоских образцов из аустенитной стали 12X18H10T (h -толщина) с покрытием из самофлюсующегося сплава ПГ-СРЗ толщиной 1 мм: 1 – Расчетные величины деформации образцов с покрытием по Г.И. Журавлеву [4]; 2 – Расчетные величины деформации образцов с покрытием по формуле (2) (кружочки – экспериментально полученные значения деформации)

ЛИТЕРАТУРА

1. Засун А. Техника напыления./пер.с японского. – М.: Машиностроение, 1975. – 288 с.
2. Иващенко С.А. Деформация плоских деталей при нанесении покрытий из самофлюсующихся сплавов / машиностроение. – Мн., 1984. Вып. 9.– С. 42–44.
3. Журавлев Г.И., Химия и технология термостойких неограических покрытий. – Л.: Зиния, 1975.– 200 с.
4. Журавлев Г.И., Кириш М.К. К методике определения термоупругих напряжений в покрытиях / Защитные высокотемпературные покрытия. – Л.: Наука, 1972. – С.152 – 155.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ОБРАЗЦОВ ИЗ СТАЛИ 12Х18Н10Т С УПРОЧНЯЮЩИМИ ПОКРЫТИЯМИ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Стали аустенитного класса обладают рядом уникальных свойств: высокая коррозионная стойкость, немагнитность, вакуумная плотность и др. Однако невысокая твердость этих материалов делает невозможным их использование для изготовления изделий, воспринимающих значительные удельные нагрузки. Ресурс деталей из аустенитных сталей может быть увеличен за счет упрочнения рабочих поверхностей нанесением износостойких покрытий.

Исследовалась износостойкость семи материалов:

- стали 12Х18Н10Т после закалки (эталон);
- стали 12Х18Н10Т, азотированной;
- стали 12Х18Н10Т, упрочненной сплавом ПГ-СР2 толщиной 1 мм;
- стали 12Х18Н10Т, упрочненной сплавом ПГ-СР3 толщиной 1 мм;
- стали 12Х18Н10Т, упрочненной сплавом ПГ-СР4 толщиной 1 мм;
- стали 12Х18Н10Т с покрытием Ti N толщиной 8 мкм;
- стали 12Х18Н10Т, упрочненной сплавом ПГ-СР3 толщиной 1 мм с покрытием Ti N толщиной 8 мкм.

Для определения относительной износостойкости исследуемых материалов использовалась специальная экспериментальная машина трения, которая обеспечивала близкий к нулю коэффициент взаимного перекрытия при испытании на изнашивание (по схеме диск-колодка [1]) исследуемых образцов.

Конструкция узла трения и качающейся самоустанавливающейся державки позволяла испытывать одновременно три пальчиковых образца и обеспечивала равномерное распределение усилия прижима образцов к контртелу. После установки державки в патроне на образцах создавали необходимое удельное давление при помощи набора грузов. Для испытания на изнашивание пальчиковые образцы размером 4х4х10 мм устанавливали в державке (рис.1) и фиксировали с помощью винтов и планок. Расстояние от базовой плоскости державки до рабочей поверхности трех образцов, обработанных в сборе, контролировали с помощью индикатора часового типа с ценой деления 0,01 мм. Чтобы высота образцов над базовой плоскостью была постоянной, их опорная поверхность подгонялась (притиралась) по месту, после чего образцы клеймились, промывались, сушились и взвешивались.

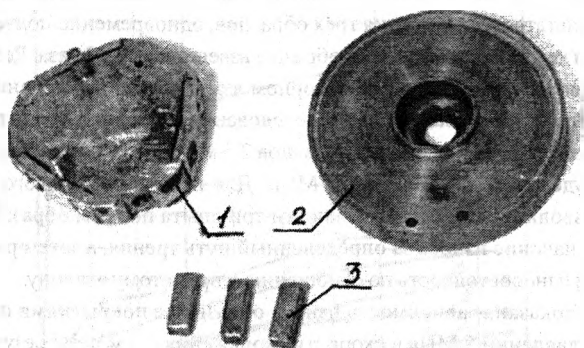


Рис. 1. Внешний вид державки, контртела и исследуемых образцов:

1 – державка; 2 – контртело; 3 – исследуемые образцы

Вырезка и подгонка образцов проводилась в условиях, не допускавших значительного нагрева образцов. Величина шероховатости R_a обработанной рабочей поверхности образцов составляла $2,5 \dots 1,25$ мкм. Рабочая поверхность трех пальчиковых образцов при исследовании износостойкости составляла порядка 48 мм^2 .

В качестве контртела использовались чугунные диски диаметром 60 мм и высотой 15...20 мм, изготовленные из серого чугуна марки СЧ 25 (ГОСТ 1412-85). Рабочие поверхности чугунных дисков (рис.2) подвергали механической обработке (точению), чтобы обеспечить шероховатость поверхности R_a не более 1,25 мкм.

Изнашивание поверхностей металлов в условиях трения скольжения происходит неравномерно и сопровождается интенсивным деформированием поверхности на значительную глубину [2]. Поэтому микрометрический метод не всегда позволяет измерить величину линейного износа с необходимой точностью, особенно при трении небольших образцов. Наиболее эффективным методом определения интенсивности изнашивания небольших образцов является весовой. С помощью этого метода определяли величину износа образцов при трении. Для повышения точности измерений образцы взвешивали на лабораторных аналитических весах.

В качестве критерия износа была принята относительная износостойкость ϵ :

$$\epsilon = \Delta P_{\text{э}} / \Delta P_{\text{упр}} \quad (1)$$

где $\Delta P_{\text{э}}$ – потеря массы эталона (сталь 12Х18Н10Т) в процессе изнашивания; $\Delta P_{\text{упр}}$ – потеря массы образца, упрочненного различными методами, в процессе изнашивания.

Общая продолжительность испытаний зависела от свойств исследуемых материалов и от величины износа. Периодичность взвешивания образцов в процессе испыта-

ния составляла 5; 15; 30; 60; 120 и 120 минут. Износ определялся как среднее арифметическое результатов взвешивания трех образцов, одновременно подвергавшихся испытанию. При каждой оценке износа образцы взвешивали 2...3 раза. Результат считался удовлетворительным, если при повторном взвешивании отклонение от предыдущего показания не превышало 0,1 мг. Исследование износостойкости производилось при постоянной скорости вращения образцов 2,5 м/с в условиях трения скольжения в масле и при удельном давлении 5–10 МПа. Для получения каждого результата на графике производилось в общей сложности три опыта по трем образцам. Определялось среднее значение износа за определенный путь трения, а затем рассчитывалась относительная износостойкость по отношению к принятому эталону.

На рис.2 показана зависимость износа образцов с покрытиями от пути трения при удельном давлении 5 МПа и скорости скольжения 2,5 м/с. Из результатов, представленных на рисунке видно, что наибольший износ имеют образцы из стали 12X18H10T, принятой за эталон. Наименьший износ – у образцов из стали 12X18H10T, упрочненных сплавом ПГ-СР4. Высокой износостойкостью обладают образцы из стали 12X18H10T с покрытием TiN , а также из стали 12X18H10T, упрочненной сплавами ПГ-СР3 и ПГ-СР2. Несколько меньшую износостойкость имеют азотированные образцы из стали 12X18H10T. Относительная износостойкость образцов из этих материалов представлена на рис.3 (соответствует пути трения порядка 5×10^3 м).

На рис. 4 показана зависимость износа образцов с покрытиями от пути трения при удельном давлении 10 МПа и скорости скольжения 2,5 м/с. Из результатов исследований, представленных на рисунке видно, что процесс изнашивания образцов из стали 12X18H10T после азотирования и с покрытием из нитрида титана сопровождается интенсивным износом поверхностей трения. Значительный износ наблюдается у образцов из стали 12X18H10T. упрочненных сплавом ПГ-СР4. Наименьший износ имеют образцы из стали 12X18H10T с покрытием TiN , упрочненные сплавом ПГ-СР3.

Анализ поверхностей трения исследуемых образцов показал, что поверхность трения образца из стали 12X18H10T после шлифования (без упрочнения) уже при удельном давлении 5 МПа имеет следы схватывания при трении; увеличение давления до 10 МПа вызывает заедание поверхностей трения. У образцов, подвергнутых азотированию, схватывание при трении наблюдается с увеличением удельного давления до 10 МПа. Покрытие из самофлюсующегося сплава в процессе трения изнашивается незначительно. Характер изнашивания сплава ПГ-СР4 как при давлении 5 МПа, так и при давлении 10 МПа существенно не изменяется. Износ образцов является, по-видимому, результатам усталостных разрушений при трении скольжения. Поверхности трения образцов имеют неглубокие следы износа, а вырывы и налипание частиц металла отсутствуют.

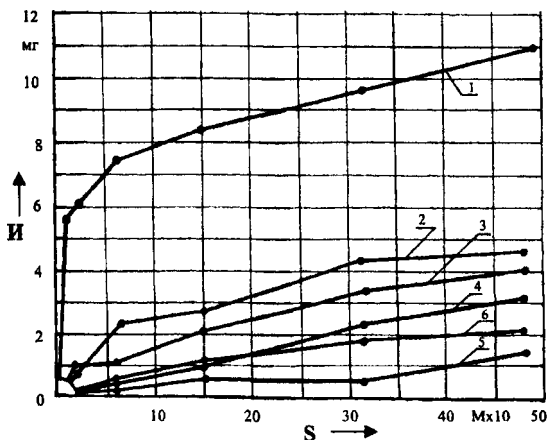


Рис. 2. Зависимость износа образцов из стали 12Х18Н10Т с упрочняющими покрытиями от пути трения (удельное давление 5 МПа, скорость скольжения 2,3 м/с): 1 - сталь 12Х18Н10Т неупрочненная (эталон); 2 - азотированная; 3,4,5 - соответственно с покрытиями из самофлюсующихся сплавов ПГ-СР2, ПГ-СР3, ПГ-СР4; 6 - с покрытием из нитрида титана

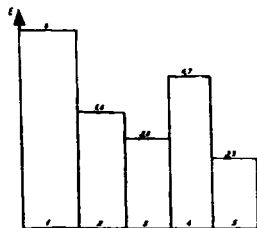


Рис. 3. Диаграммы относительной износостойкости образцов из стали 12Х18Н10Т (эталон) с упрочняющими покрытиями: 1,2,3 - соответственно образцы с покрытиями из самофлюсующихся сплавов ПГ-СР4, ПГ-СР3, ПГ-СР2; 4 - образцы с покрытиями из нитрида титана; 5 - азотированные образцы

Таким образом, упрочнение аустенитной стали 12Х18Н10Т азотированием и нанесением покрытий из нитрида титана эффективно при малых удельных нагрузках и скоростях скольжения. Увеличение удельной нагрузки приводит к продавливанию покрытий, нанесенных на «мягкую» основу и к быстрому их изнашиванию. Для повышения износостойкости деталей со специальными свойствами в качестве упрочняющих покрытий целесообразно использовать самофлюсующиеся твердые сплавы. Использование покрытий из нитрида титана эффективно лишь при наличии под покры-

тием твердого промежуточного слоя, в качестве которого может быть использован самофлюсующийся твердый сплав. Таким образом, использование покрытий из самофлюсующихся твердых сплавов на деталях из аустенитных сталей обеспечивает высокую износостойкость упрочненных поверхностей деталей.

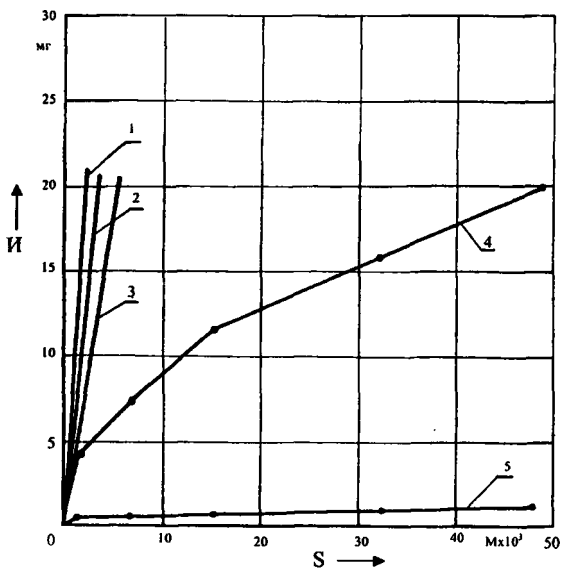


Рис. 4. Зависимость износа поверхности образцов из стали 12Х18Н10Т с упрочняющими покрытиями от пути трения (удельное давление 10 МПа, скорость скольжения 2,3 м/с): 1 – сталь 12Х18Н10Т неупрочненная; 2 – азотированные образцы; 3 – покрытия из нитрида титана; 4 – из самофлюсующегося сплава ПГ-СР4; 5 – из самофлюсующегося сплава ПГ-СР3 (подслой) и нитрида титана (основное покрытие)

ЛИТЕРАТУРА

1. Внедрение упрочняющей технологии (газопламенного и плазменного напыления) и комплексное исследование эксплуатационных характеристик упрочненных деталей типа направляющих: Отчет о НИР (заключит.) / Бел. политехн. ин-т; Рук. В.В. Бабук; № ГР80017770. – Мн., 1985. – 79 с.
2. Крагельский И.В. Трение и износ. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ТРАНСМИССИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАКЕТА ADAMS

Белорусская государственная политехническая академия

Минск, Беларусь

При разработке узлов и агрегатов машин, в частности, самоходных, желательно уже на этапе проектирования находить оптимальные параметры конструкции с учетом режимов ее работы. Для выявления оптимальных параметров приходится обращаться к методам математического моделирования, которые требуют от проектировщика умения составлять и программировать большое количество сложных дифференциальных уравнений. Кроме того, при исследовании модели на уровне динамической схемы не всегда можно проследить характер движения объекта при заданных условиях.

В настоящее время существуют ряд программных средств, позволяющих создавать модели на объектном уровне. Наиболее известна программа ADAMS (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems), разработанная американской фирмой MDI. При помощи имеющейся библиотеки компонентов, сочленений и силовых факторов ADAMS позволяет максимально приближать виртуальную модель к реальному объекту, визуализировать движение, анализировать работу спроектированного узла без составления дифференциальных уравнений пользователем.

В трансмиссиях самоходных машин широко применяются предохранительные муфты предельного момента с осевым перемещением ведомой полумуфты при срабатывании, например, кулачковые и шариковые. В некоторых случаях предохранительным муфтам могут придаваться дополнительные функции, что приводит не только к усложнению конструкции, но и затруднению выявления их оптимальных параметров. В процессе работы такие муфты могут иметь несколько состояний: замкнутое, выход из зацепления, разомкнутое и т. д. в зависимости от особенностей конструкции. Изменение состояния муфты приводит к изменению структуры и динамических характеристик трансмиссии, в которой она установлена. При исследовании приводов с такими муфтами методом математического моделирования для каждого состояния системы составляются дифференциальные уравнения, отражающие особенности поведения последней в определенных условиях, что затрудняет работу пользователя, не обладающего специальными навыками по программированию. Поэтому для исследования подобных систем инженерам удобно использовать ADAMS.

Подтверждением может служить созданная непосредственно в среде ADAMS модель предохранительной кулачковой муфты предельного момента, разработанной на кафедре "Детали машин, ПТМ и М" БГПА и предназначенной для применения в трансмиссии кормоуборочного комбайна (расчетную схему муфты см. [3]). При моде-

лировании узла удалось имитировать кулачковый ряд, создать зазор в трансмиссии, отработать такой сложный элемент, как пружина с нелинейной характеристикой, учесть трение во всех соединениях. Кроме того, широко использовались возможности программы при моделировании активных и реактивных нагрузок: изменялся движущий момент и момент сопротивления по различным законам и в соответствии с данными испытаний, усилие пружины (характеристики жесткости и демпфирования), осевая сила на кулачках, сила удара при взаимодействии элементов и т. д.

При создании модели применялись функции: IMPACT (односторонний контакт), BISTOP (двухсторонний контакт), SFORSE (однокомпонентная сила вдоль одной из осей или крутящий момент вокруг одной из осей), JOINT (сочленение) и т. д. [1, 2].

Результаты моделирования в виде графиков (скорости и ускорения полумуфт, положения частей муфты в пространстве, действующие силовые факторы) в зависимости от времени можно выводить на общем поле, что позволяет определять длительность каждого состояния муфты и, соответственно, привода, в котором она установлена, а также любой интересующий исследователя параметр в нужный момент времени. Некоторые результаты моделирования показаны на рис. 1.

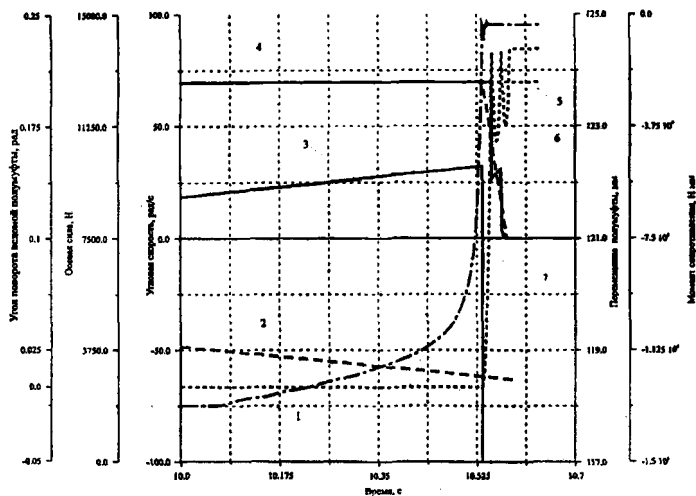


Рис. 1. Результаты моделирования муфты в среде ADAMS: 1 – перемещение ведомой полумуфты вдоль оси вала (в горизонтальном направлении); 2 – приложенный к ведомой полумуфте момент сопротивления; 3 – осевая сила на кулачках; 4 – угловая скорость ведомой полумуфты; 5 – угловая скорость ведущей полумуфты; 6 – угловая скорость опорного кольца; 7 – угол поворота ведомой полумуфты в пределах паза кольца (в зазоре).

При исследовании удалось установить связь величины угла наклона кулачков со значением момента срабатывания муфты, определить усилия пружины для различных режимов нагружения, охватывающих необходимые диапазоны срабатывания, и подобрать пружину, имеющую характеристику с существенной нелинейностью, а также определить время выключения муфты для заданных условий.

Кроме того, разработанная модель может рассматриваться как базовая для моделирования кулачковых предохранительных муфт, а также предохранительных шариковых муфт, имеющих перемещение ведомой полумуфты в осевом направлении. В полученном виде модель легко встраивается в модели трансмиссий различной структуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Using ADAMS/Solver. Version 9, part number 91 SOLVUG-01, Mechanical Dynamics, Inc., USA, 1998. 2. Using ADAMS/View. Version 9, part number 91 VIEWUG-01, Mechanical Dynamics, Inc., USA, 1998. 3. Калина А. А. Математическая модель многофункциональной кулачковой муфты в составе трансмиссии//Наука и технологии на рубеже 21 века.– Мн.: – УП "Технопринт", 2000.-С.316–320.

УДК 621. 81: 621 – 192

П. П. Капуста

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЙБУЛЛА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ОЦЕНКЕ НАГРУЖЕННОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

*Белорусская государственная политехническая академия
г. Минск, Беларусь*

1. Постановка задачи

Оценка эксплуатационного случайного (нерегулярного) нагружения предусматривает его схематизацию, результатом которой является построение эквивалентного по повреждающему воздействию реальному процессу нагрузочного блока.

Очевидно, что большую точность прогнозирования долговечности можно получить при оценке нагруженности не составляя укрупненных, а значит приближенных нагрузочных блоков, а учитывая при использовании той или иной гипотезы суммирования усталостных повреждений значения каждого напряжения случайного процесса нагружения.

Но реализация на практике указанного положения связана с решением проблемы времени счета, т.к. реальные нагрузочные блоки за один технологический цикл могут включать $10^3 \dots 10^4$ и более экстремумов. Кроме того, при проведении проектных рас-

четов на долговечность и для совершенствования методов и режимов ускоренных стендовых и компьютерных испытаний, актуален вопрос разработки и развития математического моделирования реального нагрузочного процесса. При этом, предпочтение в случае проектных оценок отдается аппроксимации случайного процесса нерегулярного нагружения различными распределениями. Анализ состояния вопроса, позволяет констатировать использование значительного количества различных распределений, для оценки нерегулярного нагружения деталей машин и элементов конструкций. Так, для описания типовых и эквивалентных режимов нагружения зубчатых передач по ГОСТ 21354-87 (распределение контактных и изгибающих напряжений) использовано несколько функций: интегральной функции β -распределения – для описания тяжелого, легкого и особо легкого режимов; интегральной функции равновероятного распределения – для описания среднего, равновероятного режима; интегральной функции нормального распределения – для описания среднего – нормального режима. При этом наиболее часто, в особенности для оценки нагруженности деталей мобильных машин, используется распределение Вейбулла.

Недостатком использования большого количества распределений является трудность сопоставления различных режимов нагружения при проведении проектных расчетов на долговечность.

Поэтому для дальнейших исследований и устранения указанных недостатков нами выбрано для оценки нерегулярного нагружения трехпараметрическое распределение Вейбулла. Формула Вейбулла предложена им в 1939 г. для исследований в статистической теории прочности [1], а позднее использована в различных вопросах сопротивления усталости [2–6].

Если при построении нагрузочного блока все действующие в данный промежуток времени напряжения m (полученные после схематизации и приведения к эквивалентным по повреждающему воздействию симметричному или асимметричному циклам) расположить в убывающий вариационный ряд $\sigma_1 > \sigma_2 > \dots > \sigma_i > \dots > \sigma_n$ (см. рис. 1) и описать с использованием распределения Вейбулла, то последнее в данном случае можно записать в виде [4–6]

$$P = \frac{i}{n} = \exp \left[- \left(\frac{\sigma_i - \sigma}{\sigma_w} \right)^w \right], \quad (1)$$

где P – значение функции Вейбулла; i – порядковый номер σ_i -го напряжения в нагрузочном блоке; n – количество напряжений в нагрузочном блоке; σ_i – значение i -го напряжения нагрузочного блока, МПа; σ – минимальное напряжение нагрузочного блока, МПа; σ_w – параметр распределения Вейбулла, имеющий размерность напряжения, МПа; w – показатель степени.

В числителе уравнения (1) стоит разность σ_i -го и σ -го напряжений ($\Delta\sigma = \sigma_i - \sigma$) т.е. величина, показывающая, на сколько отличается от σ_i от σ .

Проведенный первичный анализ распределения Вейбулла применительно к оценке нерегулярного нагружения говорит о необходимости более подробного изучения влияния всех его параметров на значения функции P , а также о необходимости установления связи параметров распределения с максимальным напряжением блока σ . Настоящее исследование необходимо с целью определения параметров распределения для адекватного описания всех возможных режимов нерегулярного и регулярного нагружения, сравнения их между собой, что позволит предложить методику расчета на долговечность при нерегулярном нагружении на стадии проектирования. Кроме того, создание такой модели дает математическое обеспечение метода ускоренных испытаний (например при регулярном нагружении) и оценки по их результатам долговечности деталей машин при нерегулярном нагружении.

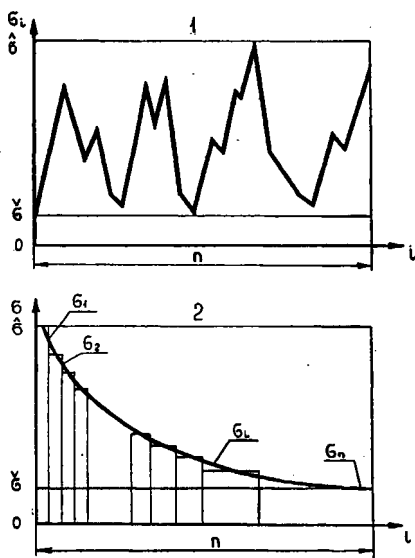


Рис. 1. Схематизация случайного процесса нагружения: 1 – случайное нагружение; 2 – схема нагрузочного блока

Такая постановка задачи по оценке нагруженности нужна еще и потому, что при расчетах деталей машин на долговечность в вероятностном аспекте необходимо статистически правильно учитывать не только факторы, влияющие на вариацию характеристик сопротивления усталости деталей, но и их нагруженности.

2. Влияние параметров функции Вейбулла на ее значения

2.1. Влияние параметров σ_w, w и σ на значения функции Вейбулла при регулярном нагружении

При регулярном нагружении напряжения σ_i являются неварьирующим параметром $\sigma_i = const$.

Для сравнения результатов анализа предположим, что деталь подвержена регулярному нагружению при $\sigma_i = \hat{\sigma} = 200 \text{ МПа} = \text{const}$ (здесь $\hat{\sigma}$ – максимальное напряжение). Остальные параметры уравнения принимаем переменными.

Для изучения степени влияния параметров σ_w , w и σ на значения функции Вейбулла с использованием уравнения (1) построены графики (рис.2) в координатах: $P - \sigma_w$ (графики 1 и 2) при $\sigma = 0$; $w = 1,5 = \text{const}$; (график 3) при $\sigma_w = 30 \text{ МПа} = \text{const}$; $\sigma = 0$; $P - \sigma$ (график 4) при (график 4) при $\sigma_w = 30 \text{ МПа} = \text{const}$, $w = 1,5 = \text{const}$.

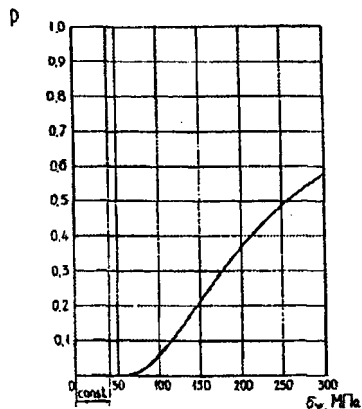


График 1

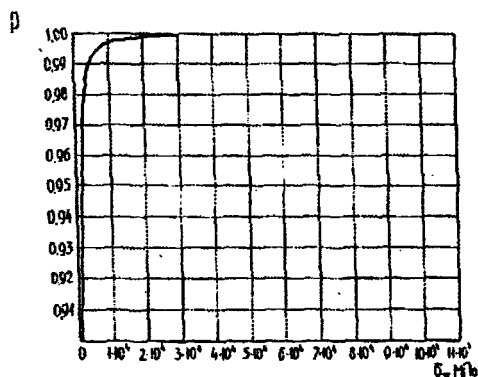


График 2

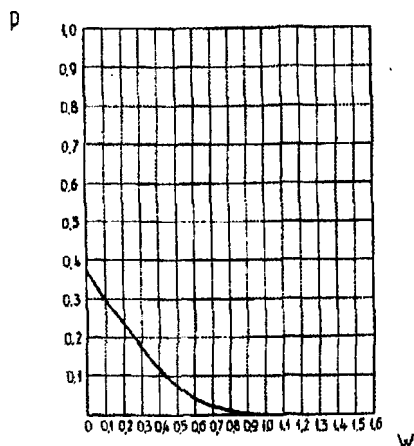


График 3

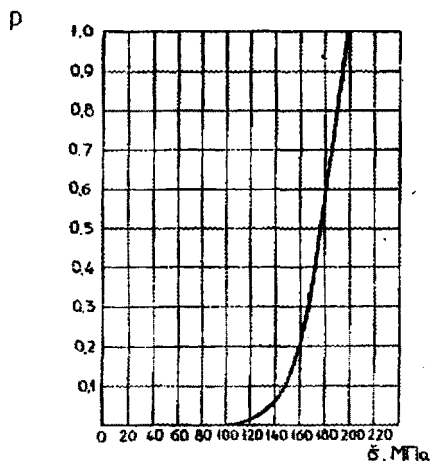


График 4

Рис. 2. Влияние параметров σ_w , w и σ на значения функции Вейбулла при регулярном нагружении ($\sigma_i = \text{const}$).

Анализ рис. 2 показывает следующее. Из графиков 1 и 2 очевидно, что с увеличением параметра σ_w можно получить любое значение функции $P = \frac{i}{n}$. Однако для получения высокой вероятности ($P \rightarrow 1$) при указанных значениях параметров w , σ и s_i параметр $\sigma_w \rightarrow \infty$.

Из графика 3 следует, что с изменением только показателя степени w при других постоянных параметрах получить значения функции Вейбулла в широком диапазоне $P=0 \dots 1$ нельзя. Причем, при $w = 0$ значение функции равно $P=0,367879$.

Отсюда следует также, что при изменении параметра σ от 0 до $\sigma = \sigma_i = \sigma$ можно получить любое значение функции в диапазоне $P = 0 \dots 1$. Очевидно, что аналогичный данному результат можно получить варьируя в уравнении (1) разностью величин $(\sigma_i - \sigma)$.

Таким образом, на основании совместного анализа графиков 1...4 по рис. 2, можно констатировать, что на величину значения функции Вейбулла более существенное влияние оказывают его параметр σ_w и разность $(\sigma_i - \sigma)$ или параметр σ при $\sigma_i = \text{const}$. Показатель же степени w оказывает второстепенное значение на изменение величины данной функции.

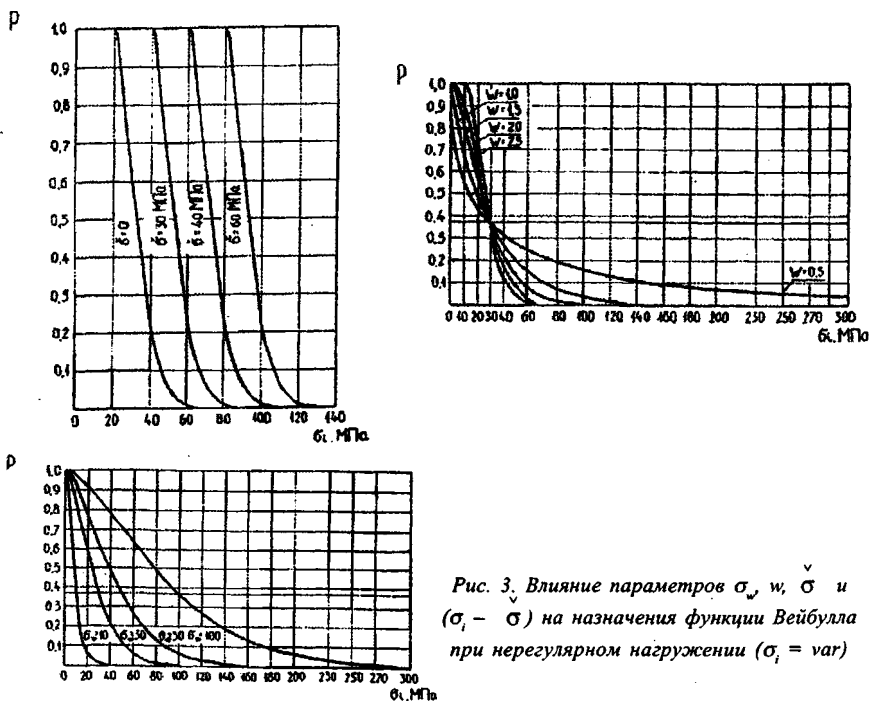


Рис. 3. Влияние параметров σ_w , w , σ и $(\sigma_i - \sigma)$ на назначения функции Вейбулла при нерегулярном нагружении ($\sigma_i = \text{var}$)

2.2. Влияние параметров σ_w, w, σ и $(\sigma_i - \sigma)$ на значения функции Вейбулла при нерегулярном нагружении

При нерегулярном нагружении напряжения σ_i являются варьирующим параметром ($\sigma_i = \text{var}$). Поэтому важнейшим является вопрос изучения влияния параметров распределения Вейбулла на величину функции в зависимости от величины напряжений нагруженного блока σ_i . Для реализации этой цели построим графики 1...3 в системе координат $P - \sigma_i$ (Рис. 3):

- при $\sigma_w = 30 \text{ МПа} = \text{const}$; $w = 1,5 = \text{const}$; $\sigma = (0; 20; 40; 60 \text{ МПа}) = \text{var}$ (график 1);
- при $\sigma_w = 30 \text{ МПа} = \text{const}$; $\sigma = 0 = \text{const}$; $w = (0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5) = \text{var}$ (график 2);
- при $\sigma = 0 = \text{const}$; $w = 1,5 = \text{const}$; $\sigma_w = (10; 30; 50; 100 \text{ МПа}) = \text{var}$ (график 3).

Анализ рис. 3 показывает следующее. Из графика 1 видно, что при изменении значения i -го напряжения блока σ_i в некоторых пределах при определенных значениях σ_w и w изменяется значение функции Вейбулла в пределах $0 \leq P \leq 1$. Следует отметить, что на ее значение существенное влияние наряду с этим оказывает величина минимального напряжения блока. Поэтому по оси абсцисс на графике 1 правильнее было бы откладывать не σ_i , а разность $\sigma_i - \sigma$, при известном значении σ для данного нагруженного блока.

Из анализа графика 2 следует, что с увеличением w при постоянных остальных параметрах функции, вероятность появления в нагруженном блоке больших напряжений снижается, т.е. кривая $P = f(\sigma_i)$ несколько наклоняется или поворачивается по часовой стрелке относительно некоторой точки с координатами $(\sigma_w; 0,367879)$.

Из графика 2 видно также, что изменением одного лишь параметра w нельзя получить любые соотношения σ_i в нагруженном блоке размером n .

Из анализа графика 3 следует, что изменение параметра σ_w , при постоянных других параметрах, оказывает более значительное влияние на величину P . При увеличении σ_w вероятность появления больших напряжений в блоке увеличивается. Очевидно, что при увеличении σ_w можно добиться гораздо более широких соотношений σ_i в нагруженном блоке n .

3. Основные результаты и выводы

В результате проведенного анализа показано, что функция Вейбулла в записи (1) достаточно чувствительна к изменению всех ее параметров в случае описания вариационных рядов механических напряжений. Определяющее значение на изменение ее величины оказывает параметр σ_w и разность текущего σ_i -го и минимального σ напряжений $(\sigma_i - \sigma)$ для нерегулярного нагружения или размах максимального и минимального напряжений $(\hat{\sigma} - \check{\sigma})$ для случая регулярного нагружения. Менее значимым является параметр w , изменением которого нельзя получить любые соотношения σ_i в нагруженном блоке размером n . Для описания режимов нерегулярного и регу-

лярного нагружения с использованием распределения Вейбулла необходимо получить зависимость типа

$$\frac{\hat{\sigma}_i - \hat{\sigma}}{\hat{\sigma} - \sigma} = f\left(\frac{i}{n}\right). \quad (2)$$

Уравнение типа (2) свяжет параметры более общего нерегулярного нагружения $(\hat{\sigma}_i, i, \sigma, n, \hat{\sigma}_w, \hat{\sigma}, w, \sigma_i - \sigma, \hat{\sigma} - \sigma)$ и его частной составляющей – регулярного нагружения $(\hat{\sigma} - \sigma = \sigma_i, n, \sigma_w, w)$, что позволит количественно интерпретировать зависимость возможных режимов нагруженности деталей машин и их сравнительный анализ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вейбулл В. Усталостные испытания и анализ их результатов.-М.: Машиностроение, 1964.– 276 с. 2. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин: Справочник.- 4-е изд.- М.: Машиностроение, 1993.-640 с. 3. Почтенный Е.К. Прогнозирование долговечности и диагностика усталости деталей машин.– Минск: Наука и техника, 1983. – 246 с. 4. Почтенный Е.К., Капуста П.П. Оценка нерегулярного нагружения деталей машин // Колебания и волны в экологии, технологических процессах и диагностике: Тез. докл. междунар. конф.: – Минск, 1993.- С. 107. 5. Капуста П.П. Проектная вероятностная оценка долговечности деталей машин при нерегулярном нагружении// Автореферат дисс. на соиск. ученой. степ. канд. техн. наук. – Минск, 1997. – 19 с. 6. Капуста П.П. Ресурсное проектирование несущих деталей АТС// Автомобильная промышленность. – 2000. – №2. – С. 59 – 61.

УДК 621. 81: 621 – 192

П.П. Капуста

УРАВНЕНИЯ НЕРЕГУЛЯРНОЙ НАГРУЖЕННОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

1. Постановка задачи

Ранее нами показано, что для описания режимов нерегулярного нагружения с использованием распределения Вейбулла необходимо получить зависимость типа

$$\frac{\hat{\sigma}_i - \hat{\sigma}}{\hat{\sigma} - \sigma} = f\left(\frac{i}{n}\right) \quad (1)$$

где i – порядковый номер σ_i -го напряжения в нагрузочном блоке; n – количество напряжений в нагрузочном блоке; σ_i – значение i -го напряжения нагрузочного блока, МПа; $\hat{\sigma}$ – минимальное напряжение нагрузочного блока, МПа; σ_w – параметр распределения Вейбулла, имеющий размерность напряжения, МПа; w – показатель степени; $\hat{\sigma}$ – максимальные напряжения нагрузочного блока, МПа (обычно $\hat{\sigma} = \sigma_1$ в убывающем ряду напряжений $\sigma_1 > \sigma_2 > \dots > \sigma_i > \dots > \sigma_n$).

2. Вывод уравнений для описания режимов нерегулярного нагружения

Запишем выражение функции Вейбулла в виде

$$\frac{i}{n} = \exp \left[- \left(\frac{\sigma_i - \hat{\sigma}}{\sigma_w} \right)^w \right] \quad (2)$$

На основании приведенной формы записи, произведя соответствующие преобразования, получим уравнения, пригодные для описания режимов как нерегулярного так и регулярного нагружения деталей машин.

2.1. Вывод уравнения типа $\frac{\sigma_i - \hat{\sigma}}{\sigma_w} = f \left(w, n, \frac{i}{n} \right)$

Прологарифмируем выражение (3) по основанию e . В результате получим:

$$- \left(\frac{\sigma_i - \hat{\sigma}}{\sigma_w} \right)^w = \ln \left(\frac{i}{n} \right) \quad (3)$$

или

$$- \left(\frac{\sigma_i - \hat{\sigma}}{\sigma_w} \right)^w = - \ln \left(\frac{i}{n} \right) = \ln \left(\frac{n}{i} \right) = \ln n - \ln i \quad (4)$$

Прологарифмировав (4) по основанию e , получим

$$w \cdot \ln \left(\frac{\sigma_i - \hat{\sigma}}{\sigma_w} \right) = \ln \ln \left(\frac{n}{i} \right) \quad (5)$$

или

$$\ln \left(\frac{\sigma_i - \hat{\sigma}}{\sigma_w} \right) = \frac{1}{w} \cdot \ln \ln \left(\frac{n}{i} \right) \quad (6)$$

Возьмем экспоненту от левой и правой частей уравнения (6)

$$\sigma_i - \hat{\sigma} = \sigma_w \cdot \exp \left[\frac{1}{w} \cdot \ln \ln \left(\frac{n}{i} \right) \right] \quad (7)$$

При $i=1$, а следовательно, при $\sigma_i = \hat{\sigma}$ уравнение (7) примет вид

$$\hat{\sigma} - \check{\sigma} = \sigma_w \cdot \exp \left[\frac{1}{w} \cdot \ln \ln(n) \right]. \quad (8)$$

Разделив (7) на (8) получим

$$\frac{\sigma_i - \check{\sigma}}{\hat{\sigma} - \check{\sigma}} = \exp \left\{ \frac{1}{w} \left[\ln \ln \left(\frac{n}{i} \right) - \ln \ln(n) \right] \right\} \quad (9)$$

или

$$\frac{\sigma_i - \check{\sigma}}{\hat{\sigma} - \check{\sigma}} = \exp \left\{ \frac{1}{w} \ln \left[\frac{\ln \left(\frac{n}{i} \right)}{\ln(n)} \right] \right\} \quad (10)$$

При $\check{\sigma} = 0$, уравнение (10) примет вид

$$\frac{\sigma_i}{\hat{\sigma}} = \exp \left\{ \frac{1}{w} \cdot \ln \left[\frac{\ln \left(\frac{n}{i} \right)}{\ln(n)} \right] \right\} \quad (11)$$

Проверяем граничные условия:

$$\text{при } i=1 \rightarrow \frac{\sigma_i - \check{\sigma}}{\hat{\sigma} - \check{\sigma}} = \frac{\sigma_i}{\hat{\sigma}} = 1 \quad \text{при } i=n \rightarrow \frac{\sigma_i - \check{\sigma}}{\hat{\sigma} - \check{\sigma}} = \frac{\sigma_i}{\hat{\sigma}} = 0$$

2.2. Анализ уравнения типа $\frac{\sigma_i - \check{\sigma}}{\hat{\sigma} - \check{\sigma}} = f \left(w, n, \frac{i}{n} \right)$

Анализируя (10) и (11) можно констатировать, что получено уравнение, позволяющее описать любой режим нерегулярного нагружения в вероятностной его трактовке. Следует отметить, что с ростом параметра w тяжесть нагрузочного режима увеличивается, а для регулярного нагружения, при $w \rightarrow \infty$ $\frac{\sigma_i}{\hat{\sigma}} = \frac{\sigma_i}{\hat{\sigma}} = 1$

Недостатком уравнений (10) и (11) является отсутствие в них более чувствительного к оценке тяжести нагрузочного режима параметра s_w и величины максимального напряжения нагрузочного блока $\hat{\sigma}$, которое желательно было бы увязать с прочностными характеристиками материала (например $\hat{\sigma} \leq (0,85...1)\sigma_w$), что особенно важно при проектных расчетах.

2.3. Вывод уравнения типа $\frac{\sigma_i - \check{\sigma}}{\hat{\sigma} - \check{\sigma}} = f \left(\sigma_w, \hat{\sigma}, n, \frac{i}{n} \right)$

Из уравнения (6) при $i=1$, получим

$$\ln \left(\frac{\hat{\sigma} - \check{\sigma}}{\sigma_w} \right) = \frac{1}{w} \cdot \ln \ln(n) \quad (12)$$

Разделив (6) на (12), получим

$$\frac{\ln \left(\frac{\sigma_i - \check{\sigma}}{\sigma_w} \right)}{\ln \left(\frac{\hat{\sigma} - \check{\sigma}}{\sigma_w} \right)} = \frac{\ln \ln \left(\frac{n}{i} \right)}{\ln \ln(n)} \quad (13)$$

Далее

$$\ln \left(\frac{\sigma_i - \check{\sigma}}{\sigma_w} \right) = \ln \left(\frac{\hat{\sigma} - \check{\sigma}}{\sigma_w} \right) \cdot \frac{\ln \ln \left(\frac{n}{i} \right)}{\ln \ln(n)} \quad (14)$$

или

$$\frac{\sigma_i - \check{\sigma}}{\sigma_w} = \exp \left[\ln \left(\frac{\hat{\sigma} - \check{\sigma}}{\sigma_w} \right) \cdot \frac{\ln \ln \left(\frac{n}{i} \right)}{\ln \ln(n)} \right] \quad (15)$$

Из (15)

$$\sigma_i - \check{\sigma} = \sigma_w \cdot \exp \left[\ln \left(\frac{\hat{\sigma} - \check{\sigma}}{\sigma_w} \right) \cdot \frac{\ln \ln \left(\frac{n}{i} \right)}{\ln \ln(n)} \right] \quad (16)$$

Разделив (16) на $(\hat{\sigma} - \check{\sigma})$ получим

$$\frac{\sigma_i - \check{\sigma}}{\hat{\sigma} - \check{\sigma}} = \frac{\sigma_w}{\hat{\sigma} - \check{\sigma}} \cdot \exp \left[\ln \left(\frac{\hat{\sigma} - \check{\sigma}}{\sigma_w} \right) \cdot \frac{\ln \ln \left(\frac{n}{i} \right)}{\ln \ln(n)} \right] \quad (17)$$

При $\check{\sigma} = 0$, уравнение (17) примет вид

$$\frac{\sigma_i}{\hat{\sigma}} = \frac{\sigma_w}{\hat{\sigma}} \cdot \exp \left[\ln \left(\frac{\hat{\sigma}}{\sigma_w} \right) \cdot \frac{\ln \ln \left(\frac{n}{i} \right)}{\ln \ln(n)} \right] \quad (18)$$

3. Основные результаты и выводы

На основании анализа распределения Вейбулла предложены уравнения для описания нерегулярной и регулярной нагруженности деталей машин в механических напряжениях. Уравнения базируются на представлении нагрузочного блока в виде убывающего вариационного ряда напряжений $\sigma_1 > \sigma_2 > \dots > \sigma_i > \dots > \sigma_n$ получаемых после схематизации случайного нагружения и приведения к эквивалентным по повреждающему воздействию симметричным или асимметричным напряжениям [1]. Уравнения (10) и (17) позволяют описать все возможные по степени тяжести нагрузочные режимы, включая и регулярное нагружение, что устраняет недостаток использования для этих целей большого количества различных распределений и дает возможность сопоставления различных режимов нагружения, что особенно актуаль-

но при проведении проектных расчетов на долговечность. Сравнительный анализ полученных уравнений показывает, что уравнение (17) включает наиболее чувствительные параметры распределения Вейбулла в явном, а менее чувствительные – в неявном виде, охватывая при этом все параметры эквивалентного схематизированного нагруженного блока, является наиболее универсальным и предпочтительным для описания нагруженности деталей машин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Почтенный Е.К., Капуста П.П. Приведение асимметричных циклов к эквивалентным по повреждающему воздействию симметричным или отнулевым// Вестн НАН Беларуси: Серия физика-технических наук.- 2000. – № 2. – С. 59 – 61.

УДК 539.3

А.Е. Крушевский, Т. Лудеманн

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТНОГО УРАВНЕНИЯ ИЗГИБНЫХ КОЛЕБАНИЙ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ШАРНИРНО-ОПЕРТОЙ ПЛАСТИНКИ В ТОЧНОЙ ПОСТАНОВКЕ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Известно, что динамические расчеты тонких упругих пластинок базируются на решении уравнения Софи Жермен, построенного на основе гипотез Кирхгофа – Лява [1]. Однако, уже при нахождении низших частот результаты оказываются слишком приближенными [2]. Поэтому возникает необходимость уточнить собственные частоты изгиба тонких пластинок на основе точной теории пластин, рассмотренной в работе [3].

Итак, собственные частоты изгиба пластин на основе уравнения Софи Жермен для прямоугольной шарнирно – опертой пластинки определяются по формуле

$$\omega_{mn} = \pi^2 \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) \sqrt{\frac{D}{\rho h}}, \quad (1)$$

где $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$ – цилиндрическая жесткость пластинки, E – модуль Юнга, ρ – плотность материала, ν – коэффициент Пуассона, h – толщина пластинки, m, n – натуральные числа, указывающие номер волны, ω_{mn} – собственные частоты.

При этом каждой волне с номером “ m ”, “ n ” соответствует единственная собственная частота. В уточненной постановке [2] те же частоты определяются в результате решения биквадратного уравнения

$$\omega_{mn}^2 = \frac{G}{\rho \left[\frac{3}{5} + \frac{\pi^2 h^2 \gamma_2}{120\gamma} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) \right]} \left\{ \left[\frac{\gamma_2 h^2 \pi^4 (\gamma + 1)}{240\gamma} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2 + \frac{(13\gamma - 10)\pi^2}{10\gamma} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) \right] + \frac{3}{h^2} \pm \sqrt{\left[\frac{\gamma_2 h^2 \pi^4 (\gamma + 1)}{240\gamma} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2 + \frac{(13\gamma - 10)\pi^2}{10\gamma} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) + \frac{3}{h^2} \right]^2 - \left[\left(\frac{3}{5} + \frac{\pi^2 h^2 \gamma_2}{120\gamma} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) \right) \cdot \left(\frac{\gamma_2 h^2 \pi^4}{120\gamma} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^3 + \frac{2(\gamma - 1)\pi^4}{\gamma} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2 \right) \right]} \right\} \quad (2)$$

причем каждой волне соответствуют две собственные частоты. В формуле (2) G – модуль сдвига, $\gamma = \frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}$, $\gamma_2 = \gamma - 2$.

В точной постановке собственные частоты определяются в результате решения следующего трансцендентного уравнения [3]

$$\left[\frac{\rho \omega^2}{G} - 2\pi^2 \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) \right]^2 \cos \frac{h}{2} \sqrt{\rho \frac{\omega^2}{G} - \pi^2 \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)} \sin \frac{h}{2} \sqrt{\rho \frac{\omega^2}{\gamma G} - \pi^2 \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)} + 4\pi^2 \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) \sqrt{\rho \frac{\omega^2}{G} - \pi^2 \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)} \cos \frac{h}{2} \sqrt{\rho \frac{\omega^2}{\gamma G} - \pi^2 \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)} \sin \frac{h}{2} \sqrt{\rho \frac{\omega^2}{G} - \pi^2 \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)} = 0 \quad (3)$$

Оказывается, что в точной постановке каждой волне с номером “ m ”, “ n ” соответствует бесчисленное множество собственных частот. К сожалению, написанное выше уравнение (3) позволяет найти частоты лишь приближенными, численными методами. В частности, раскладывая в ряд Маклорена и ограничиваясь первыми двумя членами, получим следующее приближенное алгебраическое частотное уравнение

$$\frac{\rho^3 \omega^6 h^4}{G^3} - \frac{8\rho^2 \omega^4 h^2}{\gamma G^2} \left[3\gamma + 1 + \frac{(\gamma + 1)\pi^2 h^2}{8} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) \right] + \frac{192\rho\omega^2}{G} \left\{ \frac{(\gamma - 1)\pi^2 h^2}{3\gamma} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) + \left[1 + \frac{\pi^2 h^2}{24} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) \right] \left[1 + \frac{\pi^2 h^2}{8} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) \right] \right\} - \frac{64\pi^4 h^2 (\gamma - 1)}{\gamma} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2 = 0 \quad (4)$$

При учете лишь последних двух слагаемых в уравнении (4) имеем

$$\frac{\rho\omega^2}{G} \left\{ \left[1 + \frac{\pi^2 h^2}{8} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) \right] \cdot \left[1 + \frac{\pi^2 h^2}{24} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) \right] + \frac{(\gamma - 1)\pi^2 h^2}{3\gamma} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) \right\} = \frac{(\gamma - 1)\pi^4 h^2}{3\gamma} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2 \quad (5)$$

Если в левой части уравнения (5) пренебречь слагаемыми, содержащими $\pi^2 h^2 \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)$, что справедливо для низших частот, то получим формулу (1) технической теории изгиба пластин. Следовательно, формулу (5) следует рассматривать как уточнение технической теории при определении высших собственных частот.

При учете трех слагаемых в уравнении (4) имеем формулу для определения собственных частот при $\gamma = 3$ в уточненной постановке.

$$\frac{\rho \omega^2}{G} = \frac{4\pi^4 h^2}{3K} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2, \quad (6)$$

где

$$K = \frac{2\pi^2 h^2}{3} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) + 3 \left[1 + \frac{\pi^2 h^2}{8} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) \right] \left[1 + \frac{\pi^2 h^2}{24} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) \right] \pm$$

$$\pm \sqrt{\left\{ \frac{2\pi^2 h^2}{3} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) + 3 \left[1 + \frac{\pi^2 h^2}{8} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) \right] \cdot \left[1 + \frac{\pi^2 h^2}{24} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) \right] \right\}^2 -$$

$$\left[\frac{\pi^4 h^4}{27} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2 \left[10 + \frac{\pi^2 h^2}{2} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) \right] \right]}$$

Для квадратной пластинки первые частоты ($a = b$, $m = n = 1$ при $\frac{h}{a} = 0,1$ равны $\omega_1 = 0,916 \sqrt{\frac{G}{\rho a^2}}$, $\omega_2 = 27,124 \sqrt{\frac{G}{\rho a^2}}$.

Сравнение с результатами расчета по уточненной теории, рассмотренной в работе (2), показывает незначительное увеличение и уменьшение значений собственных частот в точной постановке. Так, в уточненной постановке имеем $\omega_1 = 0,903 \sqrt{\frac{G}{\rho a^2}}$, $\omega_2 = 32,586 \sqrt{\frac{G}{\rho a^2}}$, в точной постановке имеем $\omega_1 = 0,916 \sqrt{\frac{G}{\rho a^2}}$, $\omega_2 = 27,124 \sqrt{\frac{G}{\rho a^2}}$.

Очевидно, что увеличение числа слагаемых в частотном уравнении (4) или (3) изменит значение частоты ω_1 в меньшую сторону, а частоты ω_2 – в большую сторону и приблизит их значение к частотам, вычисляемым по формуле (2).

Таким образом, как техническая, так и уточненная теория динамики пластин следуют из точной теории как соответствующие приближения решения поставленной задачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Понамарев С.Д. и др. Расчеты на прочность в машиностроении. Том 3. – М.: Машгиз, 1959. – 1118 с. 2. Крушевский А.Е. Лудеманн Т. Уточненная теория динамики тонких пластин//Машиностроение. – 2000. – Вып. 16. С 225–229. 3. Крушевский А.Е. Решение задачи о равновесии плиты в точной постановке//Материалы секции теоретической и прикладной механики. 26-я н/т конференция. – Мн.: БПИ, 1970. – С 51–57.

РЕЛЯТИВИСТСКИЕ МЕТОДЫ В МЕХАНИКЕ СРЕД. РЕЛЯТИВИЗМ В М.Д.Т

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Это научное направление в механику деформируемых твердых тел (М.Д.Т.) ввел Г.С. Крылов [1–3]. Идея, для достаточно информированных, как в теории относительности специальной (СТО), так и общей (ОТО), очень проста. Введением равноправной координаты (О) время на максимальную скорость распространения сигнала, перенести трудности физической группы уравнений, особенно за границей применимости закона Гука, в область описания их геометрическими преобразованиями координат, по аналогии со СТО и ОТО, где эта проблема замены физических уравнений геометрическими преобразованиями с дополнительной ортогональной осью уже была блестяще решена [4].

Так как классическая механика излагается в бесконечно малых (т. е. в окрестности точки), то и для самого сложного случая ОТО, как допускающего метрику СТО в окрестности точек, можно ввести единую модель «Среды», соответствующее непрерывной теории поля М.Д.Т. в релятивистском изложении.

Совместно с найденным в [5] изоморфизмом моделей n -мерной геометрии в СТО и $n-1$ -мерной геометрии Лобачевского задача расширения математической модели классической теории упругости достаточно легко решается дополнением знаком ($<$) уравнений неразрывности Сен-Венана. При этом вся классическая механика деформируемых тел входит подпространством пространственных координат.

Вероятно из-за строгости математических доказательств и попытки по рекомендации соавтора [2, 3] представить работу по техническим специальностям, работа не дошла до потребителя, несмотря на то, что по минимальному числу параметров, подлежащих определению опытным путем, и глубине охвата взаимосвязей ей нет равных до сих пор. В жизни оказалось, что ее достоинства приняты за недостатки.

Не может быть, чтобы через один параметр, и даже просто без учета пластических деформаций, можно было решить проблему усталости, которую сам Мэнсон, и только в расчетах на долговечность, решает через четыре параметра материала, определяемых из опыта!

Если авторский подход ведет к модели среды гомоморфной всем моделям, то ее нужно принимать несмотря на наличие доказательства автоморфизма между реальностью и моделью, как более полную. Простота решений признак гениальности создателя. Преобразования Лоренца определяет один параметр — угол поворота простран-

ственной и временной координаты, или двух пространственных и одной временной координаты на согласованные углы.

Если большинство затруднений связано с заменой неиспользованных геометрических условий, то оно неизбежно скрывается за многомерностью и преобразованиями перехода к различным 3-х и 4-х мерным пространствам. Тогда переходом к сферической системе координат, отображением которой на плоскости является полярная система координат, при проективном свертывании, или на секущей плоскости, можно убрать из анализа Лоренцевых преобразований пассивные пространственные координаты. Наглядность достигается при отображении круговой диаграммы Крылова для напряжений или деформации, с расположением половины круговой диаграммы Мора, может рассматриваться, как неевклидовый треугольник, со слегка приподнятыми точками над осью нормальных напряжений, образ равностороннего треугольника с вершинами на круге Крылова, а на оси расположением трех точек по Мору (рис. 1).

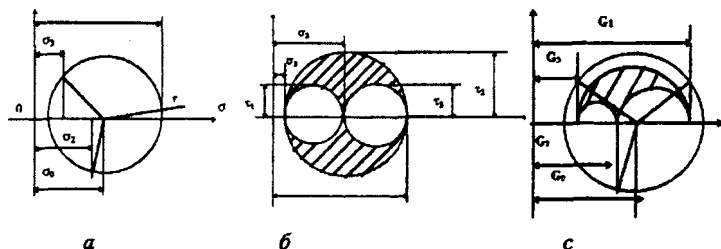


Рис. 1. Круговая диаграмма напряжений – деформаций: а – Крылова, б – Мора, с – Объединенная

Здесь а Евклидова плоскость и б Евклидова плоскость, с Полу плоскость Лобачевского в псевдоевклидовой плоскости Минковского. Числовая ось представляется комплексными числами, как основными. Сопреженные числа исключают из параметров, как не попадающие в полу плоскость Заштрихованная область – образ равностороннего треугольника с вершинами на окружности круговой диаграммы Крылова в геометрии Лобачевского.

При вычислениях в любых задачах переходят к числовой оси, и вопрос о евклидовости и неевклидовости решается только в степени точности расчета, то есть чему равен ноль, так как сама ось не входит в геометрию полу плоскости (открытое полу пространство). Тогда бесконечность и граница на оси определяется величиной обратной от нуля, а переход к числовому выражению точек неевклидовой плоскости и точек пространства определяются дробно-линейными преобразованиями координат. Геометрия Лобачевского, представляемая как геометрия внутри овального абсолюта, или, как с окружностями в роли прямых на полу плоскости без включения границы

этой полуплоскости, может быть поставлена в однозначное соответствие с диаграммой растяжения – сжатия образца на машине ИМ-4а, простым определением масштабов диаграммы.

Записывающие устройства диаграмм испытательных машин, как силовых параметров нагружения, так и деформационных перемещений, записывает по двум равноправным осям и в мм. Тогда более уместен вопрос об основаниях отказа от релятивистского подхода, заложенного самой природой в самой конструкции аппарата? Это раннее ограничение областью исследований в пределах закона Гука, ведет к потере информации о том, что диаграмма представляет собой годограф вектора и в координатах пространство время, так что в косоугольной системе координат, одна из осей которых продолжение прямолинейной зависимости (закон Гука), вторая ось необратимых остаточных перемещений - *определяет необратимость процесса как времени.*

Хрупкий характер разрушения в шейке сопровождается включением упругих перемещений. Если его не допустить и разгрузить образец, получим координатную линию параллельную наклонной оси, определяющую остаточные деформации в момент разрыва. Иногда получают равновесную диаграмму, как не допускающую хрупкого разрыва, но обеспечивающее утончение образца в шейке до нуля. В этом случае получается почти линейная диаграмма в завершающей стадии. Треугольник между координатной линией и линией спуска предлагался, как характеристика запаса пластичности в расчетах на трещиностойкость.

Наряду с исключением из анализа таких понятий, как представление суммой упругих и остаточных деформаций, так называемых полных, и связанных с этим недоумений в понятиях аддитивности тензорных характеристик деформаций, авторы получают возможность полностью отразить физические процессы разрушения в шейке, исходя из хрупкого представления сдвига по плоскостям наименьшего сопротивления сдвигу в полном соответствии с [6], описываемое как следствие октаэдрического нагружения касательными напряжениями. Устанавливается, что 4-ая теория прочности, как теория разрушения сдвигом или срезом, предпочтительнее других из-за количества октаэдрических площадок.

Минимальное количество которых в каждой точке равно 8, в то время как площадка максимальных касательных напряжений только 4. Следовательно более благоприятные условия для совмещения площадки минимального сопротивления сдвигу и октаэдрических напряжений,

Так как напряжения являются основными параметрами в уравнениях Навье:

$$\sigma_{ik,j} + f_k = \rho \frac{\partial^2 u_k}{\partial t^2}, \quad (1)$$

где σ – напряжения; f – массовые силы; ρ – плотность; u – перемещение; t – время; которыми определяется класс задач, как статически неопределимые, а закон Гука пред-

ставляется условием решения задач этого типа, то релятивизм М.Д.Т. снимает эту проблему и является теоретической базой метода конечных элементов.

Чтобы тело n – мерное деформировалось или даже просто было закреплено, необходимо $n!$ – уравнений связи. Для элементарного объема в пространстве Минковского $n = 4$. Из 24 движений 6 ограничений метрического свойства, обеспечивающих неевклидовы характер среды в каждый момент времени, и это описание является приближенным решением для поля напряжений первого рода. Они могут быть сформулированы, как условие неразрывности Сен-Венана, дополнением их неравенством, или в каждый момент времени, как условие ограничения суммы углов произвольного i - угольника любого сечения: $\sum \angle \alpha_i \leq \pi(i - 2)$. Условие $\sum \angle \alpha_i > \pi(i - 2)$ свидетельствует об отделении части от целого разрушении материала, а 6 из максимального числа возможных движений (4!), как внутренние геометрические обеспечивают условие сплошности.

Из 18 ограничений движения имеем три трехмерных деформируемых пространства, для описаний напряжений первого, второго и третьего рода. Физический подход связан с отдельным рассмотрением задачи механики сплошной среды для определения напряжений первого, второго и третьего рода, с последующим суммированием напряжений. Естественно, такой физический подход упускает условия внутренних связей пространств, как условий решения задач, заменой их физическими условиями, законами и константами. Более того, деформации также рассматриваются независимыми и аддитивными. Это ведет к необозримости как решений, так и результатов. Но движения в 4-х мерном пространстве Минковского однозначно связаны с движениями 3-х мерного пространства Лобачевского. Закон Гука в трехмерном пространстве может быть записан, если тензор больших деформаций выразить в аддитивной (суммируемой) форме:

$$\sigma_{ij} = CrC(\ln a)^{-1}(\ln(g_{ij} + u_{i,j})), \quad (2)$$

где C — скорость распространения колебаний (групповая скорость волн); ρ — плотность; \ln — натуральный логарифм; g_{ij} — метрический тензор; u_{ij} — компоненты тензора девиации.

Для малых деформаций симметричная часть тензора девиаций принимается за их тензорную характеристику

$$\varepsilon_{ij} = 1/2(u_{j,i} + u_{i,j}) \quad (3)$$

Представляя натуральный логарифм разложением в степенной ряд получим

$$C^i_{ik} \sigma_{km} C^l_{mj} = r/\ln a (e^{-1})^{n+1} e^n_{ij}. \quad (4)$$

В силу аддитивности напряжений в правой части равенства можно записать:

$$C^i_{ik} (\sigma^i_{km} + \sigma^l_{km} + \sigma^{ll}_{km}) C^l_{mj} = r/\ln a (\varepsilon_{ij} - \varepsilon^2_{ij}/2 + \varepsilon^3_{ij}/3 - \varepsilon^4_{ij}/4). \quad (5)$$

Для напряжений 1-го рода имеем три составляющих вектора перемещений в произвольной точке плоскости с нормалью v_i .

$$v_i \varepsilon_{ij} = i n a / \rho v_i C_{im}^{-1} \sigma_{mk} C_{kj}^{-1} \quad (6)$$

Для фиксированного i (6) представляет и обратную запись графика деформаций как функции напряжения, т.е. закон Гука через скорости распространения колебаний.

Если слолярный множитель занести в матрицу напряжений, то (6) может рассматриваться и как аффинное преобразование координат, подтверждая мысль тождественности деформаций и напряжений, но и одновременно представлять разрешающую группу уравнений метода конечных элементов в определении перемещений. Все определяется только масштабами элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новичихин В.А Крылов, Г.С. О теоретической прочности металлов.: Материалы межвуз. конф. по физике и механике прочности и разрушения. – Новокузнецк, 1967.
2. Жданович Г.М., Крылов Г.С. К вопросу теории предельных состояний: Сб. статей. Мн.: Наука и техника, 1974.
3. Крылов Г.С. Некоторые вопросы расчетов на прочность с учетом дискретности строения твердого тела. Мн.: БПИ, 1975.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е. М. Теория поля: изд. 2-ое М.– Л. Гостехиздат, 1942.
5. Ефимов Н.В. Высшая геометрия. М.: Физматгиз, 1961.
6. Грдина В.Ю., Грдина Ю.В. О теоретической прочности металлов: Материалы межвуз. конф. по физике и механике прочности и разрушения. – Новокузнецк, 1967.

УДК 593.3

А. В. Курбачев

ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗОЛЯЦИИ ВОЛН ЩЕЛЬЮ В ТВЕРДОЙ СРЕДЕ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Рассмотрим падение продольной волны на бесконечную по протяженности щель, расположенную вертикально в упругом изотропном пространстве. Исследуем виброизоляцию волн щелью, заполненной различными материалами. Пусть щель толщиной h заполнена жидкостью. Начало ортогональной системы координат OZY расположим на правой границе щели. Ось Y направим вверх, а ось Z вправо (рис. 1). Фронт волны проходит параллельно оси X . Пусть из полупространства I ($z < -h$) на слой жидкости под произвольным углом q_1 падает продольная гармоническая волна. В упругой среде I образуются продольная и поперечная отраженные волны, в жидком

слой II ($-h < z < 0$) – падающая и отраженная продольные волны, а в упругой среде III ($z > 0$) будут уходящие от границы продольная и поперечная волны.

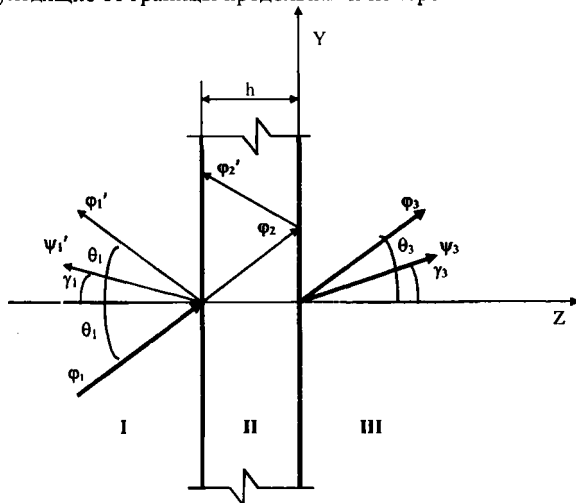


Рис. 1. Прохождение продольной волны через щель в твердой среде

Опуская фактор $\exp j(\omega t - \xi y)$, потенциалы указанных волн, запишем соответственно в виде [2]

$$\begin{aligned} & \varphi_1 \exp\{-j\alpha_1(z+h) - 0,5\eta_1[\alpha_1(z+h) + \xi y]\}, \quad \varphi_1' \exp\{j\alpha_1(z+h) + 0,5\eta_1[\alpha_1(z+h) - \xi y]\}, \\ & \psi_1' \exp\{j\beta(z+h) + 0,5\eta_2[\beta(z+h) - \xi y]\}, \quad \varphi_2 \exp(-j\alpha_2 z), \quad \varphi_2' \exp(j\alpha_2 z), \\ & \varphi_3 \exp\{-j\alpha_1 z - 0,5\eta_1(\alpha_1 z + \xi y)\}, \quad \psi_3 \exp\{-j\beta z - 0,5\eta_2(\beta z + \xi y)\}, \end{aligned}$$

где $j = (-1)^{1/2}$; ω – частота колебаний; t – время; $\xi = k_i \sin\theta_i$, (i – номер среды), $k_i = \omega/c_i$, c_1, c_2 – скорости распространения продольных волн в упругой среде и жидкости, $\alpha_i = k_i \cos\theta_i$, $\beta = \chi \cos\gamma$, $\chi = \omega/b$, b – скорость поперечной волны в твердой среде, θ и γ – углы, образованные нормальными к фронтам продольной и поперечной волн с осью z ; φ_i и φ_i' , – амплитуды падающей и отраженной продольных волн; ψ_i и ψ_i' – амплитуды падающей и отраженной поперечных волн; η_1 и η_2 – коэффициенты потерь продольной и поперечной волн в упругой среде.

Компоненты тензора напряжений определяем по формулам [1]:

$$\sigma_z = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial W}{\partial z} + \lambda \frac{\partial V}{\partial y}, \quad \tau_{yz} = \mu \left(\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y} \right), \quad (2)$$

где λ и μ – постоянные упругости Ляме;

$$W = \frac{\partial \varphi}{\partial z} + \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad V = \frac{\partial \varphi}{\partial y} - \frac{\partial \psi}{\partial z}.$$

W и V – поперечные и продольные смещения точек полупространств; φ и ψ – потенциалы продольной и поперечной волн.

На границах раздела сред нормальные напряжения равны давлению в жидкости, взятому с обратным знаком, касательные напряжения отсутствуют, нормальные смещения твердого тела и жидкости равны.

Воспользовавшись выражениями (1) и (2), получаем граничные условия

$$\begin{aligned} k_1^2 k_3 \mu_1 (\xi^2 - \alpha_1^2) (\varphi_1 + \varphi'_1) + 2k_2^2 k_4 \mu_1 \xi \beta \varphi'_1 &= \lambda_2 (\alpha_2^2 + \xi^2) (\varphi_2 e^{j\alpha_2 h} + \varphi'_2 e^{-j\alpha_2 h}), \\ k_1^2 k_3 \mu_1 \alpha_1 \xi (\varphi_1 - \varphi'_1) + k_2^2 k_4 \mu_1 (\xi^2 - \beta^2) \psi'_1 &= 0, \\ k_1 k_3 \alpha_1 (\varphi_1 - \varphi'_1) + k_2 k_4 \xi \psi'_1 &= \alpha_2 (\varphi_2 e^{j\alpha_2 h} - \varphi'_2 e^{-j\alpha_2 h}), \\ k_1^2 k_3 \mu_1 (\xi^2 - \alpha_1^2) \varphi_3 - 2k_2^2 k_4 \mu_1 \xi \beta \psi_3 &= \lambda_2 (\alpha_2^2 + \xi^2) (\psi_2 + \varphi'_2), \\ 2k_1^2 k_3 \mu_1 \xi \alpha_1 \varphi_3 + k_2^2 k_4 \mu_1 (\xi^2 - \beta^2) \psi_3 &= 0, \\ k_1 k_3 \alpha_1 \varphi_3 + k_2 k_4 \xi \psi_3 &= \alpha_2 (\varphi_2 - \varphi'_2), \end{aligned} \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} k_1 &= 1 - 0,5 j \eta_1, \quad k_2 = 1 - 0,5 j \eta_2, \quad k_3 = \exp(-0,5 \eta_1 \xi y), \\ k_4 &= \exp(-0,5 \eta_2 \xi y), \quad \mu_1 = b^2 \rho_1, \quad \lambda_2 = c_2^2 \rho_2, \end{aligned}$$

ρ_1 и ρ_2 – плотности первой и второй сред.

Решая систему уравнений (3) относительно неизвестных амплитуд, запишем выражения для амплитуд волн в полупространстве III

$$\varphi_3 = f \varphi_1, \quad \psi_3 = -\frac{2b^2 \sin \theta_1 \cos \theta_1 [1 - j(\eta_1 - \eta_2)]}{c_1^2 (r_1 - 1)} e^{-0,5 \Phi(\eta_1 - \eta_2)} \varphi_1, \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} f &= 2a_3 r_2 (r_1 - 1)^2 (a_1 + ja_2) / (a_1^2 + a_2^2), \\ a_1 &= 2a_3 a_4 \cos(\alpha_2 h) - 0,5(a_3^2 - a_4^2) [r_1(\eta_2 - \eta_1) + \eta_1] \sin(\alpha_2 h), \\ a_2 &= (a_3^2 + a_4^2) \sin(\alpha_2 h), \quad a_3 = (\rho_2 / \rho_1) \cos \theta_1, \quad a_4 = [(r_1 - 1)^2 + 2(b/c_1)^2 r_1 \cos \theta_1 r_0] r_2, \\ r_0 &= [(c_1/b)^2 - \sin^2 \theta_1]^{0,5}, \quad r_1 = 2(b/c_1)^2 \sin^2 \theta_1, \quad r_2 = |(c_1/c_2)^2 - \sin^2 \theta_1|^{0,5}. \end{aligned}$$

Снижение колебаний слоем определим как отношение амплитуд поперечных w и продольных u и смещений в среде III при наличии слоя к амплитудам w_0 , u_0 смещений

тех же точек при отсутствии слоя. При $z > z_0 = 2/(\eta_2\beta - \eta_1\alpha_1)$ имеем $\frac{w}{w_0} = \frac{u}{u_0}$. Если и $c_1 < c_2$, $\theta_1 > \theta_0 = \arcsin(c_1/c_2)$ угол θ_2 – комплексный, и продольные волны в слое будут неоднородными.

Зависимость снижения колебаний слоем от угла падения волны при $z = z_0$, приведена на рис. 2.

В случае если $z > z_0$ и $n_1 = \frac{h\omega}{c_1} \leq 1$ получим

$$\frac{w}{w_0} = \frac{u}{u_0} = \frac{(r_1 - 1)^2}{(r_1 - 1)^2 + 2n_1^2 r_1 r_0 \cos\theta_1}. \quad (5)$$

Второе слагаемое знаменателя мало по сравнению с первым, поэтому отношение амплитуд смещений близко к единице. Следовательно, для низких частот ($n_1 \leq 1$) щель, заполненная водой, практически полностью передает падающую на нее продольную волну. С увеличением n_1 эффективность щели несколько повышается.

Рассмотрим щель в твердой среде, заполненную воздухом. Если скорость продольной волны в твердой среде больше скорости звука в воздухе, то вследствие отсутствия критического угла θ_0 пустотная щель полностью изолирует колебания в падающих волнах.

Анализ полученных формул для отношения амплитуд смещений позволяет оценить влияние модуля Юнга E_2 и плотности ρ_2 материала, заполняющего щель, на передачу колебаний. Исследования показали, что на передачу колебаний существенное влияние оказывает не изменение значения E_2 , а отношение плотностей упругой среды и воздуха (ρ_1/ρ_2). Чем больше это отношение, тем щель эффективнее изолирует падающие на нее волны. На рис. 3 приведены значения вибропередачи щели при ее заполнении различными материалами.

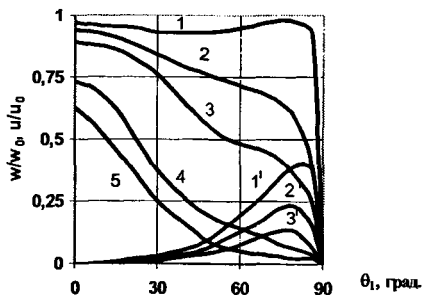


Рис. 2. Зависимость вибропроницаемости жидкого слоя от q_1 при $z=0$: 1, 2, 3, 4, 5 – w/w_0 ; 1', 2', 3' – u/u_0 ; 1, 2, 3 – $n_2=5$; 4, 5 – $n_2=10$; 1', 2', 3' – $n_2=5$; 1, 1' – $n_3=0,5$; 2, 2' – $n_3=1$; 3, 3' – $n_3=1,5$; 4 – $n_3=3$; 5 – $n_3=4$; $\rho_1=1700$ кг/м³; $\rho_2=1000$ кг/м³; $\eta_1=0,1$; $\eta_2=0,2$; $n_1=0,5$.

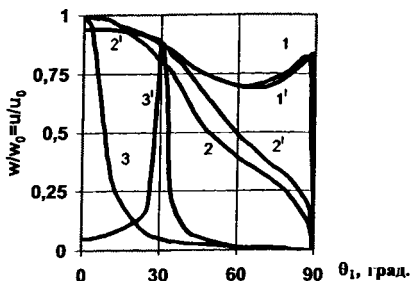


Рис. 3. Зависимость вибропроницаемости воздушной щели от q_1 , при заполнении ее различными материалами и при $z > z_0$; $n_1 = 0,5$; $n_3 = 0,1$; $\rho_1 = 1700 \text{ кг/м}^3$; 1 - $n_2 = 2$; $\rho_2 = 1000 \text{ кг/м}^3$; 1' - $n_2 = 8,94$; $\rho_2 = 1000 \text{ кг/м}^3$; 2 - $n_2 = 8,94$; $\rho_2 = 50 \text{ кг/м}^3$; 2' - $n_2 = 2$; $\rho_2 = 50 \text{ кг/м}^3$; 3 - $n_2 = 55,68$; $\rho_2 = 1,29 \text{ кг/м}^3$; 3' - $n_2 = 2$; $\rho_2 = 1,29 \text{ кг/м}^3$; $\eta_1 = 0,1$; $\eta_2 = 0,2$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах – М.: Наука, 1973. -344с. 2. Заборов В.И. Теория звукоизоляции ограждающих конструкций – М.: Стройиздат, 1969. – 185с.

УДК 539.3

И. А. Миклашевич

ОБ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ УПОРЯДОЧЕННОСТИ СОСТОЯНИЙ ТЕЛА В СЛУЧАЕ СТРУКТУРНОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь

1. Определение относительной термодинамической и статистической упорядоченности состояний тел имеет существенное значение для рассмотрения направления процессов, протекающих в системах. Это связано с самоорганизацией структур, направлением процессов релаксации и диссипации энергии. Процессы самоорганизации при пластическом деформировании, как известно, проявляются, в том числе, и в форме образования полос сдвига (полосы Людерса-Чернова [1, 2], эффект Портевена-Лешателье [2–4]). Образование структур возможно при выполнении определённых термодинамических требований, как правило, связанных с изменением энтропии процесса [5]. Однако отсутствие единого механизма образования полос скольжения требует более подробного рассмотрения изменения энтропии в процессе пластического деформирования [6]. Определение энтропии деформирования твёрдого тела, как величины, связанной исключительно с тепловыми процессами в теле, не совсем корректно

[7]. Это связано с тем, что возможно осуществить процессы, для которых $\Delta S_T = 0$, а $\Delta A \neq 0$, где S_T – тепловая часть энтропии, A – работа по деформированию тела. Рассмотрим изменение энтропии при простейшем сдвиге.

2. Для простоты будем предполагать процессы деформирования изотермическими. Поскольку энтропия величина аддитивная, полная энтропия тела может быть представлена как сумма нескольких вкладов:

$$S = S_T + S_b + S_d,$$

где $S_b + S_d = S_c$ – конфигурационная часть энтропии, определяемая S_b – структурной энтропией (индекс b=band, полоса) и S_d – энтропией, связанной с дислокациями. Будем рассматривать только изменение структурной энтропии в адиабатических процессах. Примером такого процесса может быть высокоскоростное деформирование при $\dot{\epsilon} \gg v_c$, где $\dot{\epsilon}$ – скорость пластического деформирования, v_c – характерная скорость установления равновесия (теплопередача, диссипация энергии). Поскольку рассматривается высокоскоростное деформирование, изменением плотности дислокаций можно пренебречь (генерация дислокаций недостаточно эффективна). В этом случае изменение энтропии материала связано только с S_b .

Будем считать, что зёрненная структура материала представляет совокупность ячеек определённой формы, например правильные шестиугольники (рис. 1). Форма ячейки не принципиальна для рассмотрения. Процесс деформирования материала может быть связан с изменением формы ячейки, вызванной (осуществляемой) движением дислокации [7] и с исчезновением межзёрненных границ. Исчезновение межзёрненных границ соответствует объединению ячеек в полосу сдвига.

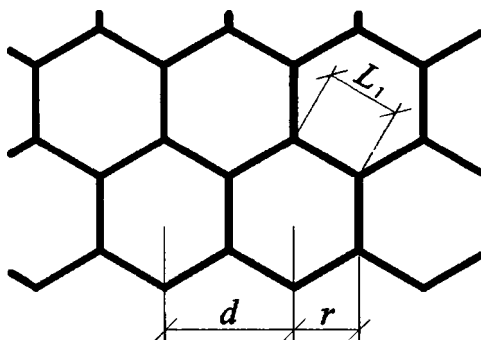


Рис. 1 Идеализированная структура материала

Пусть $\gamma > 0$ – удельная энергия границы ячейки. Тогда общая энергия границы ячейки

$$\Gamma = \gamma l,$$

где l – длина границы. Для правильного шестиугольника длина i -й стороны

$$l_i = \frac{2r}{\sqrt{3}},$$

где r – радиус вписанной окружности, $d = 2r$ есть расстояние между центрами ячеек. Тогда при образовании полосы шириной в 3 ячейки (исчезновении двух границ смежных ячеек) имеем

$$\Delta\Gamma = \Gamma_2 - \Gamma_1 = \left(\gamma \frac{8r}{\sqrt{3}} - \gamma \frac{12r}{\sqrt{3}} \right) N < 0,$$

где N есть общее число ячеек, принимающих участие в образовании полосы скольжения. С учётом изотермичности процесса и определения температуры

$$T = \left(\frac{\partial E}{\partial S} \right)_V$$

имеем

$$\frac{\partial E}{\partial S} = \text{const} > 0, \Rightarrow \Delta S = \frac{4}{\sqrt{3}} N \gamma r < 0$$

3. На основании уравнения (1) можно сделать вывод, что образование полос скольжения соответствует уменьшению энтропии. Это равносильно тому, что наиболее термодинамически упорядоченным (равновесным) с точки зрения структуры является состояние максимальной деформации. Этот вывод достаточно нетривиален, но можно привести некоторые аргументы в обоснование этой позиции. Так, в последнее время признается, что турбулентное течение жидкости и газа является более упорядоченным, чем ламинарное [8]. Кроме того, исходя из общих физических принципов известно, что для выведения системы из состояния равновесия, ей необходимо сообщить энергию. В материаловедении широко применяется процедура отжига (сообщение термической энергии) дефектной структуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Малыгин Г.А. Самоорганизация дислокаций и локализация скольжения в пластически деформируемых кристаллах. *ФТТ*, т. 37, 1995, в. 1, С. 3-42. 2. Малыгин Г.А. Процессы самоорганизации дислокаций и пластичность кристаллов. *УФН*, т. 169, 1999, № 9, С. 979-1010. 3. Лебёдкин М.А., Дунин-Барковский Л.Р. Динамический механизм температурной зависимости эффекта Портевена-Ле Шателье. *Физика твёрдого тела*, т.40, 1998, №3, С. 487-492. 4. Hдhner P., Tippelt B., Holste C. On the dislocation dynamics of persistent slip bands in cyclically deformed f.c.c. metals. *Acta Materialia*, v. 46, 1998, №14, P. 5073-5084. 5. Николис Г., Пригожин И. *Самоорганизация в неравновесных*

системах. М.: Мир, 1979. 6. Криштал М.М. Размерный эффект и макроструктурные аспекты пластической деформации при прерывистой текучести Al-Mg сплавов. *Физика металлов и металловедение*, т. 81, 1996, в. 1, С. 146-155. 7. Sherwood D.J., Hamilton C.H. The neighbour-switching mechanism of superplastic deformation: the constitutive relationship and deformation-enhanced grain growth. *Philosophical Magazine A*, v.70, 1994, № 1, p. 109-143. 8. Климонтович Ю.Л. *Статистическая теория открытых систем*. М.: Янус, 1995.

УДК 539.3

И. А. Миклашевич

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТРЕЩИНЫ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

1. Макроскопическое распространение трещины имеет ряд особенностей, происхождение и природа которых не вполне ясна до настоящего времени. Эти особенности связаны с отклонением трещины, как реального физического объекта, от модели идеальной трещины, даваемой классической теорией упругости и пластичности (модели типа Баренблатта – Дагдейла). К таким особенностям следует отнести достаточно уверенно установленный фрактальный характер процесса разрушения [1, 2], эффекты перколяции [3, 4], стохастизацию траектории [5, 6]. Объяснение этих эффектов требует более глубокой разработки физических оснований процесса разрушения и распространения трещины. Кроме того, проблемы устойчивого распространения трещины представляют интерес в связи с необходимостью создания композиционных материалов с заданными эксплуатационными свойствами.

2. На основании аналогии между распространением луча в оптически неоднородной среде и распространением трещины в неоднородном материале ранее было получено уравнение траектории трещины как уравнение экстремали, удовлетворяющее уравнению Эйлера, для упругой энергии разрушения [7, 8]. Для двумерного случая оно имеет вид

$$y'' - y f_1(x, y) + f_2(x, y)(1 + y'^2)^2 = 0, \quad (1)$$

где введены обозначения

$$f_1(x, y) = \frac{\partial \ln Q(x, y)}{\partial x}, \quad f_2(x, y) = \frac{\partial \ln Q(x, y)}{\partial y}, \quad Q = (\sigma_j n_j \mu_j)^{-1}, \quad y = \frac{dy}{dx},$$

$P_i = \sigma_j n_j$ – компоненты тензора напряжений на площадках, положение которых совпадает с поверхностью трещины, n_j – направляющий косинус j -й внешней нормали, μ_j –

компоненты вектора перемещений точек поверхности трещины. В неоднородной среде уравнение траектории записано в виде $y = f(x)$.

Уравнение (1) имеет существенно нелинейный характер. В зависимости от типа неоднородности решения уравнения допускают, в том числе, существование режимов стохастизации [6]. Дополнительно исследуем устойчивость решений уравнения.

3. Поскольку нас интересует стационарная форма траектории трещины, уравнение (1) не содержит времени и его можно рассматривать как автономное уравнение относительно y . Введём дополнительную переменную $z = y'$. Тогда уравнение (1) переписывается в виде системы уравнений 1-го порядка.

Тогда уравнение (1) переписывается в виде системы уравнений 1-го порядка:

$$\begin{cases} y' = z, \\ z' = zf_1 - f_2(1+z^2)^2 \end{cases} \quad (2)$$

Орбиты уравнения (2) в фазовой плоскости даются выражением

$$\frac{dz}{dy} = \frac{zf_1 - f_2(1+z^2)^2}{z} = f_1 - f_2 \frac{(1+z^2)^2}{z}, \quad (3)$$

Решение уравнения (3) существенно зависит от вида неоднородности среды. Эта зависимость существует поскольку напряженно – деформированное состояние есть функция механических характеристик среды, в которой распространяется трещина, $\sigma_y = \sigma_y(s_{yij})$. Если считать, что свойства среды слабо изменяются вдоль траектории распространения трещины (неоднородность материала невелика), то при анализе можно пренебречь членами, порядка выше второго. В этом случае имеем

$$\frac{dz}{dy} = f_1 - f_2 \left(\frac{1}{z} + 4 + 6z \right) \quad (4)$$

Прямое аналитическое интегрирование уравнения (4) не приводит к обозримым результатам. Однако, соответствующим подбором неоднородности (параметры f_1, f_2), мы имеем возможность регулировать тип критических точек в фазовой плоскости. С точки зрения технологии, более логичным представляется регулировка параметра f_2 (неоднородности вдоль оси Y). Так, при конструировании композиционного материала таким образом, что

$$f_2 = z^2 / (1 + 4z + 6z^2) \quad (5)$$

имеем положительный аттрактор, критической точкой является $z = 0$, трещина должна стягиваться до магистральной трещины, стохастизация невозможна.

Строго говоря, заключение о возможности линейного анализа критических точек нелинейной системы (2) требует дополнительного анализа. Так, например, для выполнения условия существования стабильных и нестабильных многообразий необходимо [9] удовлетворение дополнительных условий

$$\lim_{|z| \rightarrow 0} \frac{\left\| f_2 \left(\frac{1}{z} + 4 + 6z \right) \right\|}{\|z\|} = 0,$$

что налагает дополнительные условия $f_2 = o(z^2)$ Рассмотрим якобиан системы (1). При рассмотрении также ограничиваемся членами порядка не выше z^2

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ f_1 - f_2(4 + 6z) & 0 \end{pmatrix}$$

Собственные значения системы (6) могут быть определены вблизи критической точки

$$\lambda_{1,2} = \pm \sqrt{f_1 - 4f_2} \quad (7)$$

и тип возникающих критических точек зависит от соотношения f_1, f_2 . Если f_2 выбирается в соответствии с (5), то тип критических точек зависит от выбора величины f_1 . В зависимости от знака это может быть любой из возможных типов критической точки.

3. Проведенный анализ показывает, что при распространении трещины в неоднородных материалах на характер траектории трещины влияет и закон изменения свойств материала вдоль и поперёк траектории распространения трещины. Это принципиально позволяет в значительной степени регулировать характеристики траектории путём создания композитов детерминированной структуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. A.S. Balankin, «Title», Enging. Fract. Mech. 1997v. 57, (2/3), p. 135-203.
2. G.P. Cherepanov, A.S. Balankin, V.S. Ivanova, Fractal Fracture Mechanics – a Review, Enging. Fract. Mech., 1995, v. 51, (6), p. 997 – 1033.
3. I.M. Sokolov Dimensions and other geometric critical exponents in percolation theory. Uspekhi Fiz. Nauk, 15, (2), 221-248, (1986).
4. А.С. Баланкин. Фрактальная механика деформируемых сред и топология разрушения твердых тел. ДАН России, 322, (5), 869-874, (1992).
5. I. Miklashevich, A.V. Chigarev. Stochastisation of crack growth direction in heterogenous media. 8 International conference of fracture, Ukraine 93. Collection of Abstracts, Part 1., p.227.
6. I.A. Miklashevich, L.N. Bialyatskaja, A.V. Chigarev. Nonlinear effects at the crack propagation. Proceedings of IX Annual Seminar NPCS'2000 "Nonlinear phenomena in complex systems: Fractals, Chaos, Phase Transitions, Self-Organization", Minsk, 2000, p.206-214.
7. А.В. Чигарев, И.А. Миклашевич Расчёт траектории трещины в композиционном материале в линейном приближении. Доклады АН Беларуси, № 2, т. 39, 1995, с. 114-118.
8. И.А. Миклашевич. Траектория трещины в неоднородных средах при плоском нагружении. Механика композиционных материалов и конструкций, т. 6, № 3, 2000, с. 408-418.
9. F. Verhulst Nonlinear Differential Equations and Dynamical Systems. Springer Verlag, Berlin, 1990.

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ТОРЦОВО-ПРЕССОВОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ

*Белорусский государственный университет транспорта
Гомель, Беларусь*

Технологический способ деформирования древесины дискретным элементом в цилиндрическую оболочку открыл новые возможности для ее широкого использования в узлах трения различных машин и механизмов. Совершенствование старых технологий изготовления подшипников скольжения на основе древесины утратило актуальность в связи с изменившимися экономическими условиями [1,2]. В тоже время многолетние исследования позволили устранить технологический разрыв с точки зрения ресурсо- и энергосбережения и добиться существенных результатов в технологии деформирования древесины [3].

Разработанная новая технологическая схема позволяет получать качественные подшипники скольжения самосмазывающиеся (ПСС) на основе древесины, обладающие небольшой себестоимостью изготовления и высокой эффективностью при эксплуатации. Снижение себестоимости изготовления подшипников достигается за счет использования местного сырья и уменьшения трудоемкости изготовления путем оптимизации технологических процессов изготовления ПСС, а повышенная работоспособность и стабильные эксплуатационные свойства – за счет конструкционных параметров подшипников и применения термостойких, антифрикционных модификаторов для древесины.

Оптимизация технологии изготовления данного класса ПСС была проведена путем установления закономерностей между отдельными технологическими подсистемами, производимыми ими процессами и конструкционными параметрами ПСС. Опишем более подробно технологические процессы получения древесного вкладыша для ПСС, которые представлены на общей технологической схеме (рис. 1).

– **Торцово-прессовое деформирование древесины.** Впервые для этой операции применен дискретный элемент. Конструкция дискретного элемента рассчитана так, чтобы усилия, прикладываемые по внешней поверхности древесной карточки были распределены равномерно и прерывисто. В этом случае изменение формы прямоугольной карточки в цилиндрическую оболочку происходит без изменения сплошности природного материала в нормальных условиях при температуре окружающей среды и влажности древесины 10–15%. Для различных типоразмеров ПСС установлена зависимость максимальной толщины карточки в зависимости от высоты дискретного элемента [4].

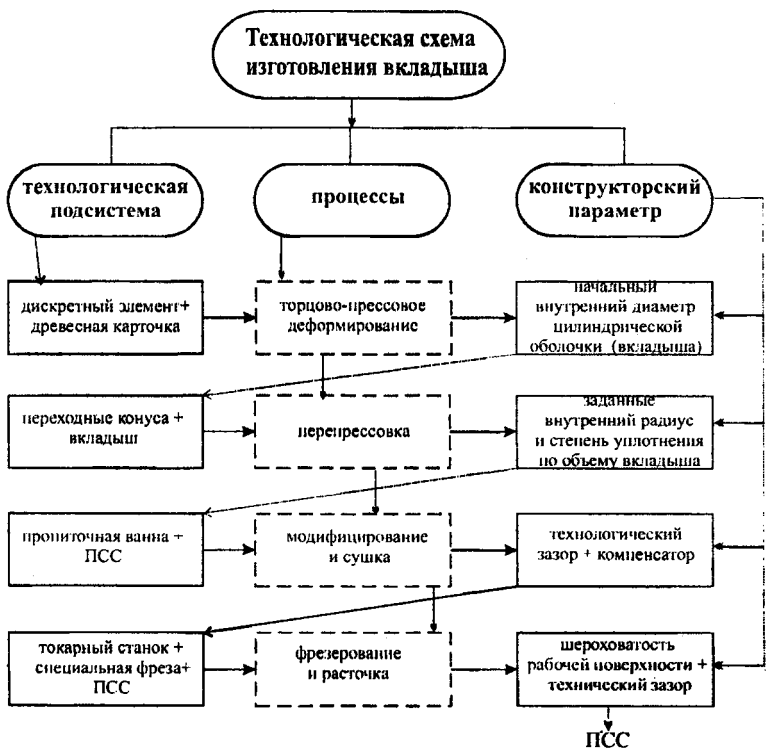


Рис. 1. Общая технологическая схема получения деревянного вкладыша для ПСС.

– **Перепрессовка** через конус применяется для получения более высокой степени уплотнения по радиусу вкладыша. Для каждого типоразмера ПСС рассчитаны оригинальные конструкции конусов с соответствующими переходными углами. Коноусность рассчитывается исходя из заданной степени уплотнения древесины, и в общем случае принимается по формуле

$$K = \frac{D-d}{l} = 2tg\alpha$$

где D – начальный внешний диаметр втулки, мм; d – заданный диаметр втулки, мм; l – длина переходного конуса, мм; α – угол переходного конуса.

– **Модифицирование с одновременной сушкой** проводится для придания антифрикционных и самосмазывающих свойств деревянному вкладышу [5]. Данная операция позволяет уменьшить влажность древесины до 15% с одновременным уве-

личением прочности древесины в 1–5 раза и сокращением размеров вкладыша по внешнему и внутреннему диаметрам на 3–5%.

– **Технологический зазор** в стыке сторон карточки, появляющийся после завершения предыдущей операции, необходимо устранять конструкторским компенсатором (КК). Размеры КК рассчитываются исходя из начальной влажности древесины и типоразмера ПСС. Материалом для КК служит сталь или древесина. Применение данного компенсатора позволяет устранить изменение линейных размеров вкладыша при его изготовлении, а при эксплуатации – придать стабильность размерам и улучшить теплоотвод от узла трения.

– **Механическая обработка** проводится путем расточки древесной втулки по внутреннему диаметру и боковой торцовой поверхности специальной фрезой. Данная операция позволяет сформировать заданную рабочую поверхность вкладыша с оптимальной шероховатостью и одновременно получить необходимый технический зазор (таблица 1). Для ПСС установлена эмпирическая зависимость

$$y = (0,004 \dots 0,006)d.$$

Таблица 1

Расчетные значения предельных величин изменения зазора в зависимости от влагопоглощения и шероховатости контактных поверхностей

| Диаметр подшипника d , мм | Толщина древесной втулки t , мм | Разбухание (усушка) по толщине (вдоль волокон) втулки U_{II} | Разбухание по диаметру при полном влагопоглощении $2U_{II}$ | Высота микронеровностей по диаметру $S_1 = 2h_{\text{мкм}}$, мкм | Зазор при изменении влажности на 30 % с учетом шероховатости | Изменение диаметра при влагопоглощении втулкой $W = 15\%$ | Зазор с учетом шероховатости при изменении влажности на 15 % |
|-----------------------------|-----------------------------------|--|---|---|--|---|--|
| 10 – 20 | 7 | 0,007 – 0,021 | 0,014 – 0,042 | 40 (0,04 мм) | 0,044 – 0,082 | 0,007 – 0,021 | 0,047 – 0,061 |
| 25 – 30 | 10 | 0,010 – 0,030 | 0,02 – 0,06 | | 0,060 – 0,100 | 0,010 – 0,030 | 0,050 – 0,070 |
| 35 – 40 | 15 | 0,015 – 0,045 | 0,03 – 0,09 | | 0,070 – 0,130 | 0,015 – 0,045 | 0,045 – 0,085 |
| 45 – 50 | 20 | 0,020 – 0,060 | 0,04 – 0,12 | | 0,080 – 0,160 | 0,020 – 0,060 | 0,060 – 0,100 |
| 55 – 60 | 25 | 0,025 – 0,075 | 0,05 – 0,14 | | 0,090 – 0,190 | 0,025 – 0,075 | 0,065 – 0,115 |
| 65 – 75 | 30 | 0,030 – 0,090 | 0,06 – 0,18 | | 0,100 – 0,220 | 0,030 – 0,090 | 0,070 – 0,130 |
| 90 – 95 | 35 | 0,035 – 0,105 | 0,07 – 0,21 | | 0,110 – 0,250 | 0,035 – 0,105 | 0,075 – 0,145 |
| 80, 85, 100 | 40 | 0,040 – 0,120 | 0,08 – 0,24 | | 0,120 – 0,280 | 0,040 – 0,120 | 0,080 – 0,160 |

Заключение. Таким образом, структура технологического процесса торцово-прессового деформирования древесины совместно с сопутствующими технологическими подсистемами и учетом конструкторских параметров ориентирована на формирование необходимого комплекса служебных свойств ПСС и снижения затрат на их производство.

ЛИТЕРАТУРА

1. Врублевская В.И., Невзорова А.Б., Врублевский В.Б. Износосотойкие самосмазывающиеся антифрикционные материалы и узлы трения из них. – Гомель: БелГУТ, 2000. – 324 с. 2. Машкин Н. А., Хрулев В.М., Дорофеев Н.С. Модифицированная древесина и ее применение. – Кемерово: Кемеровское книжное издательство, 1988. – 120 с. 3. Невзорова А.Б., Врублевская В.И. Ресурсобогащающая технология изготовления самосвязывающихся подшипников скольжения//Ресурсооберегающие и экологически чистые технологии. Ч.2. – Гродно, 1995. С. 110–119. 4. Шамаев В.А. Модифицирование древесины. – М.: Экология – 1991. – 128 с.

УДК 539.3

Э.Д. Подлозный

О РАСПРОСТРАНЕНИИ ПРОДОЛЬНЫХ ВОЛН ВДОЛЬ СТЕРЖНЯ ПРИ ПЕНЕТРАЦИИ ЕГО В УПРУГУЮ СРЕДУ – Ч.1

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Проведенные автором и др. экспериментально- теоретические исследования позволили установить, что при воздействии одночастотных колебаний вибратора на верхний конец стержня имеет место отрыв нижнего конца его от упругой среды, с последующими ударами о среду, вибрационный (колебательный) режим переходит в виброударный. При этом необходимо найти не только характеристики виброударных режимов (перемещения, скорости, время), но и рассмотреть распространение волн напряжений (деформаций) вдоль стержня при ударе его об упругую среду. Такого вида задача о периодических движениях упругого стержня с ограничителем была решена в институте машиноведения АН СССР применительно к рабочему органу ультразвуковой машины [1].

Изучение волнового процесса вдоль стержня позволит в дальнейшем при применении датчиков деформаций или ускорений (прямая связь), использованных автором в экспериментах, и актуаторов (обратная связь) – устойчив регулируемых управляющее воздействие, прийти к созданию управляемых конструкций [2].

Рассматриваемая задача имеет практическое приложение, например, в строительной индустрии, при определении напряженно-деформированного состояния при возведении свай, погружаемых в грунты вибропогружателями или дизель-молотами [3] и др.

Расчетная схема задачи о пенетрации стержня в упругую среду изображена на рис.1, где 1 – стержень, 2 – одночастотный вибратор, 3 – присоединенная масса упругой среды на линейной пружине.

При постановке задачи принимаются следующие допущения:

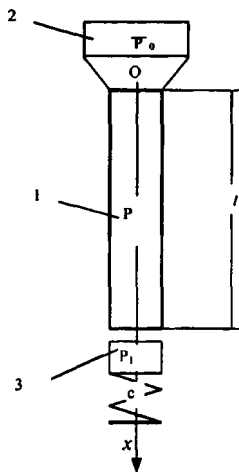


Рис. 1. Расчетная схема задачи о пенетрации стержня в упругую среду

1. Стержень рассматривается как круглый, сплошной и однородный.

2. Силами трения по боковой поверхности стержня, которые существенны при нахождении характеристик виброударного процесса, пренебрегают в виду их малого воздействия в течение времени распространения волн при ударе.

3. Влиянием предыдущего удара на последующий пренебрегаем в виду быстрого затухания колебаний в стержне во время отрыва его от массы.

4. Начальные характеристики движения в установленном режиме процесса определяются заранее, например методом точечных отображений плоскости в плоскость, с применением видоизмененной диаграммы Кенигса-Лемерея, развитым автором для неавтономных систем [4].

5. Для упрощения задачи пренебрегаем влиянием силы тяжести стержня и изменением возмущающей силы вибратора за время распространения ударной волны в прямом и обратном направлениях, т. е. вибратор отождествляем с инерционной массой.

6. Упругую среду моделируем присоединенной массой, приведенной к нижнему концу стержня, на линейной пружине.

Движение стержня при вышеприведенных допущениях можно характеризовать уравнением продольных колебаний стержня

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{1}{a^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

где $u(x, t)$ – продольное смещение сечения стержня, a – скорость распространения продольной волны в стержне.

Граничные условия имеют вид: на верхнем конце стержня ($x = 0$)

$$\left[EF \frac{\partial u}{\partial x} + \bar{P}_0 - \frac{P_0}{g} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right]_{x=0} = 0 \quad (2)$$

на нижнем конце стержня ($x = l$)

$$\left[EF \frac{\partial u}{\partial x} + (cu + \frac{P_1}{g} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}) I(t) \right]_{x=l} = 0 \quad (3)$$

Здесь $P_0 = P_0 + Q_0 \cos(\omega t - \varphi_0^{(1)})$ – осредненное до const значение возмущающей силы (см. п. 5), EF – продольная жесткость стержня, P_0 – вес вибратора, P_1 – вес

присоединенной массы, c – коэффициент жесткости среды; $I(t)=0$ при $t<0$, $I(t)=0$ при $t>0$ (функция Хевисайда).

Полагая, что в начальный момент времени происходит мгновенное изменение скорости нижнего конца стержня при неупругом ударе, начальные условия запишем в виде:

$$u|_{t=0} = 0 \quad (4)$$

$$\left. \frac{\partial u}{\partial t} \right|_{t=0} = v_0 + (v_0^{(1)} - v_0)I(x-l) \quad (5)$$

$$[0 \leq x \leq l],$$

где $v_0^{(1)}$ – скорость нижнего конца стержня в конце неупругого удара, v_0 – скорость стержня в момент контакта с присоединенной массой на линейной пружине, $I(x-l) = 0$ при $0 \leq x < l$ и $I(x-l) = 1$ при $x = l$.

Решение уравнения (1) находим методом Даламбера в классе обобщенных функций

$$u = f_1(x-at) + f_2(x+at) \quad (6)$$

где $f_1(x-at)$ и $f_2(x+at)$ – функции, определяемые из начальных и граничных условий с помощью “продолжающего” уравнения, которые представляют соответственно две волны: отраженную от массы вибратора и прямую, распространяющуюся от удара нижнего конца стержня о присоединенную массу на линейной пружине.

При этом заметим, что впервые на необходимость использования для случая удара обобщенного решения (в смысле Соболева) указал В. Колоушек (1965) [5], хотя применительно к задачам строительной механики простейшими обобщенными функциями (прерыватели Герсеванова) пользовался еще Н.М. Герсеванов (1933)[6].

Покажем, каким образом, можно получить решение данной задачи. Подставив (6) в граничные условия (2) и (3) и обозначив $at = z$ получим уравнение для определения и продолжения функций $f_1(z)$ и $f_2(z)$:

для верхнего конца стержня ($x = 0$)

$$f_1''(-z) - k_1 f_1'(-z) = f_2''(z) + k_1 f_2'(z) + k_2 \quad (7)$$

для нижнего конца стержня ($x = l$)

$$f_2''(l+z) - k_3 f_2'(l+z) - k_4 f_2(l+z) = f_1''(l-z) + k_3 f_1'(l-z) + k_4 f_1(l-z) \quad (8)$$

Здесь

$$k_1 = PP_0^{-1}l^{-1}, \quad k_2 = \dot{P}_0(EF)^{-1}k_1, \quad k_3 = PP_0^{-1}l^{-1}, \quad k_4 = c(EF)^{-1}k_3,$$

где P – собственный вес, l – длина стержня.

Воспользуемся начальными условиями задачи.

Из выражения (4) и (5) следует, что

$$u|_{t=0} = f_1(x) + f_2(x) = 0 \quad (9)$$

$$\left. \frac{\partial u}{\partial t} \right|_{t=0} = -af_1'(x) + af_2'(x) = v_0 + (v_0^{(1)} - v_0)I(x-l) \quad (10)$$

$$[0 \leq x \leq l]$$

В результате интегрирования выражений (9) и (10) и после введения вместо x переменной z получим

$$f_1(z) = -v_0(2a)^{-1}z - (v_0^{(1)} - v_0)(2a)^{-1} \left[\frac{z-l+|z-l|}{2} \right], \quad (11)$$

$$f_2(z) = v_0(2a)^{-1}z + (v_0^{(1)} - v_0)(2a)^{-1} \left[\frac{z-l+|z-l|}{2} \right]. \quad (12)$$

$$[0 \leq z \leq l]$$

И следовательно величина напряжений $\sigma(x,t)$ будет

$$\sigma(x,t) = E \frac{\partial u}{\partial x} = -E(v_0^{(1)} - v_0)(2a)^{-1} [I(x-at-l) - I(x+at-l)] \quad (13)$$

при $at \leq x \leq l$ и $0 \leq x \leq l-at$.

Ниже приводится табл. 1 для вычисления напряжений в характерных сечениях стержня $0, l/2$ и l при $at = l, 3/2l$ и $2l$.

Таблица 1

| at \ x | x = 0 | x = l/2 | x = l |
|-----------|------------------|------------------|------------------|
| at = l | $E(F_1' + F_2')$ | EF_1' | EF_1' |
| at = 3/2l | $E(F_1' + F_2')$ | $E(F_1' + F_2')$ | EF_3' |
| at = 2l | $E(F_1' + F_2')$ | $E(F_3' + F_2')$ | $E(F_2' + F_3')$ |

Величины напряжений $\sigma(x,t)$, подсчитанные по формуле (13), значительно меньше экспериментально определенных. Поэтому необходимо далее определить функции $f_1(z)$ и $f_2(z)$ в интервале $[l, 2l]$ и найти $\sigma(x,t)$. Данные функции были найдены и приводятся в следующей статье ч. 2 данного сборника.

ЛИТЕРАТУРА

1. Асташев В.К. Нелинейная динамика ультразвуковых технологических машин. Автореф. дис. ...ученой степени докт. физ.-мат. наук, М.: Ин-т машиноведения им. А.А. Благонравова, 2000. – 34 с. 2. Абовский Н.П. Управляемые конструкции: Учеб. пособие/ Крас. Гаса. – Красноярск, 1998. – 433 с. 3. Баркан Д.Д. Виброметод в строительстве. М.: Госстройиздат, 1959. 4. Подлозный Э.Д. Проблемы пенетрации в сплошные среды/VIII Белорусская математическая конференция//Тезисы докладов. Мн.: – ч.3 С. 131; 5. Колоушек В. Динамика строительных конструкций. Стройиздат, М.: – 1965; 6. Герсегонов Н.М. Функциональные прерыватели в строительной механике и их примененис к расчету ленточных фундаментов// Сб. ВИОС, № 1. – Госстройиздат. – 1933.

УДК 539.3

Э.Д. Подлозный

О РАСПРОСТРАНЕНИИ ПРОДОЛЬНЫХ ВОЛН ВДОЛЬ СТЕРЖНЯ ПРИ ПЕНЕТРАЦИИ ЕГО В УПРУГУЮ СРЕДУ – Ч. 2

Белорусская государственная политехническая академия

Минск, Беларусь

Работа является непосредственным продолжением одноименной статьи – ч.1 [7] данного сборника. Здесь покажем, каким образом можно находить “продолжающее” волновое уравнение (1) при граничных (2) и (3), и начальных (4) и (5) условиях методом Даламбера (6) в интервалах распространения волн $[-l, 0]$ и $[l, 2l]$, и, следовательно, найти напряжения $\sigma(x, t)$ на последующих этапах распространения ударной волны. Во избежание возможной путаницы мы продолжим в данной работе нумерацию формул и литературы, которая была принята в ч.1.

Сначала из уравнения (7) найдем $f_1(z)$ в интервале $[-l, 0]$. Подставив в правую данного уравнения значения функции $f_2(z)$ в интервале $[0, l]$ и значения ее производных, получим дифференциальное уравнение с постоянными коэффициентами

$$f_1''(z) - k_1 f_1'(z) = g(z) \quad (14)$$
$$[-l \leq z \leq 0],$$

где

$$g(z) = (v_0^{(1)} - v_0)(2a)^{-1} \delta(z-l) - k_1 (v_0^{(1)} - v_0)(2a)^{-1} I(z-l) + k_1 v_0 (2a)^{-1} + k_2 \quad (15)$$

Здесь $\delta(z-l)$ – m – функция Дирака.

Следуя И.М. Гельфанду и Г.Е. Шилову [8] сначала найдем фундаментальное решение $\mu(z)$ дифференциального уравнения (14) с правой частью $\delta(z)$

$$f_1''(z) - k_1 f_1'(z) = \delta(z) \quad (16)$$

$\mu(z)$ имеет вид

$$\mu(z) = \begin{cases} A(z) = \alpha_1 + \alpha_2 e^{k_1 z}; & z < 0 \\ B(z) = \beta_1 + \beta_2 e^{k_2 z}; & z > 0 \end{cases} \quad (17)$$

Постоянные α_1, α_2 и β_1, β_2 подбираем так, чтобы удовлетворялось уравнение (16), т.е.

$$A(0) = B(0); \quad A'(0) - B'(0) = 1$$

Полагая

$$\alpha_1 - \beta_1 = \gamma_1 \text{ и } \alpha_2 - \beta_2 = \gamma_2,$$

получаем для γ_1 и γ_2 систему уравнений

$$\begin{cases} \gamma_1 f_{11}(0) - \gamma_2 f_{12}(0) = 0; \\ \gamma_1 f_{11}'(0) - \gamma_2 f_{12}'(0) = 1, \end{cases} \quad (19)$$

где $f_{11}(0)$ и $f_{12}(0)$ – фундаментальные решения уравнения (16) при $z=0$.

Подставив в уравнения (19) значения $f_{11}(0)$, $f_{12}(0)$ и их производных, затем решив их, найдем

$$\gamma_1 = -k_1^{-1}, \gamma_2 = k_2^{-1} \quad (20)$$

Полагая $\alpha_1 = 1$ и $\alpha_2 = 1$, определим

$$\beta_1 = 1 + k_1^{-1}, \beta_2 = 1 - k_2^{-1} \quad (21)$$

Следовательно, фундаментальное решение $\mu(z)$ уравнения (16) можно представить в виде

$$\mu(z) = (1 + e^{k_1 z})I(-z) + [(1 + k_1^{-1}) + (1 - k_2^{-1})e^{k_2 z}] \widetilde{I}(z) \quad (22)$$

где

$$\widetilde{I}(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } z = 0 \\ 1 & \text{при } z > 0. \end{cases}$$

Частное решение $\widetilde{f}_1(z)$ уравнения (14) запишем в виде свертки $\widetilde{f}_1(z) = \mu(z-y) * g(y)$ где $g(y)$ – финитная функция, * означает свертку функций $\mu(z-y)$ и $g(y)$.

Действительно, $g(y)$ определена в интервале $[0, l]$. Тогда по теореме об аппроксимации (Л. Шварц, 1965)[9] данную функцию можно заменить вне данного интервала достаточно гладкой кривой, стремящейся к нулю на концах интервала $[-\infty, +\infty]$.

Итак,

$$\overline{f_1(z)} = \int_{-\infty}^z \mu(z-y)g(y)dy = \int_{-\infty}^z \left\{ (1+e^{k_1(z-y)})I(y-z) + [(1+k_1^{-1})+(1-k_2^{-1})e^{k_1(z-y)}] \times \right. \\ \left. \times I(z-y) \right\} \left[-(\nu_0^{(1)} - \nu_0)(2a)^{-1} \delta(y-l) + (\nu_0^{(1)} - \nu_0)(2a)^{-1} k_1 I(y-l) + \right. \\ \left. + (\nu_0(2a)^{-1} k_1 + k_2) \right] dy,$$

где $I(z-y) = 0$ при $z \leq y$ и $I(z-y) = 1$ при $z > y$.

При вычислении интегралов воспользуемся формулой (Л. Шварц, 1961)[8]

$$\int_{-\infty}^{\infty} I(x)\Phi'(x)dx = -\int_{-\infty}^{\infty} I'(x)\Phi(x)dx,$$

где $\Phi(x)$ – финитная функция.

Общее решение неоднородного уравнения (14) выглядит следующим образом

$$f_1(z) = C_1 + C_2 e^{k_1 z} + (\nu_0(2a)^{-1} + k_1 k_2)(z + k_1^{-1}) + \\ + (\nu_0^{(1)} - \nu_0)(2ak_1)^{-1} \left[(1 + I(l-z))(1 + e^{k_1(z-l)}) - (2 + k_1 + k_1^2 l) \right] \\ [-l \leq z \leq 0] \quad (24)$$

Теперь найдем $f_1'(z)$

$$f_1'(z) = C_2 k_1 e^{k_1 z} + (\nu_0(2a)^{-1} + k_2 k_1^{-1}) + \\ + (\nu_0^{(1)} - \nu_0)(2ak_1)^{-1} \left(-\delta(l-z)(1 + e^{k_1(z-l)}) [1 + I(l-z)] k_1 e^{k_1(z-l)} \right) \\ [-l \leq z \leq 0] \quad (25)$$

Постоянные C_1 и C_2 найдем из условий $f_1(-l) = 0, f_1'(-l) = 0$ (рис. 2), которые физически выражают отсутствие отраженной волны на верхнем конце стержня до подхода прямой ударной волны.

Окончательно C_1 и C_2 имеет вид

$$C_1 = (\nu_0(2a)^{-1} + k_2 k_1^{-1})l + (\nu_0^{(1)} - \nu_0)(2a)^{-1} (1 + k_1 l), \quad (26)$$

$$C_2 = -k_1^{-1} e^{k_1 l} \left[(\nu_0(2a)^{-1} + k_2 k_1^{-1}) + (\nu_0^{(1)} - \nu_0)(a)^{-1} e^{-2k_1 l} \right] \quad (27)$$

Для определения $f_2(z)$ в интервале $[l, 2l]$ воспользуемся “продолжающим” уравнением (8). Подставив в правую часть уравнения (8) значения функции $f_1(z)$ и ее производных в интервале $[0, l]$, получим уравнение для $f_2(z)$ в интервале $[l, 2l]$.

Уравнение (8) преобразуется к виду

$$f_2''(z) - k_3 f_2'(z) - k_4 f_2(z) = -(\nu_0^{(1)} - \nu_0)(2a_1)^{-1} \left\{ \delta(z-l) + k_3 I(z-l) + \right. \\ \left. + k_4 \left(\frac{z-l + |z-l|}{2} \right) - \nu_0(2a)^{-1} (k_4 z + k_3) \right\}. \quad (28)$$

Аналогично предыдущему, фундаментальное решение $\mu(z)$ уравнения

$$f_2''(z) - k_3 f_2'(z) - k_4 f_2(z) = \delta(z) \quad (29)$$

представим соотношением

$$\mu(z) = (e^{s_1 z} + e^{s_2 z})I(-z) + \left[(1 - (s_1 - s_2)^{-1})e^{s_1 z} + (1 - (s_2 - s_1)^{-1})e^{s_2 z} \right] \overline{I(z)} \quad (30)$$

Определив частное решение $\overline{f_2(z)}$ уравнения (28) в виде свертки, общее решение $F_1 = f_2(z)$ запишем следующим образом:

$$\begin{aligned} F_1 = f_2(z) = & C_3 e^{s_1 z} + C_4 e^{s_2 z} - (v_0^{(1)} - v_0)(2a)^{-1} \times \\ & \times \left[(e^{s_1(z-l)} - e^{s_2(z-l)})I(l-z)(s_1 - s_2)^{-1} + e^{s_1(z-l)} + e^{s_2(z-l)} \right] - \\ & - (v_0^{(1)} - v_0)(2a)^{-1} k_3 (s_1^{-1} e^{s_1(z-l)} + s_2^{-1} e^{s_2(z-l)}) - v_0 k_4 (2a)^{-1} \times \\ & \times \left[2z(s_1 s_2)^{-1} (s_1 + s_2 + 1) + (1 + 2s_1)(s_1 s_2^2)^{-1} + (1 + 2s_2)(s_2 s_1^2)^{-1} \right] - \\ & - v_0 k_3 (2a)^{-1} (2s_1 + 2s_2 + 1)(s_1 s_2)^{-1}, \end{aligned} \quad (31)$$

$$[l \leq z \leq 2l]$$

$$s_1 = \frac{k_3}{2} + \sqrt{\frac{k_3^2}{4} + k_4}; \quad (32)$$

$$s_2 = \frac{k_3}{2} - \sqrt{\frac{k_3^2}{4} + k_4} \quad (33)$$

Аналогичным образом найдем F_1' и постоянные C_3 и C_4 из условий непрерывности функций и их производных на концах интервала (см. рис. 2), т.е.

$$f_2(l-0) = f_2(l+0) \quad \text{и} \quad f_2'(l-0) = f_2'(l+0)$$

$$\begin{aligned} C_3 = e^{-s_1 l} \{ & (v_0^{(1)} - v_0)(2a)^{-1} (s_1 - s_2)^{-1} [(s_1 + s_2)(s_1 - k_3)s_1^{-1} - 2(s_2 - k_3)] + \\ & + v_0 k_4 (2a s_1)^{-1} [(1 + 2s_2)(s_1 s_2)^{-1} - 2l(s_1 + s_2 + 1)(s_1 - s_2)^{-1}] - \\ & - v_0 (2a)^{-1} (s_1 - s_2)^{-1} [k_3(2s_1 + 2s_2 + 1)s_1^{-1} + l s_2] + v_0^{(1)} (2a)^{-1} (s_1 - s_2)^{-1} \} \end{aligned} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} C_4 = e^{-s_2 l} \{ & - (v_0^{(1)} - v_0)(2a)^{-1} (s_1 - s_2)^{-1} [(s_1 + s_2)(s_2 - k_3)s_2^{-1} - 2(s_1 - k_3)] + \\ & + v_0 k_4 (2a s_2)^{-1} [(1 + 2s_1)(s_1 s_2)^{-1} + 2l(s_1 + s_2 + 1)(s_1 - s_2)^{-1}] + \\ & + v_0 (2a(s_1 - s_2))^{-1} [k_3(2s_1 + 2s_2 + 1)s_2^{-1} + l s_1] - v_0^{(1)} (2a(s_1 - s_2))^{-1} \}. \end{aligned} \quad (35)$$

Определив $f_1(z)$ в интервале $[-l, 0]$ и $f_2(z)$ в интервале $[l, 2l]$ запишем в окончательном виде выражения для $\sigma_1(x, t)$ и $\sigma_2(x, t)$

$$\begin{aligned} \sigma_1(x, t) = E \{ & C_2 k_1 e^{k_1(x-at)} + (v_0(2a)^{-1} + k_2 k_1^{-1}) + (v_0'^{-1} - v_0) \times \\ & \times (2a k_1)^{-1} [-\delta(l-x+at)(1 + e^{k_1(x-at-l)})] + \\ & + (v_0'^{-1} - v_0)(2a_1)^{-1} [(1 + I(l-x+at))e^{k_1(x-at-l)}] \}. \end{aligned} \quad (36)$$

$$at - l \leq x \leq at$$

$$\begin{aligned} \sigma_2(x, t) = E \{ & C_3 s_1 e^{s_1(x+at)} + C_4 s_2 e^{s_2(x+at)} - (v_0'^{-1} - v_0)(2a)^{-1} \times \\ & \times [(s_2 e^{s_2(x+at-l)} - s_1 e^{s_1(x+at-l)}) I(l-x-at)(s_1 - s_2)^{-1} + \\ & + (e^{s_2(x+at-l)} - e^{s_1(x+at-l)}) \times \\ & \times (-(s_1 - s_2)^{-1} \delta(l-x-at) + s_2 e^{s_2(x+at-l)} + s_1 e^{s_1(x+at-l)})] - \\ & - (v_0'^{-1} - v_0)(2a_1)^{-1} k_3 (e^{s_2(x+at-l)} + e^{s_1(x+at-l)}) - v_0 k_4 (s_1 + s_2 + 1)(a s_1 s_2)^{-1} \}. \end{aligned} \quad (37)$$

$$l - at \leq x \leq 2l - at$$

Для получения более полной картины напряжений на фронте первой отраженной волны от массы вибратора необходимо найти формулы $f_1(z)$ в интервале $[-l, -2l]$ и $f_2(z)$ в интервале $[-2l, 3l]$. Данные выкладки и результаты вычислений будут приведены в следующей статье.

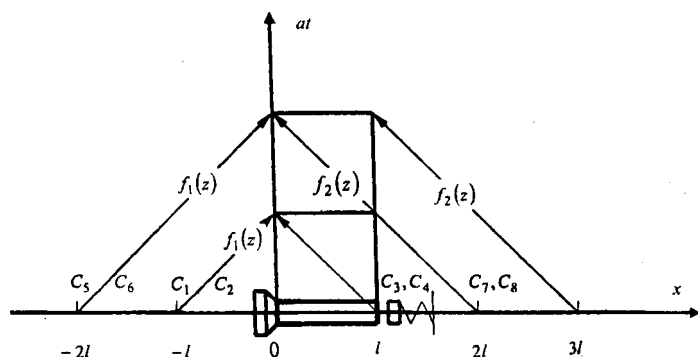


Рис. 2. Схема вычисления функций $f_1(z)$ и $f_2(z)$ (на концах интервалов показаны постоянные $C_1, C_2; C_3, C_4; C_5, C_6; C_7, C_8$)

ЛИТЕРАТУРА

7. Подлозный Э.Д. О распространении продольных волн вдоль стержня при пенетрации его в упругую среду—ч.1//Машиностроение.— Мн., 2001.— Вып.17.— С. 347–351. 8. Гельфанд И.М. Шилов Г.Е. Обобщенные функции и действия над ними. Вып. 1, Физматгизд., М., 1959. 9. Шварц Л. Математические методы для физических наук. М., изд-во “Мир”, 1965.

УДК 621.891.8

А.Ф. Присевок

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ВЫБОРА ВОДОРОДОСТОЙКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Термодинамический анализ адсорбции и абсорбции водорода металлами, а также результаты многочисленных экспериментальных и теоретических исследований систем “металл–водород” [1–15 и др.] свидетельствуют о том, что водород растворяется в окта- и тетрапорах кристаллической решетки металлов в ионизированном состоянии, накапливается в порах и других дефектах кристаллической решетки в молекулярной форме, вступает в химическое взаимодействие с различными элементами и фазами, имеющимися в металлах и сплавах, а также адсорбируется внутри металла на поверхностях микрополостей, пор, микротрещин и т.п. и сегрегирует на несовершенствах кристаллической решетки.

В зависимости от условий насыщения водородом и природы сплавов будут преобладать те или иные формы состояния водорода в металлах, между которыми существует динамическое равновесие. Различные формы существования водорода в стали подтверждаются опытами фракционного определения водорода в металлах [4–7]. С целью предотвращения диспергирования металлов, работающих в водородосодержащих средах, предпринимаются попытки создания композиционных материалов, пассивирующих к адсорбции и сорбции водорода, не разрушающихся при длительной эксплуатации и обладающих улучшенными техническими характеристиками.

Известно [2, 5–7], что взаимодействие водорода с металлами (не образующими гидридов) зависит от ряда факторов, наиболее важными из которых являются:

- химическое сродство металлов с водородом;
- радиусы междоузлий для различных металлов;
- радиус электронной оболочки водорода.

В то же время распределение водорода в металлах и особенно в сплавах осуществляется неравномерно и, главным образом, в поверхностных слоях, а наибольшая концентрация его, в зависимости от градиента температуры, отмечена по границам зерен стали, по границам раздела карбид-матрица, в порах, во внутренних трещинах, около включений, что приводит к возникновению поля упругих напряжений. При высокотемпературном (600–800 °С) наводороживании дефекты кристаллической решетки не играют решающей роли в процессах адсорбции; определяющими факторами здесь являются электронная структура металлов и способность элементов и других фаз образовывать химические соединения с водородом. При сравнительно невысоких температурах (180–300 °С), наоборот, дефекты кристаллической решетки металла играют значительную роль при наводороживании. Так, насыщение деформированного (при трении) металла водородом приводит к его сегрегации в дефектных местах кристаллической решетки, а количество растворенного водорода во много раз превышает его растворимость в междоузлиях кристаллической решетки. При кинетическом анализе состояние адсорбционных процессов определяется температурой (Т), давлением (Р) и количеством (концентрацией) водорода, растворенного в единице объема металла (S). В общем виде эта зависимость имеет вид:

$$\Phi(S, P, T) = 0.$$

При термодинамическом анализе можно не учитывать поверхностных явлений и рассматривать адсорбцию водорода в объеме металла, а концентрацию его выражать в мольных долях, в атомных по массе или объемных процентах, кубических сантиметрах на 100 г металла, миллионных долях (ppm) и т.д. Для наиболее распространенной системы железо-водород соотношение различных единиц таково: 1 ppm = 0,0001% (по массе) = 0,00553% (ат.) = 0,0873% (объемн.) = 1,11 см³/100 г.

1. Закономерности распределения водорода в металлах и сплавах

Теплота процесса растворения водорода в металлах складывается из теплоты диссоциации водорода и собственно теплоты растворения атомов водорода в металле. Диссоциация водорода сопровождается затратой энергии и величина ее всегда отрицательна. Теплота растворения атомов водорода, характеризующая энергию связи с атомами металла, всегда положительна.

При эндотермической адсорбции водорода, когда при непосредственном взаимодействии металла с молекулярным водородом гидриды не образуются, термины “адсорбция”, “растворение” и “окклюзия” могут только в первом приближении характеризовать равновесное насыщение металла водородом. Адсорбция водорода в металлах VIA–VIIIА и IB групп протекает с общим суммарным отрицательным эффектом (эндотермическое растворение), поэтому количество абсорбированного водорода с повыше-

нием температуры возрастает (рис. 1). Для этих металлов зависимость растворимости водорода от температуры при постоянном давлении водорода 0,1 МПа имеет вид:

$$S = K_S \exp(-\Delta H/2 RT),$$

где: S – количество растворенного водорода; K_S – константа; ΔH – теплота абсорбции, кДж/моль; R – газовая постоянная; T – абсолютная температура, К.

Обычно температурная зависимость растворимости водорода в металлах представляется уравнением:

$$\lg S = (-\Delta H/4,576T) + const.$$

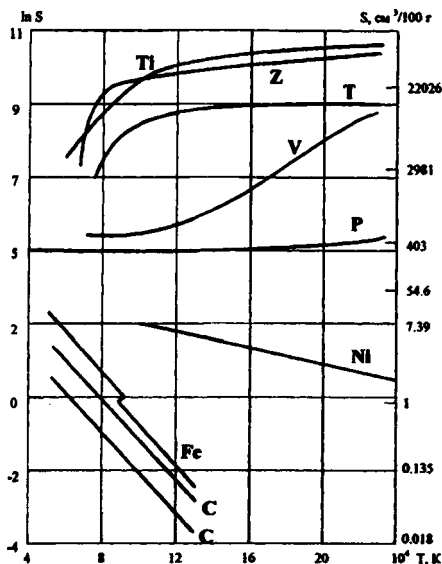


Рис. 1. Зависимость абсорбции водорода от обратной температуры $1/T$, К для ряда металлов

Графическая зависимость $\lg S - 1/T$ выражается прямой линией, по наклону которой можно найти теплоту абсорбции (ΔH). Зависимость между водородом в порах, его концентрацией и температурой, приведенная на рис. 2, свидетельствует о том, что с повышением температуры и уменьшением концентрации водорода давление в порах снижается. На основании анализа термодинамического состояния системы металл - водород можно судить о возможности образования химических соединений или твердых растворов в конкретных металлах и сплавах.

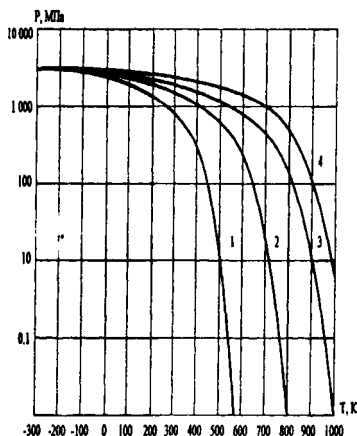


Рис. 2. Зависимость давления водорода в порах от температуры для стали с различным содержанием водорода (в мл/100г – цифры у кривых).

2. Химическая степень сродства металлов с водородом — основной путь создания водородостойких металлов и сплавов

Растворимость водорода в сталях и сплавах используют для оценки их применимости в эксплуатации при различных температурах и давлениях. Так, на термодинамическое равновесие системы железо – легирующий элемент (ЛЭ) – водород влияет не только парциальное давление растворенного газа, но и концентрация легирующего элемента. Поэтому в сравниваемых условиях (P, T) активность водорода, растворенного в железе, равна активности водорода, растворенного в сплаве, т.е. $[a_n]_{Fe} = [a_n]_{Fe - ЛЭ}$. Обычно адсорбционные процессы сопровождаются экзо- или эндотермической теплотой, которая затрачивается или выделяется при насыщении водородом металлов. В то же время процесс растворения водорода в металлах складывается из целого ряда элементарных физико-химических процессов, каждый из которых имеет определенную энергию активации. При этом адсорбционные процессы на поверхности металла и адсорбционные на внутренних микроповерхностях протекают с выделением тепла. Истинное растворение водорода в стали происходит с поглощением тепла. Химическое взаимодействие водорода с металлами сопровождается выделением тепла; ассоциация в дефектах кристаллической решетки происходит с мгновенным (порядка 10^{-3} с) выделением большого количества тепла (~ 435 кДж/моль) благодаря освобождению энергии связи. При низких, комнатных и повышенных температурах скорость диффузии водорода в металлах на несколько порядков выше, чем для других примесей внедрения. Так в α -железе при 20°C коэффициент диффузии водорода в

10^{12} раз больше коэффициента диффузии углерода и азота [2, 7]. При низких температурах процесс диффузии представляет собой зонное движение; при комнатных – термически активированные (некогерентные) процессы, при повышенных температурах (до 200°C) – термически активированные надбарьерные переходы; при температурах более высоких (свыше 400°C) – жидкостную диффузию [7]. Первые три механизма весьма важны при выборе и создании водородостойких материалов (металлов и сплавов), а тепловые процессы, протекающие при взаимодействии водорода с металлами и сплавами, были положены в основу выбора и создания водородостойких покрытий. Известно, что по характеру взаимодействия с водородом металлы разделены на несколько групп.

В качестве исследуемой была принята третья группа металлов, включающая Fe, Cr, Ni, Cu, Hg, Co, Al, Pt, которые растворяют водород с образованием истинных растворов (эндотермические окклюдеры) и тем самым оказывают влияние на его подвижность за счет формирования кристаллической решетки, фазового состава, структуры и т.д. Установлено, что легирование сталей и сплавов хромом (Cr) оказывает замедляющее действие на диффузионную подвижность водорода. Наиболее заметно это действие проявляется при введении Cr до 12–14 %. Резкое снижение диффузионной подвижности водорода отмечено при введении в сплавы кремния (Si), твердые растворы которого неоднородны, атомы кремния образуют в сплаве (металле) комплексы, не растворяющие водород, а, следовательно, и непроницаемые для него. Особый интерес представляют сведения о диффузии водорода в никеле (Ni). Так, в сплавах, содержащих ~ 37 % Ni, коэффициент диффузии водорода очень незначителен. В то же время следует отметить, что только по параметрам диффузии отдельных металлов нельзя судить об их влиянии на диффузионную подвижность водорода в сплавах. Необходимо учитывать влияние легирующих элементов (ЛЭ) на фазовый состав, структуру, образование новых фаз и т.д.

Выполненный анализ и сравнительная оценка эффективности получения водородостойких покрытий на рабочих поверхностях металла позволили отдать предпочтение порошковым самофлюсующимся сплавам на никелевой основе: Ni-Cr-B-Si. Эти сплавы применяют для нанесения защитных покрытий на детали, работающие при интенсивном износе и одновременном воздействии агрессивной среды, высоких температур и давлений.

Для третьей группы металлов, являющихся основой самофлюсующихся сплавов (Ni свыше 70% и Cr до 20%) характерно увеличение растворимости водорода с повышением температуры, причем изменение концентрации водорода в металле пропорционально корню квадратному из давления, что свидетельствует об образовании “истинных растворов”. Кинетика образования таких растворов определяется тремя различными процессами: поверхностной адсорбцией (физической или активированной), растворением водорода в прилегающих к поверхности областях и диффузией водорода

да в глубь металла. Общая скорость процесса определяется скоростью наиболее медленного из вышеупомянутых процессов. Также известно [5 – 7], что растворимость водорода в металлах может определяться химическими факторами подобно процессу химической сорбции. Это подтверждается тем, что эндотермические поглотители, которые растворяют водород в количестве менее 0,1 % (ат), располагаются между экзотермическими аккладерами, которые способны поглотить водород в количестве, более 0,1 % (ат), и элементами не абсорбирующими водород вообще или очень мало (W, Au, Zn, Ta, In, Tl, Hg). Отсюда следует, что взаимодействие водорода с металлами (которые не образуют гидридов) зависит от ряда факторов, наиболее важными из которых являются химическое сродство элементов с водородом, радиусы междоузлия для различных металлов и радиус электронной оболочки водорода.

3. Влияние концентрации легирующих элементов (п. э.) на термодинамическое равновесие системы Fe – л.э. – водород

Представления о количественных закономерностях и процессе диффузии водорода в металлах являются основой для большинства сплавов, в которых не происходят процессы гидридообразования. Введение легирующих элементов приводит к изменению внутреннего строения металла, его структуры и фазового состава, состояния поверхности, дефектности и т.д. Все эти изменения могут существенно влиять на диффузионную подвижность водорода в металле. На поверхности входа и выхода водорода из металла могут образовываться слои, так же существенно влияющие на диффузионные процессы. Элементы внедрения снижают подвижность водорода, так как образуют соединения в металле менее проницаемые для водорода. Занимая междоузлия в кристаллической решетке они препятствуют перемещению атомов водорода. Так, Арчаковым Ю. И. [7] отмечено, что легирование металлов хромом в пределах 12–14% (что характерно для самофлюсующихся сплавов) замедляет диффузионную подвижность водорода, а повышенные эксплуатационные свойства самофлюсующихся сплавов обусловлены не только присутствием в них хрома и никеля, но также бора и кремния. Флюсующие элементы В и Si, вводимые в каждую частицу порошка в определенном количестве (2–4 % и 3–5 % соответственно) диффузионным путем требуемой толщины и фазового состава, обеспечивают: самофлюсуемость, высокую технологичность порошка и повышенную прочность сцепления с упрочняемой поверхностью детали. Бор и кремний образуют с никелем легкоплавкие эвтектики с температурой плавления 950–1080 °С, восстанавливают окисные пленки на поверхности частиц порошка и подложки с образованием борсиликатных шлаков, снижают выгорание легирующих элементов, образуют бориды никеля Ni_3B и хрома CrB и Cr_5B_3 , имеющих высокую твердость и пластичность по сравнению с карбидами.

Теоретические и экспериментальные исследования особенностей формирования микроструктуры и фазового состава водородостойких покрытий из самофлюсую-

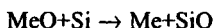
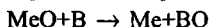
щихся сплавов и композиций на их основе [15], а также систематизация и анализ основных порошковых сплавов отечественного и зарубежного производства показали, что самофлюсующиеся сплавы, содержащие бор и кремний, по значимости представляют собой важную самостоятельную группу сплавов. Они многофазны и состоят из матричного α и γ – твердого раствора, боридов и карбидов.

Результаты исследований состава и структуры покрытий из наиболее распространенных самофлюсующихся сплавов на никелевой основе [12–15] позволяют сделать следующие обобщения:

1. Формирование защитного покрытия с заданным структурным состоянием определяется оптимальным температурно-временным воздействием, превышение которого активизирует диффузионные процессы и шлакообразование, резко снижает процентное содержание легирующих элементов, главным образом бора и кремния.

2. Самофлюсующиеся многокомпонентные Ni-Cr-B-Si-C сплавы являют собой композицию элементов, позволяющую формировать покрытия следующего комплекса свойств:

– способность сплава в процессе термической обработки к восстановлению окисных пленок, образовавшихся на подложке и на частицах порошка, и образованию монолитного покрытия. Это свойство достигается за счет наличия в составе сплава флюсующих элементов бора и кремния, которые по реакции замещения



раскисляют окисные пленки и выходят на поверхность в виде боросиликатного шлака.

– относительно невысокая температура плавления (1100–1150°C) обеспечивается за счет образования в сплаве сложной легкоплавкой эвтектики Ni-B-Si, преимущественно γ - Ni + Ni₃B.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по триботехнике / Под общ. ред. М. Хебды, А.В.Чичинадзе. В 3-х т. Т. 1. Теоретические основы. – М.: Машиностроение, 1989. – 400 с. 2. Водород в металлах. Прикладные аспекты. / Под ред. Г. Алефельда, И.Фелькля. Пер. с англ. В 2-х томах. – М.: Мир, 1981. – Т. 2. – 430 с. 3. Достижения науки о коррозии и технология защиты от нее. Коррозионное растрескивание металлов / Под ред. М.Фонтана, Р.Стзала: Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1985. – 448 с. 4. Гаркунов Д. М. Триботехника. – М.: Машиностроение. 1985. – 424 с. 5. Водород в металлах. Основные свойства. Т.1 / Под ред. Г.Алефельда, И.Фелькля. Пер. с англ. В 2-х томах. – М.: Мир. 1981. – Т. 1. – 475 с. 6. Гельд П.В., Рябов Р.А., Мохрачева Л.П. Водород и физические свойства металлов и сплавов. – М.: Наука, 1985. – 232 с. 7. Арчаков Ю.И. Водородная коррозия стали / М.: Металлургия, 1985. – 192 с. 8. Дас Аджай Кумар. Разработка технологии нанесения газотермических покрытий для защиты конструкционных сталей от воздействия

водородных сред. Диссерт. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. – Мн., 1988, – 235 с.

9. Присевок А. Ф., Овчинников Л. С., Могилин В. И. Автоматизированная оценка пористости напыленных защитных покрытий // Механизация и автоматизация производства. – 1988 – № 9. – С. 13–14.

10. Присевок А. Ф., Кураш В. В., Спиридонов Н. В. Биохимический путь выделения водорода при получении продуктов микробиологического производства // Долговечность трущихся деталей машин. Вып. 4. – М.: Машиностроение, 1990. – С. 269–274.

11. Присевок А. Ф., Кураш В. В., Спиридонов Н. В. Исследование механизма водородного изнашивания деталей узлов трения технологического оборудования производства микробиологического синтеза // Долговечность трущихся деталей машин. Вып. 5. – М.: Машиностроение, 1990. – С. 216–224.

12. Шаповалов В. И. Влияние водорода на структуру и свойства железоуглеродистых сталей и сплавов. – М.: Металлургия. 1982. – 230 с.

13. Кураш В. В. Технологическое обеспечение формирования эксплуатационных свойств машин производств микробиологического синтеза // Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. Мн., 1991. – 235с.

14. Prisevok A. F., Beliaev G. Ya. Kipnis I. Yu. Timofeev A. V. Mechanism of Metal and Alloy Wearing in Hydrogen – Containing Media. Int. J. Hydrogen Energy. Printed in Great Britain. 1996. – Vol. 21, № 11/12, P. 1005–1008.

15. Присевок А. Ф. Технология формирования газотермических водородостойких покрытий. Научное издание. – Мн.: ВУЗ – ЮНИТИ БГПА, 1998. – 214 с.

УДК 621.791.92

Т. К. Романова, А. Б. Митрофанова, Д. Л. Кожуро

УСТАЛОСТНАЯ ПРОЧНОСТЬ ДЕТАЛЕЙ, ВОССТАНОВЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ НАПЛАВКОЙ ПОРОШКОВ ИЗ БЫСТРОРЕЖУЩИХ СТАЛЕЙ

*Белорусский государственный аграрный технический университет
Минск, Беларусь*

Основная причина разрушения деталей, работающих в условиях циклического нагружения – усталость металла. Усталостное разрушение начинается с поверхностного слоя, от физико-механических свойств которого зависит в значительной степени предел выносливости. Образовавшиеся в покрытиях при электромагнитной наплавке (ЭМН), электромагнитной наплавке с поверхностно-пластическим деформированием (ЭМН с ППД) и ЭМН с ППД и трехкратным отпускком металлургические дефекты в виде пор, трещин, остаточных напряжений растяжения и другие, а также при последующей механической обработке покрытий царапины, риски, мелкие трещины, шлифовальные прижоги резко снижают усталостную прочность. Эти дефекты, являясь в процессе работы детали концентраторами напряжений, образуют очаги

зарождения усталостной трещины, которая, разрастаясь, приводит к износу детали [1].

Исследования структуры и фазового состава гетерогенных покрытий из порошков быстрорежущих сталей, полученных ЭМН, ЭМН с ППД и ЭМН с ППД и трехкратным отпуском показывают, что они имеют высокую прочность, плотность, однородность, износостойкость, наличие фаз с особыми свойствами. Отсюда следует предположить, что основные эксплуатационные характеристики покрытий могут удовлетворять условиям работы на ответственных деталях, работающих при циклических нагрузках в условиях трения и изнашивания. Поэтому в работе проводились исследования усталостной прочности наплавленных ЭМН, ЭМН с ППД и ЭМН с ППД и трехкратным отпуском поверхностей. При этом исследовалось влияние на усталостную прочность наплавленных поверхностей только метода наплавки и химического состава порошка.

Исследования проводились стандартным методом с построением известной зависимости Велера в координатах $\sigma - \lg N$, при нагружении в условиях изгиба с вращением консольно закрепленного образца на машине типа У-20М. Критерием выхода из строя являлось разрушение образца под действием знакопеременной нагрузки с постоянной амплитудой.

Образцами служили цилиндрические заготовки из нормализованной стали 45, имеющие соотношение $l/d=15$, где $l = 150$ мм – длина и $d = 10$ мм – диаметр. Образцы с покрытиями порошками Р6М5, Р6М5Ф3 и Р6М5К5, сформированными после ЭМН, ЭМН с ППД и ЭМН с ППД и трехкратным отпуском обрабатывались абразивным шлифованием и магнитно-абразивной обработкой, обеспечивая шероховатость поверхности $Ra = 0,6...0,8$ мкм. Как наплавка исследуемых порошков, так и механическая обработка полученных покрытий производились на оптимальных режимах.

Анализ полученных результатов испытаний показывает, что при циклическом нагружении образцов покрытия имеют различную способность к сопротивлению усталостному разрушению. Это может быть объяснено неодинаковой чувствительностью материалов покрытий к дислокационному скольжению, т.е. к процессам, влияющим на усталостное разрушение.

Установлено, что усталостная прочность наплавленных поверхностей порошками Р6М5К5, Р6М5Ф3, Р6М5 выше эталона (сталь 45, 54...56 HRC) соответственно в 1,40; 1,35; 1,20 раза. Обусловлено это тем, что ЭМН с ППД и трехкратным отпуском формирует в системе покрытие-основа остаточные напряжения сжатия, увеличивает зону термического влияния, приводит к распаду остаточный аустенит и превращает его в мартенсит. Кроме того, происходит выделение дисперсных карбидов и интерметаллидов, блокирующих сдвиги по плоскости скольжения. Это в конечном итоге обеспечивает повышение поверхностной прочности, особенно проявляющейся в покрытиях со структурой: мартенсит, легированные дисперсные карбиды и интерметаллиды.

Кроме того, ЭМН с ППД и трехкратным отпуском уменьшает пористость покрытия, что также повышает усталостную прочность наплавленных поверхностей.

Изучение характера излома наплавленных образцов показывает, что трещины усталости зарождаются как на поверхности образцов, так и в их глубине, т.е. в покрытии и зоне его сплавления с основой. Очаг зарождения трещины зависит от качества покрытия. В покрытиях, полученных ЭМН с ППД, трещины усталости зарождаются, как правило, в зоне сплавления и распространяются в сторону основы. Для изломов характерно непостоянство в их месторасположении по длине образцов, что подтверждает определяющее влияние концентраторов напряжений на усталостную прочность, как показано и в работе [2].

Таким образом, проведенные исследования показывают, что для повышения усталостной прочности наплавленных поверхностей деталей машин необходимо производить ЭМН с ППД и трехкратным отпуском порошком Р6М5К5.

ЛИТЕРАТУРА

1. Витязь П.А., Ивашко В.С., Ильющенко А.Ф. и др. Теория и практика нанесения защитных покрытий. – М.: Беларуская навука, 1998. – 586 с. 2. Кожуро Л.М., Хейфиц М.Л. Управление устойчивостью технологической системы в процессах комбинированной термомеханической обработки//Инженерно-физический журнал. 1995. Т.68, № 4. – С. 654–659.

УДК 621.833.01

А.Т Скойбеда, А.М. Даньков

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ ПЕРЕДАЧ С ОСТАВНЫМИ ЗУБЧАТЫМИ КОЛЕСАМИ, ЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИМИ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ КОЛЕСАМИ ВНУТРЕННЕГО ЗАЦЕПЛЕНИЯ

*Белорусская государственная политехническая академия
Могилевский государственный технический университет
Минск, Беларусь*

Передачи с составными зубчатыми колесами предназначены для изменения передаточного отношения в процессе функционирования передаточного механизма и образуются парой составных колес, взаимодействующих с промежуточными колесами, в данном случае, внутреннего зацепления. Конструкция составных зубчатых колес и основы теории их взаимодействия с цельными колесами описаны в [1]. Размеры передач с составными зубчатыми колесами определяются прежде всего размерами самих составных колес, а уже затем конструкцией передачи, от выбора которой во многом

зависят размеры промежуточных зубчатых колес. Минимальный диаметр составного зубчатого колеса, как правило, равен диаметру зубчатого колеса – заготовки для изготовления зубчатых секторов, который определяется из расчета на контактную выносливость по ГОСТ 21354. Полученное значение диаметра корректируется с учетом определяемого из расчета на выносливость при изгибе модуля m зацепления и зависящего от конструкции зубчатого сектора числа зубьев колеса – заготовки. Максимальный начальный диаметр составного зубчатого колеса, определяющий величину диапазона регулирования передаточного отношения, ограничивается необходимостью удовлетворять основному условию работоспособности подобной передачи, заключающемуся в обеспечении непрерывности процесса передачи движения при максимальном вылете зубчатых секторов. Реализация этого условия достигается в результате решения задачи синтеза составного зубчатого колеса, состоящей в том, чтобы для данного сопряженного с составным цельного зубчатого колеса при заданных модуле зацепления и количестве образующих составное зубчатое колесо секторов с определенным числом зубьев установить максимально возможный вылет указанных секторов относительно оси вращения. Указанное решение представляет собой алгоритм, позволяющий по вышеуказанным исходным данным определить величину диапазона регулирования передаточного отношения передачи, образованной составным и цельным зубчатыми колесами [2, 3]. Алгоритм разработан на основе анализа геометрических условий взаимодействия зубьев секторов, являющихся частью составного зубчатого колеса, при которых обеспечивается требуемое значение коэффициента ϵ_s торцового перекрытия зубчатых секторов, представляющего собой отношение угла φ_1 поворота вала составного зубчатого колеса к угловому шагу секторов (рис. 1)

$$\epsilon_s = i_s \times \varphi_1 / 2 \times \pi, \quad (1)$$

где i_s – число образующих составное зубчатое колесо секторов (обычно i_s для двухпочтовых составных колес принимается четным из ряда 6...12).

При увеличении вылета e зубчатых секторов уменьшается коэффициент их торцового перекрытия ϵ_s , а в крайнем случае угол β поворота зубчатого сектора, соответствующий входу первого зуба сектора в зацепление и выходу последнего из зацепления с зубьями цельного зубчатого колеса, становится меньше углового шага секторов [3].

В соответствии с рис. 1а угол между одноименными вершинами первого и последнего зубьев определяется по формуле:

$$\angle COE = \delta + \epsilon = (z_u + 1) * 2p / z_1, \quad (2)$$

где z_u – число зубьев сектора, z_1 – число зубьев колеса-заготовки.

В предварительных расчетах, как было отмечено выше, числом зубьев сектора задаются в пределах от 3 до 8.

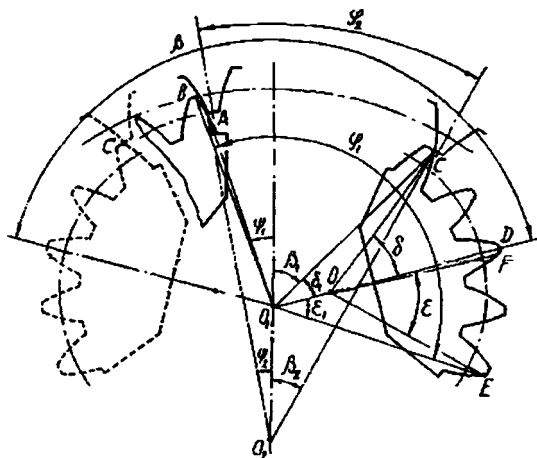


Рис. 1 Взаимодействие зубьев секторов с зубьями промежуточного зубчатого колеса внутреннего зацепления ($OO_1 = e$; $O_1O_2 = a$; $OC = r$)

Угол $\angle DOF$, соответствующий половине толщины зуба на цилиндре вершин, определяется из зависимости:

$$\angle DOF = \pi / 2z_1 + \text{inv } \alpha - \text{inv} (\arccos (r_{b1} / r_{a1})), \quad (3)$$

где r_{b1} — радиус основной окружности зубчатого колеса-заготовки, определяемый по формуле $r_{b1} = r_1 \times \cos \alpha = d_1 \times \cos \alpha / 2$, r_{a1} — радиус окружности выступов зубчатого колеса-заготовки, α — угол главного профиля исходного контура.

Угол ϵ равен:

$$\epsilon = \angle DOE = \angle COE / 2 + \angle DOF = (z_u - 1) \times \pi / z_1 + \pi / 2 r z_1 + \text{inv } \alpha - \text{inv} (\arccos (r_{b1} / r_{a1})) = (2 \times z_u - 1) \times \pi / 2 \times z_1 + \text{inv } \alpha - \text{inv} (\arccos r_{b1} / r_{a1}). \quad (4)$$

Угол между осью симметрии зубчатого сектора и радиусом вершин его крайнего зуба δ определим из выражения:

$$\delta = \angle COD = \angle COE / 2 - \angle DOF = (z_u - 1) \times \pi / z_1 - \pi / z_{1\text{max}} - \text{inv } \alpha + \text{inv} (\arccos (r_{b1} / r_{a1})) = (2 \times z_u - 1) \times \pi / 2 z_1 - \text{inv } \alpha + \text{inv} (\arccos (r_{b1} / r_{a1})). \quad (5)$$

Радиус точки С относительно оси вращения сектора определяется из треугольника OO_1C :

$$O_1C^2 = e^2 + r_{a1}^2 - 2 \times e \times r_{a1} \times \cos(180 - d) = e^2 + r_{a1}^2 + 2 \times e \times r_{a1} \times \cos \delta. \quad (6)$$

Радиус точки Е относительно оси вращения сектора определяется из треугольника OO_1E :

$$O_1E^2 = e^2 + r_{a1}^2 + 2 \times e \times r_{a1} \times \cos e. \quad (7)$$

В результате совместного решения уравнений 2–7 определяется величина максимального вылета (e) зубчатых секторов составного колеса относительно оси вращения. На основании полученной оценки величины (e) устанавливается приемлемое (действительное) значение вылета секторов, что позволяет определить максимальный диаметр составного зубчатого колеса на основании следующих рассуждений. В соответствии с рис. 2 максимальный начальный диаметр составного зубчатого колеса

$$\delta_{w1max} = d_{w1min} + 2 \times e$$

или

$$r_{w1max} = r_{w1min} + e. \quad (8)$$

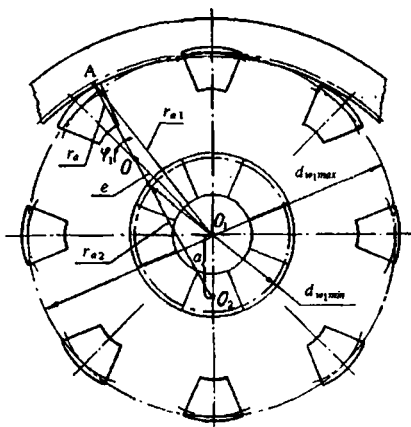


Рис. 2 Схема составного зубчатого колеса

Для некорригированного зацепления можно записать:

$$d_{w1min} = d_1, \quad (9)$$

где d_1 – делительный диаметр зубчатого колеса-заготовки, следовательно максимальный условный делительный диаметр составного зубчатого колеса

$$d_{1max} = d_1 + 2 \times e, \quad (10)$$

Тогда максимальное значение передаточного отношения передачи будет равно

$$i_{\max} = d_{w/\max} / d_i$$

а диапазон регулирования для передачи с симметричным регулированием

$$D = i_{\max} / i_{\min} = (d_{w/\max} / d)^2. \quad (11)$$

Число зубьев условного колеса, соответствующего составному зубчатому колесу при максимальном вылете секторов, определяется по формуле:

$$z_{l\max} = 2 \times (r_l + e) / m. \quad (12)$$

Полученное значение числа зубьев также должно быть кратно числу секторов. Возможна конструкция передачи, в которой наименьшее и наибольшее числа зубьев не кратны числу секторов, при этом $z_1 < z_{1\min}$. Но и в этом случае обязательно выполнение условия

$$(z_{l\max} + z_{l\min}) / 2 \times i_s - \text{целое число}. \quad (13)$$

После этого необходимо уточнить число зубьев сектора составного зубчатого колеса. Учитывая двухпоточную конструкцию составного колеса, при которой расстояние между крайними зубьями соседних секторов при их минимальном вылете (для обеспечения расположения между ними тела сектора другого потока) должно быть не менее $(0,75 \times \pi \times m)$, получим следующее выражение для числа зубьев сектора:

$$z_u = (z_l - (1 \dots 3) \times i_j) / i_s = (z_l / i_j) - (1 \dots 3). \quad (14)$$

Теперь представляется возможным выбрать схему передачи и определить число зубьев промежуточного зубчатого колеса z_2 и его делительный (начальный) диаметр d_2 . Полученные таким образом параметры зубчатого колеса-заготовки и значение максимального вылета секторов составного колеса должны удовлетворять двум условиям. Первое условие состоит в том, что прежде всего при максимальном вылете зубчатых секторов должно обеспечиваться приемлемое значение коэффициента торцового перекрытия. Второе условие предполагает обеспечение при максимальном вылете секторов приемлемой величины погрешности передаточного отношения. Значения коэффициента торцового перекрытия секторов должны находиться в интервале 1,1 ... 1,3 и для спроектированной передачи он определяется следующим образом.

Из выражения (1) определим угол поворота составного зубчатого колеса

$$j_l = 2 \times \pi \times e_s / i_s. \quad (15)$$

Величина отрезка O_1A определяется по теореме косинусов из треугольника O_1O_2A :

$$O_1A^2 = r_{a2}^2 + a^2 - 2 \times r_{a2} \times a \times \cos \psi_f \quad (16)$$

Для случая, когда взаимодействие зубчатого сектора с цельным зубчатым колесом начинается не в точке C' , а в точке A , угол (γ_2) равен

$$\psi_2 = k \times \gamma_2 - \beta_2 \quad (16)$$

где $\gamma_2 = 2 \times \pi / z_2$ – угловой шаг зубьев цельного зубчатого колеса с числом зубьев z_2 , k – число зубьев цельного зубчатого колеса, которое можно разместить на дуге CC' , причем C и C' – точки пересечения окружности выступов цельного зубчатого колеса с траекторией вершины крайнего зуба сектора, то есть k – это целая часть дроби $2 \times \beta_2 / \gamma_2 = \beta_2 \times z_2 / \pi$.

В общем случае зацепление зуба сектора с зубом сопряженного зубчатого колеса начинается в точке A и заканчивается в точке C (см. рис. 1), что соответствует углу поворота составного зубчатого колеса на угол (φ_1):

$$\begin{aligned} \varphi_1 = & \angle BO_1A + \psi_1 + \delta_1 + \varepsilon_1 + \beta_1 = \text{inv}(\arccos(r_b / O_1E)) - \text{inv}(\arccos(r_b / O_1A)) + \\ & + \arcsin(r_{a2} \times \sin \psi_2 / O_1A) + \arcsin(r_a \times \sin \delta / O_1C) + \arcsin(r_a \times \sin \varepsilon / O_1E) + \\ & + \arccos((r_a^2 - a^2 - O_1C^2) / 2 \times a \times O_1C). \end{aligned} \quad (17)$$

Из треугольника O_1O_2C по теореме косинусов имеем:

$$O_1C^2 = a^2 + r_{a2}^2 - 2 \times a \times r_{a2} \times \cos \beta_2, \quad (18)$$

где r_{a2} – радиус окружности выступов цельного зубчатого колеса, a – соответствующее данному вылету зубчатых секторов межосевое расстояние в зацеплении составного и цельного зубчатых колес

$$a = r_{w2} - (r_w + e), \quad (19)$$

здесь r_{w2} – радиус начальной окружности цельного зубчатого колеса, r_w – радиус начальной окружности зубчатого колеса-заготовки, e – вылет зубчатого сектора относительно оси вращения, откуда

$$b_2 = \arccos(a^2 + r_{a2}^2 - O_1C^2) / 2 \times a \times r_{a2} \quad (20)$$

В результате совместного решения уравнений (15)...(20) определяется действительное значение коэффициента перекрытия и сравнивается с рекомендуемым.

Для передач с составными зубчатыми колесами характерна погрешность передаточного отношения, величина которой может быть определена из выражения:

$$\begin{aligned} \Delta i = & (d_2 / d_{1max} - [d_2 \times (\cos \alpha / \cos \alpha_{wp}) / (d_{1max} - d_2 \times (1 - (\cos \alpha / \cos \alpha_{wp}))]) / (d_2 / d_{1max})) \\ = & 1 - (d_{1max} \times \cos \alpha / \cos \alpha_{wp}) / (d_{1max} - d_2 \times (1 - (\cos \alpha / \cos \alpha_{wp}))), \end{aligned} \quad (21)$$

где α – угол профиля исходного контура, $\alpha_{\omega T}$ – текущее (относительно оси симметрии зубчатого сектора) значение угла зацепления α_{ω} .

Величина Δi является скорее качественной, чем количественной характеристикой передачи, поскольку, как показывают испытания таких передач, в действительности она практически не реализуется. Эта погрешность нивелируется в процессе функционирования передачи и проявляется в виде дополнительной динамической нагрузки на элементы передачи.

Текущее значение угла зацепления, как это следует из рис. 3 определяется выражением:

$$\alpha_{\omega T} = \psi + \delta, \text{ рад},$$

в котором углы ψ и δ являются функцией текущего значения угла φ_1 поворота составного зубчатого колеса, а именно:

$$\psi = \arccos((r_{b2} - r_{b1}) / ((a^2 + e^2 + 2 \times a \times e \times \cos \varphi_1)^{0.5})), \quad (23)$$

$$\delta = \arcsin((e \times \sin \varphi_1) / ((a^2 + e^2 + 2 \times a \times e \times \cos \varphi_1)^{0.5})). \quad (24)$$

За начало отсчета углов поворота составного колеса удобно принимать ось симметрии передачи. В этом случае максимальное (худшее с точки зрения кинематики передачи) значение угла поворота колеса соответствует началу или концу зацепления крайнего зуба сектора с зубьями промежуточного зубчатого колеса. С целью упрощения расчетов близкое к максимальному значению угла поворота составного колеса можно найти по формуле:

$$\varphi_T = \arccos((r_{a2}^2 - r_{lmax}^2 - a^2) / 2 \times r_{lmax} \times a), \quad (25)$$

По найденным из выражения (21) значениям погрешности передаточного отношения можно из ряда модификаций выбрать приемлемую конструкцию передачи с составными зубчатыми колесами и промежуточными колесами внутреннего зацепления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Скойбеда А.Т., Даньков А.М. Передаточные механизмы на основе составных зубчатых колес. – Мн.: БГПА, 2000.-96 с.
2. Даньков А.М. Передаточные механизмы с составными зубчатыми колесами. Весці Акадэміі навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 1998. – № 4. – С. 84–90.
3. Даньков А.М. Исследование кинематики передачи с составными зубчатыми колесами / Могилев. машиностр. ин-т. – Могилев, 1999. –9 с.: ил. –Библиогр. 2 назв. – Деп. в ВИНТИ 24. 05. 99, № 1629 – В99.

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ РАМЫ ШАССИ АВТОМОБИЛЬНОГО КРАНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Белорусская государственная политехническая академия

Минск, Беларусь

В работе приводится расчет внешних активных и реактивных нагрузок и напряженно-деформированного состояния (НДС) рамы шасси автомобильного крана МЗКТ-79081 грузоподъемностью 75 т. Расчет произведен методом конечных элементов (МКЭ) с помощью прикладного пакета Pto_MECANICA. Описана методика создания расчетной модели. Приведены оценка статического НДС при различных нагрузочных режимах, анализ результатов расчета; даны рекомендации по изменению конструкции и снижению уровня нагруженности опасных локальных элементов и зон.

Обоснование выбора метода и средств моделирования; разработка методики

Для расчета многократно статически неопределимых конструкций в настоящее время широко применяется МКЭ, основанный на совместном рассмотрении напряженного состояния системы небольших элементов конечного размера. МКЭ используется при решении самых разнообразных задач: расчет НДС, расчет собственных частот и форм колебаний, анализ устойчивости, решение задач теплопередачи, исследование установившихся и неустойчивых переходных процессов, акустических явлений нелинейных статических процессов и т.д. Суть метода состоит в следующем. Физическая область задачи делится на подобласти или конечные элементы (КЭ). Процесс дискретизации включает в себя идеализацию реальной геометрии набором непересекающихся КЭ, а так же задание информации о числе, размерах и форме конечных элементов. Зависимая переменная (одна или несколько) аппроксимируется функцией специального вида на каждом конечном элементе и, следовательно, во всей области расчетной схемы. Подстановка аппроксимирующих функций в определяющие уравнения дает систему множества уравнений с неизвестными параметрами. Решая эти уравнения, можно определить значения параметров и, следовательно, получить приближенное решение задачи на стадии создания новых конструкций.

Системы прочностных расчетов современных САПР в авиационно-космической промышленности, судостроении, машиностроении и других отраслях отечественной и зарубежной промышленности основаны именно на МКЭ. В настоящее время разработан большой арсенал комплексов различных конечных элементов, которые позволяют моделировать практически любые конструкции с учетом реальных особенностей их

работы. МКЭ дает наиболее полное приближение к результатам натурных испытаний несущей системы.

Таким образом, представляется целесообразным прочностной анализ рамы проводить на базе универсальных конечно-элементных программных комплексов, применимых для расчета широкого класса машиностроительных конструкций. При этом, вследствие необходимости подробной детализации конечно-элементных схем, анализ конструкций должен проводиться на современных высокопроизводительных компьютерах, оснащенных средствами графического вывода информации. Применение математических методов и вычислительной техники, разработка эффективных моделей, многовариантное проектирование позволяет оптимизировать нагруженность, прочность и ресурс машин еще на стадии проектирования, что сокращает сроки их создания. Такой подход экономически целесообразен и особенно актуален при мелкосерийном и единичном производстве дорогостоящих технических объектов.

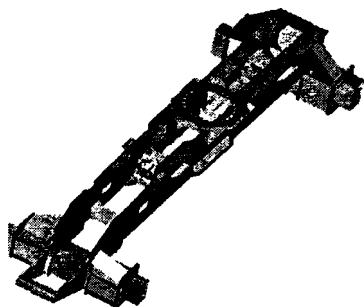
В данной работе приводится расчет реакций опор и НДС рамы кранового шасси 79081 при работе с испытательным грузом для различных положений стрелы. Расчет произведен методом конечных элементов с помощью прикладного пакета Pro/MECHANICA. Трехмерная виртуальная модель создана в пакете Pro/ENGINEER. При решении проблемы определения НДС рам по заданным нагрузкам необходимо учитывать тот факт, что рамы многоосных тягачей (РМТ) производства МЗКТ отличаются весьма сложной конструкцией и большим разнообразием модификаций. По форме РМТ являются оболочечными конструкциями и поэтому используемые в автомобилестроении методики расчета рам как стержневых систем применимы к РМТ только на самых ранних стадиях проектирования для приближенных расчетов. Ввиду конструктивных особенностей рамы представляется необходимым ее расчетную схему реализовать в виде оболочечной конечно-элементной аппроксимации. Система закрепления конструкции и нагрузки выбраны в соответствии с реальными условиями. Результатом расчета являются значения напряжений и перемещений в различных точках, функциональная зависимость которых однозначно описывается известными дифференциальными зависимостями Коши и законами Гука, а также значения реакций в местах закрепления выдвигаемых опор.

Создание трехмерной твердотельной модели рамы

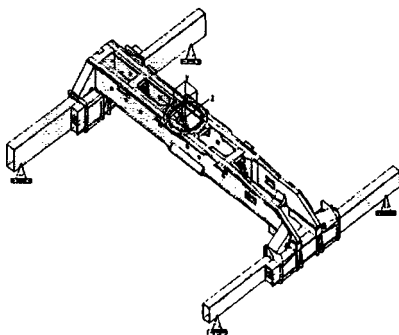
Трехмерная модель рамы кранового шасси 79081 (рис.1) была создана в среде пакета Pro/ENGINEER посредством сборки из деталей выполненных по чертежам. В дальнейшем эти детали можно использовать для моделирования различных РМТ (ввиду полной параметризации), а также для определения их центра тяжести, массы, стоимости и, в дальнейшем, передачи на производство (раскрой металла и т.д.). Однако, созданная таким образом модель является чрезвычайно сложной для непосредственного создания конечно-элементной модели, что приводит к необходимости ее упрощения. На следующем шаге детали сборки были соединены в один файл соответствующего форма-

та *.prt. На рис. 1 (фигура 1.1) изображена трехмерная твердотельная модель рамы, представляющая собой одну деталь, готовую к использованию в последующем расчете.

1.1. Трехмерная модель в сборе



1.2. Расчетная модель



1.3. Приложенные нагрузки

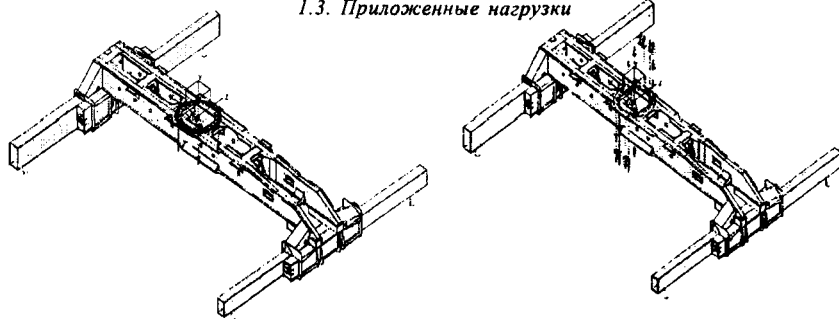


Рис.1. Трехмерная модель рамы кранового шасси

Затем с помощью модуля Pro/MECHANICA Structure в зависимом режиме были определены срединные поверхности и поверхности, которым присваивались характеристики толщин тонкостенных элементов конструкции. Полученная трехмерная поверхностная модель была передана в независимый режим модуля Pro/MECHANICA Structure, где для нее были заданы материалы, определены закрепления, приложены нагрузки.

Создание конечноэлементной модели рамы кранового шасси

Для создания конечноэлементной модели (КЭ-модели) рамы кранового шасси использовались трехмерные трех- и четырехузловые конечные элементы, каждому из

которых ставились в соответствие следующие свойства: толщина, тип (shell), материал. Разбивка поверхностной модели на конечноэлементную сетку производилась автоматически, а в местах предполагаемых концентраций напряжений автоматическая разбивка улучшалась вручную, что позволило повысить точность результатов.

Конечно-элементная модель содержит: точек – 4664, ребер – 12317, оболочек – 7600, элементов – 7600, количество уравнений – 204732. Время расчета 4173.94 сек., использование дискового пространства – 640 000 кб.

Основные результаты расчета и анализ НДС рамы кранового шасси

Результатом расчета является определенное НДС модели. На экран (и, соответственно, на печать) можно вывести поля напряжений, перемещений, а также конкретные цифровые значения этих величин в любых точках модели. Одновременно с этим создается текстовый файл, в котором содержится вся информация о ходе расчета, а также значения всех вычисляемых величин в каждом из элементов и узлов. Этот файл является достаточно неудобным для визуального просмотра, что в принципе не служит препятствием для изучения результатов расчета, т.к. всю необходимую информацию можно получить при выводе интересующих пользователя данных непосредственно на экран (на печать). Краткая информация о ходе вычислений: количестве элементов, методе вычислений, затраченном времени и памяти, а также основные результаты, такие как моменты инерции, максимальные, средние и минимальные напряжения, перемещения, энергия деформации, реакции опор записывается в файлы текстового формата *.prt. На рисунках были показаны распределения эквивалентных напряжений полученные в результате расчета рамы кранового шасси 79081 при работе на выносных опорах для различных положений стрелы с грузом и проведен анализ НДС.

Анализ НДС рамы кранового шасси 79081 при работе на выносных опорах по результатам расчета МКЭ (направление стрелы – влево под углом 90°)

На рис. 2 представлено общее НДС рамы 79081, установленной на выносных опорах при направлении стрелы влево. Как видно из рисунка, наиболее нагруженной являются задняя и центральная части левого (наиболее нагруженного) лонжерона, а так же область около левого воротника.

На рис. 3 представлено распределение эквивалентных напряжений в элементах рамы при рассматриваемом положении стрелы.

На рис. 3 (фигура 3.1) представлено распределение эквивалентных напряжений на левом лонжероне, в среднем они не превышают 343 МПа, но в местах крепления поперечин существуют области с довольно высокими напряжениями, достигающими предела текучести.

На рис. 3 (фигура 3.2) показаны напряжения в передней части правого лонжерона. Из него можно сделать вывод, что напряжения в околоротниковой части, в

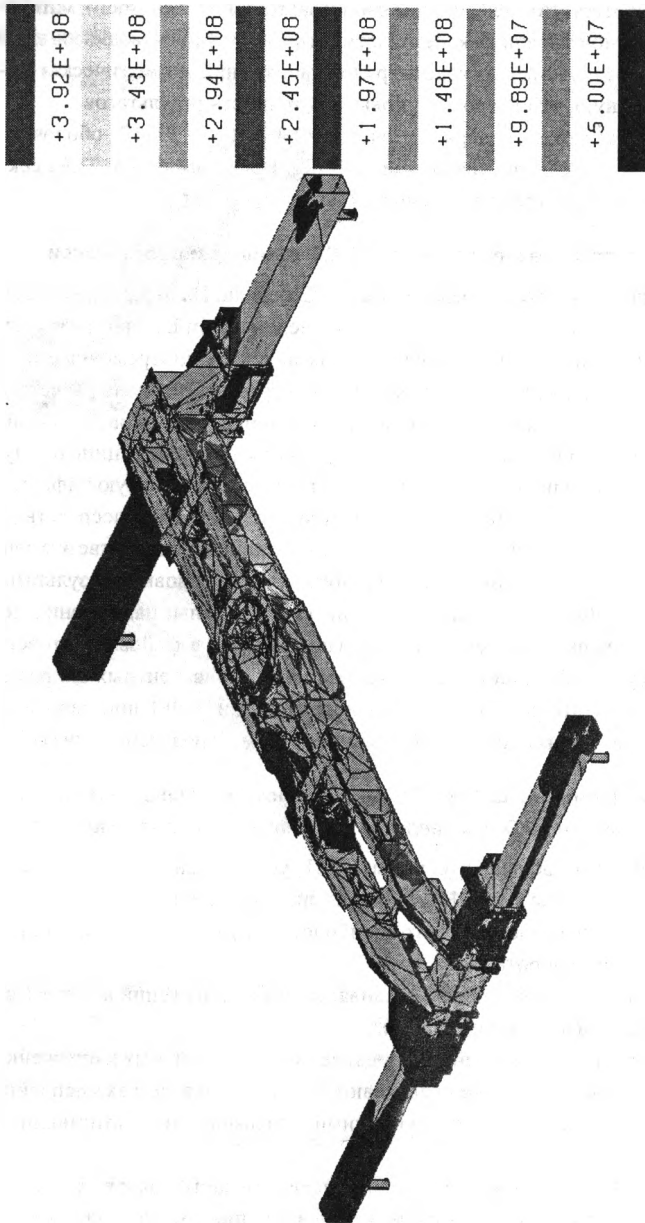
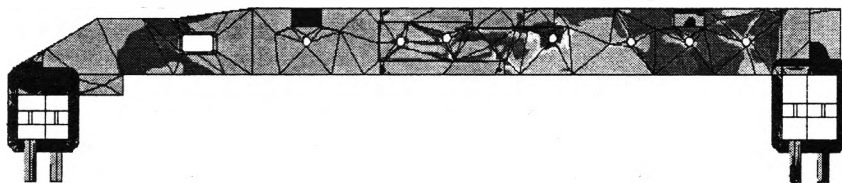


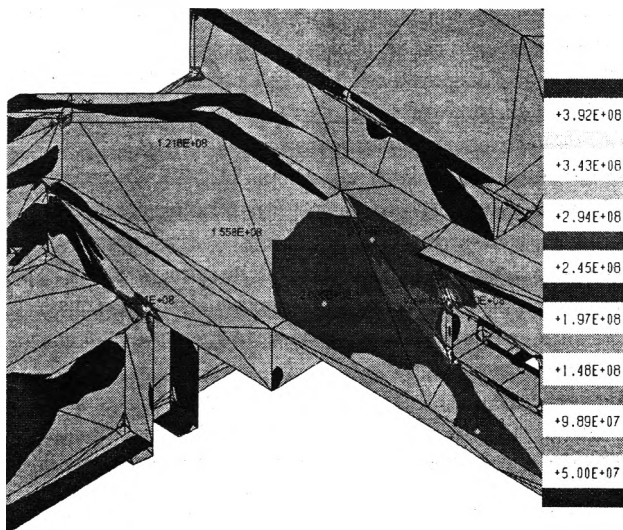
Рис. 2. Распределение эквивалентных напряжений, при направлении стрелы влево: общий вид рамы с выносными опорами

среднем, не превышают 294 МПа и лишь в местах закруглений отверстия превышают предел текучести, что является закономерным для мест концентрации напряжений.

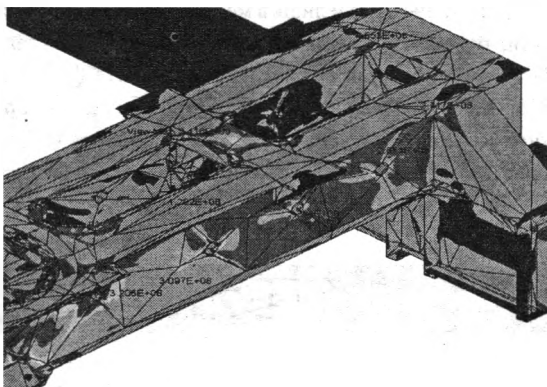
Задняя часть рамы представлена рис. 3 (фигура 3.3). Здесь возникают напряжения до 343 МПа, но на верхней задней поперечине, в местах крепления бокового подкоса к нижней полке и стенке лонжерона, а также в местах крепления труб к стенке лонжерона существуют зоны с напряжением выше предела текучести (392 МПа).



3.1 Распределение эквивалентных напряжений при направлении стрелы влево (вид слева)



3.2 Распределение эквивалентных напряжений при направлении стрелы влево (передняя часть) рамы)



3.3 Распределение эквивалентных напряжений при направлении стрелы влево (задняя часть рамы)

Рис. 3. Распределение эквивалентных напряжений

Анализ НДС рамы кранового шасси 79081 по результатам расчета МКЭ при работе на выносных опорах (стрела направлена вправо под углом 90°)

Наиболее нагруженной является задняя и центральная часть правого (наиболее нагруженного) лонжерона, а так же область около правого воротника.

Напряжения в околоротниковой части в среднем не превышают 294 МПа и лишь в местах закруглений отверстия превышают предел текучести, что является закономерным для мест концентрации напряжений.

В задней части рамы возникают напряжения до 343 МПа, но на верхней задней поперечине, в местах крепления бокового подкоса к нижней полке и стенке лонжерона, а также в местах крепления труб к стенке лонжерона существуют зоны с напряжением выше 392 МПа.

Напряжения на поворотном оборудовании не превышают 245 МПа.

На левом лонжероне эквивалентные напряжения не превышают 294 МПа, но в местах крепления поперечин существуют области с довольно высокими напряжениями достигающими предела текучести.

Центральная часть рамы: вид снизу. Особый интерес представляет нижняя полка правого лонжерона: здесь находится область с высокой концентрацией напряжений.

Напряжения в задней балке рамы достаточно велики и достигают предела текучести (392 МПа) в естественных местах концентрации напряжений.

Анализ НДС рамы кранового шасси 79081 при работе на выносных опорах по результатам расчета МКЭ (стрела направлена к передней правой опоре)

Наиболее нагруженной является задняя часть правого (наиболее нагруженного) лонжерона, а так же область около правого воротника. Напряжения в околоротни-

ковой части в среднем не превышают 294 МПа и лишь в местах закруглений отверстия превышают предел текучести, что является закономерным для мест концентрации напряжений.

В задней и центральной части рамы в области концентрации наибольших значений напряжений возникают напряжения до 343 МПа. Но на верхней задней поперечине, в местах крепления бокового подкоса к нижней полке и стенке лонжерона, а также в месте крепления трубы к стенке лонжерона существуют зоны с напряжениями выше 392 МПа. Напряжения на поворотном оборудовании не превышают 245 МПа.

В передней части правого лонжерона напряжения в местах крепления передней балки и в околоротниковой части лонжерона не превышают 294 МПа и лишь в местах закруглений отверстия достигают предела текучести, что является закономерным для мест концентрации напряжений.

Анализ НДС рамы кранового шасси 79081 при работе на выносных опорах по результатам расчета МКЭ (стрела направлена к левой задней опоре)

Наиболее нагруженными являются задняя часть левого (наиболее нагруженно-го) лонжерона и центральная часть рамы. Напряжения в околоротниковой части левого лонжерона в среднем не превышают 294 МПа и лишь в местах закруглений отверстия превышают предел текучести, что является закономерным для мест концентрации напряжений. В месте крепления передней балки возникают напряжения до 343 МПа и местный концентратор – 421 МПа.

В задней части рамы возникают напряжения до 343 МПа, но на верхней задней поперечине, в местах крепления бокового подкоса к нижней полке и стенке лонжерона, а также в местах крепления труб к стенке лонжерона существуют зоны с напряжением выше 392 МПа. В задней балке рамы напряжения достигают предела текучести, а в месте крепления переднего левого ребра к задней балке возникает мощный концентратор.

Центральная часть рамы. Особый интерес представляют нижняя полка левого лонжерона и внутренний нижний подкос правого лонжерона: здесь находятся области с высокой концентрацией напряжений. Напряжения на поворотном оборудовании не превышают 245 МПа, что меньше предела текучести (392 МПа).

Анализ НДС состояния рамы кранового шасси 79081 при работе на выносных опорах по результатам расчета МКЭ – стрела направлена вдоль рамы назад

Наиболее нагруженной является задняя часть рамы и центральная часть внутренних стенок лонжерона. Напряжения в центральной части не превышают 197 МПа, а в местах крепления поперечины и поворотного круга достигают 245 МПа. Задняя часть рамы: здесь возникают напряжения до 99 МПа, а в местах крепления бокового подкоса к верхней полке лонжерона и задней балке существуют зоны с напряжением до 148 МПа, что меньше предела текучести.

Заключение

В результате расчета рамы кранового шасси МЗКТ-79081 для всех вариантов направления стрелы с испытательным грузом, масса которого превышает массу рабочего груза на 25%, установлено следующее: эквивалентные напряжения в основных несущих элементах (верхних и нижних полках, стенках лонжеронов рамы, в балках подвижных опор и пр.) находятся в допустимых пределах и прочность рамы в целом обеспечивается. В целом конструкция является недогруженной для исследованных режимов. Напряжения выше предела текучести возникают только в местах их концентрации (соединения: поперечин с лонжеронами; ребер, соединяющих элементы поворотного круга со стенками лонжеронов и пр.). Эти напряжения при статических нагрузках незначительно влияют на общее НДС рамы, т.к. концентраторы расположены не в самых нагруженных местах основных несущих элементов и возникающие здесь локальные деформации и напряжения, релаксируя, не приводят к общей существенной деформации всей рамы, снижая, при этом, прочность ряда ее локальных элементов. По результатам проведенного анализа НДС разработаны рекомендации по конструктивной доработке опасных и сильно недогруженных зон и: уменьшения напряжений в них до требуемого уровня, как по критериям статической прочности и жесткости, так и по требуемому ресурсу с учетом усталости; снижения металлоемкости всей конструкции.

УДК 621.833.12

Д.О. Тетерюков

ВЛИЯНИЕ НА КОНТАКТНУЮ ПРОЧНОСТЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОРТОТРОХОИДНОЙ ПЕРЕДАЧИ

*Институт надежности машин АН Беларуси
Минск, Беларусь*

В настоящее время вследствие совершенствования технологий получения сложного профиля на станках с числовым программным управлением получают широкое применение различные типы трохойдных передач. Ортоотрохойдная передача относится к классу передач шестерня-зубчатая рейка. Преимуществом данной передачи является высокая точность позиционирования, большие передаваемые усилия (в зацеплении находится 5-8 цевок-роликов), хорошие массогабаритные характеристики. Исходной кривой для построения профиля зубчатой рейки служит ортоотрохойда.

Поскольку большинство трохойдных передач является высоконагруженными, необходим расчет на контактную прочность элементов зацепления. Взаимодействие двух прижатых друг к другу упругих тел (зубчатой рейки и цевки-ролика) сопро-

вождается объемным сжатием их элементов в области соприкосновения (рис. 1) [1]. На рисунке приведены следующие обозначения: F – сила нормальная к профилю зуба рейки; R_u – радиус цевки-ролика; b – ширина зуба рейки. Поскольку элементы зацепления (зуб трохондной рейки и цевка) подходят под определение цилиндрического ролика, напряжение возникающее на площадке контакта σ_H определяется по формуле Герца (1):

$$\sigma_H = Z_E \cdot \sqrt{\frac{q_H}{\rho_{np}}} \quad (1)$$

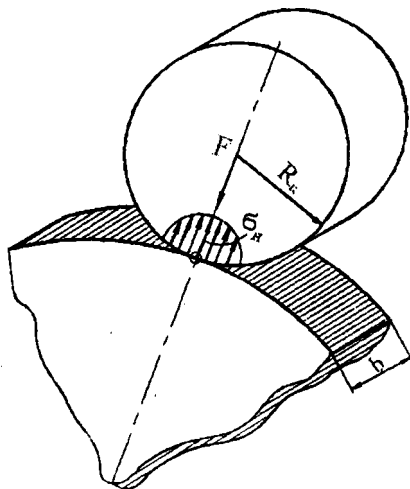


Рис. 1. Схема нагружения элементов зацепления

где Z_E – коэффициент, учитывающий механические свойства материалов соприкасающихся деталей; q_H – удельная нагрузка; ρ_{np} – приведенный радиус кривизны контактирующих тел [2].

Из формулы (1) следует, что контактное напряжение обратно пропорционально приведенному радиусу кривизны контактирующих тел. Поэтому представляется возможность определить такое значение радиуса цевки при котором контактное напряжение принимает максимальное значение. Приведенный радиус кривизны определяется выражением (2):

$$\frac{1}{\rho_{np}} = \frac{1}{R_u} - \frac{1}{R_u + \rho_{ит}} = \frac{\rho_{ит}}{R_u \cdot (R_u + \rho_{ит})}, \quad (2)$$

где $\rho_{ит}$ – радиус кривизны исходной трохонды.

Приведенный радиус кривизны ρ_{np} принимает минимальное значение при максимальном значении радиуса кривизны исходной трохойды $\rho_{нт}$ на выпуклом участке ρ^{\max} . Считая ρ^{\max} величиной постоянной, а R_u – переменной, значение, при котором минимальная приведенная кривизна принимает экстремальное значение, определим из формулы (3):

$$\frac{d}{dR_u} \cdot \left(\frac{1}{\rho_{np}} \right) = \frac{-\rho^{\max} \cdot (\rho^{\max} + 2 \cdot R_u)}{R_u^2 \cdot (\rho^{\max} + R_u)^2} \quad (3)$$

Производная равна нулю при $R_u = -\frac{\rho^{\max}}{2}$, причем для данного значения радиуса цевки приведенный радиус кривизны принимает минимальное значение. Следовательно, минимальное значение приведенной кривизны на выпуклых участках зубьев рейки получается при радиусе цевки равном половине максимального радиуса кривизны исходной трохойды на выпуклом участке (4):

$$R_u = -\frac{\rho^{\max}}{2} \quad (4)$$

Таким образом, формула (4) определяет наиболее рациональное, с точки зрения контактной прочности, значение радиуса цевки ортотрохойдной передачи.

Из формулы (3) видно, что кривизна получает бесконечно большое значение при $R_u = -\rho^{\max}$. Тогда из формулы Герца следует, что и контактные напряжения также становятся бесконечно большими. Последнее обстоятельство делает необходимым сравнение радиуса цевки с максимальным радиусом кривизны исходной трохойды на выпуклом участке.

Радиус кривизны исходной трохойды определяется с помощью подстановки уравнений трохойды в параметрической форме в формулу, известную из дифференциальной геометрии для расчета радиуса кривизны [3], и выражается отношением (5):

$$\rho_{нт} = \frac{R \cdot (1 - 2 \cdot m \cdot \cos \alpha + m^2)^{\frac{3}{2}}}{m \cdot \cos \alpha - m^2}, \quad (5)$$

где R – радиус образующей окружности; m – коэффициент укорочения; α – свободный параметр при образовании ортотрохойды (угол образования трохойды).

Зависимость $\rho_{нт}(\alpha)$ приведена на рис. 2.

Исследование функции $\rho_{нт}(\alpha)$ показывает, что функция имеет точку разрыва при значении угла α определяемым формулой (6):

$$\cos(\alpha) = m \quad (6)$$

Из формулы (6) следует, что при уменьшении коэффициента укорочения m увеличивается величина вогнутого участка профиля зубчатой рейки и уменьшается ве-

личина выпуклого участка профиля. Значение угла α при котором радиус кривизны принимает на выпуклом участке профиля максимальное значение определяется формулой (7):

$$\cos \alpha^{\max} = \frac{2 \cdot m^2 - 1}{m} \quad (7)$$

Таким образом, максимальное значение радиуса кривизны исходной трохонды на выпуклом участке равно отношению (8):

$$\rho^{\max} = -3 \cdot R \cdot \sqrt{3 \cdot (1 - m^2)} \quad (8)$$

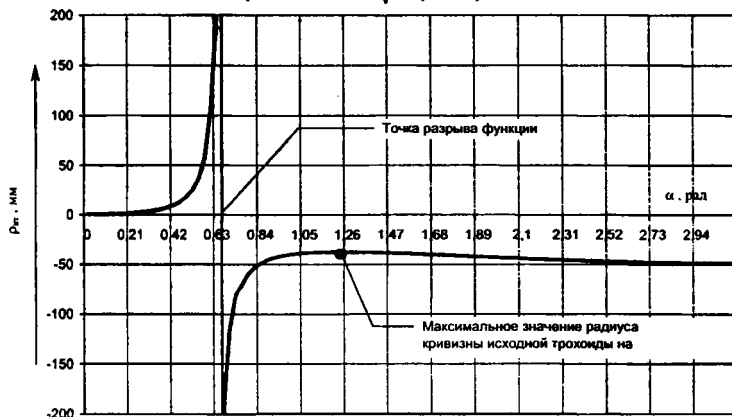


Рис. 2. Зависимость радиуса кривизны от угла образования профиля $\rho_{\text{ин}}(\alpha)$

Полученные зависимости дают возможность аналитическим путем находить экстремальные значения радиуса кривизны профиля зуба рейки, что позволяет выработать ряд рекомендаций по выявлению участков опасных в отношении подрезания.

В случае, когда на выпуклом участке профиля зуба рейки радиус цевки R_u равен или больше максимального радиуса кривизны исходной трохонды ρ^{\max} , будет иметь место подрез профиля зуба рейки. Для обеспечения нормального зацепления необходимо выполнение условия (9):

$$R_u < 3 \cdot R \cdot \sqrt{3 \cdot (1 - m^2)}$$

Данная зависимость позволяет определить значение радиуса цевки, при котором не будет происходить самопересечение профиля зубчатой рейки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Скойбеда А.Т., Кузьмин А.В. Детали машин и основы конструирования. – Мн.: Высшая школа, 2000. – 583с.
2. Красковский Е.Я., Дружинин Ю.А. Расчет и конст-

руирование механизмов приборов и вычислительных систем. – М.: Высшая школа, 1991. – 480с. 3. Хайков П.Г., Вакорин В.А., Дерябин Ю.Н., Геометрия троходных передач // Современные проблемы динамики машин и их синтеза. – 1985. – С. 21–23.

УДК 539.3

М.В. Тульева

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НА УСТОЙЧИВОСТЬ СТЕРЖНЕЙ.

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Развитие современного машиностроения тесно связано с проблемами прочности и динамики. Повышение нагрузок, давлений, температур, уменьшение веса и габаритов конструкции приводят к необходимости расширения теоретических и экспериментальных исследований в области устойчивости, прочности и колебаний. Повышение качества применяемых материалов и уточнение методов расчета является основой для создания легких и рациональных конструкций современного машиностроения. Для облегченных конструкций характерно снижение устойчивости. Поэтому расчеты на устойчивость элементов современных конструкций (стержней, пластин, оболочек) приобретают существенное значение во всех отраслях промышленности. Тонкостенные стержни используются в создании различного рода деталей разнообразных механизмов и машин, в строительных конструкциях и т.д. Наибольший интерес вызывает случай, когда на устойчивость стержней влияет не только нагрузка, но и собственный вес стержня, которым нельзя пренебрегать. В технике такими конструкциями могут быть разного рода печи, футерованные огнеупорными материалами.

В качестве примера решим задачу об устойчивости стержня (верхний конец свободен, нижний – заземлен) при одновременном действии на него сосредоточенной силы F и собственного веса (рис. 1).

Рассмотрим основное уравнение метода Бубнова – Галеркина [1]:

$$\int_0^l \left[\frac{d}{dx} \left(EI \frac{d^2 v}{dx^2} \right) + (F + R_{l-x}) \frac{dv}{dx} \right] \frac{d\eta_i}{dx} dx = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

или

$$\int_0^l \left[\frac{d}{dx} \left(EI \frac{d^2 v}{dx^2} \right) + (F + p(l-x)) \frac{dv}{dx} \right] \frac{d\eta_i}{dx} dx = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

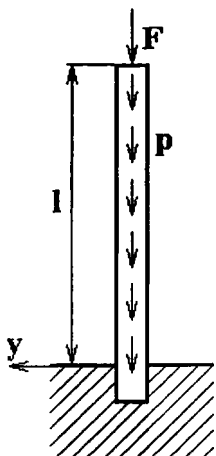


Рис. 1. Стержень, находящийся под действием нагрузки и собственного веса.

где E – модуль упругости, I – минимальный момент инерции сечения, v – изогнутая линия при потере устойчивости ($v = f_1\eta_1 + f_2\eta_2 + f_3\eta_3 + \dots + f_n\eta_n$) l – длина стержня, η_i – функция от x , удовлетворяющая геометрическим граничным условиям задачи.

Подставим уравнение упругой линии ($v = f\left(1 - \cos\frac{\pi x}{2l}\right)$) в (2), считая жесткость постоянной, проинтегрировав полученное выражение, получим:

$$EI \frac{\pi^2}{4l^2} = F + \left(\frac{1}{2} - \frac{2}{\pi^2}\right)Pl \quad (3)$$

или

$$4\left(\frac{1}{2} - \frac{2}{\pi^2}\right)Pl^3 + 4Fl^2 = EI\pi^2 \quad (4)$$

Для нахождения критической длины мы должны решить уравнение (4). Для его решения была составлена компьютерная программа, с помощью которой была найдена критическая длина стержня различного сечения, изготовленного из стали и кирпича, а также может быть получена критическая длина стержней изготовленных из других материалов и для других параметров сечения.

Исследуем влияние на устойчивость стержня его геометрических характеристик (сечение стержня). Рассмотрим прямоугольный и круглый стержни, а также тонкостенную трубу.

Для прямоугольного стержня минимальный момент инерции сечения: $I_{\min} = \frac{a \cdot b^3}{12}$, для круглого стержня – $I_{\min} = \frac{\pi \cdot r^4}{4}$ для трубы – $I_{\min} = \frac{\pi \cdot t \cdot r^3}{12}$ (где t – толщина трубы).

Будем рассматривать стержни: прямоугольный (сечение 2×1), круглый ($r=1; r=1,5; r=2$), тонкостенные трубы толщиной $t=0,1$ и радиусами ($r=1; r=1,5; r=2$).

Зависимость критической длины стального стержня от нагрузки представлена на рис. 2.

Зависимость критической длины стержня из кирпича от нагрузки представлена на рис. 3.

Результаты, полученные в данной работе, позволяют прогнозировать устойчивость разнообразных стержневых конструкций. Полученный расчет может быть также применен для определения высоты колонн, шахтных печей и других аналогичных конструкций, а также для определения их формы.

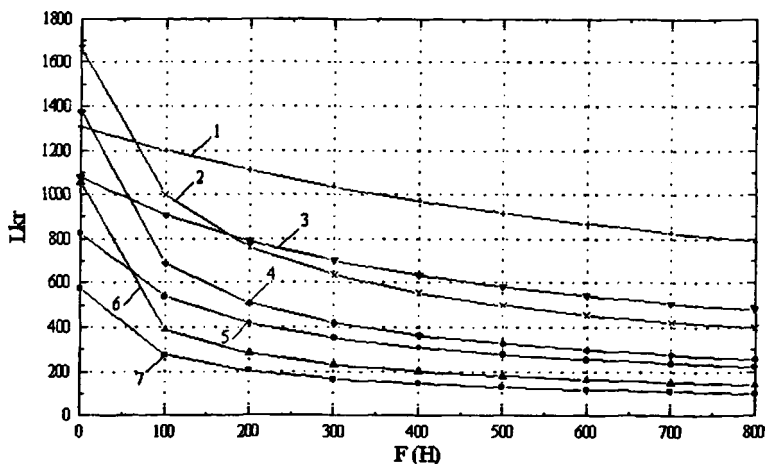


Рис. 2. Зависимость критической длины стального стержня от нагрузки: 1 – круглый стержень $r=2$; 2 – труба $r=2$, $t=0,1$; 3 – круглый стержень $r=1,5$; 4 – труба $r=1,5$, $t=0,1$; 5 – круглый стержень $r=1$; 6 – труба $r=1$, $t=0,1$; 7 – прямоугольный стержень 2×1 .

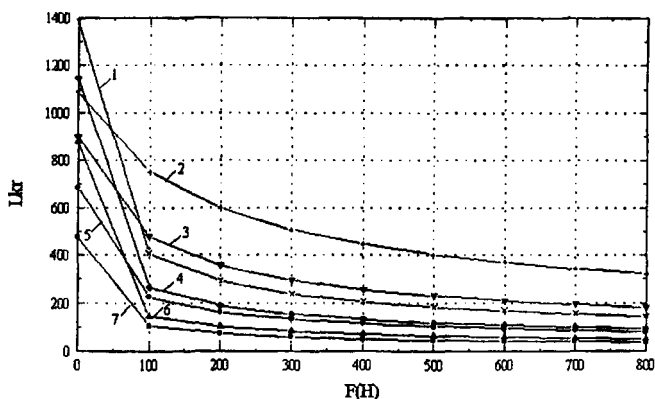


Рис. 3. Зависимость критической длины стержня из кирпича от нагрузки: 1 – труба $r=2$, $t=0,1$; 2 – круглый стержень $r=2$; 3 – круглый стержень $r=1,5$; 4 – труба $r=1,5$, $t=0,1$; 5 – круглый стержень $r=1$; 6 – труба $r=1$, $t=0,1$; 7 – прямоугольный стержень 2×1 .

ЛИТЕРАТУРА

1. А.С. Вольмир. Устойчивость деформируемых систем. – М.: Наука, 1967. – 984 с.
2. И.Г. Терегулов. Сопротивление материалов и основы теории упругости и пластичности. – М.: Высшая школа, 1984. – 472 с.

УДК 621.762.4:539

В.А. Сидоров, А.А. Хмелев

ОБ ОЦЕНКЕ ЗНАЧЕНИЙ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЯ ТВЕРДОСТИ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Сосуды, работающие под давлением, элементы металлических конструкций грузоподъемных сооружений и некоторые другие конструкции периодически подвергаются диагностированию для оценки остаточного ресурса работоспособности и пригодности к дальнейшей эксплуатации.

При этом, одним из видов контрольных испытаний является измерение твердости в зонах максимальных силовых и тепловых нагрузок контролируемых элементов. Если полученный результат показывает, что твердость металла в контролируемой зоне не соответствует требованиям нормативно-технической документации, то металл такого участка подлежит исследованию с вырезкой образцов для испытаний на ударную вязкость. По результатам последних испытаний принимается решение о выбраковке.

В данной работе предлагается метод теоретической оценки значений ударной вязкости, как браковочного критерия металла контролируемых элементов, только по результатам измерения твердости, без вырезки контрольных образцов для ударных испытаний. Для этого применяют известные диаграммы хрупковязкого состояния малоуглеродистых и низколегированных сталей при ударном изгибе [1].

На рис. 1, а такая диаграмма приведена для стали СтЗсп5. Она построена в координатных осях твердость по Брюнеллю – работа разрушения ударного образца.

Заготовки для образцов предварительно подвергаются растяжению при температуре +20°C до получения остаточной пластической деформации в 5, 10, 15% и до начала образования шейки. Испытания на ударный изгиб проводят на образцах из металла в состоянии поставки и для всех уровней предварительной деформации в интервале температур от +20 до минус 60°C.

Снижение работы разрушения и повышение твердости стали в состоянии поставки только от снижения температуры испытания характеризуется штриховой кривой диаграммы, на которой указаны температуры испытания. Аналогичные зависимости

для предварительно деформированного металла характеризуются кривыми 1–5. Начала кривых уровней предварительной пластической деформации отмечены на верхней кривой 1 диаграммы.

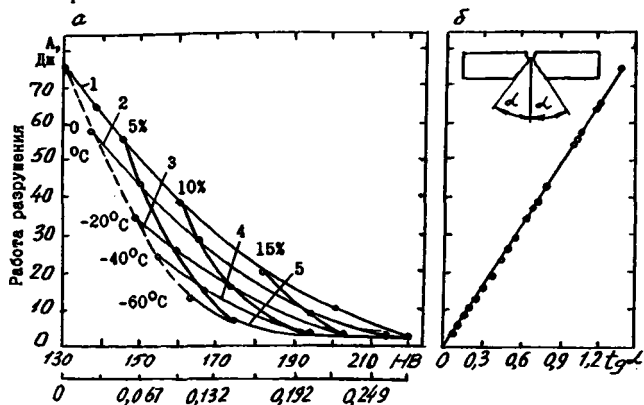


Рис. 1. Зависимость работы разрушения A от твердости по Бринеллю (а); и от тангенса угла α при ударном изгибе (б); 1–5 – температура испытания соответственно $+20$, 0 , -20 , -40 , -60°C ; --- снижение работы разрушения и повышение твердости стали в состоянии поставки при снижении температуры

Дополнительно на оси абсцисс отложены значения уровней предварительной пластической деформации, вычисленных по формуле [2]

$$\epsilon_{np} = \delta_\alpha = \frac{d_0 - d_1}{d_1}, \quad (1)$$

где d_0 – диаметр отпечатка при измерении твердости по Бринеллю стали в состоянии поставки при температуре $+20^\circ\text{C}$, мм; d_1 – контрольный диаметр отпечатка, мм.

При контрольном измерении твердости можно определить уровень накопленной пластической деформации по формуле (1) и оставшийся ресурс пластичности

$$\epsilon_{oc} = \delta_3 - \delta_\alpha,$$

где δ_3 – сертификатное, или полученное в результате дополнительных исследований, значение относительного удлинения стали в состоянии поставки.

Результат расчета по формуле (2), в свою очередь, может служить браковочным критерием, если такой критерий предусмотрен соответствующей нормативно-технической документацией.

Практическое применение диаграммы хрупковязкого состояния (рис. 1а) для теоретического определения значений ударной вязкости затруднительно из-за сложной

нелинейной взаимосвязи между работой разрушения образца, температурой испытания, уровнем предварительной деформации и оставшейся пластичностью стали. поэтому для практического применения более удобным является вариант этой же диаграммы (рис. 1б). Здесь значение работы разрушения представлено в виде линейной зависимости от тангенса угла α в, так называемом, "потерянном объеме образца после совмещения его половинок после испытания [3].

Из рис. 1б, и по данным [3] следует, что значение работы разрушения ударного образца можно записать в виде зависимости

$$A = a_0 b h^2 \operatorname{tg} \alpha, \quad (3)$$

где

$$a_0 = \frac{A}{b h^2 \operatorname{tg} \alpha} \quad (4)$$

– удельная работа пластического деформирования, Дж/м³; b и h – ширина и высота образца в сечении по надрезу, мм; $b h^2 \operatorname{tg} \alpha$ – объем пластически деформированной части образца в виде в виде клина после составления разрушенных половинок, мм³ (рис. 1б).

Для построения диаграммы (рис. 1б.) достаточно иметь результаты ударных испытаний стали в состоянии поставки только при температуре +20°C. По этим данным определяют и максимальное значение угла α после совмещения половинок образца, как показано на рис. 1б. После определения α определяют значение удельной работы пластического деформирования a_0 по формуле (4).

В свою очередь, значение a_0 является отдельной самостоятельной характеристикой стали, как величина ее энергоемкости, и является величиной постоянной для каждой конкретной плавки стали, не зависит от формы образца, скорости деформирования и температуры испытания, и может выполнять роль самостоятельного критерия качества стали [3].

Текущее значение $\operatorname{tg} \alpha$ в формуле (3) можно определить только экспериментальным путем. Поэтому для теоретической оценки значений ударной вязкости значение $\operatorname{tg} \alpha$ в указанной формуле следует заменить параметром, который можно определить непосредственно по результатам контрольных измерений твердости. В качестве такого параметра удобно принять значение истинного относительного удлинения, при котором происходит разрушение образца, и определяемого по формуле

$$e = \ln \frac{l_k}{l_n}, \quad (5)$$

где l_k, l_n – конечная и начальная длина базового участка, измеряемого по дну надреза ударного образца, мм.

Многочисленные исследования, по результатам которых построены диаграммы хрупковязкого состояния аналогичные приведенной на рис. 1,а показали, что на базе $l_k = 0,5$ мм истинное относительное удлинение практически совпадает со значением относительного поперечного сужения ψ , что дополнительно подтверждается и данными [4]. Значение ψ можно определить по результатам измерения твердости по Брюнеллю по формуле

$$\psi = \ln \frac{h_k}{h_{\min}}, \quad (6)$$

где h_k – глубина лунки отпечатка при контрольном измерении твердости, мм; h_{\min} – глубина лунки отпечатка, соответствующая максимальной твердости диаграммы (220 НВ, рис. 1,а), мм.

Взаимосвязь между ϵ и ψ для исследованной стали приведена в табл. 1.

Таблица 1

Взаимосвязь между истинным относительным удлинением ϵ и относительным поперечным сужением ψ , определяемым по значениям твердости

| НВ | 130 | 140 | 150 | 160 | 170 | 180 | 190 | 200 | 210 | 220 |
|-----------------------------------|------|------|------|------|------|-------|------|------|-------|------|
| Глубина лунки, мм | 0,74 | 0,68 | 0,63 | 0,60 | 0,56 | 0,53 | 0,50 | 0,47 | 0,45 | 0,43 |
| $\epsilon = \ln \frac{l_k}{l}$ | 0,56 | 0,45 | 0,35 | 0,32 | 0,25 | 0,20 | 0,15 | 0,08 | 0,04 | 0 |
| $\psi = \ln \frac{h_k}{h_{\min}}$ | 0,53 | 0,45 | 0,37 | 0,32 | 0,25 | 0,199 | 0,14 | 0,08 | 0,036 | 0 |

Взаимосвязь между ψ и $\text{tg}\alpha$ приведена на рис. 2, которая описывается зависимостью

$$\text{tg}\alpha = 2,22\psi = k_\alpha \psi \quad (7)$$

С учетом зависимости (7), значение работы разрушения для образца из контролируемой по твердости зоны металла можно определить по формуле

$$A = k_\alpha a_0 b h^2 \psi, \quad (8)$$

где k_α – коэффициент, определяемый по данным рис. 1.2, отдельно для каждой конкретной плавки стали.

При экспериментальной проверке досоверности формулы (8), надрез в ударном образце следует наносить только по точкам измерения твердости, по которым определяли значение ψ .

В итоге, используя сертификатные данные механических свойств исследуемой стали, и по результатам измерения твердости контролируемых зон можно определить

значение ударной вязкости металла этих зон, как браковочного критерия. не прибегая к разрушающим методам контроля.

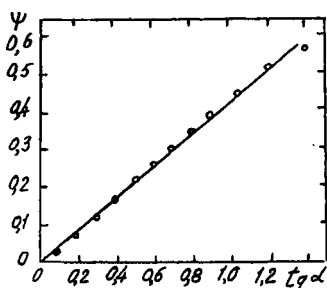


Рис. 2. Зависимость относительного поперечного сужения ψ от $tg \alpha$

ЛИТРАТУРА

1. Жданович Г.М., Хмелев А.А. О диаграмме хрупковязкого состояния малоуглеродистых сталей при ударном изгибе // Проблемы прочности.– 1981.– №1.– С.85–89.
2. Хмелев А.А., Сидоров В.А. Оценка остаточного ресурса пластичности стали методом измерения твердости//Материалы международной научн. техн. конф.– Мн., 2000.– Ч.5.–С. 28.
3. Хмелев А.А., Сидоров В.А. Об удельной работе пластического деформирования стали, как критерия оценки ее качества // Машиностроение. – Мн., 2000.– Вып.16.– С. 260–262.
4. Быков В.А. Пластичность, прочность и разрушение металлических судостроительных материалов. – “Судостроение”.– Л., 1974.– С. 38.

УДК 621.523:538.632

В. Г. Шепелевич

ДАТЧИК УГЛА ПОВОРОТА НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА ХОЛЛА

*Белорусский государственный университет
Минск, Беларусь*

Современное развитие автоматизированных систем контроля и управления различными технологическими процессами, технологическое оснащение робототехнических комплексов характеризуется широким использованием разнообразных измерительных преобразователей для сбора информации о состоянии внешней среды, а также внутренним состоянием системы. Они разрабатываются на основе различных физических явлений [1]. В последнее время значительно вырос интерес к измерительным преобразователям на основе эффекта Холла. Благодаря им удается создать датчики, у

которых отсутствует механический контакт между контролируемым объектом и измерительным преобразователем. Сбор информации на расстоянии повышает надежность и долговечность устройств. Важным фактором, вызвавшим интерес к холловским измерительным преобразователям, является то, что для их производства может быть успешно применена современная технология. Для изготовления холловских чувствительных элементов может быть активно использованы приемы и методы интегральной технологии, что позволило понизить и обеспечить их массовое производство [2]. Датчики, работающие на основе эффекта Холла, содержат, кроме холловского измерительного преобразователя, магнитную систему. Конструкция магнитной системы во многом определяет технические параметры устройств и его успешное функционирование [2-3]. В данной работе представлены результаты разработки аналогового датчика угла поворота на основе эффекта Холла с диапазоном измерений 110 и 220 °.

Датчик угла поворота, устройство которого представлено на рис. 1, состоит из магнитной системы, ротора и преобразователя Холла. В состав магнитной системы входят два самарий-кобальтовые магниты 1, центральный 2 и два боковых 3 концентратора, а также Ш-образный концентратор. На центральном выступе последнего расположен измерительный преобразователь Холла 5. Между Ш-образным концентратором и постоянными магнитами расположен ротор 6, содержащий 3 вставки из ферромагнитного материала. Две вставки 7, 8 изготовлены в виде полуколец, а третья вставка 9 имеет форму спирали Архимеда. Толщина полуколец, спирали Архимеда и ротора составляет 3 мм. Ширина вставок равна 2 мм. Внешние радиусы большого и малого полукольца равны 25 и 13 мм соответственно. Расстояние ротора до Ш-образного концентратора и концентраторов, примыкающих к постоянным магнитам, составляет 1,5 мм.

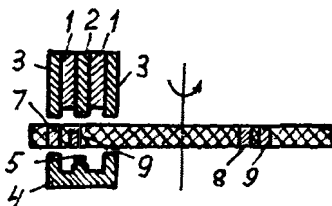


Рис. 1. Устройство датчика угла поворота

Измерительные преобразователь Холла изготовлены на основе гетерозпитаксиальной структуры $n\text{-InSb-i-GaAs}$. Его габариты $0,5 \times 0,5$ мм, размер чувствительной области — $0,1 \times 0,1$ мм преобразователи Холла приклеены к держателю, изготовленному из четырех медных проводов диаметром 0,15 мм. Провода в месте установки предварительно шлифовались, образуя площадку из четырех медных шин. Медные шины соединялись с контактными площадками элемента Холла золотым микропроводом 40 мкм.

Исследовано влияние угла поворота φ ротора на величину магнитной индукции B в области расположения преобразователя Холла. График зависимости $B(\varphi)$, представленный на рис. 2, характеризуется экстремумами, угловое расстояние между которыми 120 и 240°. Между экстремумами происходит монотонное изменение магнитной индукции. Первый экстремум наблюдается при положении малого полукольца 8 напротив правого концентратора 3 магнитной системы, а второй экстремум – при положении большего полукольца 7 напротив левого концентратора 3. При вращении ротора ферромагнитная вставка в виде спирали Архимеда 9 вызывает перераспределение магнитного потока через средний выступ Ш-образного концентратора 4, вызывая тем самым изменение магнитной индукции в области расположения преобразователя Холла и, следовательно, его сигнал.

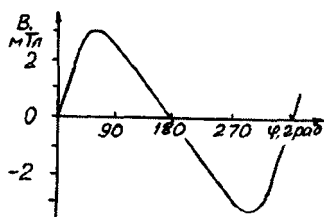


Рис. 2. Зависимость магнитной индукции B в области расположения преобразователя Холла от угла поворота ротора

Диапазон измерений угла поворота определяется угловым расстоянием между экстремумами. Он может быть принят равным 220 и 110°. Чувствительность датчика угла поворота $S = dU/d\varphi = \gamma(dB/d\varphi)$ ($U = B\gamma$ – выходной сигнал, γ – магнитная чувствительность преобразователя Холла). Для указанных диапазонов измерения $dB/d\varphi = 2,8 \cdot 10^{-5}$ и $5,5 \cdot 10^{-5}$ Тл/град. При использовании преобразователя Холла с магнитной чувствительностью $\gamma = 500$ мВ/Тл чувствительность датчика угла поворота составляет 14 и 28 мкВ/град, соответственно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Данилов А. А. Сенсорные устройства автоматов контроля и сборки. – Л.: Машиностроение, 1984. – 162 с. 2. Хомерики О. К. Полупроводниковые преобразователи. – Мн.: Наука и техника, 1981. – 214 с. 3. Шепелевич В. Г. Датчики перемещения, угла поворота и частоты вращения на основе эффекта Холла. – Мн.: БелНИИНТИ, 1989. – 28 с.

ДИНАМИКА ЦИСТЕРНЫ, ЧАСТИЧНО ЗАПОЛНЕННОЙ ЖИДКОСТЬЮ, ПРИ ДВИЖЕНИИ ПО ЗАКРУГЛЕНИЮ

*Белорусский государственный университет транспорта
Гомель, Беларусь*

Среди большого количества грузов, перевозимых транспортными средствами, значительную долю составляют жидкие грузы, причем особое место занимают опасные. Аварии, происходящие при эксплуатации подвижного состава, перевозящего жидкие грузы, приводят не только к повреждению подвижного состава и железнодорожного пути, но и к нанесению значительного ущерба окружающей среде.

Цистерны при погрузке не заполняются доверху во избежание разрывов оболочек их котлов, вызванных значительным ростом внутреннего давления при внешних тепловых воздействиях. Уровень заполнения зависит от вида перевозимой жидкости. Кроме того, при раздаче груза потребителям и нарушении герметичности сливного оборудования возможны ситуации, при которых котлы цистерн оказываются заполненными наполовину или даже меньше.

Жидкость, заполняющая котел, перемещается в нем в течение всего процесса движения. Поскольку масса перевозимой жидкости сопоставима с массой незагруженного транспортного средства, ее относительные перемещения оказывают существенное влияние на параметры движения цистерны. В то же время цистерны должны отвечать повышенным требованиям обеспечения безопасности движения вследствие опасности большинства перевозимых грузов.

В связи с перечисленными причинами возникает необходимость исследования движения цистерн, частично заполненных жидкостью. Наибольший интерес здесь представляет изучение характера их движения при переходных режимах движения.

Анализ публикаций показал, что в литературе содержится очень мало информации о расчетах переходных процессов в системах твердых тел, некоторые из которых частично заполнены жидкостью. В монографиях [2, 4] рассматривается движение свободного твердого тела, имеющего полости, частично заполненные жидкостью. Приведенные в опубликованных научных работах результаты исследований дают возможность сделать вывод о том, что теория, позволяющая изучить влияние относительно движения жидкости на колебания цистерн, частично заполненных жидкостью, практически не разработана.

Например, в работе [1] предлагается метод решения задачи о продольных колебаниях цистерны с жидкостью. В книге [3] рассматривается устойчивость цистерн при малых боковых колебаниях.

При исследовании переходных режимов движения цистерн нельзя ограничиваться случаем малых колебаний. Для точного описания движения жидкости в котле цистерны должны быть использованы уравнения динамики сплошной среды. Причем, особенностью задачи является наличие постоянно изменяющей свое положение свободной поверхности. Существующие подходы к решению задач гидромеханики, основанные на применении методов конечных разностей, конечных и граничных элементов требуют значительных вычислительных затрат. Поэтому применен вариационный подход, позволяющий при аппроксимации свободной поверхности жидкости плоскостью получить результаты, имеющие приемлемую для технических расчетов точность [5]. С использованием этого приема выполнены расчеты движения цистерны по закруглению, а также переход ее с прямолинейного участка пути на криволинейный.

Положение жидкости в котле цистерны задавалось двумя углами φ и θ , первый из которых равен углу наклона свободной поверхности жидкости по отношению к продольной оси котла, а второй определяет поворот той же поверхности в поперечной плоскости цистерны, как это показано на рис. 1.

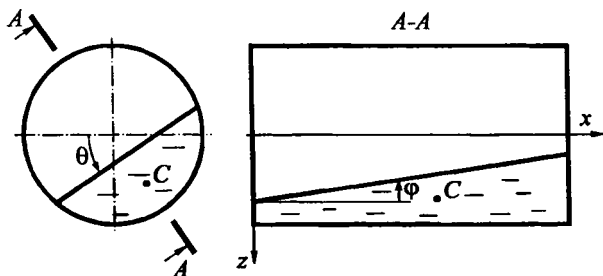


Рис. 1. Обобщенные координаты, определяющие положение жидкости в котле цистерны

При определении параметров движения цистерны деформациями ее конструктивных элементов можно пренебречь по сравнению с перемещениями транспортного средства и жидкости. Тогда выражения кинетической T и потенциальной Π энергий цистерны с жидкостью имеют вид:

$$T = \left(m_1 + \frac{J_1}{\rho^2} \right) \frac{\dot{s}^2}{2} + \frac{m_2}{2} \left(\left(\frac{\dot{s}}{\rho} (\rho + z_C(\varphi) \sin \theta) + \frac{dx_C(\varphi)}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dz_C(\varphi)}{dt} \right)^2 + (\dot{\theta} - z_C(\varphi))^2 \right);$$

$$\Pi = -m_2 g z_C(\varphi) \cos \theta,$$

где m_1 , m_2 – массы цистерны и жидкости; J_1 – моменты инерции цистерны относительно вертикальной оси; s – закон изменения пройденного цистерной пути; ρ – радиус кривизны траектории цистерны; x_C , z_C – координаты центра масс C жидкости в ее относительном движении; g – ускорение свободного падения.

Координаты x_c, z_c являются в общем случае неявными нелинейными функциями угла φ , вид которых определяется исходя из того, что объем жидкости остается постоянным в течение всего времени движения.

Заметим, что в выражении кинетической энергии системы нельзя пренебречь слагаемым $z_c(\varphi) \sin \theta$ по сравнению с радиусом кривизны ρ , так как именно оно учитывает действие на транспортное средство нормальных сил инерции.

Подстановка выражений кинетической и потенциальной энергий в уравнения Лагранжа II рода позволила получить дифференциальные уравнения движения системы. Применяя к ним стандартный алгоритм метода Рунге-Кутты четвертого порядка, необходимо было рассчитывать значения обобщенных ускорений на каждом шаге интегрирования. Попытка получить их аналитические выражения показала, что последние чрезвычайно громоздки. Поэтому в качестве подпрограммы на каждом временном шаге выполнялось решение системы линейных уравнений относительно обобщенных ускорений. Исследования показали, что описанный подход позволил значительно упростить процесс составления программы и уменьшить время расчетов.

Имея законы изменения углов φ и θ можно оценить, появляются ли условия для возникновения аварийных ситуаций при переходе транспортного средства с прямолинейной траектории движения на криволинейную. На рис. 2 приведена схема сил, действующих на исследуемую систему в этом случае.

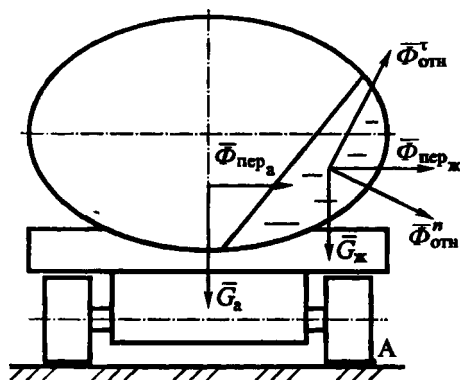


Рис. 2. Расчетная схема цистерны при движении по кривой.

Вследствие движения автомобиля по кривой возникают переносные силы инерции автомобиля $\vec{\Phi}_{\text{пер}a}$ и жидкости $\vec{\Phi}_{\text{пер}j}$. Перетекание жидкости в цистерне приводит к появлению относительных сил инерции $\vec{\Phi}_{\text{отн}}^t$ и $\vec{\Phi}_{\text{отн}}^n$. Все названные силы создают опрокидывающий момент относительно точки А колеса. Препятствуют опрокидыванию моменты сил тяжести \vec{G}_a и \vec{G}_j .

Переносные силы инерции зависят от скорости движения автомобиля v и радиуса кривизны траектории ρ . Они определяются по формуле

$$\Phi_n = ma_n = \frac{mv^2}{\rho},$$

где a_n – нормальное ускорение автомобиля.

На примере цистерны ОТА-3,8Н рассчитаны значения максимального нормального ускорения, при которых обеспечивается устойчивость цистерны. Построена его зависимость от отношения объема перевозимой жидкости V_x к объему котла V . Она представлена на рис. 3. Линия 1 на графике соответствует случаю расположения жидкости, изображенному на рис. 2, а линия 2 – варианту, предполагающему, что жидкость не перемещается относительно котла.

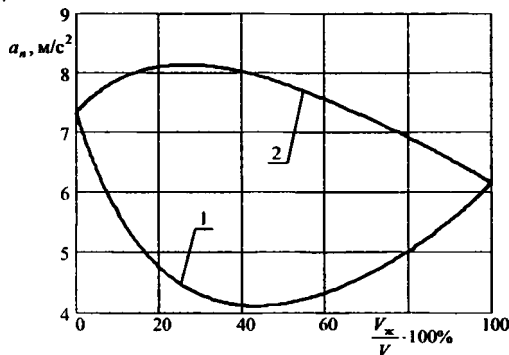


Рис. 3. Зависимость допустимого нормального ускорения автомобиля от уровня заполнения цистерны

Результаты расчетов показывают, что учет перетекания жидкости приводит к существенному уменьшению допустимого нормального ускорения, а с ним и скорости движения по кривой. Наиболее неблагоприятные условия складываются при заполнении котла цистерны на 30-60% его объема.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беспалько С. В. К вопросу о моделировании продольных колебаний цистерны, частично заполненной жидкостью // Вестник ВНИИЖТ.– 1999.– № 4.– С. 35-40.
2. Моисеев Н.Н., Румянцев В.В. Динамика тела с полостями, содержащими жидкость.– М.: Наука, 1965.– 439 с.
3. Черкашин Ю. М. Динамика наливного поезда.– М.: Транспорт, 1975.– 136 с.
4. Черноусько Ф.Л. Движение твердого тела с полостями, содержащими вязкую жидкость.– М.: Вычислительный центр АН СССР, 1968.– 230 с.
5. Shimanovsky A. O., Krakova I. E. Application of the programs of computer algebra for a research of motion of material systems // Computer algebra in fundamental and applied research and education. Proceeding of second international scientific conference, September 20-24 1999.– Minsk, 1999.– P. 70-73.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.941

В.М. Адаменко

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ ПО ЭНЕРГОПОТРЕБЛЯЮЩИМ ПОКАЗАТЕЛЯМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

*Борисовский государственный политехнический колледж
Борисов, Беларусь*

Отличительная особенность современного этапа развития нашего общества – динамизм преобразований в сфере экономической жизни. В ходе перестройки хозяйственного механизма выявляются не только позитивные тенденции, но и факторы торможения, возникшие в период экстенсивного развития экономики, использования административно-командных методов управления. К числу таких факторов относятся количественные подходы к разработке организационно-технических мероприятий без ориентации на конечные результаты, направленные на повышение производительности труда. Поэтому особую значимость приобретает дальнейшее углубление теоретических исследований, анализ источников и факторов повышения производительности труда, выработка на этой основе современных подходов к определению наиболее перспективных направлений ее роста. На решение этой актуальной задачи и сконцентрирована деятельность соответствующих технических подразделений предприятий, научного потенциала ВУЗов, ССУЗов.

Машиностроение признано сыграть ведущую роль в ускорении научно-технического прогресса в народном хозяйстве страны. Характерными чертами его развития является автоматизация технологических процессов, быстрое развитие робототехники, использование роторных и роторно-конвейерных линий, гибких производственных систем, обеспечивающих высокую производительность. Следовательно, значение обработки резанием в настоящее время резко повышается. Авторы работы [9, 10] отмечают, что изучение процессов резания сопровождается созданием математических моделей, которые базируются на единой физической концепции взаимодействия режущего инструмента с заготовкой. Так, например, В.К. Старков [7] в качестве единой физической концепции, положенной в основу комплексного анализа процесса резания, использовал теорию дислокации физики твердого тела. По его мнению, дислокационные представления хорошо раскрывают физическую природу процесса резания металлов. А.Д. Макаров [5] показал, что для каждой пары материал обрабатываемой детали – материал инструмента существует средняя температура контакта, при кото-

рой в условиях резания достигается наименьшая интенсивность изнашивания инструмента. Эта температура положена в основу различных методик оптимизации режимов резания и исследования обрабатываемости материалов.

Автор работы [4] М.И. Клушин предложил рассматривать закономерности процесса резания с той позиции, что стружкообразование, изнашивание режущего инструмента и формообразование поверхности на заготовке совершаются одновременно и тесно взаимосвязаны. Это в совокупности составляет единое целое, характеризуется взаимозависимостью его частей и называется системой резания, которая является подсистемой замкнутой динамической системы станка. Последняя включает упругую систему станок – приспособление – инструмент – деталь и процессы, действующие в системе.

При ее исследовании на входе определяют факторы, которые существенно влияют на процесс резания и могут контролироваться. К ним относятся: обрабатываемый материал, форма и размеры обрабатываемой заготовки, снимаемый припуск, материал режущего инструмента, вид инструмента и его геометрия, жесткость системы СПИД, свойства СОЖ, режим резания, а также мощность привода.

На выходе из системы фиксируются параметры ее функционирования: стойкость, скорость изнашивания и допустимый износ инструмента; шероховатость обработанной поверхности; точность обработки; мощность, расходуемая на резание; виброустойчивость системы СПИД; стружколоманье и стружкозавивание и др. Следовательно, параметрами функционирования системы являются результаты протекания процессов в ней.

Методические средства познания системы резания имеют свои недостатки и трудности, так как основным средством исследования является эксперимент. Можно предположить, что мощность привода главного движения станка и мощность, расходуемая на резание, являются показателями подсистем замкнутой динамической системы станка, находятся во взаимосвязи и могут служить в определенных схемах резания критерием оптимальной скорости резания. Данное предположение требует дальнейшего теоретического уточнения, что и приводится ниже. Авторы работы [1, 2, 10] дают определение обрабатываемости как способности металлов поддаваться резанию, которое характеризует совокупность нескольких технологических свойств материала, характеризующих его влияние на различные стороны процесса резания. В работе [6] приведены основные параметры, характеризующие обрабатываемость:

1. Силы резания и потребляемая мощность.
2. Легкость ломания и отвода стружки, определяемые ее деформацией и характером стружкообразования.
3. Возможность получения обработанных поверхностей с минимальной или заданной шероховатостью, степенью и глубиной наклепа и других характеристик качества поверхностного слоя.

4. Легкость получения необходимой точности обработки при чистовых и отделочных операциях, определяемой для заданной технологической системы интенсивностью изнашивания инструмента, возникающими при резании силами и их изменением по мере затупления инструмента.

5. Скорость резания V_r , соответствующая заданному периоду стойкости T при износе инструмента до принятого критерия затупления.

6. Оптимальная скорость резания V_0 , при которой наблюдается наименьшая интенсивность изнашивания инструмента и наименьший относительный поверхностный износ h_0 .

7. Экономическая скорость резания V_e , при которой достигается наименьшая себестоимость обработки условной детали при заданной стоимости станко-минуты, времени на смену затупившегося инструмента и стоимости его эксплуатации за период стойкости.

Авторы работы [10] используют также другие показатели для оценки обрабатываемости (табл. 1).

Таблица 1

Показатели обрабатываемости

| Черновая обработка | Чистовая обработка |
|--|---|
| Силы резания и потребляемая мощность | Легкость достижения необходимой точности обработки |
| Легкость ломания и отвода стружки | Степень и глубина наклепа обработанной поверхности |
| Склонность к сколам при выходе инструмента из контакта с деталью | Легкость получения требуемой шероховатости обработанной поверхности |
| Уровень скоростей резания, обеспечивающий требуемый период стойкости инструмента | |
| Уровень скоростей резания, соответствующий минимальной интенсивности изнашивания инструмента | |
| Уровень скоростей резания, обеспечивающий минимальную себестоимость обработки | |
| Склонность к трещинообразованию и прижогам | |

Единой универсальной характеристики обрабатываемости нет. Металл, обладающий хорошей обрабатываемостью с точки зрения уровня целесообразных скоростей, не может иногда обеспечивать требуемой шероховатости поверхности, при этом возникают слишком большие силы резания, и наоборот. Кроме того, необходимо учитывать, что оценка обрабатываемости имеет всегда относительный характер. Например, допустимая скорость зависит не только от свойств обрабатываемого материала, но и от качества режущего инструмента. Шероховатость обработанной поверхности тесно связана с геометрическими параметрами инструмента и с условиями резания, в частности, со скоростью резания, при изменении которых можно получить самые различные результаты.

Автор работы [8] приводит сравнительную оценку обрабатываемости нескольких металлов по показателям значимости:

| Черновая обработка | Чистовая обработка | Обработка на автоматах |
|---|---|---|
| 1. Стойкость | 1. Шероховатость обработанной поверхности | 1. Характер стружкообразования |
| 2. Затраты энергии | 2. Характер стружкообразования | 2. Шероховатость обработанной поверхности |
| 3. Характер стружкообразования | 3. Стойкость | 3. Стойкость |
| 4. Шероховатость обработанной поверхности | 4. Затраты энергии | 4. Затраты энергии |

В нормативно-справочной литературе обрабатываемость оценивается в первую очередь интенсивностью затупления режущих инструментов и уровнем целесообразных скоростей резания V_t . Необходимо, однако, отметить, что скорость резания V_t как характеристика обрабатываемости имеет ряд недостатков: не известен предел допустимого снижения скоростей резания, проводимого в целях повышения периода стойкости; при сравнении режущих свойств различных инструментальных материалов в зависимости от уровня скорости V_t не всегда правильно можно оценить их относительную износостойкость; скорость V_t зависит от принятого критерия затупления. Эту характеристику невозможно использовать для автоматического регулирования процесса резания, так как разным комбинациям V , S , t будут соответствовать резко отличающиеся периоды стойкости.

Основные недостатки, присущие скорости V_t , имеет и скорость V_z , поскольку она зависит от организационно-технических условий производства, модели станка, конструкции и способа заточки инструмента, разряда рабочего и др. Скорость V_z стабилизируется только для конкретных условий. Более перспективным с этих позиций является оптимальная скорость резания V_o , которая не базируется на абсолютных показателях. К сожалению, подробная систематизация уровней V_o , и $h_o.p$ для различных обрабатываемых материалов в настоящее время отсутствует. Это заставляет пользоваться в качестве основного показателя обрабатываемости значением V_t . Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что обрабатываемость можно оценивать по скорости резания, которая находится во взаимосвязи с мощностью процесса резания и потребляемой мощностью станка, и предполагается, что при черновой обработке этот фактор наиболее полно проявляется, что дает предположение об использо-

вании наиболее чувствительного энергетического параметра станка для ее установления. Например, по показателю составляющей мощности станка производить оценку процесса обработки, который теоретически и экспериментально можно увязать с определением оптимальной скорости резания. В настоящее время разработаны различные способы оценки обрабатываемости. Условно их можно подразделить на три основные группы (табл. 2).

Таблица 2

Способы определения обрабатываемости

| 1 | 2 | 3 |
|--|---|---|
| Сопоставление и анализ интенсивности изнашивания | Оценка физических параметров процесса резания | Оценка физико-механических и других свойств материала |

К первой группе относятся способы определения зависимостей скорости резания от стойкости режущих инструментов для различных материалов.

Во второй группе способов оценки обрабатываемости физическими параметрами процесса резания являются силы резания, уровень температур в зоне резания, угол сдвига.

Использование сведений о физических и механических свойствах материалов в третьей группе способов оценки обрабатываемости является перспективным направлением. Общим преимуществом таких способов является существенное снижение трудоемкости и расхода обрабатываемого материала, а в качестве анализируемых параметров используются температуры максимального электросопротивления, провала пластичности, структурно-фазового превращения α -железа в γ -железо.

В качестве предполагаемого примера можно рассматривать вариант использования рабочих характеристик привода технологического оборудования, силы тока I , коэффициента мощности $\cos \gamma$ от мощности резания N (рис. 1).

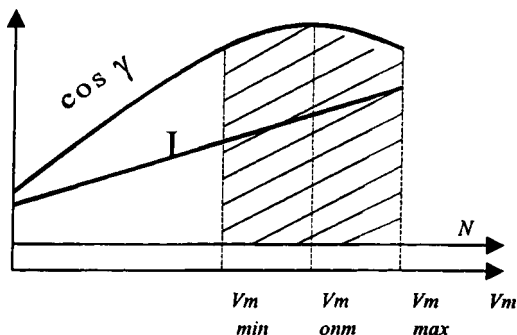


Рис. 1. Зависимость оптимальной скорости резания от энергетических показателей привода

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что оценку обрабатываемости по энергопотребляющим показателям технологического оборудования целесообразно отнести к третьей группе способов, а в качестве анализируемых параметров использовать изменение мощности двигателя, в зависимости от изменения скорости резания. Для проведения исследований разработана схема экспериментальной установки (рис. 2), позволяющая по результатам исследований определить зависимость $N=f(V_T)$.

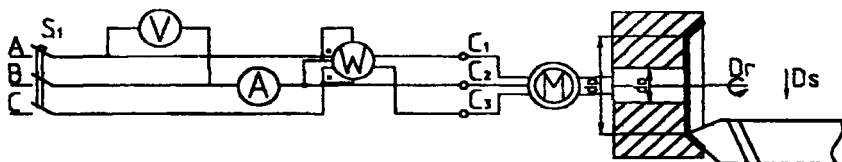


Рис. 2. Принципиальная схема установки для оценки обрабатываемости по энергетическим показателям

По данной зависимости в дальнейшем можно определить скорость резания (V_T) для любой заготовки по расчетной величине мощности резания (N). В то же время анализ технологичности процесса изготовления детали “гайка шариковая 5220-3401038-10” с использованием многошпиндельного полуавтомата 1Б240П6 на Борисовском заводе “Автогидроусилитель” по потребляемой мощности (рис. 3) показал о целесообразности учета данного фактора при проектировании технологических процессов.

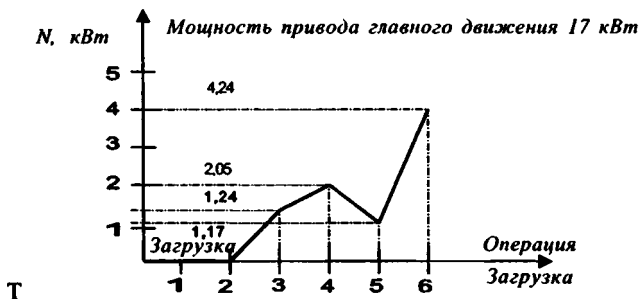


Рис. 3 Зависимость потребляемой мощности резания от мощности привода (деталь “Гайка шариковая” 5320-3401038-10, станок 1Б 240П56)

Данные предложения требуют экспериментальных исследований и апробации в условиях производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аршинов В.А., Алексеев Г.А. Резание металлов и режущий инструмент.– М., 1975.
2. Горанский Г.К. Автоматизация технического нормирования работ на металлорежущих станках с помощью ЭВМ. М., 1970.
3. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. М., 1975.
4. Клушин М. И. Теория резания. Вводные главы. Горький, 1975.
5. Макаров А.Д. Анализ характеристик обрабатываемости и параметров оптимизации процесса резания. // Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. Современные пути повышения производительности и точности металлообрабатывающего оборуд. и автоматизации технолог. процессов в машиностроении. М., 1980. С. 146–149.
6. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. М., 1976.
7. Старков В.К. Дислокационные представления о резании металлов. М., 1979.
8. Фельдштейн Э.И. Обрабатываемость сталей в связи с условиями термической обработки и микроструктурой. М., 1953.
9. Ящерицин П.И., Еременко М.Л., Жигалко Н.И. Основы резания материалов и режущий инструмент. Мн, 1975.
10. Ящерицин П.И., Еременко М.Л., Фельдштейн Е.Э. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах. М., 1990.

УДК 681.327.12.001.362

Т.В. Гамзалева, М.Н. Коваленко, В.Л. Концевой, В.М. Мирончик

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

*ЗАО "Спектроскопические системы", НИИ ПФП им. А.Н. Севченко, НИИ ПМ
Минск, Беларусь*

Программный комплекс предназначен для морфологического анализа изображений материалов. С его помощью осуществляется визуальная полуавтоматическая и автоматическая обработка полутоновых изображений и анализ получаемой информации. Ввод изображения в компьютер производится с помощью оптической системы на базе микроскопа, на который устанавливается цифровая видеокамера. Адаптация серийно выпускаемых микроскопов, для использования в комплекте с видеокамерой, осуществляется при помощи механических переходников и специальных линз.

Программный комплекс обладает следующими возможностями:

- непосредственное открытие ранее созданного изображения из файла формата .bmp или .im (формат хранения изображений промышленного анализатора MagicScan);
- ручное и автоматическое выделение интересующих объектов (зерен, пор, включений, фаз и т.п.);
- редактирование объектов – проведение деагломерации, корректировка формы объектов;

- измерение размеров, формы, положения, выделенных объектов или их участков;
- расчет различных характеристик объектов;
- статистическая обработка результатов измерений с построением гистограмм;
- автоматическая обработка пакета изображений;
- возможность добавления и создания новых методик для автоматизации выполнения рутинного анализа.

При анализе поверхности материалов в металлургии комплекс позволяет решать следующие задачи:

- определение параметров распределения размеров зерен на шлифах стальных заготовок;
- измерение размеров индивидуальных зерен, среднего размера зерна, числа зерен;
- определение степени анизотропии зерна на шлифах стального проката, (отношение среднего поперечного размера зерна к среднему продольному размеру);
- определение параметров распределения размеров зерен на шлифах алюминиевых литейных сплавов;
- определение загрязненности стали неметаллическими включениями;
- определение объемных долей и размеров включений графита различных форм на нетравленных шлифах отливок из чугуна;
- определение объемной доли и размеров включений силицидов на нетравленных шлифах латуни;
- определение относительных объемных долей перлита и феррита на шлифах стальных заготовок;
- определение объемных долей и размеров отдельных пор на шлифах различных материалов.

Процедура анализа изображения разбивается на несколько этапов.

1. Фиксация изображения.
2. Сегментирование (установка пороговых значений для каждой фазы регистрируемого образца).
3. Редактирование (очистка изображения от ложных объектов).
4. Калибровка (задание калибровочного коэффициента в выбранных единицах, который автоматически применяется для любого измерения в элементах изображения).
5. Обработка данных (измерение заданных характеристик объектов – размеров, числа осей симметрии каждой частицы, минимальной и максимальной кривизны их границ (оценка шероховатости), получение информации о положении (пространственном распределении частиц)).

Для выбранных объектов изображения измеряются следующие величины:

1. Площадь объекта.
2. Площадь поля (площадь всего изображения).

3. Детектируемая площадь (площадь, выбранная для обработки).
4. Периметр объекта.
5. Фактор формы.
6. Ориентация.
7. Длина
8. Ширина
9. Отношение длины к ширине.
10. Горизонтальная проекция
11. Вертикальная проекция.
12. $(\text{Длина} + \text{ширина}) / 2$ – полусумма длины и ширины объекта.

При расчете статистических параметров объектов изображения вычисляются следующие величины: минимум, максимум, среднее арифметическое, среднее геометрическое, среднее гармоническое, дисперсия выборки, среднеквадратичное отклонение выборки, дисперсия совокупности, среднеквадратичное отклонение совокупности, среднеквадратичное отклонение от среднего, относительная ошибка, асимметрия, эксцесс.

Главное окно программы содержит четыре пункта меню: “Файл”, “Операции”, “Настройка”, “Справка” и пять вкладок: “Обработка”, “Выборка”, “Отчеты”, “Изображение”, “Привязка” (рис. 1).

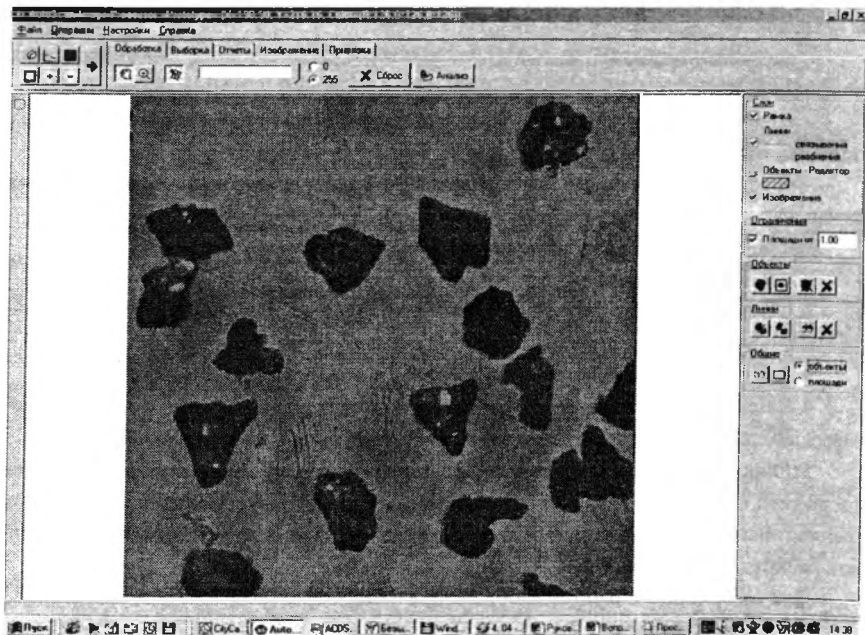


Рис. 1. Общий вид окна программы с анализируемым изображением

Если качество изображения по каким-либо причинам не удовлетворяет пользователя, возможна его корректировка путем изменения яркости, масштаба или инверсии.

Установкой оптимальных порогов черного и белого в яркости изображения, добиваются четкого выделения интересующих объектов. При этом, возможно изменение порога как от 0 до 255, так и от 255 до 0. Таким образом, можно задать любое нижнее и верхнее значение порога. После указанной процедуры, изображение анализируется, в нем выделяются объекты, по которым в дальнейшем происходит расчет геометрических и статистических параметров. При проведении анализа возможно задание некоторых дополнительных условий его проведения, а именно: задание порогового ограничения по площадям, учет граничных объектов, различные алгоритмы обработки границ и учета внутренних дефектов объектов, задание произвольной рабочей области.

В режиме редактирования возможна ручная выборка объектов, а также инвертирование этой выборки, проведение деагломерации и корректировки формы (рис. 2).

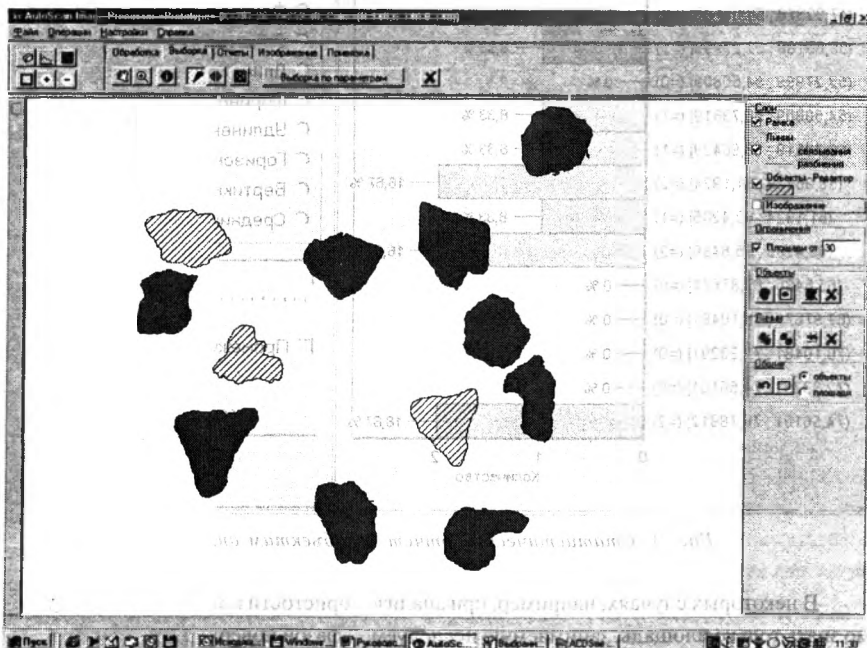


Рис. 2. Полученные после анализа исходного изображения и последующего редактирования объекты.

После того, как проведен анализ изображения, осуществлено, при необходимости, ручное редактирование, выбраны объекты анализа, становится возможным полу-

чение информации как по каждому из объектов, так и по всей совокупности. Результаты измерений можно вставлять в произвольные отчеты и использовать в дальнейшем. На рис. 3 показано, как происходит вывод гистограмм по рассчитанным характеристикам объектов анализа. Выбирая необходимый параметр в правой части окна, в левой части получаем гистограмму распределения по выбранному параметру. Гистограммы также можно выводить на печать и использовать в отчетах. Помимо статистики по параметрам в отчет входят следующие величины: площадь поля, детектируемая площадь, общее количество объектов, количество объектов для отчета.

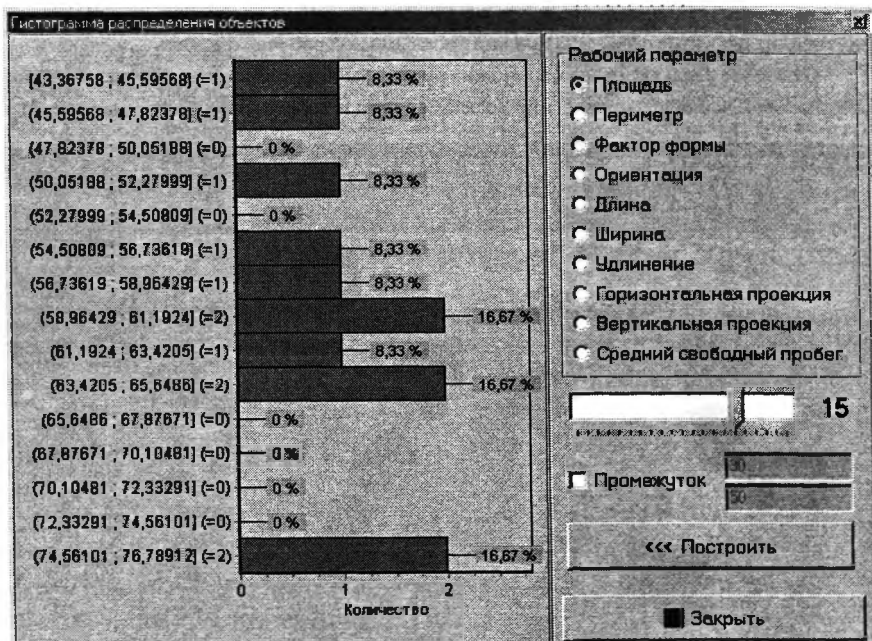


Рис. 3. Статистический отчет по объектам анализа

В некоторых случаях, например, при анализе пористости поверхности, необходимо знать только площадь, занимаемую исследуемой фазой поверхности, а также отношение этой площади ко всему полю изображения. Для реализации такой возможности в программе предусмотрен специальный режим работы, при котором рассчитывается отношение общей площади поля к площади детектируемых объектов.

Для автоматической обработки группы изображений предусмотрен режим пакетной обработки, который позволяет обрабатывать любое количество изображений предварительно сохраненных на диске и сделанных в одних и тех же услови-

ях. В этом случае все отчеты выводятся путем суммирования для всей совокупности изображений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вудраф Д., Делчар Т., Современные методы исследования поверхности. – М.: Мир, 1989. – 568 с. 2. Методы анализа поверхности / Под ред. А.Задерны. – М.: Мир, 1979. – 582 с. 3. Нефедов В.И. Черепин В.Т. Физические методы исследования поверхности твердых тел. – М.: Наука, 1983. – 296 с.

УДК 621.313

Л.И. Гречихин В.Б. Тимошевич

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ В МАШИНОСТРОЕНИИ ПУТЕМ АНАЛИЗА ГЕНЕРИРУЕМОГО РАДИОШУМА

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Радиоизлучение промышленных объектов или промышленные радишумы чаще всего рассматриваются как явление, мешающее обеспечению надежной радиосвязи. Исследования шумов проводились ранее с целью определения методов их наиболее эффективного ослабления и подавления. При этом физические причины их формирования глубоко не вскрывались, так как поставленные задачи этого не требовали. В условиях возросших требований к надежности контроля технологических процессов с целью удержания их в оптимальных режимах и экономии средств на послеаварийный и текущий ремонт промышленные радишумы приобретают другую значимость, так как являются новым надежным источником информации о состоянии технологических процессов. Дистанционное получение и обработка радиосигнала излучаемого промышленными объектами позволяет не вводить конструктивных изменений в технологическую оснастку и обеспечивает непрерывную техническую диагностику каждого отдельного узла сложной технической системы. Обеспечение безопасности движения самолетов, судов, железнодорожных поездов и автотранспорта в процессе эксплуатации также представляет значительный интерес.

Технологические процессы в машиностроении сопровождаются разделением электрических зарядов, то есть электризацией [1,2]. Разделение зарядов происходит при контакте разнородных материалов, в электрических разрядах, в камерах сгорания реактивных двигателей и двигателей внутреннего сгорания [3] и приводит к образованию электрического диполя, изменяющегося со временем, что сопровождается излу-

чением электромагнитных волн. Мощность излучения дипольного радиоизлучателя определяется по формуле [4]:

$$N = \frac{2}{3 \cdot c^3} \left| \frac{d^2 p_z}{dt^2} \right|^2, \quad (1)$$

где c – электромагнитная постоянная, t – время, p_z – электрический дипольный момент.

В большинстве случаев образование электрического диполя можно рассматривать как последовательный процесс накопления электрических зарядов на конденсаторе, затем пробой зарядного промежутка и разряд конденсатора по образовавшемуся каналу. При таком механизме формирования электрического диполя его временная зависимость представится в виде:

$$p_z(t) = \begin{cases} q_0 \cdot l_0 \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) \right], & 0 \leq t \leq \tau_1 \\ q_0 \cdot l_0 - \frac{S_0}{S} \cdot (l_0 - \bar{\theta}_e \cdot t) \cdot \int_S^{\frac{l_0}{\bar{\theta}_e}} \int_{n_1} e \cdot \bar{\theta}_e \cdot n_{e,0} \cdot \exp[(\alpha + \beta) \cdot t] dS dt, & \tau_1 < t \leq \tau_1 + \frac{l_0}{\bar{\theta}_e} \\ q_0 \cdot l_0 \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right), & \tau_1 + \frac{l_0}{\bar{\theta}_e} < t < \infty, \end{cases} \quad (2)$$

где $\tau_1 = R_1 \cdot C$ – время зарядки конденсатора емкостью C через сопротивление R_1 ; l_0 – расстояние полного разделения электрических зарядов; $q_0 = \frac{C}{U}$ (U – разность потенциалов на обкладках конденсатора); $\bar{\theta}_e$ – подвижность электронов; e – заряд электрона; $n_{e,0}$ – концентрация электронов в окружающей среде; α и β – соответственно первый и второй коэффициенты Таундсена; S_0 – площадь канала разряда; S – площадь образующихся пластин конденсатора; $\tau_2 = R_2 \cdot C$ – время разряда конденсатора емкостью C через сопротивление канала разряда R_2 .

В уравнении (2) содержатся все основные параметры технологического процесса. Максимальная энергетика реализуется на основной частоте, равной

$$\nu_{\max} = \frac{1}{R_1 \cdot C}.$$

Излучение на отдельных гармониках определяется разложением в ряд Фурье (2). Электромагнитное излучение технологического процесса, промодулировано по амплитуде, частоте и фазе. Причинами этого могут быть неравномерность протекания тока разделения зарядов, механические колебания технологической оснастки, воздействие внешнего электромагнитного поля, интерференция и ряд других явлений. В таких условиях принимаемый радиосигнал имеет сложную форму. Рассмотрим проблему фильтрации совокупности полезных параметров сложного радиосигнала по

методу, основанному на свойствах непрерывных Марковских процессов и концепции переменных состояний. Это позволяет представить все случайные процессы, вызывающие радишумы и модулирующие их с помощью дифференциальных уравнений или уравнений состояния вместо корреляционных функций. Модель оценки радиосигнала, соответствующая реальным физическим процессам формирования электромагнитной волны заданным технологическим процессом как сложным антенным излучателем показана на рис. 1.

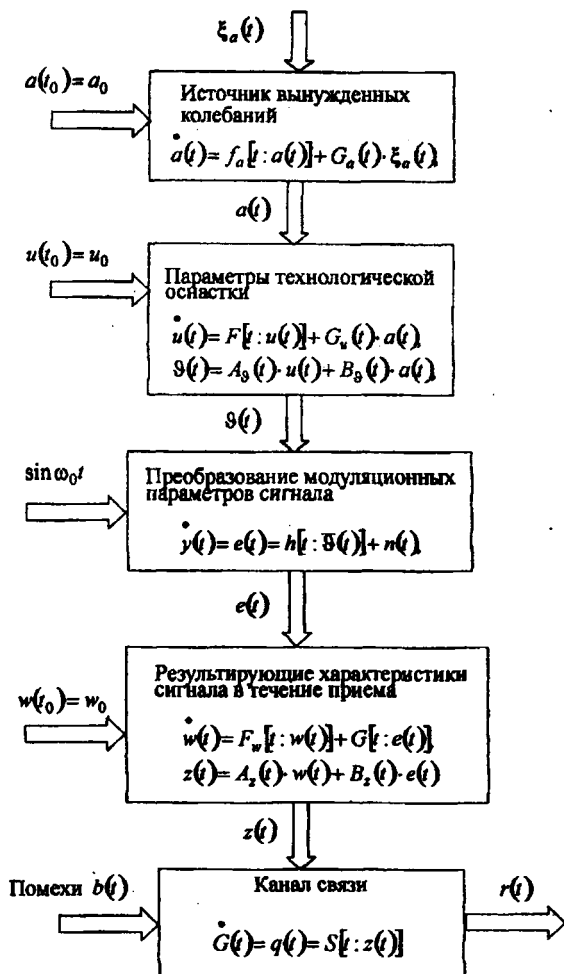


Рис.1. Модель оценки радиосигнала

Пусть $\xi_{\alpha}(t)$ есть внешний источник воздействия при реализации заданного технологического процесса, который описывается вектором состояния $a(t)$, связанного с характеристиками источников вынужденных колебаний отдельных элементов технологического процесса. Вектор $a(t)$ представляет собой многомерный марковский процесс, определяемый уравнением Ито [5].

$$d[a(t)] = f_{\alpha}[t : a(t)]dt + G_{\alpha}(t)d[\alpha(t)], \quad (3)$$

где $a(t_0) = a_0$, $\alpha(t)$ – процесс Винера.

Процесс (3) представлен на рис. 2.

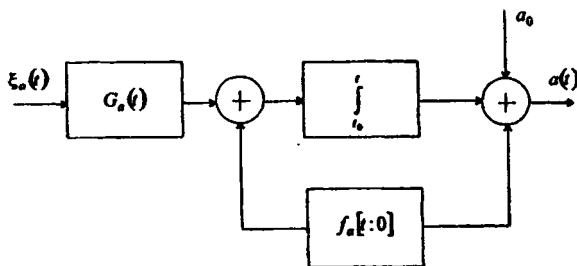


Рис. 2. Воздействие внешнего источника на внутренние колебания элементов технологического процесса

Пусть ковариационная матрица, соответствующая процессу Винера, задана выражением:

$$E[\alpha(t) \cdot \alpha'(t)] = A(t, u), \quad (4)$$

где A – симметричная неотрицательная матрица вида:

$$A(t, u) = \begin{Bmatrix} M_{\alpha}(t, u) & M_{\alpha', \alpha}(t, u) \\ M_{\alpha', \alpha}(t, u) & M_{\alpha'}(t, u) \end{Bmatrix} \quad (5)$$

Здесь $M_{\alpha}(t, u) = \|B_{\alpha}(t, u)\|$ – корреляционная функция, а $M_{\alpha', \alpha}(t, u) = \|B_{\alpha', \alpha}(t, u)\|$ – смешанная корреляционная функция.

Формально поделив уравнение (3) на dt , получим другой вид его записи:

$$\dot{a}(t) = f_{\alpha}[t : a(t)] + G_{\alpha}(t) \cdot \xi_{\alpha}(t), \quad (6)$$

где $\xi_{\alpha}(t) = \dot{\alpha}(t)$ – Гауссовский шум с равномерным спектром в полосе частот флуктуаций механических или электрических колебаний всех отдельных звеньев технологического процесса с ковариационной матрицей $A \cdot \delta(t, u)$ ($\delta(t, u)$ – дельта-функция). Увеличение количества источников механических или электрических колебаний приводит к увеличению размерности вектора состояния $a(t)$. Сигнал $a(t)$, выработанный источ-

ником, поступает в модулятор, преобразующий параметры вынужденной силы в параметры шума. Первоначально осуществляется операция нелинейного преобразования колебаний внешней вынуждающей силы в параметры колебательного процесса отдельных узлов технологической оснастки на всех характерных для данной оснастки обертонах. Реализуются как бы линейная фильтрация. Такой линейный фильтр можно описать следующим уравнением состояния:

$$\begin{aligned}\dot{u}(t) &= F[t; u(t)] + G_u(t) \cdot a(t), \\ \vartheta(t) &= A_v(t) \cdot u(t) + B_v(t) \cdot a(t), \\ u(t_0) &= u_0.\end{aligned}\quad (7)$$

Над входным сигналом линейного фильтра осуществляется нелинейное преобразование без запоминания

$$\dot{y}(t) = e(t) = h[t; \bar{\vartheta}(t)] + n(t), \quad (8)$$

где $e(t)$ – промодулированный отдельными звеньями технологического процесса радиосигнал. Эффекты, связанные с воздействием среды на радиосигнал, и интерференционные эффекты при сложении колебаний одного направления в точке приема опишем следующим уравнением состояния:

$$\begin{aligned}\dot{w}(t) &= F_w[t; w(t)] + G[t; e(t)], \\ z(t) &= A_z(t) \cdot w(t) + B_z(t) \cdot e(t).\end{aligned}\quad (9)$$

В канале связи существует процесс возмущения канала. Пусть вектор $b(t)$, характеризуется источником возмущения канала и описывает естественные и искусственные помехи в точке приема. Этот вектор взаимодействует с $z(t)$ и на выходе канала связи имеем сигнал $r(t)$. Допустим, что $b(t)$ при $t \geq t_0$ – непрерывный марковский процесс, описываемый уравнением Ито:

$$\begin{aligned}d[b(t)] &= f_b[t; b(t)]dt + G_b(t)d[\beta(t)], \\ b(t_0) &= b_0,\end{aligned}\quad (10)$$

где $\beta(t)$ – симметричная положительная матрица.

В этих предположениях сигнал на выходе модели можно записать в виде:

$$d[r(t)] = S[t; r(t)]dt + d[\eta(t)] \quad (11)$$

где $\eta(t)$ – процесс Винера с ковариационной матрицей.

$$E[\eta(t), \eta'(t)] = N(t, u).$$

На основании изложенного предоставляется возможность определить суммарный вектор $x(t)$, характеризующий информационные параметры сигнала. Принимаемая реализация промышленного радиосигнала является функцией четырех векторов

состояния $a(t)$, $u(t)$, $w(t)$ и $b(t)$. Определим $x(t)$ как вектор, получаемый путем соединения всех четырех векторов состояния в любом порядке. Например, пусть

$$x(t) = \begin{pmatrix} a(t) \\ u(t) \\ w(t) \\ b(t) \end{pmatrix}.$$

Тогда имеем:

$$\begin{aligned} d[x(t)] &= f_x[t; x(t)]dt + G_x(t)d[\xi(t)], \\ x(t_0) &= x_0, \end{aligned} \quad (12)$$

где

$$f_x[t; x(t)] = \begin{pmatrix} f_a[t; a(t)] \\ F_u[t; u(t)] + G_u(t) \cdot a(t) \\ F_w[t; w(t)] + G_w[t; h[t; \bar{\theta}(t)]] \\ f_b[t; b(t)] \end{pmatrix},$$

$$G_x(t) = \begin{pmatrix} G_u(t) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_b(t) \end{pmatrix}, \quad x(t) = \begin{pmatrix} \alpha(t) \\ 0 \\ 0 \\ \beta(t) \end{pmatrix}$$

Спектр вынуждающей силы механического, электрического или электромагнитного происхождения можно представить в виде ряда резонансных дискретных составляющих со следующей аппроксимацией:

$$S(\omega) = \sum_{i=1}^n A_i(t) \cdot \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_i)^2}{2\Delta\omega_i}\right], \quad (13)$$

где $A_i(t)$ – амплитуда i -той составляющей в спектре, $\Delta\omega_i$ – дисперсия флюктуации частоты i -той составляющей.

Будем считать, что каждая составляющая в спектре вынуждающей силы формируется резонансной системой, описываемой дифференциальным уравнением второго порядка:

$$f''(t) + \frac{r(t)}{L(t)} \cdot f'(t) + \frac{1}{L(t) \cdot C(t)} f(t) = \frac{1}{L(t)} \xi'(t), \quad (14)$$

а соответствующее ему дифференциальное уравнение первого порядка в матричной записи имеет вид:

$$\begin{aligned} \dot{f}(t) &= F[t; f(t)] + G(t) \cdot \xi(t), \\ f_{\text{вых}} &= C \cdot f(t), \end{aligned} \quad (15)$$

где

$$F[t; f(t)] = \begin{bmatrix} -\frac{r(t)}{L(t)} & 1 \\ -\frac{1}{L(t) \cdot C(t)} & 0 \end{bmatrix}, \quad G(t) = \begin{bmatrix} 1 \\ L(t) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix},$$

а резонансная частота системы

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L(t) \cdot C(t)}}.$$

Таким образом, промышленный ради шум промодулирован всеми возможными внешними силами и внутренними откликами отдельных элементов или узлов технологического процесса, т.е. он является носителем информации о протекании всего технологического процесса. Поэтому прием и обработка ради шума по мощности излучения на заданной частоте, дисперсии сигнала и спектра амплитудных модуляций позволяет выявить все тонкости протекания технологического процесса и создать датчики для его контроля и регулирования.

Использование радиоизлучения в целях контроля и диагностики технологических процессов представляет значительный интерес. В этом случае вместо спектрограмм вибраций и акустических шумов используются спектральные характеристики радиоизлучения силовых установок, получение которых в реальных условиях эксплуатации может оказаться предпочтительнее других способов диагностики.

С целью выяснения возможностей данного метода было необходимо:

1. Выяснить существование модулирующих воздействий механических колебаний корпуса двигателя на создаваемое им в процессе работы радиоизлучение.
2. Провести исследования различных типов двигателей и выяснить связь между параметрами, режимами работы, техническим состоянием установки в целом и характеристиками создаваемого ими электромагнитного излучения.
3. Разработать физическую модель радиоизлучения, создаваемого при работе каждой конкретной силовой энергетической установки.

Для решения поставленных задач была создана специальная установка для регистрации радиоизлучения (рис. 3). Радиоизлучение с исследуемого объекта регистрируется радиодатчиком, где усиливается и подвергается предварительной обработке. С радиодатчика сигнал поступает на вход анализатора спектра, определяющего спектральный состав ради шума. Полученные спектрограммы записываются на самопи-

пущем потенциометре [7]. При исследовании двигателей внутреннего сгорания дополнительно использовался вибродатчик. Для электродвигателей применялся датчик электрического тока. С обоих датчиков сигнал через коммутатор поступал также на вход анализатора спектра, что давало возможность проводить сравнительный анализ полученных результатов. С целью проверки эффекта модуляции радиоизлучения механическими колебаниями проводилось лабораторное моделирование. В вакуумной камере зажигался электрический заряд в системе отрицательное острие – положительная плоскость, что осуществляло имитацию работы энергетической силовой установки. При этом подбирались такие условия, чтобы электрический разряд по току был промодулирован периодической составляющей. В случае коронарного и тлеющего разрядов возникают так называемые импульсы Тричеля [6], частота которых зависит от радиуса острия, давления и величины разрядного тока. В электрических разрядах разделения электрических зарядов происходит в приэлектродных областях, образуя при этом двойной электрический слой. Этот слой можно рассматривать как электрический диполь, колебания которого приводят к возникновению электромагнитного излучения. Частота следования импульсов Тричеля при атмосферном давлении непостоянна и колеблется около некоторого среднего значения определяемого разрядным током и радиусом кривизны коронирующего острия. При понижении давления частота стабилизируется, что позволяет наблюдать эффект модуляции радиоизлучения механическими колебаниями электрода на его амплитудно-частотной характеристике [8].

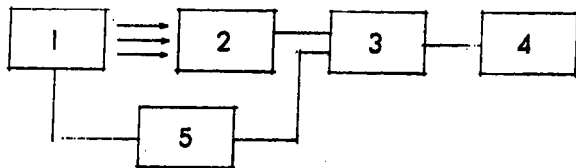


Рис.3. Экспериментальная установка (1 – исследуемый объект; 2 – радиодатчик; 3 – анализатор спектра; 4 – самопишущий потенциометр; 5 – вибродатчик)

Механические колебания осуществляют модуляцию в основном двумя способами:

- 1) вибрациями обусловленных плохой балансировкой трущихся деталей;
- 2) периодичностью работы двигателя. Оба механизма модуляции были смоделированы в вакуумной камере. Оба механизма модуляции были смоделированы в вакуумной камере.

На рис.4. показаны осциллограммы радиоизлучения тлеющего разряда без модуляции и с модуляцией механическими колебаниями одного электрода относительно другого частотой 1200 Гц при давлении 10 тор и токе разряда 150 мкА. На спектре

амплитудных модуляций отчетливо видны комбинационные частоты, то есть дополнительные пики на частотах, равных сумме и разности следования импульсов Тривеля и модулирующей частоты. При осуществлении модуляции переменным электромагнитным полем наблюдается аналогичная ситуация.

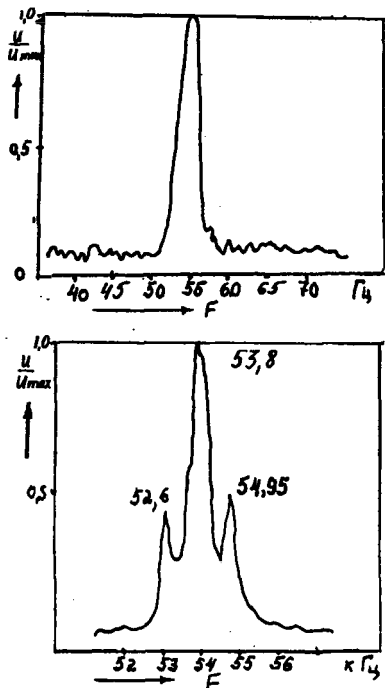


Рис. 4. Осциллограмма радиоизлучения тлеющего разряда без модуляции и с механической модуляцией одного электрода относительно другого с частотой 1200 Гц при давлении 10 тор и токе нагрузки 150 мка

Полученные результаты свидетельствуют о том, что воздействие механических колебаний и переменное электромагнитное поле одинаковым образом воздействуют на радиоизлучение, формируемое системой. В сложных энергетических установках в качестве исполнительных элементов используются электродвигатели. Были проведены исследования характеристик коллекторных электродвигателей постоянного тока при различных режимах работы. Снимались и анализировались осциллограммы и спектрограммы радиоизлучения и тока через электродвигатель при различных питающих напряжениях. Спектрограммы содержали ряд высокочастотных пиков (рис. 5). Частота первого пика соответствует скорости вращения двигателя, а последующие пики,

кратные первому, представляют собой высшие гармоники. При увеличении скорости вращения происходит пропорциональное увеличение частоты данных пиков и изменяется соотношение амплитуд различных гармоник, индивидуальное для каждого двигателя. Например, для двигателя ДПМ-30-Н2-03 амплитуда первой гармоники радиоизлучения и тока возрастает при увеличении питающего напряжения от 5 до 27 В. Седьмая, а также восьмая и шестнадцатая гармоники тока и радиоизлучения минимальны при напряжении питания 20 В, а четырнадцатая гармоника радиоизлучения – максимальная. Анализ подвергались 21 гармоника тока и радиоизлучения. Амплитуда каждой из гармоник различным образом зависит от скорости вращения и может служить исходной предпосылкой для определения технического состояния и режима работы силовой энергетической установки. Кроме гармоник, кратных частоте вращения двигателя, возникают также резонансные пики и на других частотах. В спектре амплитудных модуляций дизеля 8 ЧСП-22/18 имеется ярко выраженный пик на частоте около 700 Гц и пики с кратными частотами (см. рис.6), а для электродвигателя – на частоте около 150 гц и пики с кратными частотами (рис.5). При изменении скорости вращения частота этих пиков изменяется незначительно.

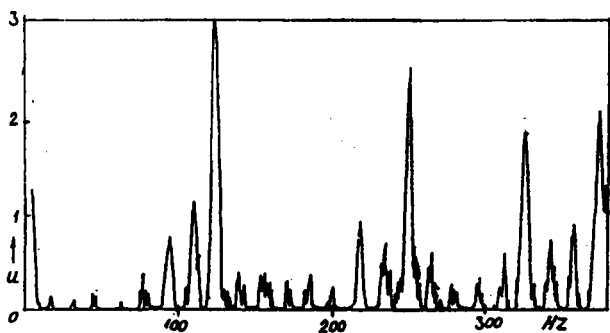


Рис.5. Спектрограмма радиоизлучения электродвигателя ДПМ-30-Н2-03

Для моделирования воздействия крутящего момента на валу снимались спектрограммы тока и радиоизлучения электродвигателя при постоянной частоте вращения и различной нагрузке на валу. Величина тока через двигатель линейно зависит от нагрузки на валу. Поэтому вместо непосредственного измерения тормозящего момента определялся ток через электродвигатель. Величина тормозящего момента регулировалась в широких пределах его изменения путем подачи напряжения на вспомогательный двигатель, соединенного соосно и включенного встречно с исследуемым. Анализ полученных спектрограмм тока и радиоизлучения показал, что амплитуды гармоник, кратных частоте вращения, сложным образом зависят от тормозящего момента. Первая гармоника радиоизлучения имеет максимум при токе через двигатель – 100 мА, десятая – при токе

600 мА, а седьмая и четырнадцатая резко возрастают при токе – 800 мА. Резонансные пики, не кратные частоте вращения, возрастают по амплитуде и частоте, по мере роста нагрузки на валу (рис. 7). Можно предположить, что эти резонансные пики могут быть откликом обобщенного колебательного контура на внешнее воздействие. Таким образом, по частоте и амплитуде резонансных пиков в спектре амплитудных модуляций высокочастотного радиоизлучения возможно бесконтактно определять режим работы и техническое состояние каждого исполнительного двигателя в составе технологического объекта или системы (скорость вращения, нагрузку на валу, износ щеток и коллектора). Были проведены исследования электродвигателей, дизельных и карбюраторных двигателей внутреннего сгорания. Спектральные характеристики радиоизлучения этих двигателей содержали целый ряд высокочастотных резонансных пиков, в частности, кратных частоте вращения двигателя и другим модулирующим воздействиям. Эти характеристики существенно различаются в зависимости от технического состояния, режима работы, типа конкретного экземпляра двигателя.

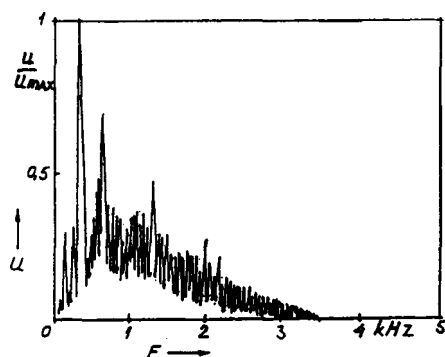


Рис.6. Спектрограмма радиоизлучения дизельного двигателя 8 ЧПС-22/18

Представляет интерес механизм возникновения электрических разрядов при работе электродвигателя и двигателя внутреннего сгорания. Помимо искрения при разрыве электрических контактов коллекторных машин дополнительное разделение зарядов осуществляется в процессе трения угольных щеток о медный коллектор, причем медь, имеющая большее сродство к электрону, заряжается отрицательно, а угольные щетки – положительно. Наличие радиоизлучения при трении медь-уголь было подтверждено экспериментом, когда двигатель вращался без подачи на него внешнего напряжения и излучал радиошумы. При работе двигателей внутреннего сгорания помимо искрообразования в системе зажигания карбюраторного двигателя возникают разрядные явления с выхлопной трубы на газовую струю продуктов сгорания топлива. Эти разряды обусловлены разделением электрических зарядов

вследствие уноса отрицательно заряженных частиц из камеры сгорания в окружающую атмосферу и периодически импульсными разрядами между выхлопной трубой и газовой струей. Разрядные импульсы имеют малую длительность, что обуславливает радиоизлучение в широкой полосе частот. Для регистрации возникающего излучения можно работать как в ближней, так и в дальней зоне. При работе в ближней зоне возможна регистрация амплитудно-частотных характеристик радиоизлучения во всей области частот с анализом спектра амплитудных модуляций. В дальней зоне регистрируется только высокочастотное излучение и так же анализируется спектр амплитудных модуляций в области частот с максимальным отклонением – сигнал/шум. Мощность радиоизлучения в ближней зоне резко падает с расстоянием (обратно пропорционально кубу расстояния), тогда как в дальней зоне интенсивность радиоизлучения падает гораздо медленнее, что позволяет осуществить прием на достаточном удалении от исследуемого объекта.

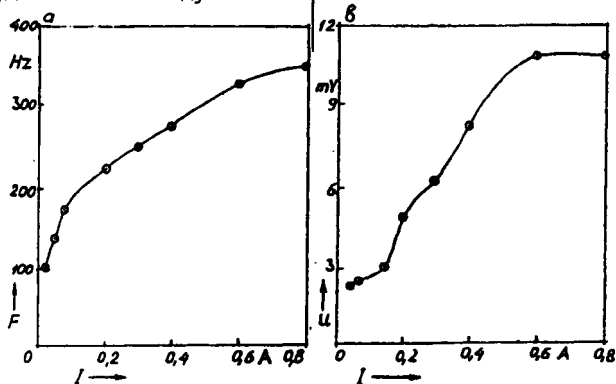


Рис. 7. Графики зависимости частоты и амплитуды резонансных пиков не кратных частоте вращения от тока через двигатель (от нагрузки на валу)

В результате проделанной работы получено:

1. Радиоизлучение работающих энергетических систем и двигательных установок является носителем полезной информации об их техническом состоянии и режимах работы, что позволяет осуществлять неразрушающий контроль и автоматическое регулирование энергетической системы в целом.
2. Причиной возникновения радиоизлучения являются электрические разряды, возникающие вследствие разделения электрических зарядов при трибоэлектричестве и отрицательной термоэмиссии с сажевых частиц.
3. Низкочастотные механические и электромагнитные колебания оказывают моделирующее воздействие на радиоизлучение в высокочастотной области спектра, что позволяет проводить дистанционный контроль за техническим состоянием излучающего объекта на значительных удалениях от него.

ЛИТЕРАТУРА

1. Постников С.Н. Электрические явления при трении и резании – Горький; Волго-вятское книжное издательство, 1975. – 280с.
2. Тэнзеску Ф., Краманюк Р. Электростатика в технике. – М.: Энергия; 1980. – 296с.
3. Гречихин Л.И., Пушкин Н.М. Влияние сажевых частиц на термодинамическое состояние газов при различных температурах // Известия ВУЗов, Авиационная техника. – 1983. – №1. – С. 84-88.
4. Зоммерфельд Д. Электродинамика. – М.: ИЛ; 1958. – 501с.
5. Анго А. математика для электро- и радиоинженеров. – М.: наука; 1974. 772с.
6. Мик Дж, Крегс Дж. Электрический пробой в газах. – М.: ИЛ; 1960. – 605 с.
7. Гречихин Л.И., Тимошевич В.Б. Аппаратура и методы измерений флюктуационных характеристик радиосигналов, возникающих в различных технологических процессах/Приборостроение. – Мн., 1989. – Вып. 11. – С.121–124.
8. Гречихин Л.И., Тимошевич В.Б. Спектральные характеристики радиоизлучения электрических разрядов и их применение для контроля и регулирования плазменных технологических процессов/Приборостроение. – Мн., 1991. – Вып. 13. – С. 121–125.

УДК 621.941.2/31-83

П.Н. Гурецкий

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ СУПОРТА ТОКАРНОГО СТАНКА

Белорусская государственная политехническая академия

Минск, Беларусь

Обработка большинства деталей на машиностроительных предприятиях осуществляется с использованием технологических машин, обеспечивающих снятие припуска с заготовки. Как правило, это металлорежущие станки, обработка на которых производится лезвийным или абразивным инструментом. Именно поэтому, в кругу проблем по снижению себестоимости и повышению конкурентоспособности продукции, особое место занимает задача минимизации энергопотребления технологического оборудования в машиностроительном комплексе, который потребляет значительную часть энергетических и материальных ресурсов.

Целью численного исследования являлась оценка степени влияния на величину энергетических потерь законов распределения давлений по рабочим поверхностям направляющих скольжения. В качестве примера был рассмотрен токарно-винторезный станок модели 16К20Ф3 с шарико-винтовой передачей, расчётная схема суппорта представлена на рис. 1 с указанием всех сил, действующих в процессе обработки. Первоначально для упрощения поставленной задачи численное исследование было проведено для случая равномерного поступательного перемещения рабочего органа. На основании приведенной схемы составлена в координатном виде расчётная система уравнений (1):

$$\begin{cases}
 Q - N_C f' - N_B f_{\text{кл}}' - N_A f_{\text{кл}}' - F_P^X = 0, \\
 N_A \cos \varphi - N_B \cos \varphi + F_P^Y = 0, \\
 N_A \sin \varphi + N_B \sin \varphi + N_C - G - F_P^Z = 0, \\
 N_C y_C - F_P^Z y_P + F_P^Y z_P - G y_G = 0, \\
 N_A f_{\text{кл}}' z_A + N_B f_{\text{кл}}' z_B + Q z_Q + F_P^X z_P - F_P^Z x_P - G x_G + N_A x_A \sin \varphi + N_B x_B \sin \varphi + N_C x_C = 0, \\
 F_P^X y_P - F_P^Y x_P + N_C f' y_C + N_B f_{\text{кл}}' y_B - N_A f_{\text{кл}}' y_A + Q y_Q + N_B x_B \cos \varphi - N_A x_A \cos \varphi = 0.
 \end{cases} \quad (1)$$

где Q – приводная сила; N_A, N_B, N_C – реактивные силы в направляющих; F_P^X, F_P^Y, F_P^Z – составляющие силы резания (рабочая нагрузка); X_P, Y_P, Z_P – координаты точки приложения силы резания F_P ; X_G, Y_G, Z_G – координаты центра масс перемещаемого узла; X_Q, Y_Q, Z_Q – координаты размещения приводной шестерни (точки приложения приводной силы Q); $X_A, X_B, X_C, Y_A, Y_B, Y_C, Z_A, Z_B, Z_C$ – соответственно координаты точек приложения реактивных сил N_A, N_B, N_C ; $f'_{\text{кл}}, f'$ – приведенные коэффициенты трения треугольной и плоской направляющих. φ – угол треугольной (клиновой) направляющей.

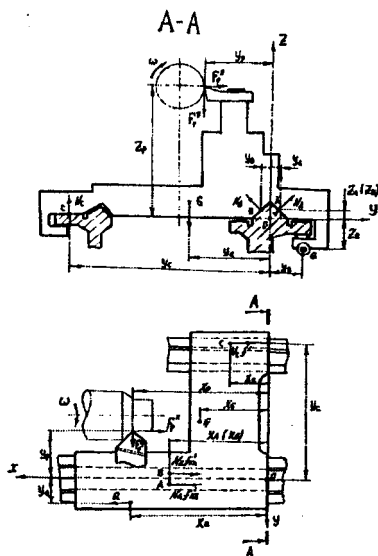


Рис. 1. Расчётная схема суппорта

Необходимо отметить, что сложность моделирования с учётом сил трения заключается в том, что значения сил трения существенно зависят, как от распределения давлений в зоне контакта, так и от конструкции подвижных звеньев, схемы прилож-

ния сил [1]. При моделировании таких взаимосвязей, с целью учёта всех выше перечисленных факторов, в данном случае использовался не табличный коэффициент трения, а приведенный. При этом сохраняется геометрическая интерпретация коэффициента трения, как тангенса угла наклона тангенциальной составляющей реактивной силы к нормальной [2]. Например, для треугольных (клиновых) направляющих приведенный коэффициент трения определится из выражения:

$$f' = F_{TP}^{CYM} / N_{CYM}, \quad (2)$$

где F_{TP}^{CYM} – суммарная величина силы трения на рабочих поверхностях; N_{CYM} – суммарная реактивная сила.

Для клиновых направляющих (рис.2) при симметричном профиле направляющей создаются одинаковые реакции N_1 и N_2 . При поступательном, равномерном перемещении ползуна (суппорта) по рабочим поверхностям возникают силы трения F_{TP1} и F_{TP2} , а суммарное значение силы сопротивления движению определится, как:

$$F_{TP}^{CYM} = F_{TP1} + F_{TP2} = f(N_1 + N_2), \quad (3)$$

где f – табличный коэффициент трения.

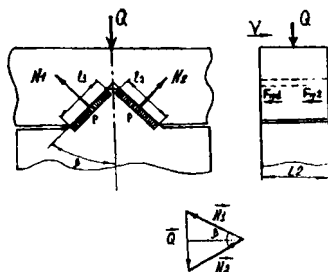


Рис.2. Определение приведенного коэффициента трения

Так как, сосредоточенные силы N_1 и N_2 являются равнодействующими распределённого давления P по номинальной площади $S=L_1L_2$, тогда условие равновесия ползуна (суппорта) имеет вид:

$$\begin{aligned} \bar{Q} + \bar{N}_1 + \bar{N}_2 &= 0, \\ Q_{CYM} = N_{CYM} &= N_1 \sin \beta + N_2 \sin \beta \end{aligned} \quad (4)$$

Приведенный коэффициент трения определится, как:

$$f' = F_{TP}^{CYM} / Q_{CYM} = f / \sin \beta \quad (5)$$

Численные исследования проводились для гяти различных законов распределения: прямоугольный, закон левого треугольника (центр тяжести находится левее).

правого треугольника (центр тяжести находится правее), левой и правой трапеции. Как правило, для конструкторских расчётов принимают прямоугольный закон распределения давлений по рабочим поверхностям в продольном сечении. Однако по результатам расчётов наилучшим и наихудшим являются законы левого и правого треугольников соответственно. Для этих соответствующих случаев ниже на рис. 3 представлен график зависимости величины приводной силы Q от силы резания F_p для различных вариантов законов распределения давлений по рабочим поверхностям:

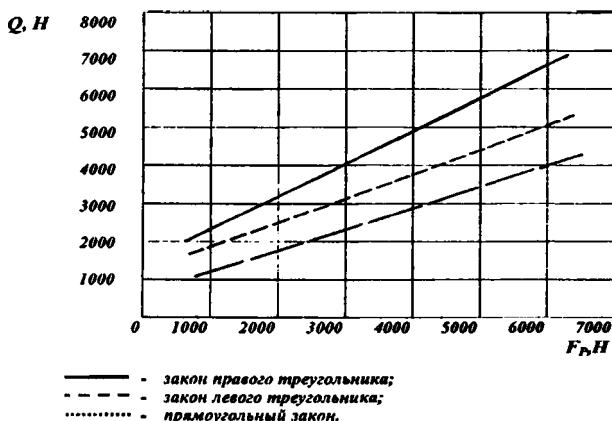


Рис. 3. Зависимости величины приводной силы Q от силы резания F_p для различных законов распределения давлений

Проведя анализ полученных результатов можно утверждать, что в результате оптимизации закона распределения давления на рабочих поверхностях можно уменьшить силу трения в направляющих в 1,3–1,7 раза и соответственно снизить величину приводной силы суппорта в 1,5 раза, а значит и уменьшить энергопотребление оборудования. Характер распределения давлений на рабочих поверхностях зависит от точки приложения рабочей нагрузки (силы резания), значит нахождение её оптимального положения на стадии проектирования технологического оборудования, для наиболее часто встречающегося диапазона рабочих нагрузок, позволит максимально приблизится к желаемому закону распределения и минимизировать величину энергопотребление.

ЛИТЕРАТУРА

1. Металлорежущие станки/ Под ред. Пуша В.Э. – М.: Машиностроение, 1986. – 576с.
2. Филонов И.П., Анципорович П.П., Акулич В.К. Теория механизмов, машин и манипуляторов. – Мн.: ДизайнПРО.– 1998. – 656 с.

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ГОФРИРОВАННОЙ МЕМБРАНЫ С ПРИСОЕДИНЕННОЙ МАССОЙ

*Полоцкий государственный университет
Новополоцк, Беларусь*

В последние годы весьма остро стоит проблема разработки и применения совершенных систем управления и измерительно-информационных систем. Реализация предпосылок для широкой автоматизации промышленных процессов определяется возможностями устройств получения информации о регулируемом параметре. Первичную информацию обычно получают путем оснащения исследуемых или контролируемых объектов датчиками различных физических величин. Большое разнообразие аппаратуры, в том числе и датчиковой, для измерения давления объясняется тем, что понятие “давление” охватывает обширную область значений – от сверхвысокого вакуума до сверхвысоких избыточных давлений. Обязательным элементом датчиков, используемых при измерении давлений, является наличие в их конструкции элементов, чувствительных к давлению – разнообразных мембран, мембранных и анероидных коробок, витых трубок, трубок Бурдона, сильфонов, колпачков. Широкое применение металлических мембран обусловлено следующими факторами: возможностью изготовления из различных высококачественных упругих сталей и сплавов, а также из других материалов с требуемыми свойствами, в том числе, предназначенных для работы в агрессивных, высокотемпературных или криогенных средах; относительной простотой технологического изготовления и низкой трудоемкостью; высокой надежностью и несложностью соединения мембран с корпусными деталями измерительных узлов при использовании современной сварки и пайки с металлами и другими конструкционными материалами. Кроме того, мембранами различной геометрической формы перекрывается диапазон давлений от 10 до 10^8 Па.

При разработке макета датчика давления, в котором в качестве вторичного электронного преобразователя применяется микроэлектронный преобразователь Холла из GaAs, возникла необходимость исследования присоединенной массы на упругую характеристику мембраны, показанной на рис. 1.



Рис. 1 Гофрированная мембрана с неравномерной гофрировкой

Это связано с тем, что на жесткий центр металлической мембраны устанавливается малогабаритная магнитная система, обладающая определенной массой. Поэтому необходимо точное изучение влияния присоединенных масс на работу датчика в целом, так как преобразование давления в линейное перемещение магнитной системы, осуществляемое чувствительным элементом, должно производиться с максимальной точностью и с наименьшими потерями информации о входной величине (высокая чувствительность).

Для исследования влияния присоединенной массы изготовлена экспериментальная установка (рис.2).

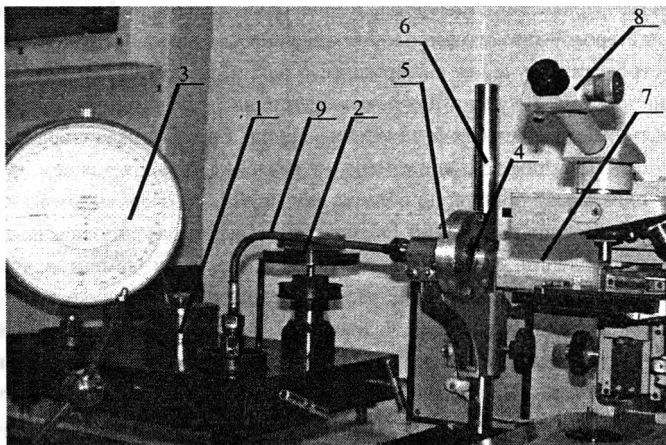


Рис. 2. Экспериментальная установка для исследования характеристик металлических мембран с присоединенной массой

Давление задается с помощью грузопоршневого манометра избыточного давления 1 МП–60М класса 005, нагружаемого непосредственно грузами 2 и контролируется деформационным манометром 3, класс точности которого 0,15. Исследуемая мембрана 4 в сборе с жестким центром, изготовленным из титана, закреплена обжимом по контуру в оправке 5, которая обладает достаточно высокой прочностью и изготовлена из немагнитного материала – аустенитной стали 12Х18Н10Т. Герметизация мембраны проведена с помощью клея ВК95. Оправка с мембраной жестко укреплена на штативе 6. К жесткому центру мембраны приклеен передатчик перемещений – стеклянный прозрачный шток 7 с нанесенными на него рисками. Риски, расположенные друг от друга на одинаковом расстоянии, служат для считывания информации о прогибах жесткого центра мембраны. Определение прогиба мембраны фиксируется с помощью микроскопа “Биолам–М” 8. Давление масла к мембране подводится через

герметичную систему 9, состоящую из медной трубки со штуцерами. Для повышения точности измерений штатив с оправкой и микроскоп установлены неподвижно друг относительно друга на одном массивном основании. Присоединение массы к жесткому центру осуществляется с помощью тонкого клевого соединения. После добавления груза производится контроль массы оправки с помощью электронных весов. Исследовалось влияние присоединенной массы $M_{пр}$ от 0,1г. до массы, превышающей массу мембраны в шесть раз (исходная масса мембраны M_m в сборе с жестким центром составляет 3,7г.) с шагом 0,1г. Для устранения систематической погрешности на результаты эксперимента давление к мембране для каждой присоединенной массы подводилось не монотонно, а произвольно, по ряду, определяемому генератором случайных чисел. Обработка результатов наблюдений производилась на ЭВМ с помощью математических пакетов 'MathCAD7.0', 'Excel' и 'Statistica' согласно [1].

Установлено, что присоединенная масса, не превышающая $2\gamma M_m$, практически не влияет на упругую характеристику мембраны (рис.3). Однако на этом участке масс ($0 < M_{пр} < 2 \times M_m$) следует выделить две области:

1. Прогибы при $M_{пр} \leq 1,5 \times M_m$ несколько увеличиваются (не более 3–5% по отношению к прогибам, когда $M_{пр} = 0$).
2. В случае, когда $1,5 \times M_m < M_{пр} \leq 2 \times M_m$ прогибы несколько уменьшаются (не более 1–2% по отношению к прогибам, когда $M_{пр} = 0$).

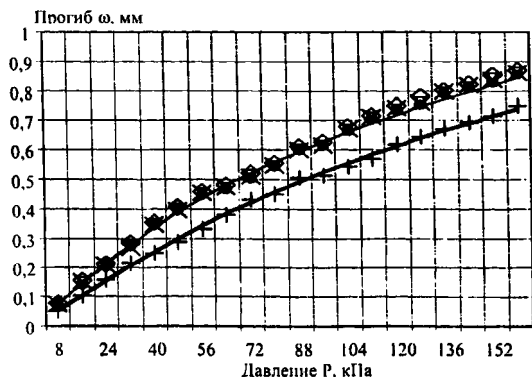


Рис.3 Зависимости прогиба мембраны от величины приложенного давления для различных значений присоединенных масс $M_{пр}$

- теоретическая линия при $M_{пр}=0$ гр.;
- × экспериментальные данные при $M_{пр}=0$ гр.;
- экспериментальные данные при $M_{пр}=3,8$ гр.;
- ◇ экспериментальные данные при $M_{пр}=5,4$ гр.;
- экспериментальные данные при $M_{пр}=7,4$ гр.;
- теоретическая линия при $M_{пр}=15$ гр.;
- + экспериментальные данные при $M_{пр}=15$ гр.

Когда $M_{np} > 2 \times M_m$ упругая характеристика мембраны становится более линейной, чем исходная ($M_{np} = 0$), но величина прогиба в этом случае достаточно резко уменьшается.

Аналитическое определение зависимости прогиба от величины воздействующего давления проведено с использованием метода отношений, описанным в [2]. Исследования упругой характеристики гофрированной мембраны с неравномерным гофром, проведенные без присоединенной массы показаны в работе [3], где предложен алгоритм расчета с использованием выражений геометрической формы мембраны. Применение подобного алгоритма позволило с высокой точностью (погрешность порядка 1%) аналитически определить упругую характеристику гофрированной мембраны.

Для учета присоединенной массы в полученное выражение, определяющее упругую характеристику мембраны [2, 3] вводятся коэффициенты m_1 и m_2 :

$$\frac{p \times R^4}{E \times h^4} = m_1 \times \eta_p \times a_p \times \frac{\omega_0}{h} + m_2 \times \xi_p \times b_p \times \frac{\omega_0^3}{h^3}$$

$$m_1 = M_m - 0.25 \times M_{np}, \quad \text{для } 0 < M_{np} < 2 \times M_m$$

$$m_1 = M_m + 0.1 \times M_{np}, \quad \text{для } 6 \times M_m \leq M_{np} \leq 2 \times M_m$$

$$m_2 = 4 \times M_m + \ln(M_{np}^2 + M_m \times M_{np} + M_m), \quad \text{для } 0 < M_{np} < 2 \times M_m$$

$$m_2 = 4 \times M_m + \ln(2 \times M_{np}^3), \quad \text{для } 6 \times M_m \leq M_{np} \leq 2 \times M_m$$

Предлагаемый алгоритм определения упругой характеристики гофрированной мембраны с присоединенной массой с использованием выражений геометрической формы мембраны позволяет с довольно высокой степенью точности (погрешность не более 5%), проводить подобные расчеты.

ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ 8207-76. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений.
- Довгяло Д.А., Рымарев В.А. Гофрированная металлическая мембрана с неравномерной гофрировкой // Метрологическое обеспечение качества-2000: материалы международной научно-технической конференции / Мн.: Тесей, 2000.- С.191-196.
- Андреева Л.Е. Упругие элементы приборов.-М.: Машиностроение, 1981.-391с.

К ВОПРОСУ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ПРИ РАСТАЧИВАНИИ ОТВЕРСТИЙ

Могилевский государственный технический университет
Могилев, Беларусь

Целью данной работы является создание программного обеспечения анализа шероховатости поверхности при растачивании.

При растачивании на качество поверхности в направлении подачи режущего инструмента влияют следующие факторы: колебание резца, вызванное податливостью консольно закрепленного резцедержателя; глубина канавки оставляемой резцом при вращении заготовки и некоторые другие факторы [1, 2].

Целью настоящей работы явилось создание математической модели колебания резца, закрепленного в борштанге.

Для оценки влияния колебания резца можно воспользоваться динамической моделью консольно расположенного режущего инструмента, полученной в соответствии с рис. 1.

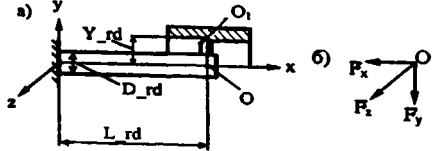


Рис.1. Динамическая модель процесса растачивания: а-схема растачивания: L_{rd} – длина резцедержателя, D_{rd} – диаметр резцедержателя, Y_{rd} – расстояние от оси резцедержателя до режущей кромки; б – схема действующих сил

Силы резания F_z и F_y вызывают соответственно перемещение Z и Y точки O , а изгибающий момент, образуемый силой F_x на плече Y_{rd} , вызывает перемещение Y_M точки O_1 .

Для получения математической модели воспользуемся уравнениями Лагранжа второго рода [3].

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta T}{\delta \dot{q}_i} \right) - \frac{\delta T}{\delta q_i} + \frac{\delta \Pi}{\delta q_i} + \frac{\delta \Phi}{\delta q_i} = Q_i, \quad (1)$$

где T , Π , Φ – соответственно кинетическая и потенциальная энергия, а также диссипативная функция Релея; q_i – обобщенная координата; Q_i – обобщенная сила.

В качестве обобщенных координат примем Y, Z, Y_M . Тогда потенциальная энергия системы будет определяться выражением:

$$\Pi = 0,5C_Y Y^2 + 0,5C_{Y_M} Y_M^2 + 0,5C_Z Z^2, \quad (2)$$

где C_Y, C_{Y_M}, C_Z – коэффициенты жесткости, значения которых можно определить по известным выражениям теории упругости:

$$C_Y, C_Z = 3EJ / L^3_{rd}; \quad C_{Y_M} = 2EJ / (L^2_{rd} Y_{rd}), \quad (3)$$

где E – модуль упругости 1 рода (для стали $E = 2 \times 10^{11}$ Па); $J = \pi D_{rd}^4 / 32$ – осевой момент инерции сечения.

Для определения кинетической энергии выделим элементарный элемент dl , расположенный от точки O на расстоянии l . Масса этого элемента равна:

$$dm = \rho \frac{\pi D_{rd}^2}{4} dl.$$

Кинетическая энергия элементарного элемента равна:

$$dT = \frac{1}{2} dm \left\{ \left[\dot{Y} f_1(l) - \dot{Y}_M f_2(l) \right]^2 + \left[Z \dot{f}_1(l) \right]^2 \right\},$$

где $f_1(l) = 1 - \frac{3}{2} \frac{l}{L_{rd}} + \frac{1}{2} \left(\frac{l}{L_{rd}} \right)^3$ и $f_2(l) = 1 - 2 \frac{l}{L_{rd}} + \left(\frac{l}{L_{rd}} \right)^2$ – соответственно перемещения, вызванные силой и изгибающим моментом в долях перемещений точки O (известные выражения из теории упругости).

Проинтегрируем данное выражение в левой части от 0 до T , а в правой – от 0 до L_{rd} и введем обозначения:

$$\left. \begin{aligned} m_Z, m_Y &= \frac{33}{140} \rho \frac{\pi D_{rd}^2}{4} L_{rd}; \\ m_{Y_M} &= \frac{1}{5} \rho \frac{\pi D_{rd}^2}{4} L_{rd}; \\ m_{Y Y_M} &= \frac{13}{60} \rho \frac{\pi D_{rd}^2}{4} L_{rd}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Тогда получим

$$T = \frac{1}{2} m_Y (\dot{Y})^2 + \frac{1}{2} m_Z (\dot{Z})^2 + \frac{1}{2} m_{Y_M} (\dot{Y}_M)^2 - m_{Y Y_M} \dot{Y} \dot{Y}_M. \quad (5)$$

Выражение для диссипативной функции Рэлея аналогично выражению (2), только вместо коэффициентов жесткости C_Y, C_{Y_M}, C_Z необходимо использовать коэффициенты диссипативных сил μ_Y, μ_{Y_M}, μ_Z , а вместо перемещений соответствующие скорости.

При определении обобщенных сил Q_i используется соотношение

$$Q_i = \sum_{j=1}^n \delta A_j / \delta q_i,$$

где δA_j – работа j силы на возможном перемещении.

Учитывая выбранные направления осей координат, работа обобщенных сил на возможных перемещениях будет:

$$\delta A_{F_Y} = -\delta Y F_Y; \quad \delta A_{F_Z} = \delta Z F_Z; \quad \delta A_{F_X} = -\delta Y_M Y_{rd} F_X. \quad (6)$$

Подставив полученные выражения в (1) получим следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} m_Y \ddot{Y} &= -C_Y Y - \mu_Y \dot{Y} - F_Y + m_{YY_M} \ddot{Y}_M; \\ m_{Y_M} \ddot{Y}_M &= -C_{Y_M} Y_M - \mu_{Y_M} \dot{Y}_M + F_X Y_{rd} + m_{YY_M} \ddot{Y}; \\ m_Z \ddot{Z} &= -C_Z Z - \mu_Z \dot{Z} + F_Z. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Введем обозначения:

$$\left. \begin{aligned} m_\Delta &= m_Y m_{Y_M} - m_{YY_M}^2; \\ F_{YY_M} &= -C_Y Y - \mu_Y \dot{Y} - F_Y; \\ F_{Y_M Y} &= -C_{Y_M} Y_M - \mu_{Y_M} \dot{Y}_M - F_Y. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Решим первые два уравнения системы (7) относительно \ddot{Y} , \ddot{Y}_M . Тогда система уравнений (7) примет вид:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{Y} &= (F_{YY_M} m_{Y_M} + F_{Y_M Y} m_{YY_M}) / m_\Delta; \\ \ddot{Y}_M &= (F_{YY_M} m_{YY_M} + F_{Y_M Y} m_Y) / m_\Delta; \\ \ddot{Z} &= (-C_Z Z - \mu_Z \dot{Z} + F_Z) / m_Z. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Коэффициент диссипативных сил определяются по коэффициентам аperiodичности ψ (для сталей ψ можно принять равным 0.05), который в данном случае учитывает рассеивание энергии в материале резцедержателя:

$$\left. \begin{aligned} \mu_Y &= 2\psi \sqrt{m_Y / C_Y}; \\ \mu_Z &= 2\psi \sqrt{m_Z / C_Z}; \\ \mu_{Y_M} &= 2\psi \sqrt{m_{Y_M} / C_{Y_M}}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Составляющие силы резания при расстачивании F_Z, F_Y, F_X определяются по известным в теории резания выражениям [4]:

$$\left. \begin{aligned} F_Z &= 10C_{PZ} t^{Xz} S^{Yz} V^{Nz} K_{M-Fz} K_{\phi-Fz} K_{y-Fz} K_{\lambda-Fz} K_{r-Fz}; \\ F_Y &= 10C_{PY} t^{Xy} S^{Yy} V^{Ny} K_{M-Fy} K_{\phi-Fy} K_{y-Fy} K_{\lambda-Fy} K_{r-Fy}; \\ F_X &= 10C_{PX} t^{Xx} S^{Yx} V^{Nx} K_{M-Fx} K_{\phi-Fx} K_{y-Fx} K_{\lambda-Fx} K_{r-Fx}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где $C_{PZ}, C_{PY}, C_{PX}, X_Z, X_Y, X_X, Y_Z, Y_Y, Y_X, N_Z, N_Y, N_X$ – постоянные коэффициенты и показатели степени; $K_{M_{Fz}}, K_{M_{Fy}}, K_{M_{Fx}}$ – коэффициенты, учитывающие свойства материала заготовки; $K_{\varphi_{Fz}}, K_{\varphi_{Fy}}, K_{\varphi_{Fx}}, K_{y_{Fz}}, K_{y_{Fy}}, K_{y_{Fx}}, K_{\lambda_{Fz}}, K_{\lambda_{Fy}}, K_{\lambda_{Fx}}, K_{r_{Fz}}, K_{r_{Fy}}, K_{r_{Fx}}$ – коэффициенты, учитывающие геометрические параметры режущей части резца; t – глубина резания, мм; S – подача, мм/об; V – скорость резания, м/мин. Данные по коэффициентам приведены в таблицах [4]

Из выражений (4.1) видно, что изменение сил резания происходит за счет глубины резания t . Поэтому целесообразно выражения для составляющих сил резания представить в виде:

$$\left. \begin{aligned} F_Z &= C_{PPZ} t^{X_Z} \\ F_Y &= C_{PPY} t^{X_Y} \\ F_X &= C_{PPX} t^{X_X} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где

$$\left. \begin{aligned} C_{PPZ} &= 10 C_{PZ} S^{Y_Z} V^{N_Z} K_{M_{Fz}} K_{\varphi_{Fz}} K_{y_{Fz}} K_{\lambda_{Fz}} K_{r_{Fz}} \\ C_{PPY} &= 10 C_{PY} S^{Y_Y} V^{N_Y} K_{M_{Fy}} K_{\varphi_{Fy}} K_{y_{Fy}} K_{\lambda_{Fy}} K_{r_{Fy}} \\ C_{PPX} &= 10 C_{PX} S^{Y_X} V^{N_X} K_{M_{Fx}} K_{\varphi_{Fx}} K_{y_{Fx}} K_{\lambda_{Fx}} K_{r_{Fx}} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

На глубину резания оказывают влияние несоосность установки заготовки, колебание резца, а также предварительная шероховатость поверхности растачивания. С учетом данных соображений глубину резания можно определить:

$$t = t_0 + t_\lambda + t_{RZ} \quad (14)$$

где t_0 – глубина резания, учитывающая несоосность расположения заготовки; t_λ – изменение глубины резания, вызванное колебаниями режущего инструмента; t_{RZ} – изменение глубины резания, вызванное предварительной шероховатостью поверхности заготовки.

Для определения величины t_0 воспользуемся уравнением смещенной окружности, описывающей расстояние от начала координат до поверхности заготовки перед растачиванием:

$$\rho = \sqrt{R_{ZZ}^2 - \Delta_3^2 \sin^2(\varphi + \varphi_0)} + \Delta_3 \cos(\varphi + \varphi_0), \quad (15)$$

где R_{ZZ} – радиус смещенной окружности (в нашем случае он определяется $R_{ZZ} = D_{-z}/2 - t_{cp}$); Δ_3 – смещение окружности относительно начала координат (в нашем случае это несоосность установки заготовки); φ – угол поворота заготовки; D_{-z} – диаметр детали после растачивания; t_{cp} – средняя глубина резания.

Тогда величина t_0 будет равна:

$$t_0 = D_{-z}/2 - \rho. \quad (16)$$

Изменение глубины резания, вызванное колебаниями режущего инструмента можно определить следующим образом:

$$t_{\Delta} = \Delta - \Delta_0, \quad (17)$$

где Δ – изменение глубины резания, вызванное перемещениями резца Y, Z, Y_M ; Δ_0 – изменение глубины резания, вызванное перемещениями резца Y, Z, Y_M под воздействием сил F_Y, F_Z, F_{Y_M} при средней глубине резания t_{cp} .

С учетом вышеизложенного величина Δ определяется:

$$\Delta = \sqrt{(0,5D_z + Y - Y_M)^2 + Z^2} - 0,5D_z. \quad (18)$$

Величина Δ_0 также определяется по формуле (18), но перед этим необходимо вычислить Y, Z, Y_M , решая систему уравнений (7) при значениях ускорений и скоростей равных нулю:

$$\left. \begin{aligned} Y &= F_Y / C_Y; \\ Z &= F_Z / C_Z; \\ Y_M &= F_{Y_M} Y_{rd} / C_{Y_M}. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Значение величины φ_0 в формуле (15) подбирается таким образом, чтобы в начальный момент времени (т.е. при $\varphi = 0$) величина t_0 была равна t_{cp} :

$$\varphi_0 = -\arccos(0,5\Delta_y/R_{Zz}). \quad (20)$$

Для определения изменения глубины резания, вызванное предварительной шероховатостью поверхности заготовки t_{Rz} введем допущение, что высота неровностей изменяется случайным образом в соответствии с нормальным законом распределения. Тогда в соответствии с правилом “шести сигм” имеем

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{Rz} &= R_z / 6; \\ t_{Rz} &= \sigma_{Rz} \text{RandF}; \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

где σ_{Rz} – среднее квадратическое отклонение высоты неровностей поверхности; R_z – значение шероховатости поверхности по Rz ; RandF – случайная функция, значения которой соответствуют стандартизованному нормальному распределению.

Приведенный выше анализ влияния колебаний системы совместно с анализом влияния геометрии режущей части инструмента на шероховатость растачиваемой поверхности был обеспечен программой для ЭВМ в среде программирования Delphi, которая является средством быстрой разработки приложений под Windows, что позволило разработать интерфейс программы. При использовании программы на ЭВМ, где не установлена Delphi, достаточно иметь файл `Rastach1.exe` и файл с динамической библиотекой `Bivbx11.dll`.

Математические модели и алгоритмы реализованы в модуле `Rastach` в виде отдельного блока из пяти процедур.

Программное обеспечение позволяет осуществлять ввод исходных данных на диск, запись и чтение их с диска, а также определять шероховатость поверхности. В состав программного обеспечения входят восемь файлов. Тестирование разработанного программного обеспечения показало его высокую эффективность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудинов В.А. Динамика станков. – М.: Машиностроение, 1967. – 367с. 2. Кудинов В.А. Информационный подход к проблеме малых перемещений в станках/ В.Э.Пуш, Л.И.Шутова / Тр. 3-го междунар. конгр. КТИ-96. – М., 1996. – С.82–84. 3. Тарасик В.П. Математическое моделирование технических систем. –Мн: ДизайнПро, 1997. – 640с. 4. Справочник технолога машиностроителя. Т.1, /Под ред. А.Г.Косиловой и Р.К.Мещерякова. –М.: Машиностроение, 1986. – 656с.

УДК 620.179.118.4

В.А. Зеленин, А.С. Сенько, С.Ф. Сенько

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА ДЕФЕКТОВ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВЫСОКОГО КЛАССА ОБРАБОТКИ

*Физико-технический институт Национальной Академии Наук
Минск, Беларусь*

Современный уровень развития точного приборостроения, машиностроения, микроэлектроники, и др. отраслей промышленности предъявляет все более высокие требования к исходным материалам, в частности, к качеству обработки поверхностей ответственных деталей. Это, в свою очередь, обуславливает необходимость постоянного совершенствования и разработки новых методов контроля качества поверхностей, дефекты которых влияют на выход годных и параметры изготавливаемых изделий. Метрологическое обеспечение изготовления деталей с поверхностями высокого качества базируется в настоящее время в основном на применении узкоспециализированных методов контроля.

Критерием высокого качества поверхностей, наряду с соответствием требованиям к размерам и форме, является отсутствие на них дефектов. Наличие дефектов поверхности приводит к браку изделий, например, снижает процент выхода годных кристаллов при изготовлении ИС.

Общим недостатком существующих методов контроля качества поверхности является оценка интегральных ее характеристик, например, шероховатости, неплоскостности и др. [1]. Эти методы не позволяют установить природу и причины возникновения дефектов, что в ряде случаев приводит к необоснованному росту материальных

затрат на повышение качества изделий. Дальнейшее развитие методов контроля должно основываться на неразрушающей дифференциальной диагностике дефектов, т.е. на установлении связи между конкретным типом дефектов и порождающими его причинами.

В связи с этим наиболее привлекательным неразрушающим методом контроля качества поверхности высокого класса обработки является метод оптической топографии [2]. Сущность метода заключается в освещении контролируемой поверхности коллинеарным излучением оптического диапазона и наблюдении отраженного света на специальном экране. В местах локализации дефектов угол отражения света изменяется, и на экране возникают их светотеневые изображения. Метод обладает высокими разрешающей способностью и производительностью. Однако, несмотря на возможность одновременного контроля всех топографических дефектов (по сути, микронеровностей), метод не позволяет получать количественные данные о дефектности контролируемой поверхности. Эта проблема может быть решена только с помощью компьютерной обработки и расшифровки оптических топограмм [4].

Целью настоящей работы является разработка метода неразрушающей дифференциальной диагностики качества поверхностей высокого класса обработки.

Поставленная цель реализована путем модернизации метода оптической топографии за счет введения компьютерной обработки полученной информации. Сущность обработки заключается в дифференцировании полученных изображений, что и дало название методу.

Известно, что для получения достаточно резкого изображения рельефа поверхности необходимо, чтобы максимальная разность хода лучей, несущих изображение некоторого ее участка не превышала $\lambda/4$, т.е.

$$2R_z \cos \varphi \leq \lambda_{cp} / 4,$$

где R_z – шероховатость поверхности; φ – угол падения луча; λ_{cp} – средняя длина волны [1]. В нашем случае $\lambda_{cp} = 540$ нм, $\varphi < 30^\circ$, следовательно $R_z \leq 60$ нм. Т.е. метод позволяет наблюдать и идентифицировать дефекты на поверхностях, параметр шероховатости R_z которых не превышает 60 нм. Теоретическая разрешающая способность метода по высоте дефектов на порядок выше и составляет 6 нм [3].

Предварительные исследования показали высокую эффективность данного метода по сравнению с существующими. Высокая наглядность и информативность метода позволяет проводить дифференциальную диагностику качества поверхности по типам и видам дефектов, дифференцировать их по причинам возникновения. Развитие и расширение применения метода позволит значительно повысить качество разработок в различных областях промышленности при меньших затратах.

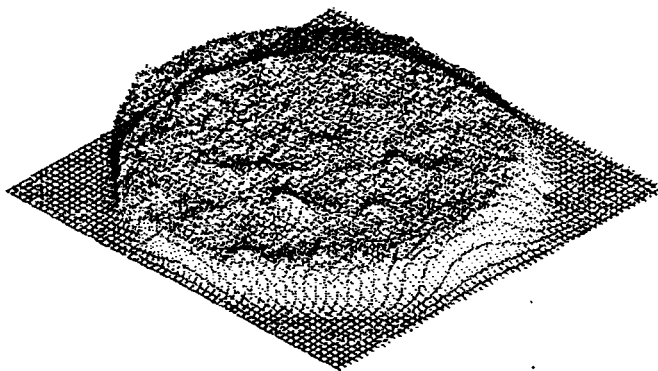


Рис. 1. Топография контролируемой поверхности после компьютерной обработки.

На рис.1. представлен пример изображения поверхности круглой пластины с шероховатостью $R_z < 50$ нм диаметром 200 мм. Применение метода дифференциальной диагностики позволило установить причину брака пластины – большое количество заполированных участков – выступов. Полученное изображение позволяют судить о локализации этих выступов и их размере.

Развитие дифференциальной диагностики дефектов поверхностей позволит сократить затраты на повышение качества изготавливаемых изделий в различных областях промышленности – точном приборостроении и машиностроении, электронике, оптике и в др. Метод существенно повышает оперативность процесса контроля различных поверхностей на наличие дефектов. Изображение контролируемой поверхности на экране монитора формируется в течение нескольких с после внесения объекта в рабочую зону контроля.

Оперативное выявление с помощью данного метода причин формирования дефектов поверхностей позволит принимать адекватные меры по их устранению, что сократит затраты на производство и снизит себестоимость продукции. Замена разрушающих методов контроля на неразрушающий позволяет получить дополнительную экономию, так как разрушающие методы приводят в негодность контролируемые объекты. При этом повышается также экологическая безопасность за счет исключения вредных выбросов (например, паров кислот при проведении металлографического контроля), имеющих место при контроле разрушающими методами.

Высокая эффективность контроля наряду с невысокой стоимостью оборудования и высокой производительностью позволяет проводить оперативный количественный контроль микрогеометрических параметров поверхностей. Программное обеспечение предусматривает пакетную обработку данных, что значительно ускоряет процесс получения информации при массовом производстве.

Таким образом, использование данной системы позволит осуществлять дифференциальную диагностику поверхностей с параметром шероховатости $R_z < 50$ нм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Топорец А.С. Оптика шероховатой поверхности. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988.–191 с. 2. Сенько С.Ф., Зеленин В.А. Оптическая топография – новый метод контроля материалов электронной техники // Известия Белорусской инженерной академии. № 1(9)/2. – 2000. – С.167–169. 3. Hahn S. et al. Characterization of mirror-like wafer surfaces using magic mirror method. J. of Crystal Growth. – 1990. – V. 103, № 1–4, p. 423–432. 4. Сенько А.С., Сенько С.Ф., Зеленин В.А.. Компьютерная диагностика топографических дефектов полупроводниковых пластин // Материалы докладов Международной научно-технической конференции “Новые технологии изготовления многокристалльных модулей”. 25–29 сентября 2000 г., Минск – Нарочь, Беларусь. – Мн., 2000. – С.136.

УДК 621.37/39:534

В.М. Колешко, В.В. Баркалин, Е.В. Польшкова

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ АКУСТОЭЛЕКТРОННЫЕ МИКРОСИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ И АЛМАЗОПОДОБНЫХ ПЛЕНОК

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

В настоящее время в различных областях микротехники и технологии все более широкое применение находят алмазоподобные пленки (АПП), обладающие рядом ценных с прикладной точки зрения свойств, недостижимых при использовании других материалов. Свойства АПП существенно зависят от параметров технологического процесса их получения, что связано со способностью атомов углерода образовывать прочные химические связи различного характера, отличающиеся типом sp -гибридизации. Получаемые пленки обычно гетерофазны и содержат следующие фазы: 1) алмазная (sp^3 -гибридизация); 2) графитовая (sp^2); 3) полимерная ($CH_{n=1,2,3}$, sp^2 и sp^1); 4) карбин. Свойства углеродных пленок могут существенно отличаться от свойств как алмаза, так и графита, варьируясь в этом диапазоне, при этом химические потенциалы углеродных фаз различаются слабо, что приводит к высокой вероятности термодинамических переходов между ними. Это качество углеродных пленок позволяет ставить задачу технологического управления их параметрами для создания “интеллектуального” углеродного материала для использования в составе интеллектуальных микроэлектромеханических систем (МЭМС), в частности, акустоэлектронных [1,2].

С принципиальной точки зрения задача получения АПП ставится как проблема получения алмаза при низких давлениях на базе закономерностей кристаллизации различных фаз углерода. Выделяются две группы способов получения алмазоподобного материала: высокотемпературные, при использовании которых получают алмазные поликристаллические пленки, и низкотемпературные, позволяющие создавать аморфные углеродные пленки. Низкотемпературные процессы в большой степени удовлетворяют требованиям микротехнологии. Это касается в первую очередь процессов на основе низкотемпературной газоразрядной плазмы, в частности, магнетронного [3]. Температура молекул в такой плазме сравнима с температурой окружающей среды, а электроны достаточно энергичны для их возбуждения, ионизации и диссоциации.

Особенностью АПП независимо от способа получения является сильный эффект внутренних механических напряжений, что обусловлено их многофазностью и большой величиной модуля Юнга алмазной фазы. Одним из перспективных направлений решения этой проблемы в микротехнологии является применение редкоземельных элементов (РЗЭ) и их химических соединений, небольшие добавки которых способствуют снижению механических напряжений в различных пленках [3]. В табл. 1 представлены данные по электрофизическим свойствам пленок углеродного материала с добавками оксидов и фторидов РЗЭ, полученных магнетронным распылением мишеней на основе графита в атмосфере аргона, в зависимости от величины отрицательного электрического смещения, подаваемого на кремниевую подложку при напылении.

Из представленных данных следует, что высокоомные пленки получают при достаточно высоком давлении аргона и не слишком большой мощности магнетронной системы (≤ 1 кВт). Эти параметры соответствуют сильному перемешиванию потока атомов углерода и бомбардировке растущей поверхности пленки ионами аргона, которые должны обладать энергией 30–50 эВ. Высокоомные аморфные пленки углерода обладают неоднородной структурой на атомно-молекулярном уровне, с нелокальными электронными состояниями в областях графитоподобных фазы и локализованными – в областях алмазоподобной фазы, и являются типичным представителем объектов мезоэлектроники. Алмазоподобная фаза требует для своего образования достаточно высокого уровня внутренних механических напряжений, которые реализуются при бомбардировке растущей пленки ионами аргона. Управление пространственным распределением углеродных фаз и создание упорядоченных мезоструктур может быть достигнуто путем целенаправленного создания областей с высокими и низкими напряжениями на поверхности подложки. В качестве оптимального для магнетронного получения АПП установлен процесс при давлении аргона 0,04 мм рт.ст., токе магнетрона 0,35 А, напряжении 600 В, напряжении смещения подложки – 40 В. Скорость осаждения углеродной пленки при этом составляет 5–8 нм/мин [2].

Электромеханические параметры пленок углеродного материала с добавками РЗЭ на подложках из кремния (001)-среза (давление аргона при напылении 0,04 мм рт.ст, ток магнетрона 0,35 А, напряжение питания магнетрона 600 В)

| | | | | | | | |
|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|------|------|------|------|
| Напряжение смещения подложки при напылении углеродного материала, В | -45 | -40 | -35 | -30 | -25 | -20 | -15 |
| Оптическая ширина запрещенной зоны, эВ | 2,30 | 2,28 | 2,07 | 1,44 | 0,74 | 0,22 | 0,12 |
| Удельное электрическое сопротивление, Ом·см | 2,5* *10 ⁹ | 7,1* *10 ⁶ | 6,9* *10 ² | 89 | 48 | 22 | 10 |
| Твердость по Виккерсу | | 2410 | 2230 | 1590 | 1180 | 990 | 920 |

Аморфные пленки углерода представляют собой материал с запрещенной зоной подвижностей, определяющей их диэлектрические свойства. Частотную зависимость мнимой части диэлектрической проницаемости углеродного материала можно определить ширину на основе соотношения [2]

$$\omega^2 \epsilon''(\omega) = B(h\omega - E_0)^2 \quad (1)$$

где ω – угловая частота электромагнитного поля, B – константа, слабо зависящая от концентрации РЗЭ в углеродном материале, E_0 – оптическая ширина запрещенной зоны, представленная в табл. 1. В диапазоне частот 1,5–5,0 эВ электромагнитного спектра вещественная часть диэлектрической проницаемости углеродного материала при этом принимает значения от 4,5 до 1,1 в зависимости от величины электрического смещения подложки, а мнимая – от 0,01 до 3,2. В основе резкого роста удельного электрического сопротивления пленок при малом изменении напряжения смещения подложки (от –35 до –40 В) в процессе напыления, по-видимому, лежит перколяционный эффект, т.е. резкое уменьшение вероятности образования связанного кластера графитоподобной проводящей фазы. Это подтверждается близостью значений объемной доли графитоподобной фазы в получаемых высокоомных пленках и критической концентрации проводящей фазы $V_c=0,15$, при которой образуется бесконечный проводящий кластер в трехмерных системах.

Механическая твердость углеродных покрытий, представленная в табл. 1, исследовалась вдавливанием индентора по Виккерсу, а их адгезия к подложке – механическим царапанием. Достаточно высокую адгезию углеродных пленок удалось получить на подложках из кремния, кварцевого стекла, кварца, ниобата лития, арсенида галлия, стали.

Ввиду высокой скорости поверхностных акустических волн (ПАВ) в алмазе и высокой химической инертности углеродных покрытий, исследованы их акустоэлектронные свойства. Для оценки дисперсионных зависимостей фазовой скорости ПАВ в углеродном материале использованы значения модулей упругости и плотности алмаза и графита, которые ввиду аморфности углеродного материала усреднялись по мето-

дике [4]. Результаты такого усреднения представлены табл.2 вместе с соответствующими значениями фазовой скорости ПАВ V и фактора материала звукопровода F в чувствительности фазовой скорости ПАВ к нагружению поверхности слоем из DN молекул с молекулярной массой M , которая определяется соотношением

$$\frac{\Delta V}{V} = -f \cdot F \cdot M \cdot \Delta N, \quad (2)$$

где f – частота ПАВ. Указанные величины рассчитывались в соответствии с алгоритмом, изложенным в [5,6].

Таблица 2

Параметры предельных фаз углеродного материала

| Параметр | Алмаз | Графит |
|---|---------|--------|
| Плотность, 10^3 кг/м^3 | 3,515 | 2,267 |
| Модули упругости $C_{11}, 10^{11} \text{ Н/м}^2$ | 12,850 | 0,3855 |
| $C_{12}, 10^{11} \text{ Н/м}^2$ | 0,210 | 0,2065 |
| Диэлектрическая проницаемость, 10^{-11} Ф/м | 5,047 | 0,8854 |
| Фазовая скорость ПАВ, 10^3 м/с | 11,7619 | 1,8575 |
| Фактор $F, 10^{-8} \text{ м}^2 \cdot \text{с/кг}$ | 5,217 | 27,475 |

Для акустоэлектронных применений особый интерес представляют особенности модовой структуры ПАВ в многослойных структурах на основе аморфного углеродного материала. На рис. 1 представлены дисперсионные зависимости фазовой скорости ПАВ в структуре а-CVZnO для фундаментальной моды (кривая 0) и десяти высших мод (кривые 1-10), свидетельствующие, в частности, о возможности многомодовых режимов распространения ПАВ в таких структурах, что можно использовать в устройствах обработки аналоговой информации на ПАВ.

На рис. 2 представлены дисперсионные зависимости фазовой скорости ПАВ. Преобладание алмазоподобной фазы характеризуется высокой скоростью ПАВ, в случае преобладания графитоподобной фазы справедливо обратное. Верхние (нижние) кривые соответствуют предельной алмазной (графитовой) фазам углерода, точками указаны экспериментальные данные для ПАВ-структур со слоями углерода, напыленными при отрицательном смещении подложки -40 В (алмазоподобная пленка) и -30 В (графитоподобная пленка). Высокоомной пленке при этом соответствует величина модуля упругости $C_{11} = 8 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$, а низкоомной – $2 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$.

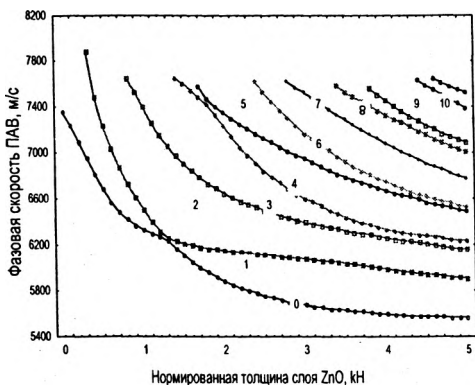


Рис. 1. Дисперсионные кривые фазовой скорости ПАВ в структуре $a\text{-C}/\text{ZnO}$. 0 – фундаментальная мода, 1–10 – высшие моды

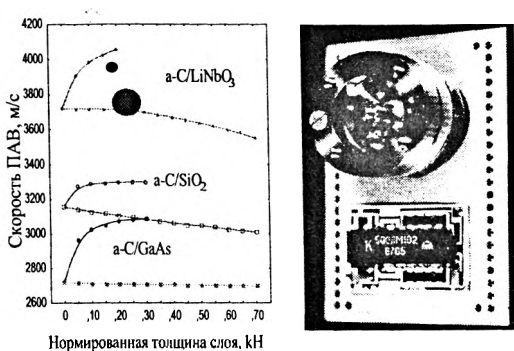


Рис. 2. Дисперсионные зависимости фазовой скорости ПАВ в структурах с углеродным слоем (k – волновое число ПАВ). Верхняя кривая – алмазоподобная высокоомная фаза, нижняя – графитоподобная низкоомная фаза. \bullet – экспериментальные данные для углеродного материала, полученного при отрицательном напряжении смещения подложки 40 В, –30 В.

Исследовано влияние слоя углеродного материала на характеристики ПАВ в звукопроводах из монокристаллического кварца, ниобата лития, арсенида галлия, кремния и других материалов.

Изучение влияния а-С слоя на чувствительность ПАВ к массовому адсорбционному нагружению поверхности показывает (рис. 3), что графитоподобная пленка на

поверхности звукопровода незначительно влияет на фактор F , в то время как наличие алмазоподобной пленки в некоторых случаях приводит к качественно новому эффекту: при приближении к частоте отсечки величина фактора F обращается в ноль, что соответствует росту глубины проникновения ПАВ в подложку и, следовательно, увеличению стабильности ПАВ-структур.

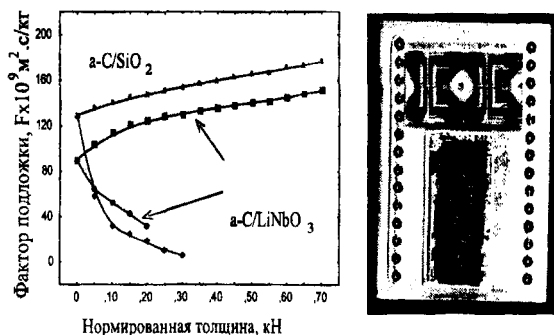


Рис. 3. Дисперсионные зависимости фактора подложки в чувствительности фазовой скорости ПАВ к массовому нагружению поверхности в структурах с углеродным. Нижняя кривая – алмазоподобная высокоомная фаза, верхняя – графитоподобная низкоомная фаза.

На рис. 2 и 3 представлены также примеры микросистем гироскопа и “электронного носа” на ПАВ соответственно, в которых реализованы интеллектуальные функции углеродного материала.

Покрyтия из углеродного материала с технологически управляемыми свойствами перспективны для применения в интеллектуальных устройствах на ПАВ из кварца, кремния, арсенида галлия, ниобата лития, стекла как для управления их параметрами, так и для защиты поверхности звукопровода от вредных воздействий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колешко В.М., Мешков Ю.В., *Зарубежная электронная техника*, 9, 3(1985).
2. Koleshko V.M., Barkaline V.V., Polynkova E.V., Shevchonok A.A. Nanophase Diamond-like carbon films doped by rare-earth elements. – “Functional Gradient Materials and Surface Layers Prepared by Fine Particles Technology” NATO Advanced Study Institute, Kiev, June 18- 28, 2000 (Ukraine)// Proceedings, p.99.
3. Колешко В.М., Баркалин В.В., Шевченко А.А., Полинкова Е.В. Мишени для магнетронного нанесения алмазоподобных пленок углерода. – Международная конференция “Вибротехнология’2000”, Одесса, Украина, 2000// Тезисы докладов.
4. Smith F.W., *J.Appl.Phys.*, 55, 764(1984).
- 5.

УДК 621.88.084

В.М.Колешко, И.А.Таратын, А.В.Сергейченко

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСЕНСОРЫ – ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ “ЭЛЕКТРОННОГО НОСА” ДЛЯ МОНИТОРИНГА ГАЗОВЫХ СРЕД

Белорусская государственная политехническая академия

Минск, Беларусь

Электронный нос – это тип анализатора газовой среды на основе сенсоров, имитирующий работу органов обоняния человека и/или высших млекопитающих.

К настоящему времени разработаны и производятся множество сенсоров для определения содержания газов и пахучих веществ в атмосфере, использующих различные физические принципы работы. Но, несмотря на это, во всем мире продолжают исследования, направленные на разработку новых сенсорных микросистем, обладающих высокой чувствительностью, быстродействием, пониженным энергопотреблением и т.п. Это связано с тем, что экологическая ситуация на планете и безопасность жизнедеятельности с каждым годом все больше приближается к критической. Поэтому первым шагом по предотвращению глобальной экологической катастрофы должна стать установка детекторов вредных и токсичных газов на всех их возможных источниках.

Интегральные микросенсоры, входящие в состав электронного носа выполнены по планарной технологии. В качестве подложки используется кремниевый кристалл толщиной 100 мкм, размером 0,8x0,8 мм. Платиновые нагреватель и сенсорный электроды сформированы на одной стороне кристалла. Определенную сложность при использовании планарной технологии представляет формирование на плоской поверхности однородной (без дефектов и трещин) полупроводниковой структуры.

Для создания образца №1 использовались следующие растворы: нитратов In и Sn, ацетата Co и HAuCl_4 . Слои наносились последовательно на нагретую подложку с последующим отжигом. В результате сформировался однородный активный слой (АС) толщиной 100 мкм типа “сэндвич”. АС образца №2 имеет состав $\text{In}_2\text{O}_3 + \text{SnO}_2$ (~ 5 % вес.). Для его создания был приготовлен гель соответствующего состава, обладающий слабокислой средой (рН~3-4). Для формирования АС образца №3 использовался сильнокислый (рН ~1) раствор сплава ИТО с содержанием компонентов 95% In и 5% Sn.

Как известно [1], принцип работы полупроводниковых сенсоров основан на изменении проводимости АС при адсорбции на нем детектируемого газа. На рис. 1 представлен вид выходного сигнала образцов № 1-№ 3 на примере воздействия водорода.

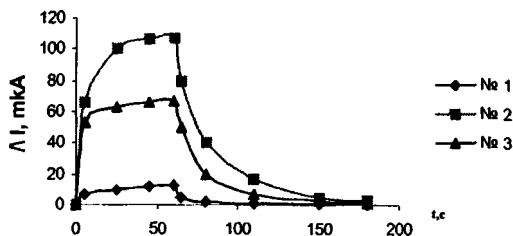


Рис. 1. Динамика выходных сигналов сенсоров при воздействии 100 ppm H₂

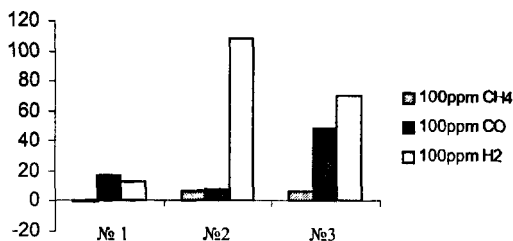


Рис. 2. Сравнительная характеристика выходных сигналов сенсоров на различные газы

Полученные результаты свидетельствуют, что время срабатывания исследованных интегральных микросенсоров составляет $t_{сраб} < 15$ сек., а возврата $t_{возвр} \leq 90$ сек. (при потребляемой мощности ~ 150 мВт).

Особенностью сенсоров, входящих в состав “электронного носа”, является их перекрестная чувствительность к различным газам. Нами были проведены исследования по определению чувствительности каждого из образцов к таким газам, как метан, оксид углерода, водород (рис. 2).

Кроме того, были проведены исследования на предмет чувствительности сенсоров к алкоголю, табачному дыму и дыму конопли (рис. 3). Сигнал сенсоров на алкоголь соответствует содержанию этилового спирта в крови человека порядка 1 ‰.

Как видно из графических зависимостей, каждый из сенсоров обладает своей, индивидуальной, картиной откликов на воздействие различных газов (паров, дыма).

Используя статистические методы обработки сигналов или искусственные нейронные сети можно определять не только качественный состав газовых смесей, но и приблизительно оценивать концентрацию входящих в них газов.

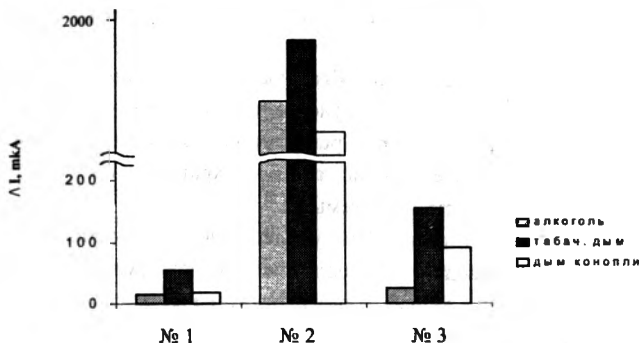


Рис. 3. Отклики сенсоров на воздействие паров этилового спирта, табачного дыма и дыма горячей конопли

ЛИТЕРАТУРА

1. Бутурлин А.И. и др. Газочувствительные датчики на основе металлоокисных полупроводников// Зарубежная электронная техника. – 1983. – № 10. – С. 3–39.
2. Таратын И.А., Сергейченко А.В. Микросенсор оксида углерода// Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления. Сборник материалов XII научно-технической конференции. – М.:МГИЭМ, 2000. – С. 69.

УДК 681.327.(0.88)

В.М. Колешко, М.А. Самошкин

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ ПРИ СЧИТЫВАНИИ ГРАФИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ И ФИЛЬТРАЦИИ ВИДЕОСИГНАЛОВ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Предложена методика и получены математические выражения для моделирования процессов параллельно-последовательного считывания информации. Созданы математические модели нелинейной фильтрации видеосигналов с учетом критерия максимального отношения сигнал/шум и оптического контраста.

Перспективной формой представления видеоданных в автоматизированных системах обработки информации, в рамках которой целесообразно вести разработку методов кодирования, являются рекурсивные структуры и структуры на основе регу-

лярной декомпозиции. Помимо эффективности, такие структуры обеспечивают поэтапную передачу информации, что дает дополнительные возможности для ускорения выполнения операций над изображениями.

В связи с этим были предложены способы и программно-технические средства с автоматическим выбором шага, размеров и траектории движения считывающего луча на основе регулярной декомпозиции и рекурсивного представления элементов поля изображения. Это в 3-5 раз снижает объемы передачи, хранения и обработки видеоданных и увеличивает быстродействие системы.

С 1992 г. фирмы Agfa и Linotype-Hell усиленно ведут разработки в области новых технологий растрового ввода-вывода полутоновых черно-белых и цветных изображений. До сих пор все цветные журналы, книги, газеты печатались с использованием технологии амплитудного растрового вывода, в котором расстояние между растр-элементами оставалось постоянным, а изменялся лишь размер растр-элемента. Взгляды на качество ввода и вывода изображений меняются с развитием технологий, и амплитудное представление изображений уже не удовлетворяет современному качеству. Сейчас почти все известные фирмы – разработчики RIP-машин, преобразующих PostScript-файл в растровое изображение, активно внедряют стохастический растровый вывод. Фирма Scitex пошла еще дальше в поисках путей повышения качества. Если в Crystal Raster и Diamond Screen предложены технологии, в которых изменяется только расстояние между одинаковыми растр-элементами при растровом выводе изображений, то в технологии Scitex FULLtone изменяется и размер растр-элемента, что позволяет еще больше приблизить качество полутонового черно-белого и цветного вывода изображений к фотографической печати.

Рассмотрим методику компьютерного моделирования средств автоматического ввода изображений, в том числе и сенсора изображения (СИ) с матричным фотоприемником (МФ), позволяющую исследовать прохождение оптических сигналов через оптико-электронный тракт СИ при параллельно-последовательном считывании изображений с переменным шагом и апертурой сканирующего луча.

Компьютерное моделирование производится в три этапа. На первом этапе выполняется синтез входного сигнала – распределение спектральной лучистости. Косвенное задание входного оптического сигнала в виде матрицы кодов излучающих объектов позволяет представить информацию об объектах с различными излучательными свойствами и геометрической формой, сократить объем вычислений при пересчете спектральных характеристик и уменьшить требуемый объем памяти при помощи кодирования входного оптического сигнала матрицей целых чисел. Исходной информацией на первом этапе является описание излучательных свойств и геометрической формы объектов в плоскости предметов. При моделировании производится пересчет координат точек объектов с учетом их размеров, геометрической формы, пересечений с другими объектами, формируется матрица входного оптического сигнала (СИ).

На следующем этапе моделирования определяется распределение эффективной (т.е. с учетом спектральной чувствительности МФ) облученности в плоскости изображения (ПИ). Это позволяет определить часть энергии оптического излучения, которая будет преобразована в электрический сигнал в МФ, и упростить пересчет чувствительности МФ. Оптический сигнал представляется в виде матрицы значений эффективной облученности в ПИ. Значения эффективной облученности вычисляются с учетом пропускания элементов оптико-электронного тракта и aberrаций оптической системы (ОС):

$$E_p(x', y') = \iint_{-\infty}^{\infty} E(\xi, \zeta) h(x' - \xi, y' - \zeta) d\xi d\zeta, \quad (1)$$

где x', y' – координаты точки в ПИ; $E_p(x', y')$ – значение эффективной облученности в точке (x', y') ПИ с учетом aberrаций ОС; $h(\xi, \zeta)$ – функция рассеяния точки ОС; $E(x', y')$ – значение эффективной облученности в точке с координатами (x', y') в ПИ в случае идеальной (безабберационной) ОС:

$$E(x', y') = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{f'} \right)^2 \left(\frac{\beta_{3p}}{\beta_{3p} - \beta} \right)^2 \int_0^{\gamma} L \left(\frac{x'}{\beta}, \frac{y'}{\beta}, \lambda \right) \tau_{oc}(\lambda) \tau_{of}(\lambda) S_{mf}(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

где D, f' – диаметр входного зрачка и фокусное расстояние ОС; β, β_{3p} – соответственно линейное увеличение и линейное увеличение в зрачках ОС; $L(x, y, \gamma)$ – спектральная плотность лучистости в точке плоскости предметов; $\tau_{oc}(\lambda), \tau_{of}(\lambda)$ – спектральные коэффициенты пропускания ОС и оптический фильтр (Оф) соответственно, $S_{mf}(\lambda)$ – спектральная характеристика чувствительности МФ.

На завершающем этапе моделирования определяются значения электрического сигнала каждого фоточувствительного элемента (ФЧЭ) МФ. Этот сигнал включает составляющие темнового сигнала, фотосигнала и шума

$$U(i, j) = U_{\tau}(i, j) + U_{\phi}(i, j) + U_{\omega}, \quad (3)$$

где i, j – номера ФЧЭ в МФ; $U(i, j)$ – выходной электрический сигнал i, j -го ФЧЭ; $U_{\tau}(i, j)$ – темновой сигнал i, j -го ФЧЭ, который задается пользователем или генерируется как случайная величина; $U_{\phi}(i, j)$ – значение фотосигнала i, j -го ФЧЭ; U_{ω} – шумовая составляющая, которая генерируется как случайная величина в зависимости от значения удельной обнаружительной способности МФ.

Значение фотосигнала $U_{\phi}(i, j)$ определяется методом численного интегрирования функции распределения эффективной облученности. Это дает возможность учесть большее количество факторов, включая влияние апертурной характеристики ФЧЭ, неравномерности чувствительности и темнового тока в МФ, а в случае ПЗС определить искажение электрического сигнала из-за потерь при переносах зарядов и растекания зарядов при переполнении потенциальных ям ФЧЭ. Можно добиться также повышения точности вычислений путем выбора соответствующего шага интегрирования:

$$U_{\text{ин}}(i, j) = \frac{S_{\text{н}}}{K_{\text{н}}} e(i, j) \iint_{A(i, j)} E_{\rho}(x^{\text{в}}, y^{\text{в}}) S_{\rho}(x' - x_{\text{н}})(i, j), y' - y_{\text{н}}(i, j) dx', dy', \quad (4)$$

где $S_{\text{н}}$ – интегральная чувствительность МФ; $K_{\text{н}}$ – коэффициент использования излучения паспортного источника; $e(i, j)$ – коэффициент учета неравномерности чувствительности i, j -го ФЧЭ, который задается пользователем или генерируется как случайная величина; $A(i, j)$ – область ПИ, которую занимает i, j -й ФЧЭ; $S_{\rho}(i, j)$ – апертурная характеристика ФЧЭ; $x_{\text{н}}(i, j), y_{\text{н}}(i, j)$ – координаты центра i, j -го ФЧЭ в ПИ.

В случае ПЗС при расчете $U(i, j)$ потери переноса задаются специальным коэффициентом, зависящим от числа переносов зарядового пакета, а растекание зарядов моделируется перераспределением части зарядового пакета ФЧЭ, превышающего уровень потенциальной ямы, между соседними ФЧЭ согласно весовым коэффициентам, заданным в исходных данных.

Выполнено моделирование СИ инфракрасной системы для космических аппаратов с ОС Кассегрена ($f = 500$ мм, $D = 200$ мм) для двух вариантов МФ с ФЧЭ размером $0,1 \times 0,1$ мм: первый изготовлен из материала InSb, второй – на основе CdHgTe. Результаты моделирования для случая, когда объектом наблюдения является спутник с полированной суперчистой алюминиевой поверхностью ($T = 300^{\circ}$ К), имеющий форму конуса размером $1,5 \times 1,5$ м, представлены в табл. 1.

Таблица 1

| Наименование параметров | Значения параметров | |
|--|---------------------|-----------------------|
| | 1-й вариант InSb | 2-й вариант CdHgTe |
| Облученность ПИ, обусловленная излучением объекта, Вт/м ² | 0,330 | 0,330 |
| Эффективная облученность ПИ, обусловленная излучением объекта, Вт/м ² | 0,00603 | 0,0769 |
| Коэффициент использования излучения источника | 0,07017 | 0,1065 |
| Значение фотосигнала, мкА | 3,0069 | 61,873 |
| Отношение сигнал/шум | 14,812 | 59,095 |
| Количество ФЧЭ, которые "накрывают" изображение объекта | 20 | 19 |

Второй вариант СИ позволяет получить большее значение отношения сигнал/шум за счет более полного использования излучения объекта наблюдения и большего значения интегральной чувствительности. Поскольку на практике МФ для диапазона 3-5 мкм (In Sb) получили большее распространение, чем МФ для диапазона 8-14 мкм, (Cd HуTe) первый вариант может оказаться предпочтительнее. Высокое значение отношения сигнал/шум и то, что изображение объекта «накрывает» 19-20 ФЧЭ, даст

возможность автоматического распознавания по геометрическим признакам для обоих вариантов (см. табл. 1).

Улучшение максимального отношения сигнал/шум можно осуществить за счет оптимальной нелинейной фильтрации с учетом дискретности раstra, т. е. случайного положения изображения точечного объекта (ТО) между строками с шагом разложения по кадру $2d$, величина которого является переменной и равной $2d/2^0, 2d/2^1, 2d/2^2, \dots$,

$$\Psi_{AMB} \approx i_{CM} \sqrt{\frac{\tau_o}{N_o}} \frac{\int_{-\infty}^{\infty} S^2(T) dT + \int_{-\infty}^{\infty} \frac{S^2(T)}{1+mS(T)} dT}{\left(2 \int_{-\infty}^{\infty} \frac{S^2(T)}{1+mS(T)} dT\right)^{1/2}}, \quad (5)$$

где i_{CM} – среднее значение размаха сигнала от ТО на выходе диссектора; $t_o = r_o / v_a$ (r_o – условный радиус распределения освещенности изображения ТО, v_a – скорость строчной развертки); $N_o/2 = qK_1^2(1+B_1)i_{tm}\sigma_d^n$ – интенсивность шума в секции переноса электронного изображения и вторично-электронного умножения (ВЭУ) соответственно; $i_\phi = \epsilon E_\phi S_a \sigma_d^n$ – ток от фона, где ϵ – чувствительность фотокатода; E_ϕ – освещенность фона; S_a – площадь апертуры; $S_a = \pi d^2/4$, d принимает значения $d/2^0, d/2^1, d/2^2, \dots$; σ_d – коэффициент вторичной эмиссии динода ВЭУ; n_y – число динодов ВЭУ; $S(T) = i_c(T)/i_{CM}$ – нормированный сигнал на выходе диссектора ($i_c(T)$ – ток сигнала от ТО, где $T = t/\tau_o$ – относительное время); $m = i_{CM}/i_\phi$.

В случае круглой апертуры ввода графической информации, равномерной прозрачности носителя и радиуса считывания $R_a = r_a N$, принимающего значения на первом, втором и последующих уровнях считывания $1/2^0 r_a, 1/2^1 r_a, 1/2^2 r_a, \dots$, средние величины сигналов на выходе диссектора

$$i_{CM} = \epsilon E_o \sigma_d^n r_o^2 \frac{\sqrt{\pi}}{4K_c a} \int_{-K_{ca}}^{K_{ca}} I_{10} I dn_o, \quad (6)$$

где E_o – освещенность центра изображения ТО; $K_c = \delta_y / r_a$ – относительное расстояние между центрами апертур соседних строк; $2\delta_y$ – шаг разложения по кадру, $a = R_a / r_o$, $I_{10} = I_1$,

$$I_1 = \int_{-a-n_o}^{a-n_o} [\exp(-n_o^2)] [\Phi(\sqrt{a^2 - (n_{o1} + n_o)^2 - T}) + \Phi(\sqrt{a^2 - (n_{o1} + n_o)^2 + T})] dn_{o1},$$

где $n_o = y_o / r_o$, $n_{o1} = (y - y_1) / r_o$, $y_o = y - y_1$ (y – расстояние между элементарным участком апертуры и ее центром по оси Y , y_1 – расстояние между элементарным участком изображения ТО и центром ТО);

$$\Phi(U) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^U \exp(-t^2) dt - \text{интеграл вероятности, } S_a = r_a^2,$$

$$S(T) = \frac{K_c a \int_{-K_c a}^{K_c a} I_1 dn_0 - K_c a}{K_c a \int_{-K_c a}^{K_c a} I_{10} dn_0}, \quad m = \frac{K_o}{4\sqrt{\pi}(1-K_o)K_c a^3} \int_{-K_c a}^{K_c a} I_1 dn_0,$$

$K_o = E_o / (E_o + E_\phi)$ – оптический контраст изображения объекта.

Таким образом, m для первого, второго и последующих уровней считывания определяется

$$m = \frac{K_o}{4\sqrt{\pi}(1-K_o)K_c (r_a N / r_0)^3} \int_{-K_c a}^{K_c a} I_1 dn_0, \quad (8)$$

где r_a – радиус апертуры первого уровня считывания; N принимает значения для первого, второго и последующих уровней считывания изображения соответственно $1/2^0, 1/2^1, 1/2^2, \dots$

Развертка выбирается из условия уверенного захвата объекта для первого, второго и третьего уровней считывания соответственно:

$$V'_a = K_2 V'_y \frac{h_x}{2ar_0}, \quad V''_a = K_2 V''_y \frac{h_x}{2ar_0/2}, \quad V'''_a = K_2 V'''_y \frac{h_x}{2ar_0/4}, \quad (9)$$

где $K_2 = 0,8 - 1,2$ – коэффициент пропорциональности; V'_a, V''_a, V'''_a – вероятностные составляющие скоростей движения ТО по фотокатоду относительно апертуры; h – длина строки растра.

Выигрыш в отношении сигнал/шум при оптимальной нелинейной фильтрации по сравнению с линейной согласованной фильтрацией растет с увеличением контраста.

Так, при изменении контраста K_o от 0,5 до 0,97 выигрыш растет от 1,1 до 10. При фиксированных размерах апертуры по графикам рис. 1 можно определить при известном значении контраста оптимальное отношение сигнал/шум.

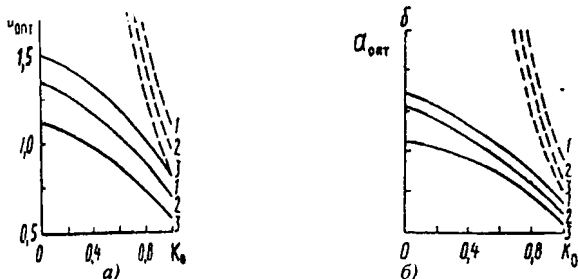


Рис. 1. Зависимость оптимальных размеров круглой (а) и квадратной (б) апертуры от контраста: 1 – $K_0 = 0,6$; 2 – $K_0 = 1,0$; 3 – $K_0 = 1,4$

Разработанная методика компьютерного моделирования может применяться как для проведения энергетических расчетов оптической системы при переменном шаге и апертуре сканирующего луча, так и для анализа геометрических признаков изображений в СИ с МФ, работающих в широком диапазоне спектра оптического излучения.

УДК 621.75.002

Д.В. Кусков, Л.В. Курч

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ CAD/CAM/CAE/PDM ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ИЗГОТОВЛЕНИИ ГЛАВНОГО ТОРМОЗНОГО ЦИЛИНДРА

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

В современном машиностроении происходит серьезное переосмысливание подходов к организации производства. Требования потребителя постоянно повышаются. Осведомленность о характеристиках промышленных товаров, представленных на рынке так же довольно высока, что заставляет производителей все больше и больше внимания уделять проблемам качества выпускаемой ими продукции. Кроме качества одним из главных факторов успеха сегодня становится также повышение скорости проектирования и максимально быстрое доведение законченного продукта до рынка. Качество и количество новых разработок напрямую увязывается со степенью освоения и оснащенности предприятия программами CAD/ CAM/ CAE/ PDM.

На крупных предприятиях на передний план выходят вопросы организации взаимодействия проектировщиков и обеспечение интегрированного процесса, охватывающего все стадии: конструирование изделия, анализ, технологическое проектирование, получение программы для станков с ЧПУ.

Современный рынок САПР предлагает широчайший спектр интегрированных и специализированных программных продуктов, рассчитанных для решения глобальных и локальных задач. Условно их можно разделить на три класса:

1. Системы низкого уровня.

Системы низкого уровня CAD типа Auto CAD 2000, AutoCAD Mechanical 2000, предназначены для эффективной работы по выпуску чертежно-конструкторской документации и работают в основном с плоскими 2D – объектами. Это наилучшее программное обеспечение для тех, кто проектирует изделие без создания трехмерных моделей, кто использует стандартный крепеж, часто подбирает подшипники, проектирует пружины, другими словами для всех тех, кто занят оформлением и выпуском чертежей.

2. Системы среднего уровня.

Как правило это системы CAD/CAM (Computer – Aided Design/ Computer – Aided Manufacturing), т.е. проектирование с помощью компьютера и изготовление с помощью компьютера. Они позволяют в полной мере осуществлять трехмерное моделирование и создавать электронные математические модели, адекватные реальным физическим моделям. Для примера можно назвать Solid Works, Solid Edge, Mechanical Desktop, Autodesk Inventor.

Здесь пользователь получает все преимущества трехмерного проектирования: топологическую точность, возможность проектирования сверху вниз (начиная от проектирования сборочного узла и заканчивая проектированием деталей, которые в него входят), или же снизу вверх – от деталей к сборочным единицам и изделию. Конструктор может, используя ограниченное количество спроектированных деталей и схематичные зависимости между ними в трехмерном пространстве, увидеть как они будут работать в изделии до окончательной разработки самого изделия и всех деталей, входящих в его состав. Многие программные продукты обладают возможностью анализа трехмерных моделей и автоматического получения управляющих программ для станков с ЧПУ.

3. Системы высшего уровня.

К таким системам можно отнести Unigraphics, CATIA, CADD5-5, EUCLID и др. Как правило такие системы являются сложными многомодульными продуктами CAD/CAM/CAE/PDM. Можно выделить два основных признака, отличающих их от остальных систем. Во-первых, возможность обеспечения всего цикла создания изделия – от концептуальной идеи до реализации – внутри самой системы, без дополнительного использования внешних приложений. Во-вторых, обеспечение единой среды для разработки изделия и поддержка параллельного инжиниринга, т.е. создание единой цифровой модели, с которой все участники проекта могут работать одновременно [1]. Рассмотрим их более подробно.

Сегодня внедрение специализированных модулей CAE (инженерный анализ) для отечественных предприятий представляется весьма не простой задачей. В определенной степени это связано с высокой стоимостью, как самих программных продуктов, так и аппаратного обеспечения, требуемого для нормального функционирования этих программ.

Другая причина, сдерживающая их внедрение – определенный элемент новизны для большинства предприятий в самом процессе автоматизации инженерной деятельности, что обусловлено отсутствием подготовленных в области информационных технологий инженеров и руководителей всех уровней. Современным пользователям более понятна автоматизация процессов проектирования нового изделия в CAD – системе и технологии его изготовления с использованием технологической САПР – и (или) CAM – системы, нежели проведения прочностного и иного анализа с применением

компьютерных технологий. Безусловно, не всякий анализ требует сложных вычислений. Когда для оценки изделия на прочность, устойчивость или смятие материала достаточно выполнить несложные инженерные расчеты, неразумно тратить десятки тысяч долларов на закупку дорогостоящей западной системы для выполнения того же анализа методом конечных элементов.

Тем не менее, отношение к САЕ – системам пересматривается и уже можно наблюдать обратную тенденцию. Вчерашний страх перед всем новым постепенно сменяется страхом упустить возможность зарабатывать деньги по-новому, выпуская более качественные товары и используя для этого, в частности, современные компьютерные технологии и новейшие достижения зарубежной и отечественной науки.

Система управления производством – PDM (Product Data Management) – технология, предназначенная для управления всей информацией об изделии, процедурах и процессах его производства. За счет объединения в PDM информации о жизненном цикле изделия данные об изделии и его проекте становятся доступными всем пользователям системы от инженеров и технологов до экономистов и специалистов по маркетингу [2].

Целью развития и внедрения современной и автоматизированной системы управления производством является повышение эффективности управления проектированием новых изделий, подготовкой производства, снабжением и сбытом на основе логически единого информационного потока в корпоративной сети предприятия, реорганизация и структурирование информации подразделений для получения необходимой плановой и учетной информации на каждом уровне управления.

К сожалению, ситуация в отечественных проектных организациях и промышленных предприятиях такова, что только не многие из них могут потратить значительные средства на автоматизацию. Поэтому крупные внедрения систем управления технической документацией и PDM пока еще довольно редки.

Первым и логически понятным шагом является оснащение конструкторских подразделений САД – системами. Именно там определяются идея и вид нового изделия, там находится начало цепочки, звенья которой, охватывают многочисленные подразделения. Это может быть одна из систем верхнего или среднего уровней. Но следует помнить, что создание 3D – модели не самоцель. Конструктору важно проанализировать конструкцию, проверить взаимодействие деталей между собой, оптимизировать конфигурацию каждой детали. И это можно сделать еще на стадии конструирования изделия, связав в единый процесс компоновку, детализовку и различные типы анализа конструкции. Преимущества такого метода очевидны.

Для наглядности рассмотрим пример: на сегодняшний день российским АО “АВТОВАЗ” предложена конструкция [3] главного тормозного цилиндра (ГТЦ) ВАЗ 2101 (рис. 1). В свою очередь корпорация “FENOX”, специализирующая на изготовлении деталей тормозной системы легкового автомобиля предложила свою конструкцию

ГТЦ (рис.2). Вопрос, каким же из двух вариантов проектирования: традиционным или же с использованием САПР наиболее удобней и эффективней осуществлять переход от одной конструкции к другой?

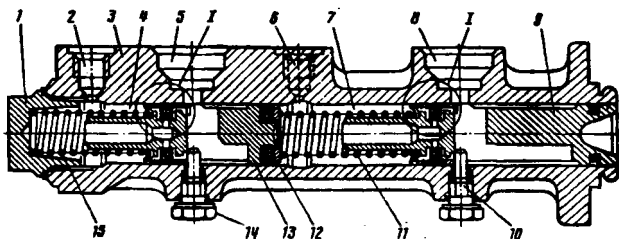


Рис. 1. Сдвоенный главный тормозной цилиндр автомобилей ВАЗ АО "Автотаз"

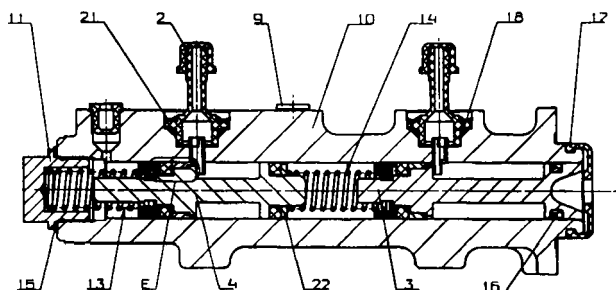


Рис. 2. Сдвоенный главный цилиндр автомобилей ВАЗ Кор. "Фенюкс"

В первом случае проектировщик создает новые конструкции, основываясь на предыдущих решениях, технической политике, справочниках или просто на собственном опыте и интуиции. При таком способе проектирования стадии компоновки и детализовки выполняются последовательно, а средства анализа работоспособности конструкции сильно ограничены.

Исходя из этого, появляется необходимость в создании как правило, нескольких прототипов и проведение их испытаний. Испытания нужны для того, чтобы убедиться в работоспособности конструкции. Как правило, эти испытания выявляют необходимость доработок. Естественно после изменения конструкции следует заново пройти весь цикл создания изделия. Это влечет за собой дополнительные затраты, времени и денег.

При автоматизированном проектировании процесс компоновки трехмерной модели изделия включает в себя и процесс детализовки, а так же процесс проработки 3D – модели каждой детали, входящей в конструкцию изделия (рис.3). На этом этапе можно применяя специализированные программные средства, проанализировать работоспособность конструкции. В целом такой метод проектирования позволяет свести

к минимуму количество создаваемых прототипов и испытываемых образцов, а значит, и сократить время выпуска нового изделия.

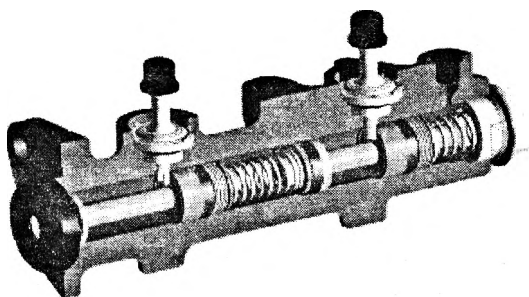


Рис. 3. 3-D модель главного тормозного цилиндра

Любая система проектирования (традиционная или с использованием САПР) имеет смысл только при условии, что результаты ее работы могут быть реализованы в виде конкретного изделия. Конструктор должен работать в тесном взаимодействии с технологом стыкуя те или иные особенности конструкции с возможностями технологического оборудования и процессов. Использование на предприятиях систем высшего уровня, позволяет обеспечить единую среду для разработки изделия (модели) с которой все участники проекта могут работать одновременно.

Внедрение новых технологий на машиностроительных предприятиях позволяет решать задачи проектирования все усложняющихся изделий. По созданным математическим моделям достаточно оперативно может быть разработана технологическая оснастка (пресс формы, штампы, литейные формы и т.д.) для их производства и управляющие программы для обработки на станках с ЧПУ. Благодаря единой электронной базе данных значительно сокращается время поиска информации (ГОСТы, справочники, карты, схемы и т.д.). Возможность компьютерного сопровождения всего цикла создания изделия – от концептуальной идеи до реализации – внутри самой системы без дополнительного использования внешних приложений, а так же обеспечение единой среды для разработки изделия и поддержка параллельного инжиниринга, т.е. создание единой цифровой модели, с которой все участники проекта могут работать одновременно, позволят оперативно решать все более и более сложные задачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. САПР и графика – М.: Компьютер пресс, 1999-2001 гг (www.cpress.ru).
2. Российское представительство компании Unigraphics Solutions. (www.ugsolutions.ru).
3. Роговцев В.А. Устройство и эксплуатация автотранспортных средств – М.: Транспорт, 1990 – 432 с.

РЕЗОНАНСНЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

*Витебский государственный технологический университет
Витебск, Беларусь*

1. Одной из задач, которые решаются с помощью математических моделей, является отражение связи между физическими величинами, установленной в эксперименте. Такие модели называются регрессионными. Регрессионные математические модели являются основным теоретическим инструментом при исследовании многих технических задач, что составляет основу их непреходящей актуальности. Особенно важную роль играют математические модели при исследовании и проектировании технологических процессов, в которых механизм связи между величинами не раскрыт полностью. В таких случаях нельзя составить уравнения, отражающие закономерности рассматриваемого процесса, на основании законов физики, химии и др. фундаментальных наук, и регрессионные модели становятся единственным математическим инструментом для исследования таких процессов. Задача может усложниться тем, что на результат технологического процесса могут влиять одновременно несколько факторов. При этом, часто бывает необходимым установить наличие у некоторого показателя, параметра, технологического процесса экстремумов, зависящих от каждого из факторов. Модели традиционных видов, например, полиномиальные, позволяют это сделать, но требуют дифференцирования по каждому из аргументов, анализа производных и т.д., т. е. требуют выполнения довольно сложной процедуры. Даже если эта процедура автоматизирована с помощью ЭВМ, она требует определенного опыта и непростой интерпретации формальных результатов.

Поиск экстремумов некоторого показателя технологического процесса, особенно, экстремумов, зависящих от нескольких факторов, удобно производить с помощью резонансных математических моделей. Формы резонансных математических моделей берут свое начало от уравнения амплитуды резонансных колебаний. Из теории колебаний известна формула зависимости амплитуды колебаний A от круговой частоты ω колебаний возмущающей силы, амплитуды этой силы F_0 , коэффициента жесткости системы k , массы m и коэффициента демпфирования c :

$$A = \frac{F_0}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2}}.$$

При $k = m\omega^2$ амплитуда A возрастает до максимального значения и наступает резонанс. Это явление лежит в основе идеи создания резонансных моделей для отраже-

ния результатов эксперимента, когда отклик (исследуемый показатель процесса) зависит от нескольких факторов и когда требуется, прежде всего установить наличие экстремумов отклика, зависящих от каждого из факторов.

2. Для изучения свойств резонансных математических моделей рассмотрим однофакторную резонансную модель. В общем случае эта модель может иметь вид:

$$v = \frac{1 - ax}{|b| \sqrt[2n]{|c - x|^n |f - x|^n} + |d|} \quad (1)$$

Изучение свойств модели (1) удобно начинать с упрощенного ее варианта, получаемого из (1) при $m = 1$ и $c = f$,

$$v = \frac{1 + ax}{|b| * |c - x|^n + |d|} \quad (2)$$

Модель (2) можно назвать прямой, в противоположность обратной модели, у которой экстремум соответствует минимальному значению показателя v ,

$$v = (e + ax) \left[1 - \frac{1}{|b| * |c - x|^n + d} \right] \quad (3)$$

На рис. 1 и рис. 2 показаны формы резонансных кривых, построенные по моделям (2) и (3) при различных сочетаниях параметров. Из этих рисунков видно, что резонансные модели, позволяют получать кривые самой различной формы. При этом, по параметрам модели сразу видны характерные точки кривой.

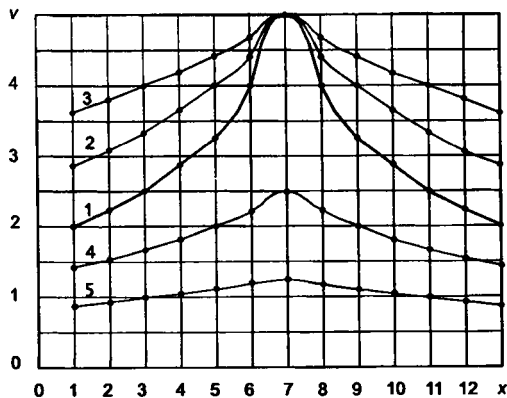


Рис. 1. Формы резонансных кривых:

- 1 - $a = 0$; $b = 0,05$; $c = 7$; $d = 0,2$; $n = 1$;
- 2 - $a = 0$; $b = 0,025$; $c = 7$; $d = 0,2$; $n = 1$;
- 3 - $a = 0$; $b = 0,0125$; $c = 7$; $d = 0,2$; $n = 1$;
- 4 - $a = 0$; $b = 0,05$; $c = 7$; $d = 0,4$; $n = 1$;
- 5 - $a = 0$; $b = 0,051$; $c = 7$; $d = 0,8$; $n = 1$;

Параметр c определяет положение экстремума на оси X .

Параметр d определяет высоту резонанса по оси V .

Параметр b определяет ординату начальной точки графика.

Параметр a определяет общий наклон графика.

При $c \neq f$ резонансная модель может иметь вид:

$$v = \frac{1 + a * x}{|b| * (|c - x| * |f - x|)^n + |d|} \quad (4)$$

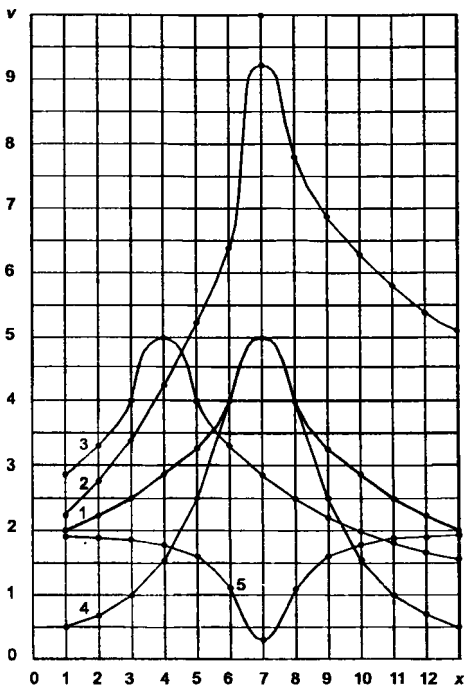


Рис. 2. Формы резонансных кривых:

-- прямых: 1 -- $a = 0$; $b = 0,05$; $c = 7$; $d = 0,2$; $n = 1$;

2 -- $a = 0,12$; $b = 0,05$; $c = 7$; $d = 0,2$; $n = 1$;

3 -- $a = 0$; $b = 0,05$; $c = 4$; $d = 0,2$; $n = 1$;

4 -- $a = 0$; $b = 0,05$; $c = 7$; $d = 0,2$; $n = 0,5$;

-- обратной: 5 -- $a = 0$; $b = 1$; $c = 7$; $d = 1,2$; $n = 1$; $e = 3$

На рис. 3 показаны формы резонансных кривых, построенные по модели (4) при различных сочетаниях параметров. Из этого рисунка видно, что резонансные модели с $c \neq f$ не только могут отражать наличие двух экстремумов у исследуемого показателя процесса, но и служить средством изменения формы кривой при одном экстремуме.

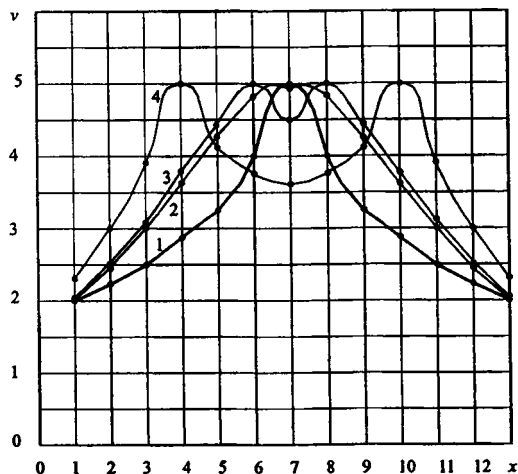


Рис. 3. Формы резонансных кривых:

1 – $a = 0$; $b = 0,05$; $c = 7$; $f = 0$; $d = 0,2$;

2 – $a = 0$; $b = 0,0083$; $c = 6,5$; $f = 7,5$; $d = 0,2$;

3 – $a = 0$; $b = 0,0083$; $c = 6$; $f = 8$; $d = 0,2$;

4 – $a = 0$; $b = 0,0083$; $c = 4$; $f = 10$; $d = 0,2$

3. При зависимости показателя от двух факторов резонансная модель в общем случае может иметь вид:

$$v = \frac{1 + ax + ey + gxy}{|b| \sqrt[2n]{|c_1 - x| * |c_2 - x| * |f_1 - y| * |f_2 - y|^n} + |d|} \quad (5)$$

В более простом случае можно применить следующую резонансную двухфакторную модель

$$v = \frac{1 + ax + ey}{|b| \sqrt[2n]{|c - x| * |f - y|^n} + |d|} \quad (6)$$

Очевидно, что подобным же образом можно построить и трехфакторную резонансную модель. Если факторов больше трех, то можно исследовать зависимость показателя технологического процесса поочередно от различных сочетаний из трех факторов.

4. Использование резонансных моделей на практике обусловлено двумя особенностями.

Первая особенность резонансных моделей заключается в том, что они могут служить удобным инструментом для исследования экспериментальных зависимостей

на наличие экстремумов, для определения взаимодействия различных факторов и для определения других особенностей экспериментальных зависимостей. Но резонансные модели не могут точно отражать эти зависимости, т. е. давать малую остаточную дисперсию. Для точного отражения сложных многофакторных зависимостей необходимы полиномы высоких порядков. Одним из видов таких полиномов могут служить полиномы с переменными коэффициентами, которые можно использовать при условии проведения расчетов на ЭВМ. Пусть имеется двухфакторная экспериментальная зависимость

$$v_u = f(x_u, y_u)$$

Для каждого уровня u фактора y_u можно построить модель, отражающую зависимость показателя процесса (отклика) от x_u

$$y_u \Rightarrow v = a_u x^0 + b_u x^1 + \dots + g_u x^n \quad (7)$$

Из системы таких уравнений можно составить последовательности чисел для составления моделей, задающих параметры (7) как функции y_u , например,

| | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| y_u | y_1 | y_2 | y_3 | y_4 | y_5 | y_6 | y_7 |
| a_u | a_1 | a_2 | a_3 | a_4 | a_5 | a_6 | a_7 |

по которым можно построить модели для коэффициентов уравнений (7),

$$a = f_a(y_u);$$

$$b = f_b(y_u)$$

и т. д. Подставляя эти модели в (7), можно получить для параметра процесса модель с переменными коэффициентами:

$$v = f_a(y_u) x^0 + f_b(y_u) x^1 + \dots + f_g(y_u) x^n \quad (8)$$

Модель (8) является слишком громоздкой для анализа экстремумов и других свойств отклика, но для вычислений отклика на ЭВМ она вполне приемлема.

Таким образом, резонансная модель вида (5) или (6) может использоваться для анализа сложной экспериментальной зависимости, а при необходимости точных вычислений может использоваться дополнительно модель вида (8). Такой подход вполне соответствует принципу, согласно которому каждый объект должен описываться с помощью нескольких моделей.

Вторая особенность резонансных моделей заключается в том, что в них много параметров и используются абсолютные значения величин. Поэтому определение параметров резонансных моделей целесообразно вести не с помощью аналитических методов, а методом направленного перебора по критерию минимума дисперсии или

минимума величины ее заменяющей. Ниже рассмотрены основные шаги алгоритма направленного перебора параметров математических моделей по критерию минимума суммы модулей разностей теоретических и экспериментальных значений отклика. В описание этого алгоритма включены для определенности изложения элементы программы на языке "Паскаль". Операторы программы написаны прямым шрифтом.

1) Выбирается вид модели. В этом примере используется простейшая модель для сокращения объема изложения: $v = a + bx + cx^2$.

2) По результатам эксперимента создается массив исходных данных. В примере 13 уровней u со значениями факторов x_i и y_i : `Ish_xu[1..13]: array of real; Ish_yu[1..13]: array of real; Ish_yu [1..13, 1..13]: array of real.`

3) Вводятся начальные средние значения параметров модели: a_2, b_2, c_2 .

4) Назначаются начальные значения коэффициентов варьирования параметров модели: $q_1:=0,451; q_2:=0,451 q_3:=0,451$.

4) Определяется приращение параметров модели: $Da_1:=a_2 * q_1; Da_2:=0; Da_3:=a_2 * q_1 / (1 - q_1)$. То же для b и c

5) Определяется множество значений параметров модели: $a_1:=a_2 - Da_1; a_2:=a_2; a_3:=a_2 + Da_3$. То же для b и c

6) Составляются ряды множества значений параметров модели: `Row_a[1..3]: array of real; Row_b[1..3]: array of real; Row_c[1..3]: array of real.`

7) Вычисляются значения функции $v = f(x_i, y_i)$ при всех возможных сочетаниях значений коэффициентов a, b, c по п. 5).

8) Вычисляются суммы модулей разностей $SMR = \sum |v(x_i, y_i) - y_i|$ для всех сочетаний коэффициентов a, b, c и выбираются коэффициенты, дающие наименьший модуль разности. Эти коэффициенты принимаются за новые средние коэффициенты a_2, b_2, c_2 .

9) Изменяются коэффициенты варьирования параметров: если параметр модели имеет среднее значение a_2, b_2, c_2 , то соответствующий ему коэффициент q_1, q_2, q_3 уменьшается до 0,7 прежнего значения; если параметр модели имеет уменьшенное или увеличенное значение, то соответствующий ему коэффициент увеличивается в 1,4 раза.

10) Цикл вычислений повторяется с п. 4) до тех пор, пока не будет получена SMR , удовлетворяющая некоторому критерию. Коэффициенты a, b, c , соответствующие этой сумме, принимаются в качестве искомых коэффициентов модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ящерицын П.И., Махаринский Е.И. Планирование эксперимента в машиностроении. Мн.: Выс. шк., 1985.– 288 с. 2. Мисевич В.С., Ольшанский В.И. Алгоритмический метод поиска коэффициентов регрессии многопараметрических моделей. Витебск, 2000. Совет ВГТУ. Деп. в БелИСА, рег. № Д200078 от 11 12 2000. Сборник рефератов № 4, 2001 г.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКИ ПОГРУЖЕНИЕМ В РАСПЛАВ

Белорусская государственная политехническая академия,

Минск, Беларусь,

Полоцкий государственный университет,

Новополоцк, Беларусь

Процесс индукционной наплавки погружением, заключающийся в том, что наплавляемый металл затвердевает на очищенной от оксидной пленки поверхности заготовки в расплаве этого металла, применяется для наращивания поверхностных слоев заготовки. После кратковременной выдержки заготовку извлекают из расплава и на ее поверхности получают слой присадочного металла [1]. Разница температур расплава T_1 и заготовки T_2 ($T_1 \gg T_2$), задает начальные условия процесса, локальный объем расплава, контактирующий с поверхностью заготовки определяется граничными условиями.

Для исследования тепло-массопереноса между поверхностями, сформированными на смежных переходах, проводилось моделирование температурных полей в рабочей зоне технологической системы.

Для получения математической модели технологического процесса считали, что сток тепла согласно принципу симметрии эквивалентен его распространению. Принимали плотность и теплопроводность материала детали и расплава равными, а ванну расплава – неограниченной. Для упрощения расчетов допускали, что ось шкалы температур направлена к абсолютному нулю, а за ноль этой шкалы принимали температуру расплава. Предполагали, что теплообмен в системе осуществляется только путем теплопроводности.

Измерение температуры бесконечной пластины, толщиной $2l$ в некоторой точке А (рис. 1) от мгновенного плоского источника через время τ [2, 3]:

$$dT_a = \frac{dQ}{F c \rho \sqrt{4\pi\omega\tau}} \cdot e^{-\frac{x_a^2}{4\omega\tau}}, \quad (1)$$

где dQ – расход тепла через плоский мгновенный сток; F – площадь пластины; c – теплоемкость материала; ρ – плотность материала; ω – коэффициент теплопроводности; τ – время, прошедшее от начала процесса; x_a – расстояние от точки А до плоского мгновенного стока тепла.

$$\Delta T_a = \int_{x_1}^{x_2} \frac{\Delta T_0 dx}{\sqrt{4\pi\omega\tau}} \cdot e^{-\frac{x_a^2}{4\omega\tau}},$$

где $x_1 = R - l$ – расстояние от точки А до ближней, а $x_2 = R + l$ – до дальней плоскости пластины.

Введя замену $u = \frac{x_a}{\sqrt{4\omega\tau}}$ получили:

$$\Delta T_a = \int_{u_1}^{u_2} \frac{\Delta T_0 \sqrt{4\omega\tau} du}{\sqrt{4\pi\omega\tau}} \cdot e^{-\frac{u^2}{2}}.$$

откуда:

$$\Delta T_a = \Delta T_0 \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{u_1} e^{-\frac{u^2}{2}} du - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{u_2} e^{-\frac{u^2}{2}} du \right] = \Delta T_0 [\Phi(u_2) - \Phi(u_1)],$$

где

$$\Phi(u_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{u_1} e^{-\frac{u^2}{2}} du; \quad \Phi(u_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{u_2} e^{-\frac{u^2}{2}} du,$$

После подстановки пределов интегрирования:

$$\Delta T_a = \Delta T_0 \left[\Phi\left(\frac{R+l}{\sqrt{4\omega\tau}}\right) - \Phi\left(\frac{R-l}{\sqrt{4\omega\tau}}\right) \right] \quad (4)$$

При индукционной наплавке погружением в расплав происходит фазовый переход-кристаллизация жидкого металла. Исходя из этого, действительное изменение температуры в точке А определяется из следующих соображений.

Если вычисленное значение $\Delta T_a \leq \Delta T_n \frac{c_{ж}}{c_m}$, то принимается $\Delta T_a' = \Delta T_a \frac{c_{ж}}{c_m}$, в котором $\Delta T_a'$ – действительная температура в точке А; c_m – теплоемкость материала расплава в твердом состоянии; $c_{ж}$ – теплоемкость материала расплава в жидком состоянии.

Если $\Delta T_a > \Delta T_n \frac{c_{ж}}{c_m}$, то некоторый сток тепла пойдет на компенсацию тепла, выделяющегося при кристаллизации и дальнейшее охлаждение. Тогда уравнение теплового баланса:

$$\Delta T_a c_m \rho dV = \Delta T_n c_{ж} \rho dV + n \rho dV + (\Delta T_a' - \Delta T_n) \cdot c_m \rho dV, \quad (5)$$

где dV – объем элементарного слоя; n – удельная теплота плавления материала расплава.

Первое слагаемое правой части уравнения (5) определяет сток тепла, необходимый для охлаждения перегретого расплава до температуры кристаллизации, второе – выделение тепла при кристаллизации, третье – тепловыделение после кристаллизации.

Преобразовав выражение (5), получили

$$\Delta T_a' = \Delta T_a + \Delta T_n - \frac{n}{c_m} - T_n \cdot \frac{c_x}{c_m} \quad (6)$$

для которого возможны два случая:

$$\Delta T_a \leq \frac{n}{c_m} + \Delta T_n \cdot \frac{c_x}{c_m} \quad (7)$$

когда весь сток обеспечивает компенсацию тепла, выделяющегося при кристаллизации, в этом случае $\Delta T_a' = \Delta T_n$, а также

$$\Delta T_a > \frac{n}{c_m} + \Delta T_n \cdot \frac{c_x}{c_m} \quad (8)$$

когда будет происходить дальнейшее охлаждение точки А, тогда $\Delta T_a'$ вычисляется по формуле (6).

В результате основной характеристикой наплавочной системы будет выражение

$$T_{0x} = \frac{n}{c_m} + \Delta T_n \cdot \frac{c_x}{c_m} \quad (9)$$

физический смысл которого заключается в том, что оно дает минимальную разность температур расплава и детали, при которой будет происходить наплавка погружением в расплав.

Расчеты по формуле (4) с использованием (6)...(8) позволяют построить номограмму, по которой можно оптимизировать технологический процесс наплавки намерзанием. Однако реальная толщина наплавленного слоя будет несколько меньше расчетной. Это связано с тем, что в математической модели не учитывается теплопередача конвекцией и излучением. Поэтому в выражение (4) введены два поправочных коэффициента K_1 и K_2 , которые зависят от свойств материалов детали и расплава, а также условий тепло-массообмена. Они дают реальные значения как температуры материала в заданной точке, так и времени протекания процесса.

С учетом поправочных коэффициентов выражение (4) примет вид

$$\Delta T_a = K_1 \Delta T_0 \left[\Phi \left(\frac{R+l}{\sqrt{4\omega t K_2}} \right) - \Phi \left(\frac{R-l}{\sqrt{4\omega t K_2}} \right) \right] \quad (10)$$

По выражению (10) построена номограмма (рис. 2), согласно которой, в зависимости от требуемой толщины наплаваемого слоя покрытия, можно определить оптимальный режим индукционной наплавки погружением в расплав.

Теплоемкость материала детали из конструкционной стали в твердом состоянии принимали $c_m = 0,7$ Дж/(г·°С); в жидком – $c_x = 0,9$ Дж/(г·°С), а удельную теплоту плавления $n = 200$ Дж/г [4, 5]. Коэффициенты $0,82 < K_1 \leq 0,92$ и $0,85 < K_2 \leq 0,95$, установленные экспериментально, близки к единице.

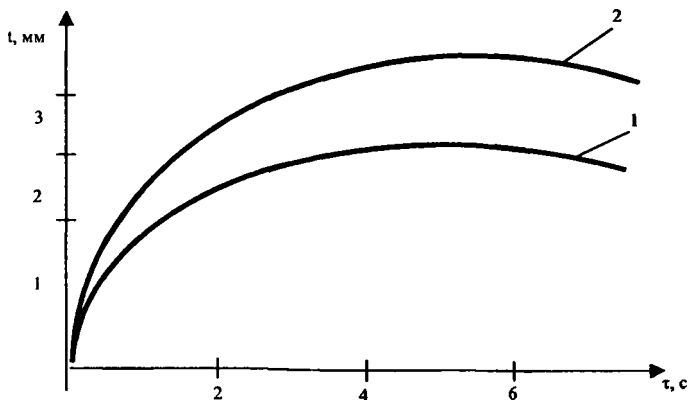


Рис. 2 Зависимость толщины наплавляемого слоя t от времени обработки детали t при основной характеристике системы $T_{\text{ос}} = 350$ °С: 1 – $\Delta T_0 = 500$ °С и $\Delta T_n = 50$ °С; 2 – для $\Delta T_0 = 650$ °С и $\Delta T_n = 50$ °С

Так, для пластины толщиной 12 мм слой наплавки, равный 2 мм при $\Delta T_0 = 500$ °С и $\Delta T_n = 50$ °С должен формироваться за 2 с, а при $\Delta T_0 = 650$ °С и $\Delta T_n = 50$ °С за 1 с.

Для расчета по полученной математической модели требуемой толщины t покрытия индукционной наплавкой погружением в расплав в зависимости от основной характеристики системы (9) выбирают время наплавки t . При этом имеют в виду, что требуемую толщину слоя можно получить последовательными технологическими переходами при наплавке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Индукционная наплавка твердых сплавов/ В.Н Ткачев, Б.М Фиштейн, Н В. Казинцев и др. – М.: Машиностроение, 1970. – 184с. 2. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. – М.: Машгиз, 1951.– 296с. 3. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1981.– 279с. 4. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: Справочник/ Под общ. ред. В.А.Григорьева и В.М.Зорина.– М.: Энергоатомиздат, 1988. – 560с. 5. Енохович А.С. Справочник по физике и технике.– М.: Просвещение, 1976. – 175с.

БАЛАНС ЭНЕРГИИ В ПРОЦЕССЕ ДРОБЕУПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Политехника, Зеленогурска

Зелёна Гура, Польша

Формирование и изменение таких характеристик качества поверхностного слоя как шероховатость, остаточные напряжения, микротвердость и др. в процессе дробеупрочнения стальными шариками зависит от количества энергии, вносимой в поверхностный слой при ударе шарика о поверхность [1, 2].

В процессе соударения с различной скоростью абсолютно жесткого шара с упругопластическим полупространством кинетическая энергия шара расходуется на упругопластическое сопротивление материала упрочняемой поверхности с учетом тепловых потерь. Под действием нормальной составляющей силы давления шара при упругопластическом деформировании образуется лунка, глубина которой определяет высоту неровности при единичном или многократном ударах. Совместное силовое и тепловое воздействие изменяет в поверхностном слое его свойства. Степень таких изменений зависит от его исходного, до упрочнения, состояния. Поэтому прогнозирование изменения свойств и характеристик поверхности при упрочнении может быть осуществлено при известном энергетическом влиянии силового и теплового воздействия на упрочняемую поверхность.

На рис. 1 показана общая схема взаимодействия абсолютно жесткого шара с полубесконечной плоскостью при ударе под углом β со скоростью подлета (соударения) V . В процессе упрочнения угол может изменяться от 0 до 90.

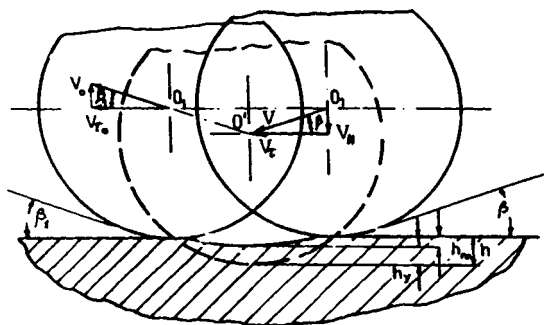


Рис. 1 Схема упругопластического контакта сферы с плоскостью

Рассмотрим характер взаимодействия шара с поверхностью при прямом ударе. В процессе соударения абсолютно жесткого шара с полубесконечным пространством кинетическую энергию упругопластической деформации можно выразить как:

$$E_k = \frac{mV_{\text{н}}}{t} h + E_{\text{н}}, \quad (1)$$

где m – масса шара; $V_{\text{н}}$ – нормальная составляющая скорости подлета; t – время упругопластического внедрения в материал; h – величина упругопластического внедрения; $E_{\text{н}}$ – энергия потерь при ударе.

Согласно условному разделению свойств материала на упругие и пластические, предложенному еще Ньютоном, при деформации на величину h единичного микро-столбика, выделенного под площадью контакта шара с материалом, вся кинетическая энергия шара расходуется на преодоление упругих и пластических сил сопротивления материала с учетом тепловых потерь:

$$E = E_y + E_{\text{нн}} + E_{\text{н}} \quad (2)$$

Согласно закону Герца упругие и пластические деформации при нагружении развиваются независимо друг от друга, поэтому:

$$h = h_y + h_{\text{нн}}, \quad (3)$$

где h_y – величина упругого внедрения шара, м; $h_{\text{нн}}$ – величина пластического внедрения шара, м.

Энергия упругой объемной деформации поверхности переходит в энергию упругого восстановления E_y этой поверхности, сообщаящей шару скорость отлета V_0 : $E_y = V_0^2 / 2$

Энергию пластического деформирования поверхности $E_{\text{нн}}$ и энергию потерь на трение и тепловыделение $E_{\text{н}}$ можно определить исходя из следующих соображений.

Учитывая, что энергия деформации при ударе равна работе ударных импульсов или произведению сил ударных импульсов на путь объемной деформации, а величина импульса силы – это произведение силы на время деформации (действия силы), можно определить силы, действующие в процессе удара шара о поверхность, следующим образом.

Силы пластической деформации (сила ударного импульса, направленного на преодоление пути пластического внедрения шара в материал):

$$F_{\text{нн}} = \frac{m(V_{\text{н}} - V_0)}{t_{\text{нн}}},$$

где $t_{\text{нн}}$ – время преодоления пути пластического деформирования при изменении скорости от $V_{\text{н}}$ до V_0 .

Сила упругого внедрения шара за время t_y составляет: $F_y = mV_0/t_y$.

Сила упругопластического внедрения шара за время изменения скорости от $V_{\text{н}}$ до 0: $F_{\text{нн}} = mV_{\text{н}}/t$.

На основании равенства энергии и работы ударных сил составим систему уравнений:

$$A_{\text{упл}} = E_{\text{упл}} = mV_{\text{н}} h/t; \quad A_{\text{ин}} = E_{\text{ин}} = m(V_{\text{н}} - V_{\text{о}})h_{\text{ин}}/t_{\text{ин}}; \quad A_y = E_y = mV_{\text{о}} h_y/t_y = mV_{\text{о}}^2/2$$

Подставляя эти значения в уравнение (2) и обозначив $V_{\text{н}} = V$, можно получить:

$$mV^2/2 = mV/t + E_{\text{н}} = m(V - V_{\text{о}}) h_{\text{ин}}/t_{\text{ин}} + mV_{\text{о}} h_y/t_y + E_{\text{н}} = m(V - V_{\text{о}}) h_{\text{ин}}/t_{\text{ин}} + mV_{\text{о}}^2/2 + E_{\text{н}}; \\ mV^2/2 = mV_{\text{о}} h_y/t_y; \quad V_{\text{о}}/2 = h_y/t_y; \quad (V - V_{\text{о}}) h_{\text{ин}}/t_{\text{ин}} + V_{\text{о}} h_y/2 = Vh/t \quad (5)$$

Используя систему уравнений и подставляя значение уравнения (3), определяем значения энергий, входящих в уравнение (2):

$$mV^2/2 = m(V - V_{\text{о}})(h - h_y)/t_{\text{ин}} + mV_{\text{о}}^2/2 + E_{\text{н}} \quad (6)$$

Учитывая, что $(mV^2/2 - E_{\text{н}})/mV = h$; $h_y = V_{\text{о}} t_y/2 = V_{\text{о}}(t - t_{\text{ин}})/2$ и, подставляя эти значения в уравнение (6), имеем:

$$mV^2/2 = m(V - V_{\text{о}})\{[mV^2/2 - E_{\text{н}}]t/mV - V_{\text{о}}(t - t_{\text{ин}})/2\}/t_{\text{ин}} + mV_{\text{о}}^2/2 + E_{\text{н}} = \\ = m(V - V_{\text{о}})[Vt/2 - E_{\text{н}}t/mV - V_{\text{о}}t/2 + V_{\text{о}}t_{\text{ин}}/2]/t_{\text{ин}} + mV_{\text{о}}^2/2 + E_{\text{н}}$$

и после преобразований

$$E_{\text{н}} Vt_{\text{ин}} - t(V - V_{\text{о}})Vt_{\text{ин}}(V - V_{\text{о}}) = m[t_{\text{ин}}(V + V_{\text{о}}) - t(V - V_{\text{о}}) - Vt_{\text{ин}}]/2t_{\text{ин}} = \\ = m[Vt_{\text{ин}} - t(V - V_{\text{о}})]/2t_{\text{ин}}; \quad E/V(V - V_{\text{о}}) = m/2; \quad E = mV(V - V_{\text{о}})/2; \quad (7)$$

Из системы уравнений (5) с учетом уравнений (7) следует:

$$E_{\text{упл}} = mV^2/2 - mV^2/2 + mVV_{\text{о}}/2 = mVV_{\text{о}}/2;$$

$$E_{\text{н}} = E - E_y - E_{\text{н}} = mV^2/2 - mV_{\text{о}}^2/2 - mV(V - V_{\text{о}})/2 \quad (8)$$

$$E = mVV_{\text{о}}/2 - mV_{\text{о}}^2/2 = mV_{\text{о}}(V - V_{\text{о}})/2 \quad (9)$$

Используя коэффициент восстановления $K = V_{\text{о}}/V_{\text{н}}$, полученные значения энергий можно записать в следующем виде:

$$E_y = K^2 mV^2/2; \quad E_{\text{ин}} = K(1 - K) mV^2/2; \quad E_{\text{н}} = (1 - K) mV^2/2; \quad E_{\text{упл}} = K mV^2/2 \\ E_y = K^2 E; \quad E_{\text{ин}} = K(1 - K)E; \quad E_{\text{упл}} = \kappa E \quad E_{\text{н}} = (1 - K)E \quad (10)$$

На рис. 2 приведены графические зависимости вышеприведенных формул, которые наглядно характеризуют распределение кинетической энергии шара при соударении его с полубесконечным пространством. Из общего количества этой энергии на пластическую деформацию поверхности затрачивается не более 25%, при этом коэффициент восстановления не превышает 0,5.

Общие тепловые потери на нагрев при трении обратнопропорциональны энергии упругопластического деформирования: для малоупругих тел ($K < 0,5$) уменьшение тепловых потерь компенсируется, в большей мере, ростом пластических деформаций, а для упругих тел ($K > 0,5$) – в большей мере – за счет роста упругой деформации.

Баланс энергии при ударе шара под углом β о поверхность может быть выражен следующим образом:

$$E = E_{\text{упл}} + E_{\text{тр}} + E_y + E_{\text{н}}, \quad (11)$$

где $E_{\text{н}}$ – энергия, затрачиваемая на преодоление сил внутреннего трения материала и связанных с этим тепловых потерь при его упругопластической деформации; $E_{\text{тр}}$ – работа или энергия, затрачиваемая на преодоление внешних сил трения при ударе.

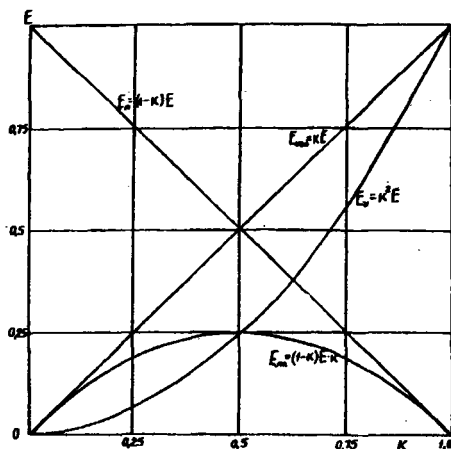


Рис.2 Изменение составляющих энергии удара шара о упругопластическую поверхность в зависимости от коэффициента восстановления K

Считая, что при подлете шара кинетическую энергию можно разделить на два направления – нормальное и тангенциальное к соударяемой поверхности, тогда:

$$E = mV^2 / 2 = \frac{mV_H^2}{2} + \frac{mV_\tau^2}{2}$$

Для направления, нормального к поверхности:

$$\frac{mV_H^2}{2} = E_{\text{ynn}} + E_{\text{m1}}$$

Энергия упругопластического внедрения E_{yna} шара определяется аналогично прямому удару по формуле (10), поэтому:

$$\frac{mV_H^2}{2} = \frac{mV_o(V_H - V_o)}{2} + \frac{mV_o^2}{2} K + E_{\text{m1}} \quad (12)$$

Для направления, тангенциального к поверхности:

$$\frac{mV_\tau^2}{2} = \frac{m(V_\tau - V_{\tau o})}{\tau} X + E_{\text{m2}} \quad (13)$$

С учетом того, что путь скольжения шара $X = h \text{ctg} \beta$, а $\tau = 2h/V_o$, решая уравнения (12) и (13) имеем:

$$E_{\text{m1}} = \frac{mV_H^2}{2} (1 - K); \quad E_{\text{m2}} = \frac{mV_\tau(V_\tau - V_{\tau o})}{2}$$

Общая энергия, затрачиваемая на преодоление внутренних сил при сопротивлении материала упругопластическому деформированию в нормальном и тангенциальном направлениях, равна:

$$E_m = \frac{mV_H^2}{2} [(1+K) + K(\operatorname{ctg} \beta - \operatorname{ctg} \beta_1)].$$

Энергия упругого восстановления материала в тангенциальном направлении:

$$E_y^* = \frac{mV_{\tau}^2}{2} = \frac{mV_o^2}{2} \operatorname{ctg} \beta_1 = \frac{mV_H^2}{2} = K^2 \operatorname{ctg} \beta_1$$

Потери энергии, связанные с проскальзыванием шара в тангенциальном направлении на пути их преодоления сил внешнего трения, определяются как:

$$E_{\text{тр}}^* = \frac{m(V_{\tau} - V_{\tau o})}{\tau} \quad X = \frac{m(V_{\tau} - V_{\tau o})V_o}{2} \operatorname{ctg} \beta_1 = \frac{mV_H^2}{2} K(\operatorname{ctg} \beta - \operatorname{ctg} \beta_1) \operatorname{ctg} \beta,$$

Таким образом, энергия шара, соударяемого с поверхностью под углом β с нормальной к этой поверхности скоростью V_n и отлетающего от поверхности под углом β_1 с нормальной скоростью $V_o = K V_n$ состоит, согласно формуле (11) из:

$$E_{\text{упл}} = KE; E_n = E[(1-K) + K(\operatorname{ctg} \beta - \operatorname{ctg} \beta_1)];$$

$$E_y^* = K^2 E \operatorname{ctg} \beta_1; E_{\text{тр}}^* = KE(\operatorname{ctg} \beta - \operatorname{ctg} \beta_1) \operatorname{ctg} \beta, \quad (14)$$

Учитывая, что при инженерных расчетах глубина пластического внедрения шара в поверхность формирует, при неоднократных ударах, шероховатость этой поверхности, пренебрегая разность углов подлета и отлета (принимая $\beta = \beta_1$), а также выражая скорость подлета шара через нормальную составляющую скорость V_n , приведенные формулы могут иметь вид:

$$E_{\text{упл}} = KE; E_n = E(1-K)E; E_y^* = K^2 E \operatorname{ctg} \beta_1; E_{\text{тр}}^* = K(1-K)E \operatorname{ctg}^2 \beta \quad (15)$$

Эти формулы могут быть выражены через скорость подлета V как:

$$E_{\text{упл}} = KE \sin^2 \beta; E_n = (1-K)E \sin^2 \beta; E_y^* = 0,5K^2 E \sin 2\beta; E_{\text{тр}}^* = K(1-K)E \cos^2 \beta \quad (16)$$

Найденные расчетные значения составляющих энергии удара шара с плоской поверхностью с учетом коэффициента восстановления позволяют рассчитать степень влияния силового и теплового факторов при ударе на формирование таких характеристик качества поверхности, как шероховатость и остаточные напряжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кильчевский Н.А. Динамическое контактное сжатие твердых тел. – К.: Наукова думка, 1976. – 315 с. 2. М.С. Дрозд, Матлин М.М., Сидякин Ю.И. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации. – М.: Машиностроение, 1986. – Машиностроение. – 220 с.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ПРИ ТОЧЕНИИ КОНСОЛЬНОГО ВАЛА

*Политехника Зеленогурска
Зелена Гура, Польша*

Относительные колебания инструмента и детали оказывают существенное влияние как непосредственно на процессы в зоне резания, так и на выходные параметры технологической системы – стойкость инструмента, точность обработки, качество поверхностного слоя. Анализируя колебательные процессы в зоне резания, можно определить сочетания амплитуды и частоты, обеспечивающие производительную и экономичную обработку.

В процессе обработки наиболее интенсивные колебания возникают только в одной системе – инструмента или детали. В частности, при точении консольно закрепленного вала колебания с наибольшей амплитудой имеет деталь.

В упругих системах, совершающих поперечные колебания, действуют силы инерции F_u , сопротивления (демпфирования) F_d , упругости $F_{упр}$ и резания P [1]. В большинстве реальных систем доминирующими являются поперечные колебания в плоскости, в которой действуют главная сила резания P_z и радиальная сила P_y , поскольку жесткость вдоль оси X значительно выше, а уровень осевой силы P_x – меньше.

Сила инерции в соответствии с известными законами механики может быть представлена в виде

$$\vec{F}_u = -m \left(\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} \vec{j} + \frac{\partial^2 z(x,t)}{\partial t^2} \vec{k} \right), \quad (1)$$

где $m = c/\omega_0^2$ – приведенная масса системы; c – обобщенный коэффициент жесткости системы; ω_0 – круговая частота первой гармоники свободных колебаний; \vec{j}, \vec{k} – орты осей Y и Z соответственно; y и z – функции времени t и длины x (вдоль оси X).

Силу сопротивления (демпфирования) для зоны малых амплитуд с некоторым приближением можно принять пропорциональной скорости колебательного перемещения

$$\vec{F}_d = \eta_0 \left(\frac{\partial y(x,t)}{\partial t} \vec{j} + \frac{\partial z(x,t)}{\partial t} \vec{k} \right) \quad (2)$$

где η_0 – обобщенный коэффициент сопротивления системы.

Его можно найти, как [2]

$$\eta_0 = \frac{2m\delta_0^*}{T}, \quad (3)$$

где T – период колебаний; m – приведенная масса системы; δ_0^* – обобщенный логарифмический декремент колебаний.

Сила упругости системы может быть определена, как

$$\bar{F}_{уп} = c(y(x,t)\bar{j} + z(x,t)\bar{k}) \quad (4)$$

где $c = 3\pi D^4 E / 64 L^3$ – обобщенный коэффициент жесткости; D, L – диаметр и вылет детали; E – модуль упругости материала детали.

Сила резания и ее проекции на оси Y, Z зависят от толщины среза, причем нелинейно. Для их выражения можно использовать зависимости

$$\begin{cases} P_z = C_{Pz} b^{x_{Pz}} [a(t)]^{y_{Pz}}, \\ P_y = C_{Py} b^{x_{Py}} [a(t)]^{y_{Py}}. \end{cases} \quad (5)$$

где $C_{Pz}, C_{Py}, x_{Pz}, x_{Py}, y_{Pz}, y_{Py}$ – постоянные, зависящие от геометрии инструмента и свойств обрабатываемого материала; a, b – толщина и ширина среза.

Дополнительно, однако, следует учесть, что в связи с инерционностью процесса пластической деформации в зоне резания силы резания отстают от изменения толщины среза на некоторое время τ . Определить это время можно, используя формулу

$$\tau = \frac{a \cos(\beta - \gamma)}{V \sin \beta \cos \gamma}; \quad \operatorname{tg} \beta = \frac{\cos \gamma}{K_a - \sin \gamma} \quad (6)$$

где K_a – коэффициент утолщения стружки; V – скорость резания; γ – передний угол; β – угол сдвига.

В реальных процессах резание всегда осуществляется “по следу” предыдущего прохода, что весьма существенно сказывается на возможности возникновения автоколебаний. Учесть это влияние можно, вводя время запаздывания T , равное времени одного оборота детали (периоду колебаний).

Таким образом, запаздывание сил резания от изменения толщины среза определяется временами τ и T . Следовательно, уравнения для расчета сил резания можно представить в виде

$$\begin{cases} P_z = C_{Pz} b^{x_{Pz}} [a_0 + y(x, t - T - \tau) - y(x, t - \tau)]^{y_{Pz}}; \\ P_y = C_{Py} b^{x_{Py}} [a_0 + y(x, t - T - \tau) - y(x, t - \tau)]^{y_{Py}}, \end{cases} \quad (7)$$

где x – координата зоны резания вдоль оси детали.

В данных уравнениях принято, что мгновенная толщина среза

$$a(t) = a_0 + y(x, t - T) - y(x, t), \quad (8)$$

а с учетом погрешностей закрепления детали

$$a(t) = a_0 + \varepsilon \sin \omega t + y(x, t - T - \tau) - y(x, t - \tau), \quad (9)$$

где ε – эксцентриситет закрепления детали; ω – угловая скорость вращения детали; T – время одного оборота детали; τ – отставание изменения силы резания от изменения толщины среза.

Уравнение движения консольного вала с массой, приведенной к свободному концу, можно записать на основе принципа Даламбера:

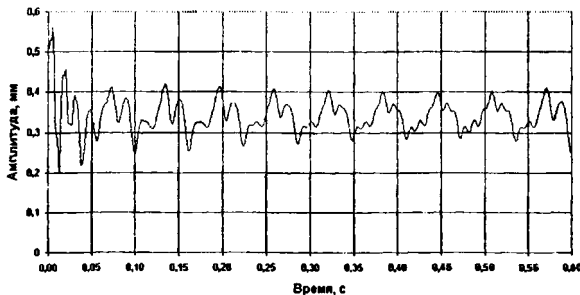
$$\vec{F}_u + \vec{F}_\delta + \vec{F}_{мп} + \vec{P} = 0. \quad (10)$$

Тогда движение оси консольно закрепленной детали в зоне резания в процессе точения, считая ее расположенной на расстоянии $x = l$ от места закрепления, можно описать системой из двух дифференциальных уравнений:

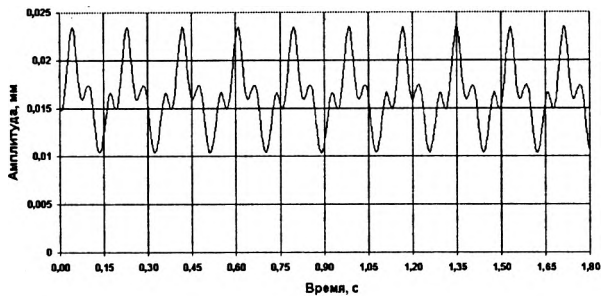
$$\begin{cases} m \frac{\partial^2 y(t)}{\partial t^2} + \eta_{ор} \frac{\partial y(t)}{\partial t} + c_y(t)y(t) = P_y(t) \\ m \frac{\partial^2 z(t)}{\partial t^2} + \eta_{оз} \frac{\partial z(t)}{\partial t} + c_z(t)z(t) = P_z(t) \end{cases} \quad (11)$$

Система (11) не может быть проинтегрирована точно и для ее решения использовался метод Рунге-Кутты.

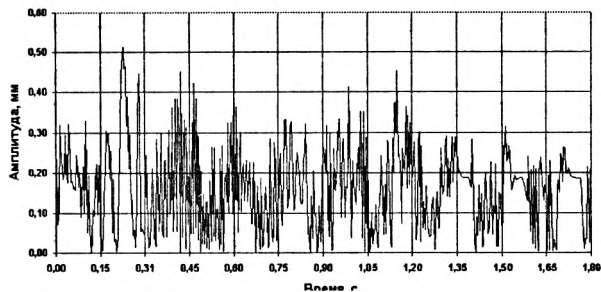
Для определения влияния условий точения деталей из стали 45 на амплитуду и частоту колебаний был спланирован численный эксперимент. В результате расчетов были получены виброграммы, характеризующие колебания консольно закрепленного вала в зависимости от времени резания, типовые формы которых приведены на рис. 1. Анализируя характер полученных виброграмм, можно выделить следующие преобладающие случаи: преобладание низкочастотных вынужденных и параметрических колебаний; возникновение автоколебаний (резкое возрастание частоты и амплитуды) в условиях пониженной жесткости технологической системы; появление подрывания (асимметричный характер виброграммы).



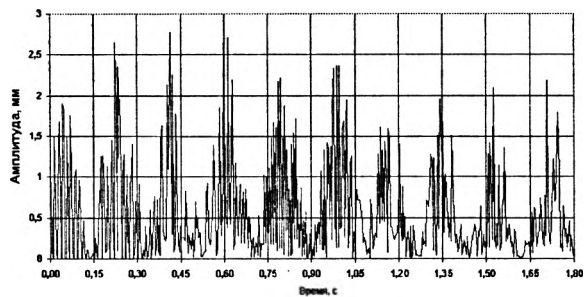
а



б



в



г

Рис. 1. Типовые формы колебаний при точении консольно закрепленного вала: а, б – преобладание вынужденных и параметрических колебаний с низкими частотами; в – возникновение автоколебаний; г – появление подрывания

После обработки результатов численных экспериментов было получено уравнение регрессии для расчета амплитуд колебаний:

$$A = 1,89 t^{1,153} S^{-0,224} V_{-0,330} \varphi^{-0,257} \epsilon^{0,745} D^{-4,0} L^{2,936}$$

Анализируя коэффициенты регрессии, легко заметить, что амплитуда колебаний возрастает с ростом глубины резания, вылета заготовки из патрона и погрешностей ее

установки и уменьшается с ростом подачи, скорости резания, главного угла в плане и диаметра заготовки.

Предложенная математическая модель колебательных процессов при точении консольно закрепленного вала позволяет снизить затраты на дорогостоящие экспериментальные исследования. В частности, установление влияния условий обработки вала на амплитуду колебаний позволяет оценить уровень изменения сил резания и использовать эти данные для расчетов на прочность узлов станка и режущих инструментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жарков И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом. Л.: Машиностроение, 1986. – 184 С. 2. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле. М.: Физматгиз, 1967. – 324 С.

УДК 621.75.002

И.П. Филонов, Л.В. Курч, А.В. Шавель

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОМПЬЮТЕРИЗИРОВАННОГО СТЕНДА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ И ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Компьютеризация инженерной деятельности позволила значительно повысить продуктивность работы и избавить человека от выполнения ряда рутинных функций. А использование компьютеров и специального программного обеспечения в областях, требующих постоянного повышенного внимания и четкого выполнения инструкции, является просто необходимым.

В развитых странах широко используется при автоматизации систем для сбора данных и управления процессами программы фирмы ADVANTECH'S – разработчика данного типа прикладных систем. Программа VisiDAQ – это прикладной инструмент разработки программ для сбора данных и управления процессами. Она имеет необходимый набор функции и утилит для разработки приложений оперативной автоматизации при использовании их в среде Windows.

Типичным примером использования данного типа программного обеспечения является построение на их базе испытательных стендов для различных типов машиностроительных предприятий. Так на рис.1 приведен один из возможных вариантов интерфейса испытательного стенда двигателя внутреннего сгорания, реализованного в среде VisiDAQ. Необходимость ведения постоянного, четкого контроля требу-

емых параметров с возможностью их быстро и многостороннего анализа, легко реализуется с помощью подобных программных продуктов. Проведение многодневных, а порой и многомесячных испытаний с постоянным ведением протокола контроля большого числа параметров сложно себе представить без помощи компьютерной техники. Однообразное протекание процессов приводит к снижению внимания человека, и в результате, возникают ситуации, когда моменты появления нетиповых отклонений в процессах не фиксируются с требуемой точностью. Данные ситуации вызывают необходимость проведения дополнительных многократных испытаний с целью достижения требуемой точности результатов. Например, наработка на отказ – это долговременный процесс испытания на постоянных (не предельных) режимах, длящийся до того момента, когда система выйдет из устойчивого состояния и даст сбой. Весь процесс наблюдения и контроля заключается в том, чтобы точно зафиксировать этот момент начала выхода из устойчивого состояния и четко определить причину возникновения сбоя.

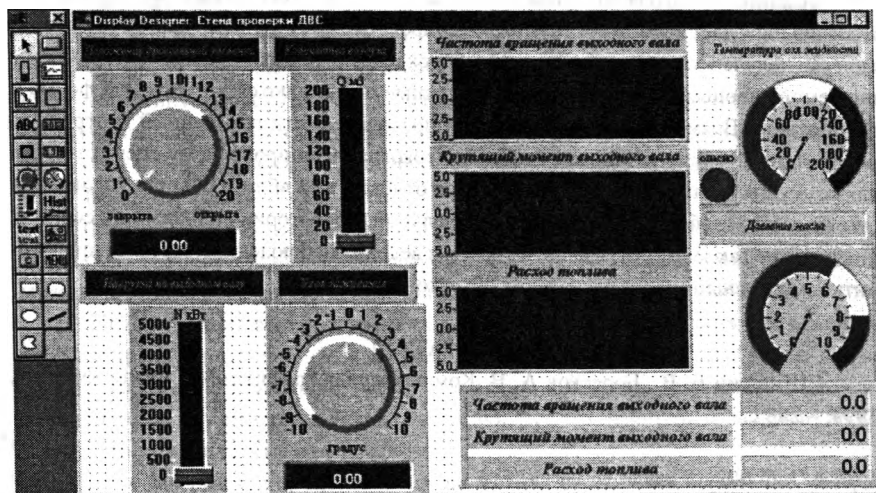


Рис.1. Пример интерфейса испытательного стенда двигателя внутреннего сгорания.

Компьютерная реализация установки по управлению объектами, контролю и анализу данных протекающих процессов, заключается в системе мероприятий:

1. Создание специальных устройств ввода-вывода, предназначенных для получения необходимых данных от объектов контроля и управления. Данные устройства преобразуют технологические параметры объекта (температура, частота вращения, угол поворота, изменение объема и т.п.) в электрические сигналы, предназначенные

для анализа компьютером. Настройка и конфигурирование этих устройств осуществляется уже непосредственно под конкретный объект наблюдения.

2. Создание программной среды для возможности построения графических интерфейсов по управлению объектами и контролю за происходящими процессами. Эта программная среда позволяет гибко оперировать данными, поступающими от различного рода датчиков. Помимо визуального представления контролируемых параметров (в виде графиков, временных протоколов, стрелочных индикаторов и т.п.) в данной программной оболочке возможно задание функциональных зависимостей одних параметров от других, создание функций анализа аварийных ситуаций с возможностью принятия различных вариантов решений без непосредственного участия человека. В случае возникновения аварийной ситуации, когда контролируемые параметры превысили предельно допустимые значения, программа может перейти в режим фиксирования данных или вообще отключить установку практически мгновенно, что не под силу обслуживающему персоналу, выполняющему контрольные функции на данном стенде.

Ведение протокола контроля с его постоянной записью в электронном виде на жесткий диск дает возможность гибко оперировать с полученными данными, автоматически получая различные варианты выборок и аналитических зависимостей контролируемого процесса. Все фиксируемые данные оформляются в требуемой форме в файл отчета. Возможность работы в сети позволяет вести постоянный контроль за работой нескольких установок одному высококвалифицированному специалисту, а также осуществлять анализ данных файлов отчетов, не вблизи объекта управления (что не всегда удобно и допустимо), а в отдельной лаборатории на удаленном сервере. Построение такой многоуровневой системы ведения наблюдения позволяет производить комплексный анализ нескольких объектов испытаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шишкин Е. В., Боресков А. В. Компьютерная графика - М.: Диалог-МИФИ, 1999. – 288 с.

УДК 621.75.002

И.П. Филонов, Л.В. Курч, В.С. Ревяко

СОКРАЩЕНИЕ СРОКОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Появление нового и совершенствование уже имеющегося программного обеспечения (ПО) позволяет пересмотреть классические обязанности инженера-конструкто-

ра. В настоящее время совсем не обязательно проходить долгий и дорогостоящий путь от проектирования до испытания опытного образца, чтобы выявить те или иные недостатки изделия. Имея возможность использовать самое передовое ПО инженер-конструктор уже на этапе проектирования может провести анализ изделия по некоторым техническим характеристикам, выявить его технологические, эксплуатационные и другие недоработки.

К одному из таких ПО относится программа MSC/NASTRAN выпущенная The MacNeal-Schwendler Corporation. MSC/NASTRAN для Windows (MSC/N4W) – это система окончательного анализа, которая позволяет быстро и качественно выполнить технические исследования. MSC/N4W предоставляет возможность выполнять сложные исследования возникающих напряжений, воздействия температуры, и динамической характеристики на трехмерной модели. Программа совместима практически со всеми современными CAD продуктами и средствами MS Office, что позволяет значительно повысить производительность. Фактически, MSC/N4W может импортировать твердую модель из любого пакета моделирования использующего ядро ACIS или Parasolids.

Если ваш пакет моделирования использует другое ядро, можно эти файлы открыть используя команды последовательного ввода. Также MSC/N4W позволяет создать собственную модель изделия, при помощи мощных каркасных и твердотельных инструментальных средств моделирования, импортировать геометрию из других CAD продуктов и дорабатывать её. Полученную модель можно экспортировать в более чем в двадцать различных форматов.

Для проведения исследования соответствующие материалы и свойства сечения могут быть созданы или назначены посредством MSC/N4W библиотек. Имеется возможность моделирования различных типов реакций связи и нагружающих сил.

MSC/N4W в процессе построения модели следит за правильностью её создания, чтобы устранить потенциальные погрешности. Например, MSC/N4W может проверять совпадающую геометрию, оценивать массу и инерцию, оценивать состояния реакций связи, и суммировать условия нагрузки. Всё это значительно экономит время и средства затрачиваемые на разработку.

После завершения процесса создания модели проводится испытание, которое раньше требовало изготовления опытного образца. Анализ может быть базовым (который включает: линейную статику, нормальные режимы, и линейную деформацию), и расширенным (который включает: теплообмен, динамику и оптимизацию).

После проведения анализа, MSC/N4W даёт возможность быстро представить результаты вычислений в различных видах: графики деформации, контурные графики, мультипликации, и графики X-Y – это только некоторые из инструментальных средств, имеющихся у MSC/N4W. MSC/N4W может экспортировать графику и текст в такие популярные программы как MS Word, MS PowerPoint и др. Можно экспортировать в

электронные таблицы, базы данных, текстовые документы, и программы иллюстрации. Это позволяет создать полный отчет в электронном виде на одном рабочем месте.

MSC/N4W идеально подходит для расширения возможностей инженера-конструктора так как дает возможность создать собственные комплексные трехмерные модели, а учитывая способность импортировать Parasolid, ACIS, IGES, и файлы других систем автоматизированного проектирования этот программный продукт может с успехом использоваться на любом машиностроительном предприятии.

Использование MSC/N4W в сочетании с другими CAD/CAM/CAE/PDM продуктами даёт возможность практически полной автоматизации этапа подготовки производства. Так, например, программа IMAN фирмы Unigraphics позволит автоматизировать документооборот и обеспечить своевременность обмена информацией между подразделениями, а в совокупности с MSC/N4W это даст возможность провести проверку деталей входящих в общую сборку. Средства затраченные предприятием на закупку и внедрения подобных программных пакетов быстро окупаются за счет возможности перехода на выпуск новой продукции в кратчайшие сроки, повышения производительности инженерного персонала, уменьшение процента конструкторского брака в изделии.

ЛИТЕРАТУРА

1.Шишкин Е. В., Боресков А. В. Компьютерная графика- М.: Диалог-МИФИ, 1999. – 288 с., ил. 2.IMAN Deployment Guide. Unigraphics Solution Inc., 2000 .

УДК 621.75.002

И.П. Филонов, Л.В. Курч, И.А. Политов

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ PDM – СИСТЕМ НА ЭТАПЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Одним из путей повышения производительности в области подготовки производства машиностроительного предприятия является компьютеризация инженерных задач. Конструирование специального оборудования и средств технологического оснащения на основе объёмного моделирования, разработка чертёжной документации, подготовка управляющих программ для станков с ЧПУ – все эти задачи можно решать с помощью CAD/CAM – систем. CAE – системы позволяют выполнить анализ и оптимизацию проектных решений. Подобные системы нашли широкое применение на многих предприятиях машиностроительной отрасли, и за последнее время накоплен достаточно большой опыт их использования.

Однако, в условиях рыночной экономики постоянно растущая конкуренция требует от производителей быстрой переналадки на выпуск различной номенклатуры

продукции. Быстрота переналадки может быть достигнута за счёт снижения времени на технологическую подготовку производства. Это можно обеспечить применением PDM – систем (Product Data Management – системы ведения проектов). Суть данных систем состоит в непрерывной информационной поддержке разработчиков на всех этапах жизненного цикла изделия (ЖЦИ).

На сегодняшний день машиностроительное предприятие использует сразу несколько CAD/CAM – систем. Наличие систем разного уровня объясняется главным образом разнообразием поставленных задач, а также не последнюю роль играет стоимость CAD/CAM/CAE-систем, и как правило, такая комбинация различных систем экономически обоснована.

Уже сформировался определённый круг специалистов, которые могут передавать опыт работы с CAD/CAM-системами, одновременно ставя перед собой новые задачи по компьютеризации работы различных служб предприятия.

Одной из таких задач является интеграция всех данных, получаемых с помощью различных систем проектирования. В странах, где доля конструкторского проектирования с использованием CAD-систем уже весьма значительна, специалистами и специализированными фирмами в рамках крупных проектов выполняется значительный объём работ по преобразованию форматов данных. Однако отработка информационного взаимодействия разных систем с использованием нейтральных форматов или прямых интерфейсов – только часть решения данной проблемы. Большую сложность представляет интеграция всей информации (результатов деятельности всех специалистов), с обеспечением возможности её многократного использования. На практике по-прежнему всю информацию выводят на бумажные носители, и это главным образом объясняется неготовностью участников процесса принять информацию в электронном виде, неспособностью служб управлять электронными архивами. Решение этой проблемы лежит в использовании PDM-систем.

Информация, создаваемая на этапе технической подготовки производства, составляет большую часть общей информации ЖЦИ. Сюда входит информация конструкторских проектов оснастки для изготовления этих изделий, информация технологических процессов изготовления изделий и технологических процессов изготовления оснастки, информация о стандартных изделиях и материалах и т.д.

Целями PDM-системы являются:

- ускорение процессов проектирования за счёт параллельного выполнения работ и электронного обмена данными между специалистами в едином информационном пространстве;
- повышение качества и достоверности информации за счёт прозрачности системы и взаимоконтроля участников процессов проектирования;
- сохранность информации в электронном виде;
- ускорение передачи опыта проектирования молодым специалистам.

PDM-система организует единое информационное пространство, предприятия, обеспечивая приём информации от различных систем проектирования, автоматически поддерживая механизм ведения версий информации документов и т.д.

Среди различных видов PDM–систем можно отметить систему iMAN Portal (Information Manager) фирмы Unigraphics Solutions Inc.

iMAN – это компьютерная технология, предназначенная для управления всей информацией о продукте производства и всеми относящимися к этому продукту процессами. Информация о продукте может состоять из любых данных, описывающих его, таких как файлы из систем CAD/CAM/CAE, конструкторские и технологические спецификации, конфигурации, деловые документы, таблицы характеристик, цен, поставок и т.д. Процессы включают в себя любую информацию, покрывающую процедуры, правила и действия, относящиеся к принятию решений, авторизации, безопасности хранения информации, стандартам, информационным потокам, организационным взаимодействиям и т.п. Объединяя в себе информацию о всём жизненном цикле изделия, система iMAN делает данные о проекте доступными всем пользователям системы – от конструкторов, технологов и операторов станков с ЧПУ до бухгалтеров и специалистов по маркетингу.

При создании данной системы ставились следующие цели:

- система должна быть масштабируемой;
- система должна быть расширяемой и иметь возможность работать с различными CAD/CAM/CAE системами (например, Unigrphics), а также с приложениями, написанными непосредственно пользователем; в свою очередь пользователь должен иметь возможность расширять существующий интерфейс;
- система должна иметь объектно–ориентированную структуру и при расширении возможностей системы пользователю должны быть предоставлены необходимые графические инструменты;
- система должна поддерживать коммуникационные технологии на уровне предприятия. Среди PDM – систем широко распространена технология CORBA;
- клиентский уровень должен быть переносимым и должен поддерживать различные платформы, включая UNIX, Windows, Netscape и Internet Explorer.

Система iMAN имеет тесную интеграцию со многими системами CAD/CAM/CAE (Unigraphics, SolidEdge, AutoCAD, CATIA), а также лёгкий в использовании интерфейс и широкие возможности для всего предприятия. Система имеет объектно–ориентированную архитектуру и поэтому может быть расширена и настроена под конкретные проблемы предприятия.

Среди множества функций, которые выполняет данная система можно выделить такие, как возможность создания динамически изменяемых спецификаций (рис. 1), а также с помощью модуля Workflow руководители предприятия могут контролировать и управлять “потоками работ” (деловыми процессами) (рис. 2). Кроме того в распоряжении у руководителя имеются все возможности поиска и просмотра всей необходимой информации по проектам.

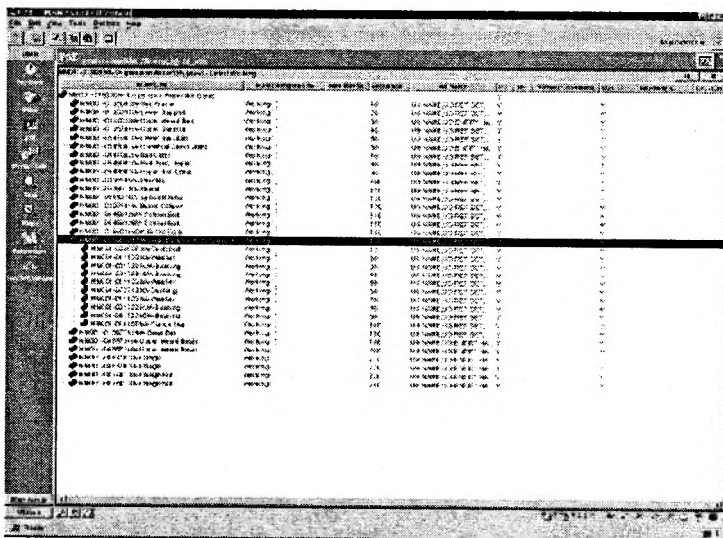


Рис. 1. Пример динамически составленной спецификации

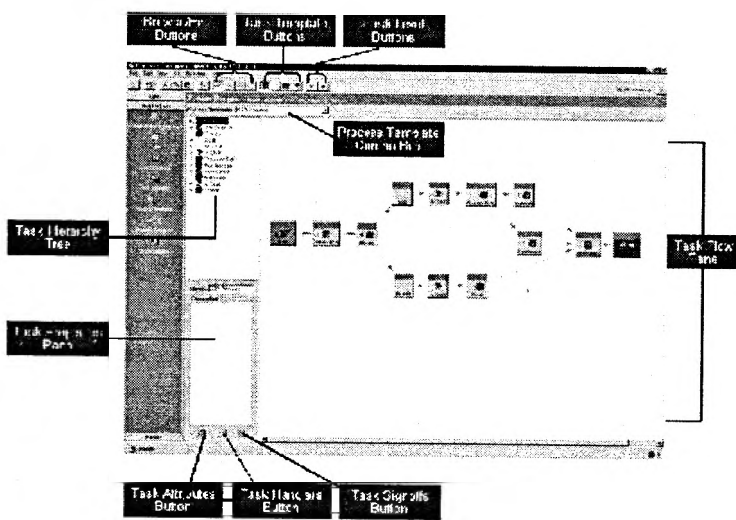


Рис. 2. Рабочая область модуля Workflow.

Очень важной и актуальной является задача организации электронных архивов различных типов документов. Как правило под термином “электронный архив” понимается набор отсканированных файлов конструкторских или технологических документов безотносительно к изделиям, то есть как полная аналогия “бумажным архивам”. В системах PDM имеется возможность создавать не только базу данных документов в электронном виде, но и электронные архивы, в которых отслеживаются все этапы эксплуатации документов (оригиналов, подлинников и т.п.) при изготовлении и утилизации изделий.

Таким образом, применение PDM – систем является одним из эффективных способов решения проблемы информационной интеграции задач технической подготовки производства промышленных предприятий. С участием сотрудников кафедры “Технология машиностроения” начаты работы по внедрению данной системы на ПО МТЗ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. Яблочников. Компьютеризация подготовки производства в едином информационном пространстве предприятия.//САПР и графика. – 2001. – №3. – 80 с. 2. IMAN Deployment Guide. Unigraphics Solution Inc., 2000. – 47р.

УДК 621.785

Ю.Ю. Ярмак, А.А. Пуховой, У. Фюссель, Г. Эккарт

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАЗМЕННОГО НАНЕСЕНИЯ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ КАРБИДНЫХ ПОКРЫТИЙ

Белорусская государственная политехническая академия

Минск, Беларусь

Дрезденский технический университет

Дрезден, Германия

Нанесение защитных покрытий на поверхности деталей машин является одним из современных методов повышения надежности и долговечности. При плазменном нанесении защитных покрытий широкое применение находят тугоплавкие материалы, которые по своим физическим свойствам подразделяются на металлические (карбиды, нитриды, бориды, силициды) и неметаллические (оксиды, керамика). Это объясняется тем, что тугоплавкие материалы обладают целым рядом положительных свойств, но не могут во многих случаях применяться для изготовления контактных изделий из-за их высокой хрупкости и низкой прочности при динамических нагрузках, а также из-за технологических трудностей при изготовлении деталей.

Одно из ведущих мест среди тугоплавких материалов занимают карбиды и особенно карбиды вольфрама, хрома и титана. Однако уже первые исследования в области нанесения плазменных покрытий из чистых карбидов показали, что покрытия имеют высокую пористость, низкую прочность сцепления с подложкой, а частицы порошка при нанесении подвергаются сильному окислению [1].

Одним из способов сохранения свойств карбидов в процессе плазменного напыления и улучшения качества покрытий является нанесение их в виде плакированного порошка [1].

В качестве порошка для нанесения покрытий был выбран карбид титана, плакированный Ni–Mo–P оболочкой. Нанесение на высокодисперсные частицы карбида металлической оболочки осуществлялось химическим осаждением в водных растворах. Применение этого метода позволило получить на частицах TiC равномерную никель–молибден–фосфорную оболочку с заданным соотношением карбидной составляющей и металлической матрицы. Для определения влияния никель–молибден–фосфорной плакирующей оболочки на сохранение свойств карбида титана и его химического состава в процессе плазменного напыления, а также влияния оболочки на некоторые свойства покрытий, полученный TiC–Ni–Mo–P порошок напылялся на металлическую поверхность аргоно–водородной плазмой в атмосфере. По достижении определенной толщины нанесенное покрытие скалывалось, подвергалось измельчению и в полученном порошке определялось содержание различных элементов. В качестве порошка для напыления использовался чистый карбид титана (TiC), а также плакированный карбид титана с содержанием плакирующей оболочки 50% по массе (50TiC–50Ni–Mo–P).

Нанесение покрытий осуществлялось на следующих режимах: $U=60\text{В}$; $I=400\text{А}$; $L=100\text{мм}$. Структура полученных покрытий из чистого карбида титана и плакированного порошка показана на рис. 1. Отличительной особенностью покрытий из плакированного карбида титана (рис. 1-б) является их низкая пористость, а также наличие мягкой металлической матрицы с равномерно расположенными в ней твердыми частицами карбида. Металлическая матрица позволяет напылять покрытия из карбида титана значительной толщины, повышает прочность сцепления покрытия с подложкой и удерживает частицы карбида в процессе трения, которые могут воспринимать большие нагрузки и не выкрашиваться. Некоторые из свойств покрытий, нанесенных из карбида титана и композиционного порошка TiC–Ni–Mo–P с соотношением массы карбида к массе металлической составляющей 1:1, приведены в табл. 1.

Изменение содержания углерода в покрытии по отношению к напыляемому порошку определялось по формуле

$$C_{\text{пот}} = \frac{C_{\text{пор}} - C_{\text{пок}}}{C_{\text{пор}}} \cdot 100, \%$$

где $C_{\text{пот}}$ – потери углерода в процессе напыления; $C_{\text{пор}}$ – содержание углерода в напыляемом порошке; $C_{\text{пок}}$ – содержание углерода в нанесенном покрытии.

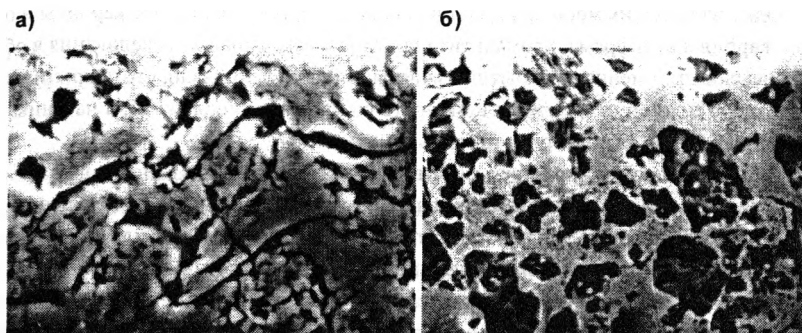


Рис. 1. Структура карбидных покрытий (РЭМ x 3000): а – TiC; б – 50TiC/50Ni-Mo-P

Таблица 1

Содержание элементов и характеристики покрытий

| Порошок | Содержание элементов, % | | | Пористость, % | Прочность сцепления, МПа | Микротвердость, HV ₅₀ , МПа |
|------------------------|-------------------------|----------------|------------------|---------------|--------------------------|--|
| | O ₂ | N ₂ | C | | | |
| TiC | 8,04 (0,63) | 0,74 (0,09) | 14,80 (19,14) | – | – | 24000 |
| TiC/Ni-Mo-P (50/50) | 1,76 (1,26) | 0,42 (0,11) | 8,88 (10,16) | 15,21 | 38 | 15000 – матрица 30000 – TiC зерна |

ПРИМЕЧАНИЕ: в скобках указано содержание химических элементов в напыляемом порошке.

Изменение содержания кислорода и азота в покрытии определялось как отношение их процентного содержания в покрытии к соответствующей величине в напыляемом порошке.

Следует отметить, что общей тенденцией явилось уменьшение содержания углерода в напыляемом порошке и резкое увеличение содержания кислорода и азота в покрытии. Это увеличение особенно значительно при напылении чистого карбида титана. Однако нанесение плакированного карбида титана позволяет значительно сократить потери углерода при напылении в атмосфере, уменьшить в покрытии содержание кислорода и азота по сравнению с покрытиями из TiC.

Следует отметить, что металлическая матрица обладает также достаточно высокой микротвердостью не свойственной покрытиям из никеля. Это можно объяснить, как показал рентгеноструктурный анализ, образованием различных фаз и соединений в процессе плазменного напыления.

Прочность сцепления покрытия с подложкой и пористость покрытий из TiC не определялись из-за трудностей, вызванных невозможностью нанесения покрытий достаточной толщины.

В данной работе были проведены также исследования влияния режимов плазменного напыления на содержание в покрытии таких химических элементов как: кислород (O_2), углерод (C). Качество покрытий в процессе напыления определялось в зависимости от напряжения (U), тока (I) и расстояния нанесения покрытий (S). Предельные значения этих величин, а также интервалы их варьирования приведены в табл. 2. Указанные интервалы режимов напыления позволили изменять мощность плазменного потока от 12 до 35 кВт.

Таблица 2.

Исследуемые параметры и интервалы из варьирования

| Параметры | Обозначение | Интервалы варьирования | | |
|--------------------------|-------------|------------------------|---------|---------|
| | | Нижний | Средний | Верхний |
| Напряжение, В | U | 40 | 55 | 70 |
| Ток, А | I | 300 | 400 | 500 |
| Расстояние напыления, мм | S | 70 | 110 | 150 |

Для проведения исследований был выбран полнофакторный эксперимент типа 2^3 . В результате проведения экспериментов для плакированного порошка с содержанием TiC-65% и Ni-Mo-P – оболочки 35% были получены уравнения множественной регрессии для углерода и микротвердости:

$$C = 7,75 + 0,78U - 0,54S - 0,22UI + 0,2UIS$$

$$HV_{50} = 1565 + 114U + 179S + 128US$$

Для определения зависимости содержания кислорода (O_2) в покрытии из порошка с содержанием TiC 65%, а также для определения влияния режимов напыления на качество покрытий из порошка с соотношением карбидной составляющей к матрице 1:1 исходя из полнофакторного эксперимента 2^3 был использован план типа 2^{3-1} и получены следующие уравнения регрессии:

$$O_2 = 3,78 - 0,5U - 0,72I + 0,4S \text{ (порошок 65TiC/35Ni-Mo-P)}$$

$$O_2 = 2,20 - 0,35U - 0,45I + 0,36S \text{ (порошок 50TiC/50Ni-Mo-P)}$$

$$C = 6,94 + 1,75U + 0,28I - 0,09S \text{ (порошок 50TiC/50Ni-Mo-P)}$$

Из полученных зависимостей следует, что напряжение и расстояние напыления являются основными факторами, влияющими на содержание углерода и кислорода в покрытии, а также на микротвердость покрытия. С увеличением напряжения содержание углерода в покрытии и микротвердость, увеличиваются. Увеличение расстояния напыления приводит к снижению содержания углерода в покрытии, но, в тоже время, увеличивает их микротвердость.

Влияние тока на содержание химических элементов в покрытии является незначительным, причем это влияние зависит существенно от других параметров плазменного потока.

На основе проведенных экспериментов были определены оптимальные режимы для нанесения твердосплавных карбидных покрытий из плакированных порошков с различным содержанием карбидной составляющей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mash D.R., Weare N.E., Walker D.L. Process variables in Plasma – Jet Spraying. – Journal of metals. New-York. – 1961.– № 7.– S. 473–478. 2. Blume F., Eckart G., Jarmak Ju. Plasma-spritzen verschleissbestandiger TiC –Schichten. – Schweisstechnik. Berlin. – 1986.– № 6.– S. 251–253.

ЭКОНОМИКА, ОРГАНИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ

УДК 338.45:621

А. В. Александров

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАТЕРИАЛОПОТРЕБЛЕНИЯ КАК СТРАТЕГИЧЕСКИЙ ПУТЬ РАЗВИТИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

*Могилевский государственный технический университет
Могилев, Беларусь*

Машиностроительный комплекс Республики Беларусь по-прежнему остается в значительной степени материалоским. В последние годы материалоемкость производства в машиностроении неизменно превышает уровень 680 руб./тыс. руб. (табл. 1).

Таблица 1

**Материалоемкость продукции по отраслям машиностроения
за 1995-1999 гг., руб./тыс. руб.**

| Отрасль | 1995 | 1996 | 1997 | 1998 | 1999 | 1999 в % к 1995 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-----------------------|
| Машиностроение | 710,4 | 691,6 | 690,8 | 685,6 | 736,2 | 103,6 |
| В том числе: | | | | | | |
| энергетическое машиностроение | 504,7 | 581,2 | 527,9 | 529,8 | 566,4 | 112,2 |
| горношахтное и горнорудное машиностроение | 460,4 | 563,3 | 595,3 | 627,7 | 536,7 | 116,6 |
| подъемно-транспортное машиностроение | 522,0 | 582,0 | 610,2 | 665,5 | 752,3 | 144,1 |
| железнодорожное машиностроение | 476,7 | 514,4 | 547,9 | 662,0 | 724,4 | 152,0 |
| электротехническая промышленность | 623,3 | 585,7 | 626,0 | 609,4 | 691,9 | 111,0 |
| химическое и нефтяное машиностроение | 641,6 | 715,9 | 855,4 | 750,0 | 628,3 | 97,9 |
| станкостроение и инструментальное машиностроение | 541,9 | 562,2 | 620,2 | 561,4 | 592,0 | 109,3 |
| промышленность межотраслевых производств | 578,9 | 674,9 | 720,6 | 701,8 | 714,5 | 123,4 |
| приборостроение | 573,6 | 559,7 | 608,0 | 578,5 | 567,0 | 98,8 |
| автомобильная промышленность | 827,9 | 757,0 | 773,4 | 779,5 | 873,3 | 105,5 |
| подшипниковая промышленность | 565,7 | 761,0 | 709,2 | 893,9 | 875,9 | 154,8 |
| тракторное и сельскохозяйственное машиностроение | 722,5 | 702,0 | 692,7 | 684,0 | 749,8 | 103,8 |
| строительно-дорожное и коммунальное машиностроение | 645,2 | 709,3 | 729,6 | 708,9 | 762,0 | 118,1 |
| машиностроение для легкой и пищевой промышленности и бытовых приборов | 643,7 | 688,3 | 570,5 | 707,4 | 652,2 | 101,3 |
| производство санитарно-технического и газового оборудования и изделий | 652,5 | 625,1 | 575,8 | 491,8 | 550,8 | 84,4 |
| другие отрасли машиностроения | 663,8 | 661,1 | 677,8 | 580,8 | 620,3 | 93,5 |

Источник: собственная разработка на основании данных Министерства статистики и анализа Республики Беларусь.

Причем на протяжении 1995-1998 гг. рассматриваемый показатель последовательно снижался и только в 1999 г. увеличился. Причем этот рост был столь значителен – 50,6 руб./тыс. руб. (736,2-685,6), – что в результате в 1999 г. материалоемкость превышает уровень 1995 г. на 3,6%. Однако в отраслевом разрезе соответствующая тенденция движения материалоемкости наблюдается лишь в тракторном и сельскохозяйственном машиностроении и в производстве санитарно-технического и газового оборудования. Но если в первой отрасли, как и по машиностроению в целом, рост показателя в 1999 г. (на 65,8 руб./тыс. руб. (749,8-684,0)) нивелировал его уменьшение во все предыдущие годы, то во второй снижение материалоемкости в 1995-1998 гг. было более значительным (особенно в 1998 г. – на 84,0 руб./тыс. руб. (491,8-575,8)), в результате чего в 1999 г., несмотря на увеличение, она составила 84,4% от уровня 1995 г.

С другой стороны, в двух отраслях – подъемно-транспортном машиностроении и железнодорожном машиностроении – рассматриваемый показатель в период с 1995 по 1999 г. неизменно рос. Прирост за эти годы составил соответственно 44,1 и 52,0%. Кроме того, еще в шести отраслях материалоемкость увеличивалась три раза из четырех. Однако наибольший прирост за все годы (54,8%) наблюдался в отрасли, имевшей равное количество периодов увеличения и уменьшения анализируемого показателя – в подшипниковой промышленности. Но в обоих случаях материалоемкость здесь возросла почти на 200 руб./тыс. руб., что и предопределило конечный результат.

В целом в 1999 г. по сравнению с 1995 г. материалоемкость уменьшилась в трех отраслях машиностроения (тогда как в 1998 г. таковых было четыре). Помимо производства сантехнического оборудования такого результата достигли химическое и нефтяное машиностроение (уменьшение – 2,1%) и приборостроение (1,2%). Кроме того, на 6,5% снизилась материалоемкость в группе других отраслей машиностроения.

Итак, материалоемкость в машиностроении по-прежнему остается чрезвычайно высокой. В 1999 г. в семи отраслях из пятнадцати она превышала 700 руб./тыс. руб., в том числе в двух – 800, еще в пяти – 600 руб./тыс. руб. Причем в большинстве отраслей рассматриваемый показатель имел тенденцию к росту.

Высокий уровень материальных затрат и соответственно высокая себестоимость являются одним из основных негативных факторов, обуславливающих низкую конкурентоспособность отечественных машин и оборудования, прежде всего по цене. С другой стороны, высокая материалоемкость производства продукции не позволяет предприятиям получать достаточные объемы прибыли, необходимые для совершенствования выпускаемых изделий с целью повышения их конкурентоспособности. Поэтому стратегическим направлением развития машиностроительного комплекса в настоящее время должно стать повышение эффективности материалопотребления, снижение материалоемкости.

Одним из основных факторов, определяющих материалоемкость производства в машиностроении, является уровень используемых техники и технологии. Дадим количественную оценку влияния данного фактора.

Важнейшей характеристикой производственных фондов предприятий является их прогрессивность, которую косвенно можно оценить по показателям степени износа и коэффициенту ввода и в том числе обновления как всех фондов, так и их активной части (машин и оборудования). Проанализировав соответствующую информацию в отраслевом разрезе машиностроения за 1997-1999 гг., было выявлено, что наибольшую связь материалоемкость производства по пятнадцати основным отраслям машиностроения имеет со степенью износа производственных фондов (коэффициент корреляции – 0,3999). Значимость коэффициента корреляции проверяется по критерию Стьюдента сравнением расчетного значений критерия (в нашем случае – 3,05) с теоретическим (при числе степеней свободы 44 и уровне значимости 5% t-табличное составляет 1,998). Поскольку t-фактическое больше t-табличного, связь между материалоемкостью и степенью износа является надежной, а величина коэффициента корреляции – значимой.

Это дает основание построить теоретическую зависимость между уровнем материалоемкости производства и степенью износа основных производственных фондов в машиностроении. Фактические данные по указанным показателям за 1997-1999 гг. отображены на рис. 1.

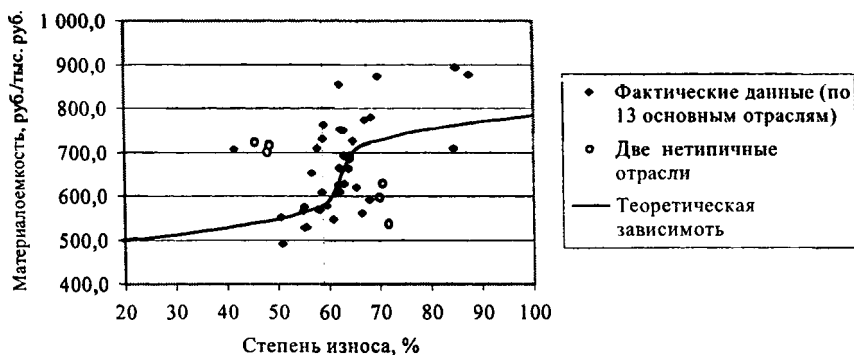


Рис. 1. Взаимосвязь материалоемкости производства по основным отраслям машиностроения и степени износа производственных фондов.

Для более объективного выявления связи между рассматриваемыми показателями исключим из рассмотрения две наиболее нетипичные отрасли. Поскольку взаимосвязь между материалоемкостью и степенью износа является прямой, то таковыми будут отрасли с высокой материалоемкостью и низким износом (промышленность межотраслевых производств) и с низкой материалоемкостью и высоким износом (горношахтное и горнорудное машиностроение). Указанная операция повышает коэффициент корреляции исследуемых показателей до 0,5821.

Из рисунка 1 следует, что форма взаимосвязи между материалоемкостью производства и степенью износа носит параболический характер. С помощью технических средств программы Microsoft Excel нами была подобрана соответствующая аналитическая зависимость (критерием оптимальности служил минимум отклонений теоретических значений от фактических):

$$Y = 41,5648 * \sqrt[3]{X-62,1342} + 643,5317, \quad (1)$$

где Y – материалоемкость производства, руб./тыс. руб.; X – степень износа основных производственных фондов, %.

Теоретические значения материалоемкости отображены на рис. 1. Коэффициент корреляции между расчетными и фактическими значениями материалоемкости производства составляет 0,6143, а коэффициент детерминации 0,38. Это значит, что вариация материалоемкости на 38% обусловлена изменением степени износа основных фондов.

Таким образом, выявленная зависимость свидетельствует, что по мере роста износа до уровня 59% материалоемкость производства плавно увеличивается до значения 582,7 руб./тыс. руб.; затем повышение степени износа на каждый пункт (до уровня 66%) приводит к резкому росту материалоемкости (до 708,8 руб./тыс. руб. в конце интервала); после этого последняя вновь начинает увеличиваться достаточно плавно (см. рис. 1).

Таким образом, одним из путей повышения эффективности использования материальных ресурсов, снижения материалоемкости в машиностроении республики является уменьшение износа основных производственных фондов. Основой реализации данной политики в настоящее время должны стать модернизация и техническое перевооружение в большинстве отраслей машиностроения на базе наукоемких, материало- и энергосберегающих техники и технологий, а также переход к малоотходным и комплексным безотходным технологиям производства.

В последние годы резко увеличился физический износ основных фондов. Так, по данным Министерства статистики и анализа, в 1999 г. в целом по машиностроению он составил 64,3%, в том числе активной части – 83,7%. Одновременно усилился моральный износ машин и оборудования. На предприятиях преобладает технологический уклад IV типа, в то время как в развитых странах мира доля V уклада достигла уже примерно половины ВВП (в Беларуси – 3-5%) [1, с. 44]. Без быстрой смены техники и технологий отечественное машиностроение в ближайшее время рискует оказаться на грани физического распада производственного потенциала, а также еще больше отстать от развитых стран по уровню конкурентоспособности продукции со всеми вытекающими последствиями.

В этих условиях требуется резкое расширение инвестиционной и инновационной активности. За последние 6-8 лет общий объем капитальных вложений в экономи-

ку республики снизился более чем на 70%, а инвестиции в базовые и наукоемкие отрасли сократились в 6-30 раз [2, с. 19]. Коэффициент обновления основных фондов в среднем по машиностроению в 1999 г. составил лишь 1,0%. По расчетам экспертов, в ближайшие 10 лет республике необходимо инвестировать в экономику 50 млрд. долл., тогда как в настоящее время годовой объем инвестиций достигает примерно 1,5 млрд. долл. [3, с. 54].

Наряду с совершенствованием техники и технологии производства, важным направлением повышения эффективности использования материальных ресурсов является улучшение конструкций машиностроительной продукции. Экспертные оценки показывают, что в машиностроении формирование материалоемкости примерно на 2/3 зависит от решений, принятых в процессе проектирования. Именно на этой стадии легче всего комплексно проработать и экспериментально проверить прогрессивные варианты конструкции нового изделия и выбрать оптимальный вариант. Более того, ошибки, допущенные при проектировании, значительно сложнее исправить в процессе изготовления. В то же время известно, что удельная металлоемкость отечественных машин и оборудования намного выше лучших зарубежных аналогов.

В конструкциях машиностроительной продукции недостаточно применяются новые прогрессивные материалы, которые придают принципиально новые качества изделиям, увеличивают ресурс их службы, а также способствуют экономии традиционных материалов и значительно (до нескольких раз) снижают удельную материалоемкость изделий.

Важную роль также должно играть совершенствование организации использования материальных ресурсов. На наш взгляд, один из наиболее значительных резервов повышения эффективности материалопотребления в данном случае заключается в использовании вторичных ресурсов и отходов, причем как на конкретных предприятиях, так и на уровне отраслей и народного хозяйства в целом. В настоящее время из 19,4 млн. т отходов производства и производственного потребления, ежегодно образующихся в республике, используются только 3,2 млн. [4, с. 106]. Использование же их в изготовлении конструкционных материалов требует значительно меньших затрат энергии по сравнению с производством из первичных ресурсов, а также непосредственно экономит последние.

Наряду с этим для повышения эффективности материалопотребления необходимо осуществлять и другие меры – совершенствовать систему снабжения предприятий материальными ресурсами, их хранения, нормирования расхода, стимулирования рационального и экономного использования и т. п.

ЛИТЕРАТУРА

1. Слонимский А.Л. Научный потенциал и технологическая структура экономики Беларуси: стратегия развития // Белорусский экономический журнал. – 1998. – № 1. –

С. 39-50. 2. О функционировании экономики в 1999 году // Белорусская экономика: анализ, прогноз, регулирование: Экономический бюллетень НИЭИ М-ва экономики РБ. – 2000. – №2. – С. 2-31. 3. Дрозд В.А. Инвестиционный фактор в экономике Беларуси // Белорусский экономический журнал. – 1999. – №4. – С. 47-56. 4. Национальная стратегия устойчивого развития Республики Беларусь / НИЭИ Минэкономики Республики Беларусь. – Мн., 1997. – 232 с.

УДК 338

Н.Ю.Бербасова

МЕТОД ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Могилевский государственный технический университет

Могилев, Беларусь

Эффективность сварочного производства любой организации или предприятия связана с различными по своим функциям, содержанию, назначению процессами. Благодаря общности цели – получению качественных, надежных, конкурентоспособных сварных конструкций, все эти разнообразные процессы образуют определенное многомерное единство. Это дает возможность представлять сварочное производство как целостную систему функциональных связей различных элементов, операций и процессов. Для оценки деятельности такой системы в настоящий момент используется незначительное число показателей, каждый из которых отражает определенный аспект: массу израсходованных электродов, проволоки, присадочных материалов; коэффициент использования сварочных материалов; удельный расход наплавленного металла на 1 т металлоконструкций; энергоемкость на 1 кг наплавленного металла; уровень механизации сварочных работ [1]. Представление эффективности функционирования сварочного производства через приведенные показатели не дает единой оценки их деятельности. Каждый расчетный показатель, безусловно, позволяет представить определенный процесс сварочного производства в количественном выражении, в совокупной оценке можно говорить лишь о качественной характеристике сварочного производства, подкрепляя ее отдельными количественными параметрами.

Поиск оценочного показателя уровня деятельности сварочного производства в условиях переходной экономики сопряжен с решением ряда проблем:

- учетом условий функционирования отечественных предприятий;
- представлением эффективности их функционирования как многомерной и целостной системы;
- спецификой сварочного производства.

Особенностью сварочного производства является то, что оно является заготовительным. Результатом производства редко является продукт, имеющий самостоятель-

ное значение на рынке. Обычно сварные конструкции входят в состав машин, механизмов, оборудования, строительных объектов. В связи с этим влияние уровня сварочного производства на финансово – экономические показатели проявляется опосредованно через качество, эргономичность, эстетичность, потребительские свойства готового продукта, имеющего сварные элементы. Таким образом, сварную конструкцию можно рассматривать как элемент конкурентоспособности готовой продукции и степень “ответственности” качества сварной конструкции за финансовые показатели работы предприятия имеет место быть.

Анализ существующих методик оценки эффективности функционирования предприятий и организаций показал, что для анализа и оценки сварочного производства наиболее адекватной является оценка, основанная на том, что для характеристик сварочного производства выбираются группы показателей, каждой из которой присваиваются весовые коэффициенты [2]. В группы объединяются однородные характеристики сварочного производства, оказывающие влияние на конкурентоспособность и качество продукции. Внутри групп выделяются отдельные показатели, максимальные значения которых составляют 1, а минимальные – 0. Показатели построены таким образом, что стремление их к 1 говорит о повышении уровня сварочного производства, а стремление к 0 о его деградации. Агрегированная оценка уровня сварочного производства, таким образом, определяется:

$$A = \sum_{i=1}^n b_i \sum_{j=1}^m a_{ij} K_{ij},$$

где A – агрегированная оценка; K_{ij} – преобразованное значение значение i -го показателя в j -й группе; a_{ij} – весовой коэффициент i -го показателя в j -й группе; b_i – весовой коэффициент i -й группы показателей; i – номер показателя в j -й группе; j – номер текущей группы показателей. Весовые коэффициенты показателя в группе и группы определяются с использованием создания причинно-следственных моделей качества сварочной продукции и уровня сварочного производства, исходя из особенностей отрасли, в которой оценивается состояние сварочного производства и методики парных сравнений частных показателей.

Для определения весовых коэффициентов в агрегированной оценке уровня сварочного производства представим процесс образования определенного качества сварной конструкции в виде графа. Вершинами графа являются факторы, определяющие определенный уровень качества сварной конструкции, а ребра – пути, по которым происходит действие факторов. Для систематизации факторов качества применим принцип декомпозиции сложной системы по уровням ее внутреннего состояния. Для этого в сложной системе причинно – следственных связей уровня качества выделим уровни, отличающиеся степенью обобщенности рассматриваемого явления. Для системы определения степени качества нами выделено 3 уровня: обобщающие показатели каче-

ства; показатели, входящие в состав групп; группы показателей, определяющие уровень сварочного производства;

Наиболее общим является уровень показателей качества сварочной продукции, на котором качество раскладывается по отдельным элементам. На следующем уровне факторы, определяющие качество уточняются в зависимости от показателей сварочного производства. На последнем уровне факторы объединяются в однородные группы - состояние парка сварочного оборудования (X_1); состояние кадрового потенциала сварочного производства (X_2); состояние технологий (X_3); состояние организации сварочного производства (X_4); состояние инновационной деятельности предприятия (X_5); состояние экологии и сварочного производства (X_6).

Для оценки влияния входных величин на качество сварочной продукции проведем декомпозицию графов по факторам уровня сварочного производства. Для этого представим подмножества, принадлежащие каждой из основных величин, в виде подграфа. Оценим степень влияния каждой причины X_i . Будем считать, что зависимость уровня качества сварочной продукции от факторов уровня сварочного производства определяется различными путями. Например, качество сварочной продукции зависит от состояния парка сварочного оборудования, которое в свою очередь определяется показателем возрастного состава оборудования, показателем морального износа оборудования, показателем прогрессивности сварочного оборудования и показателем использования сварочного оборудования. Все эти показатели в определенной степени влияют на среднюю долю брака, удельный вес зарекламированной продукции, удельный вес аттестованной продукции, удельный вес сертифицированной продукции, удельный вес экспортируемой продукции, удельный вес продукции, соответствующей мировым стандартам, эргономический уровень качества сварной конструкции. Эти показатели со своей степенью значимости определяют качество сварочной продукции. Возможны другие маршруты, по которым образуется определенный уровень качества. Чем больше количество маршрутов последовательности от фактора X_i к качеству, тем более значим этот фактор.

После построения модели причинно-следственных связей для решения поставленной задачи необходимо выбрать методику для определения весов. В работе используется подход, разработанный Т. Саати, основанный на лингвистических оценках, которым соответствуют количественные значения. Матрица строится на основе попарного сравнения всех частных показателей с помощью шкалы лингвистических значений типа: “квалификация инженерно-технических работников сварочного производства более значима, чем их возраст” или “прогрессивность сварочного оборудования, если речь идет о промышленном комплексе, более значима его возрастного уровня”.

Для определения весов ребер графов определяем α_{ij} в матрице парных сравнений $A\{a_{ij}\}$ частных показателей x_i исследуемой системы:

$a_{ij} = \frac{\alpha_i}{\alpha_j}$, $W=(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ – искомый вектор. Умножив A на вектор W , получим $AW=NW$, где N – собственное значение матрицы A , по которому можно восстановить вектор W (с учетом условия нормализации $f = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n} = 1$, где n – число частных критериев).

W вычисляется из условия:

$$S = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(a_{ij} - \frac{\alpha_i}{\alpha_j} \right)^2 \rightarrow \min ,$$

т.е. искомые значения получаются при решении оптимизационной задачи:

$$S = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (a_{ij} \alpha_j - \alpha_i)^2 \rightarrow \min \sum_{i=1}^n \alpha_i = n ; i=j$$

Проведя суммирование всех маршрутов для подграфа причинно-следственных связей влияния состояния парка сварочного оборудования на качество сварочной продукции по формуле получим значимость фактора X_1 в уровне качества сварочной продукции (рис. 1).

По рассмотренной выше методике определяются все весовые коэффициенты ребер графа “Причинно-следственных связей качества сварочной продукции и уровня состояния сварочного производства”.

В результате рассмотрения всех подграфов с учетом весовых коэффициентов, полученных методом Т. Саати, строим матрицы смежности для каждого подграфа, и выводим уравнение причинно-следственных связей зависимости качества сварной конструкции от интегральных показателей состояния сварочного производства:

$$Y=17X_1 + 17X_2 + 13,9X_3 + 13,6X_4 + 13 X_5 + 7,3X_6$$

В относительных значениях:

$$Y=0,2X_1 + 0,2X_2 + 0,178X_3 + 0,174X_4 + 0,159X_5 + 0,089X_6$$

Числовые значения при $X_1 \dots X_6$ являются весовыми коэффициентами групп показателей уровня состояния сварочного производства в агрегированной оценке уровня сварочного производства и сумма их равна 1.

Весовые коэффициенты показателей групп уровня сварочного производства определялись методом построения матриц попарных сравнений частных критериев.

Таким образом, анализ графов влияния уровня сварочного производства на качество продукции и определение рангов факторов и весовых коэффициентов методом парных сравнений позволил с определенной степенью достоверности определить весовые коэффициенты для агрегированной оценки уровня сварочного производства.

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Для укрепления своих позиций на быстро растущем рынке организациям машиностроительной отрасли необходимо регулярно изучать конкурентоспособность товара и предприятия в целом, ее уровень и интенсивность изменения, а также факторы, оказывающие на нее наибольшее влияние.

Конкурентоспособность – многоаспектное понятие, к определению которого существует много подходов в зависимости от решаемых задач. В общем случае под конкурентоспособностью предприятия понимается его текущее положение на рынке, т.е. набор характеристик (параметров), которые обеспечивают предприятию преимущество на рынке, и содействует его успешному функционированию в условиях конкуренции.

Следует понимать, что конкурентоспособность имеет нестабильный характер. Она зависит от значительного числа условий и ограничений, которые определяются как факторы конкурентоспособности.

Изучение конкурентоспособности должно вестись непрерывно и систематически, в тесной привязке к фазам жизненного цикла отдельных товаров и всего предприятия в целом. Это позволит своевременно уловить момент снижения показателя конкурентоспособности и принять соответствующие решения. Последовательность этапов оценки представлено на рис. 1.

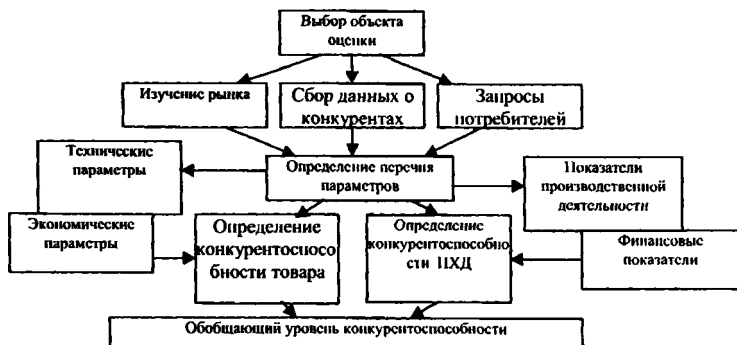


Рис. 1. Схема оценки конкурентоспособности

В настоящее время существует множество методов для определения уровня конкурентоспособности, которые разрабатываются разными авторами: рейтинговый, параметрический, комплексный, метод сопоставления инновационности и адаптивности предприятия, расчет индивидуальных и групповых показателей, метод функции желательности, метод многокритериальной оптимизации и т.д. Выбрать наиболее достоверный метод достаточно сложно, так как все эти подходы имеют ряд своих специфических достоинств и недостатков. Наиболее обоснован с точки зрения формализации метод многокритериального ранжирования.

Процедура оценки конкурентоспособности на основе метода многокритериальной оптимизации включает следующие этапы:

Этап 1. Устанавливаются основные показатели: количество предприятий и их наименования (f_k); количество блоков параметров и их наименования (y_j); количество параметров, их наименования и фактические значения (x_{ij}^k); степень важности (c_j^i), тенденция изменения (l_j^i) (возрастание, убывание, возрастание-убывание) и вид зависимости каждого показателя (g_j^i) (линейная, нелинейная).

Этап 2. Формирование шкалы желательности исследуемых параметров объекта.

Функция определена в интервале $0 \dots 1$ и используется в качестве безразмерной шкалы, названной шкалой желательности, для оценки уровней параметров сравниваемых объектов.

С помощью шкалы желательности оцениваются параметры объектов или изделий. Каждому фактическому значению функции желательности придается конкретный экономический смысл, связанный с уровнем конкурентоспособности исследуемого объекта. Причем значение функции желательности, равное 0, соответствует неприемлемому уровню параметра, значение функции желательности, равное 1, соответствует полностью приемлемому уровню параметра.

Вводятся ограничения для значений функции желательности $[0, 1]$ и устанавливаются максимальные (\max^i_j), минимальные (\min^i_j) и оптимальные (opt^i_j) значения параметра.

Значение является максимальным (\max^i_j), если оно больше всех остальных, и минимальным (\min^i_j), если соответственно – меньше всех остальных значений.

При формировании функции желательности учитываются тенденции изменения показателей (l_j^i). Если наилучшее значение показателя стремится к максимуму ($x \sim \max^i_j$) и производная функция $f'(x_{ij}^k)$ в промежутке (\min^i_j, \max^i_j) всюду положительна, то функция $f(x_{ij}^k)$ в этом промежутке возрастает, если наилучшее значение показателя стремится к минимуму ($x \sim \min^i_j$) и производная функция $f'(x_{ij}^k)$ всюду отрицательна, то $f(x_{ij}^k)$ убывает.

Если наилучшее значение показателя до определенной величины стремится к максимуму, а затем – к минимуму, то функция $f(x_{ij}^k)$ сначала возрастает, а потом убывает и представляет собой параболу, у которой ветви направлены вниз. При

этом минимальному и максимальному значениям соответствует ноль, а оптимальному – единица. Оптимальное значение показателя является точкой перегиба кривой функции.

При построении функции желательности определяют вид зависимости (g_i^j) для каждого показателя, при этом она может быть линейной или нелинейной.

1) При линейной зависимости узловые точки шкалы желательности рассчитываются по формулам (1) и (2):

$$R_{ij} = ((\max_i^j - \min_i^j) * r) + \min_i^j, \quad (1)$$

$$R_{ij} = ((\text{opt}_i^j - \min_i^j) * r) + \min_i^j; \quad R_{ij} = ((\max_i^j - \text{opt}_i^j) * r) + \text{opt}_i^j, \quad (2)$$

где R_{ij} – узловая точка шкалы желательности для i -го показателя j -го блока, r – значение функции желательности.

При тенденции изменения показателей – возрастание или убывание то применяют формулу (1), а если возрастание – убывание, то формулу (2).

2) при нелинейной зависимости узловые точки шкалы желательности устанавливаются с помощью экспертов.

Этап 3. Определение приведенного значения функции желательности для каждого оцениваемого параметра $f(x_{ij}^k)$, при этом s_{ij}^k – приведенное значение i -го показателя j -го блока k -го объекта.

Значение функции желательности s_{ij}^k характеризует уровень x_{ij}^k показателя k -го объекта. При $s_{ij}^k = 0$ значение x_{ij}^k -го показателя неудовлетворительно, а если $s_{ij}^k = 1$, то значение x_{ij}^k -го показателя приемлемо в полном объеме.

Способ расчета приведенного значения функции желательности для каждого параметра также зависит от зависимости его значений.

1) при линейной зависимости применяются формулы (3) и (4):

$$s_{ij}^k = (x_{ij}^k - \min_i^j) / (\max_i^j - \min_i^j), \quad (3)$$

если улучшению признака соответствует увеличение его значения;

$$s_{ij}^k = 1 - (x_{ij}^k - \min_i^j) / (\max_i^j - \min_i^j), \quad (4)$$

если улучшению признака соответствует уменьшение его значения.

2) при нелинейной зависимости для расчета используют коэффициенты аппроксимирующей функции, которые могут быть найдены с помощью встроенных в среде Excel опций, либо с помощью метода Ньютона. Наилучший результат дает построение степенной функции 3-го порядка:

$$s_{ij}^k = a \times x_{ij}^k + b \times x_{ij}^k + c \times x_{ij}^k + d, \quad (5)$$

где a, b, c, d – коэффициенты аппроксимации.

Этап 4. Оценка агрегирующей функции для каждого блока параметров проводится в зависимости от способа расчета:

1 мультипликативный подход: рассчитывается как среднее геометрическое значение функции желательности по отдельным признакам:

$$K_{y_j}^k = \sqrt[n]{x_{ij}^k \cdot c_i^j * \dots * x_{im}^k \cdot c_i^j}, \quad (6)$$

где $K_{y_j}^k$ – агрегирующая функция y_j -го блока k -го объекта; n – количество показателей; f_k – количество объектов, $k = 1, \dots, f_k$; y_j – j -е количество блоков параметров, $j = 1, \dots, m$; x_{ij}^k – i -е количество параметров j -го блока k -го предприятия, $i = 1, \dots, n$; c_i^j – степень важности i -го показателя j -го блока;

2-ой аддитивный подход: рассчитывается как среднеарифметическое значение функции желательности по отдельным признакам (7):

$$K_{y_j}^k = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (c_i^j * x_{ij}^k) \quad (7)$$

Этап 5. Определение показателя конкурентоспособности с учетом выбранного способа:

1 при мультипликативном подходе показатель конкурентоспособности будет равен произведению показателей блоков (8):

$$K^k = K_{y_1}^k * \dots * K_{y_m}^k, \quad (8)$$

где K^k – показатель конкурентоспособности k -го объекта.

2 при аддитивном подходе показатель конкурентоспособности равен сумме произведений показателей блоков и степени их важности:

$$K^k = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (K_{y_j}^k * c_i^j), \quad (9)$$

где K^k – показатель конкурентоспособности k -го объекта.

Наивысшее значение имеет тот субъект, у которого наибольший суммарный результат по всем однонаправленным показателям. В соответствии с разработанным интервалом от 0 до 1 уровень конкурентоспособности субъекта на рынке характеризуется следующим образом:

- $0 \leq K^k \leq 0,40$ – неудовлетворительный уровень конкурентоспособности;
- $0,41 \leq K^k \leq 0,70$ – удовлетворительный уровень конкурентоспособности;
- $0,71 \leq K^k \leq 0,80$ – хороший уровень конкурентоспособности;
- $0,81 \leq K^k \leq 1,00$ – высокий уровень конкурентоспособности.

Используя мультипликативный подход для расчета агрегирующих функций желательности, получаем, что при неудовлетворительном значении какого-либо признака ($s_{ij=0}^k$) объект является абсолютно неконкурентоспособным ($K^k=0$). Применяя адди-

тивный подход, в том же случае будет наблюдаться лишь незначительное снижение показателя конкурентоспособности.

На основе приведенной выше методики разработан программный продукт, который позволяет своевременно принимать управленческие решения с учетом реальных характеристик работы предприятия.

Данный продукт включает математический модуль и удобный интерфейс, построенный на основе языка программирования Visual Basic 6.0, состоящий из пользовательских диалоговых окон, из множества подсказок, обеспечивающих простоту его освоения и использования. При этом полученные результаты могут быть сохранены в виде текстового файла.

После оценки конкурентоспособности существует потребность в управлении уровнем конкурентоспособности с помощью ряда шагов:

1. обоснование необходимого уровня конкурентоспособности;
2. доведение существующих показателей до требуемого уровня;
3. поддержание уровня конкурентоспособности на основе контроля и регулирования;
4. прогнозирование уровня конкурентоспособности;
5. планирование и разработка стратегий развития предприятия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Атамалиева Л. Конкуренция и ее роль в работе предприятий // Финансы, учет и аудит. – 2000. – №9. – С.31-32.
2. Радионова Л.Н., Кантор О.Г., Хакимова Ю. Р. Оценка конкурентоспособности // Маркетинг в России и за рубежом. – 2000. – №1. – С.63–77.
3. Щиборщ К.В. Сравнительный анализ конкурентоспособности и финансового состояния предприятий отрасли и/или региона // Маркетинг в России и за рубежом. – 2000. – №5. – С.93–104.
4. Яшева Г. Конкурентоспособность предприятий: методика оценки и результаты // Финансы, учет и аудит. – 2000. – №4. – С. 17–20.

УДК 336.713

М.Н.Гриневич, В.А.Устинович

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ И УПРАВЛЕНИЯ РЫНОЧНОЙ СТОИМОСТЬЮ ПРЕДПРИЯТИЯ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

На современном этапе большинство директоров отечественных предприятий концентрирует свои усилия на решении текущих задач, оперативном управлении и

соответственно краткосрочном горизонте планирования. Вопросы же перспективного развития нередко оказываются “не у дел”. Для того, чтобы выжить и усилить свои конкурентные позиции на рынке, необходимо на высоком профессиональном уровне проводить стратегическое планирование направленное, прежде всего, на рост рыночной стоимости предприятия, включающее определение альтернативных стратегий и оценка конкретных программ в рамках этих стратегий, а так же выбор методов управления на основе стоимости для анализа и установления целевых нормативов деловых операций. Рыночная стоимость предприятия в конкурентной экономике представляет собой важнейшую комплексную оценку эффективности его деятельности, поскольку чутко и адекватно реагирует на изменение как текущего, так и перспективного положения предприятия.

Исследования мировой практики оценки и управления стоимостью предприятия, проведенные одной из лидирующих международных консалтинговых фирм McKinsey & Company, Inc. (представительство в России с 1992 г.) указывают на тесную связь между ВВП на душу населения, производительностью труда и созданием стоимости [1]. Предприятия, которые не в состоянии уменьшая затраты на производство увеличивать производительность в условиях современной глобализации экономики, быстро сталкиваются с утратой рыночной доли. Страны, не способные повышать производительность труда так же быстро, как их соседи, страдают от “бегства” капитала, эмиграции квалифицированных человеческих ресурсов и снижения уровня жизни.

Процесс оценки стоимости является ключевым элементом развития инфраструктуры любого предприятия, а максимизация стоимости предприятия принимается за его главную цель. Такие традиционные финансовые показатели, как прибыль или темпы роста прибыли, не дают точной и адекватной картины состояния устойчивости и платежеспособности предприятия, не всегда правильно отражают процесс создания новой стоимости. Перед предприятием необходимо также ставить оперативные задачи, основанные на краткосрочных, более явных показателях его финансовой деятельности по созданию прироста стоимости, таких как экономическая прибыль.

Экономическая прибыль представляет собой произведение разницы между рентабельностью всего инвестированного капитала предприятия и затратами на привлечение капитала, на величину инвестированного капитала. Возникновение концепции экономической прибыли относится к периоду опубликования исследований в экономике А. Маршалла в 1980 г. Она в наибольшей мере отражает финансовую устойчивость и платежеспособность как с теоретической, так и с практической точек зрения. Преимущество модели экономической прибыли состоит в том, что данный показатель дает представление о результатах деятельности компании в любом периоде времени, в то время как, например, свободный денежный поток не обладает таким свойством. В самом общем виде финансовую устойчивость пред-

приятия можно охарактеризовать как отражение стабильного превышения его доходов над расходами, обеспечивающего свободный оборот его денежных потоков. Исходя из вышеизложенного, предприятие стоит больше или меньше инвестированного капитала лишь в той мере, в какой оно зарабатывает больше или меньше своих средневзвешенных затрат на капитал. Падение цены предприятия происходит в результате снижения его прибыльности либо увеличения средневзвешенной стоимости обязательств и собственного капитала. В этом смысле управление стоимостью – процесс непрерывной максимизации стоимости предприятия, служащий ориентиром для принятия решений на всех уровнях – от стратегических, до оперативных. Управляя балансом, а тем самым и рентабельностью инвестиций и созданием новой стоимости, на предприятии необходимо разрабатывать структуру факторов стоимости для каждого из управленческих решений: от участка цеха до высшего управленческого уровня.

Этапами предлагаемой системы стоимостной оценки любого предприятия являются:

- анализ финансово-хозяйственной деятельности предприятия за предыдущие периоды;
- прогнозирование будущей деятельности предприятия;
- оценка экономической прибыли предприятия в последующие периоды;
- оценка затрат на капитал;
- определение текущей стоимости предприятия;
- выявление и анализ факторов стоимости, разработка мероприятий по повышению стоимости предприятия.

В развернутом виде система стоимостной оценки предприятия представлена в виде блок-схемы на рис. 1.

Для того, чтобы управление стоимостью было взято за основу прогнозирования деятельности предприятия, необходимо постатейное регулирование баланса наравне с отчетом о прибылях и убытках, а также поддержание разумного сочетания долгосрочных и краткосрочных целей финансовой деятельности. Такое управление, по сути, представляет собой непрерывную реорганизацию, направленную на достижение максимальной стоимости.

Стоимостная оценка должна служить ориентиром на следующих уровнях принятия решений:

- планирование и подведение итогов работы за выбранный период времени;
- разработка соответствующих нормативов, на основании которых оцениваются результаты деятельности и намечаются цели;
- разработка критериев системы поощрения;
- оценка стратегических инвестиционных решений;
- подготовка информации для потенциальных инвесторов.

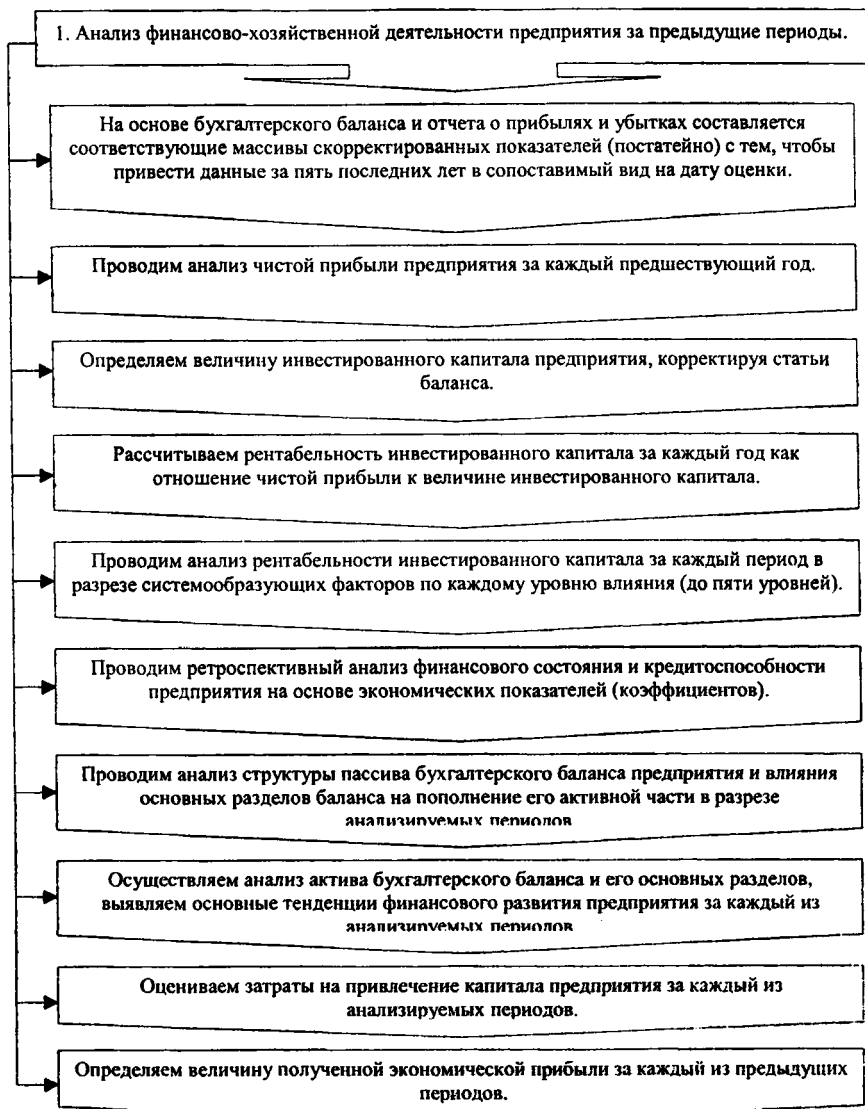
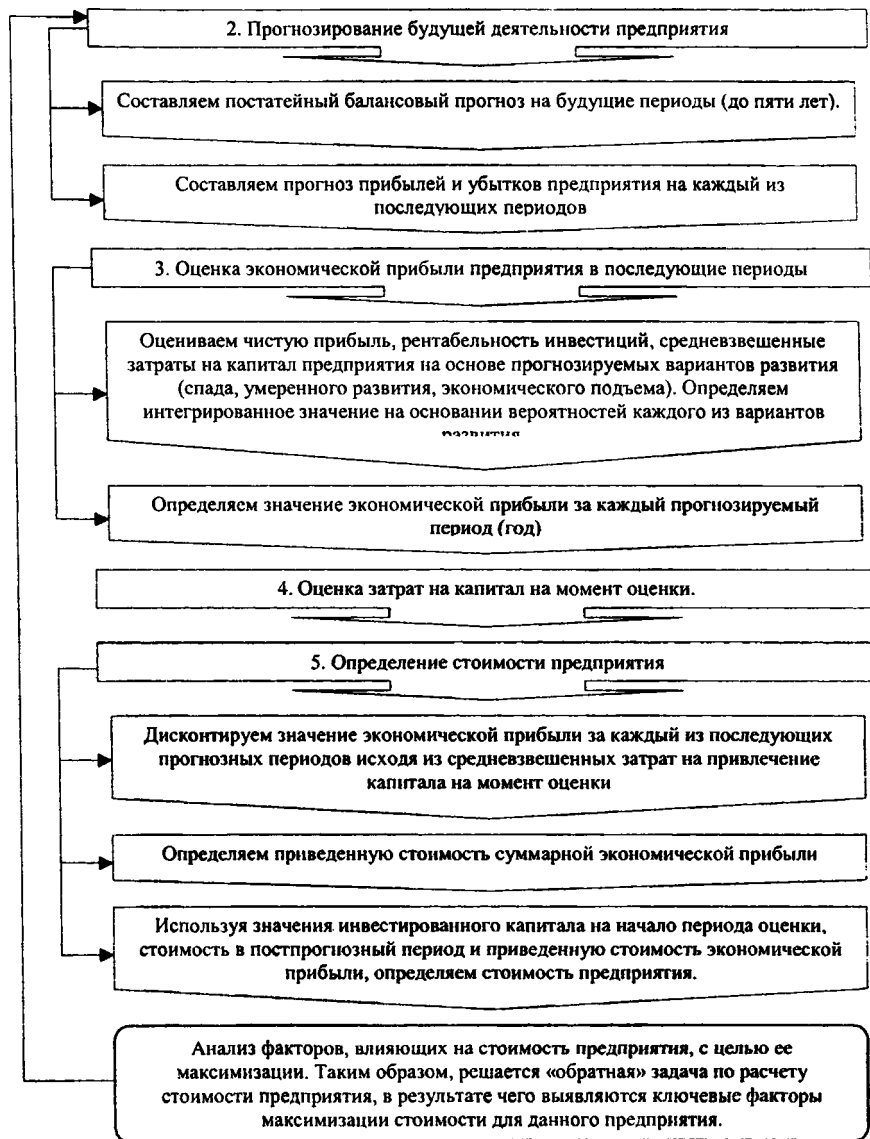


Рис. 1. Этапы стоимостной оценки



Продолжение рис. 1

Руководителям предприятий необходимо рассматривать свою деятельность с позиций повышения стоимости предприятия, уделяя внимание таким факторам стоимости как рост объема продаж, норма прибыли или рентабельность капитала. Все привыкли обращать внимание на рост доходов, но для дальнейшего продвижения вперед основное значение имеет рост стоимости и экономической прибыли от инвестиций. В некоторых случаях это означает отказ от расширения производства и снижение прибыли при условии инвестирования средств в исследования и разработки с долгосрочной окупаемостью. Кроме того, система стимулирования руководителей должна также побуждать последних к созданию стоимости, т.е. определяться достижением текущих целей по конкретным стоимостным факторам, а так же на основе программы отсроченного вознаграждения, построенного на показателе экономической прибыли.

Способность управлять стоимостью – важнейший элемент стратегии управления производством. Методы и приемы оценки стоимости бывают довольно сложны в деталях, однако по своим задачам и применению они сравнительно просты и прозрачны, учитывая возможное применение электронных таблиц. Управление стоимостью не означает создание стоимости путем финансовых спекуляций или манипуляций. Наоборот, управление стоимостью означает разработку направленных на создание стоимости стратегических и оперативных планов для предприятия. Большинство отечественных предприятий только выиграли бы от основательного изучения возможностей структурной перестройки, включающей три крупных этапа:

1. Изучение ситуации с созданием стоимости на предприятии за последние несколько лет и определение возможностей структурной перестройки.
2. Использование этих возможностей на основе разработанного плана.
3. Внедрение системы управления стоимостью в процесс управления предприятием.

Таким образом, управление стоимостью – интегрирующий процесс, направленный на качественное улучшение стратегических и оперативных решений на всех уровнях организации за счет концентрации общих усилий на ключевых факторах стоимости. При хорошо отлаженном управлении стоимостью планирование и оценка результатов деятельности обеспечивают руководителей всех уровней достоверной информацией и необходимыми стимулами для создания новой стоимости.

ЛИТЕРАТУРА

1. McKinsey Global Institute. Service Sector Productivity, Washington D.C., October 1992; Manufacturing Productivity, Washington D.C., October 1993.

ПРИМЕНЕНИЕ МАТРИЧНОГО МЕТОДА ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ

*Витебский государственный технологический университет
Витебск, Беларусь*

Главной целью функционирования как машиностроительного, так и любого другого промышленного предприятия является создание и реализация конкурентоспособной продукции. Одно из основных условий ее успешного достижения заключается в хорошо координированной посредством сетевых компьютерных технологий работе ключевых участников производственного процесса. Возникающая таким образом система коллективного интеллекта требует разработки соответствующего программно-алгоритмического обеспечения, которое, в свою очередь, должно строиться на эффективном математическом аппарате. В работах [1–3] показано, что в основу математического обеспечения интегрированной САПР производственной системы может быть положен тензорный подход. Исходя из принятой тензорной методологии продукция как инвариант и сама цепочка трансформации ее описаний в ходе выполнения этапов производственного процесса представляют собой тензоры разных рангов, в частности, двумерные матрицы (таблицы).

Одной из важных задач при проектировании (планировании) и управлении производственной системой (предприятием) является текущая оценка эффективности ее функционирования. В статье исследуется возможность применения для решения указанной задачи так называемого “матричного метода” [4], а priori полностью соответствующего тензорному подходу.

Матричный метод анализа дает не только обобщающую характеристику состояния предприятия и динамику его развития, но и позволяет определять изменения в ходе и результатах работы и выявлять резервы повышения эффективности производства. Работа проводится в несколько этапов.

На первом этапе анализа и оценки деятельности предприятия изучают количественные показатели результатов деятельности, прослеживают динамику изменения этих показателей на базе матриц относительных и индексных значений. Сравнение можно осуществлять как для показателей затрат и ресурсов, идущих на производство, так и для показателей результатов деятельности. Динамика изменения показателей прослеживается на основании данных матриц, элементы которых представляют собой индексы анализируемых показателей. В матрицах анализируется значение интенсивных факторов (рентабельность, фондоотдача, материалоемкость и т.д.) за анализируемый период. Подобное сравнение показателей, проводимое при данной структуре произ-

водственной программы, данной технологии и организации производства позволяет сделать вывод об эффективности деятельности предприятия.

На втором этапе оценивают тесноту связи между затратами и результатами, между затратами и ресурсами в оценке взаимосвязей конечных результатов деятельности. В результате получается итоговая оценка деятельности предприятия на основе интегрированных оценок эффективности и интенсивности хозяйственной деятельности (блочные и интегрированные оценки эффективности), определяются тенденции их изменения.

Третий этап анализа состоит в разложении изменений результатов деятельности предприятия на интенсивные и экстенсивные факторы, вызвавшие эти изменения, а также в факторном анализе приростов количественных и качественных результатов.

Матрица показателей эффективности хозяйственной деятельности состоит из парных локальных показателей эффективности. В каждой паре один показатель должен расти при повышении эффективности, а другой уменьшаться. Прямые показатели эффективности расположены под главной диагональю матрицы, а обратные, отражающие технико-экономическую сторону производства, технологию, — над главной диагональю. Матрицу показателей эффективности можно использовать и вместе с инструментарием производственной функции, которая также позволяет изучать экономическую и техническую стороны производства на основе взаимосвязи затрат, ресурсов и результатов.

Данные табл. 1 и 2 (значения показателей условные) позволяют проанализировать результаты производственно-хозяйственной деятельности (ПХД) предприятия с позиций ресурсоотдачи.

Обобщающая оценка эффективности может быть получена в процессе анализа индексной матрицы (табл. 2), представляющей блочные и интегрированные показатели эффективности и интенсивности работы предприятия. Так, значение блочной оценки преобразования затрат в результаты 0,817 свидетельствует о снижении общей результативности деятельности; значение блочной оценки взаимосвязи конечных результатов 0,948 говорит о несоблюдении правильной пропорции роста всех результатов хозяйственной деятельности. В частности, отчетные данные показали отставание темпов роста балансовой прибыли по отношению к темпам роста товарной продукции (1,8 к 1,9).

Конкретные причины именно такого поведения блоков можно выявить, проанализировав изменение локальных и интегральных факторов (поддиагональное полуполе матрицы). Например, индекс показателей, характеризующих блочную оценку преобразования затрат в результаты составил 0,817; индекс затратноотдачи по товарной продукции изменился незначительно и составил 0,921. Наиболее существенные изменения претерпел индекс фондоотдачи – его величина упала до 0,18 – вследствие проведенной переоценки основных фондов, увеличившей их стоимость более чем в 10 раз. Таким образом, по основным факторам произошло снижение ресурсоотдачи.

Таблица 1
 Матрица относительных значений для анализа и оценки ПХД (отчетный период - базисный)

| | Прибыль | Товарная продукция | Полная себестоимость | Материальные затраты | Основные фонды | Фонд оплаты труда | Численность персонала |
|-----------------------|---------|--------------------|----------------------|----------------------|----------------|-------------------|-----------------------|
| Прибыль | 1069886 | 6265880 | 5550425 | 4294420 | 5321103 | 1225950 | -31 |
| 1069886 | * | 0,304 | 0,58 | 0,216 | 2,028 | 0,309 | -0,001 |
| Товарная продукция | -0,01 | * | 0,064 | 0,002 | 0,366 | 0,052 | -0,00019 |
| 6265880 | | | | | | | |
| Полная себестоимость | -0,033 | -0,105 | * | -0,069 | 0,44 | 0,052 | -0,00028 |
| 5550425 | | | | | | | |
| Материальные затраты | -0,017 | -0,003 | 0,091 | * | 0,535 | 0,075 | -0,0055 |
| 4294420 | | | | | | | |
| Основные фонды | -2,004 | -10,293 | -7,548 | -6,982 | * | -0,78 | -0,00454 |
| 5321103 | | | | | | | |
| Фонд оплаты труда | -0,897 | -4,243 | -2,723 | -2,881 | 2,295 | * | -0,0031 |
| 1225950 | | | | | | | |
| Численность персонала | 395,627 | 2313,315 | 2045,374 | 1585,305 | 1942,85 | 449,562 | * |
| -31 | | | | | | | |

Индексная матрица для анализа и оценки ПХД (отчетный период / базисный)

| | Прибыль | Товарная продукция | Полная себестоимость | Материальные затраты | Основные фонды | Фонд оплаты труда | Численность персонала |
|-----------------------------|---------|--------------------|----------------------|----------------------|----------------|-------------------|-----------------------|
| Прибыль 1,801 | 1,801 | 1,907 | 2,07 | 1,912 | 10,617 | 3,031 | 0,988 |
| Товарная продукция 1,907 | * | 1,059 | 1,149 | 1,069 | 5,899 | 1,684 | 0,524 |
| Полная себестоимость 2,07 | 0,948 | * | 1,085 | 1,003 | 5,575 | 1,598 | 0,525 |
| Материальные затраты 1,912 | 0,872 | 0,921 | * | 0,924 | 5,112 | 1,466 | 0,472 |
| Основные фонды 10,617 | 0,94 | 0,117 | 1,083 | * | 5,573 | 1,586 | 0,52 |
| Фонд оплаты труда 3,031 | 0,169 | 0,18 | 0,195 | 0,18 | * | 0,285 | 0,092 |
| Численность персонала 0,988 | 0,594 | 0,629 | 0,683 | 0,631 | 3,505 | * | 0,33 |
| | 1,821 | 1,929 | 2,093 | 1,933 | 10,79 | 3,065 | * |

Оценка взаимосвязи конечных результатов – 0,948

Оценка преобразования затрат в результат – 0,817

Оценка взаимосвязи затрат и результатов – 2,416

Между тем, имевшее место уменьшение численности персонала на 2% и рост цен привели к повышению производительности труда, исчисленной по товарной продукции в сопоставимых ценах (значение индекса 1,929). В тоже время производительность труда в натуральном выражении снизилась почти на 10%. Следовательно, рост производительности в основном вызван влиянием внешних рыночных факторов.

Внутренние переменные организации также сыграли определенную роль в реальном снижении эффективности производственной деятельности анализируемого предприятия. В связи с недостатком финансовых средств и отсутствием ритмичности в снабжении сырьем, материалами, полуфабрикатами и комплектующими изделиями произошло недовыполнение плана производства и реализации продукции. Увеличились сверхнормативные остатки готовой продукции на складе; однако, рост цен обеспечил увеличение выручки балансовой прибыли. Несмотря на это, опережающие темпы роста затрат над темпами роста прибыли вызвали падение рентабельности и снижение прибыльности производства. В целом затроемкость прибыли увеличилась почти на 15%, рост затрат на 1 рубль товарной продукции составил 8,5%.

Комплексная оценка эффективности позволяет определить влияние каждого из многочисленных и разнонаправленных факторов, построить модель поведения и выбрать рациональный путь управления процессами и конечными результатами деятельности предприятия.

Рассмотренные таблицы в качестве фрагментов входят в базу данных интегрированной САПР/АСУ производственной системы предприятия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ракович А.Г., Свирский Д.Н. Коллективный интеллект в проектировании компактных производственных систем // Проблемы создания информационных технологий, вып. 2, т. 2. – Мн.: МАИТ, 1998. – С. 28 – 35.
2. Завацкий Ю.А., Свирский Д.Н. Модель преобразования информации при коллективном принятии решений в технической подготовке производства // Моделирование и информационные технологии проектирования, вып. 3. – Мн.: ИТК НАН Беларуси, 2000. – С. 99 – 106.
3. Свирский Д.Н. Компактная производственная система как объект автоматизированного проектирования – Мн.: ИТК НАН Беларуси, 2000. – 48 с.
4. Анташов В.А., Уварова Г.В. Экономический советник менеджера – Мн.: Финансы, учет, аудит, 1996. – 318 с.

ВЛИЯНИЕ МОРАЛЬНОГО ИЗНОСА НА ЭКОНОМИЧЕСКУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Белорусская государственная политехническая академия

Минск, Беларусь

Экономическая эффективность внедряемых средств труда является основным следствием научно-технического прогресса. Динамика развития новой техники под влиянием научно-технической революции наделяет экономическую эффективность конкретных моделей техники свойствами, зависящими от временных параметров. В связи с этим внимание ученых и специалистов все более сосредоточивается на динамическом аспекте экономической эффективности новой техники, изменении ее во времени и продолжительности периода внедрения оборудования.

Особое значение при этом приобретает исследование морального износа машин и оборудования. Являясь результатом объективного процесса развития производительных сил, моральный износ с особой остротой проявляет себя на этапе ускорения НТП и в периоды научно-технических революций. Причем среди основных фондов моральный износ в наибольшей степени свойственен средствам производства. Ускорение НТП и присущая ему быстрая сменяемость объектов техники в сферах производства и потребления усиливают тенденцию к постоянному сокращению сроков эффективного применения средств труда в реальных условиях производства.

Наиболее интенсивно моральный износ проявляется в наукоемких отраслях машиностроения – электронной промышленности, роботостроении, производстве лазерной техники и других.

Сущность морального износа заключается в том, что основные фонды работоспособны, но их эксплуатация экономически нецелесообразна. Данный вид износа характеризуется прежде всего тем, что он наступает до физического износа. Моральный износ бывает двух видов. Моральный износ первого вида означает потерю части стоимости машин без соответствующего физического износа в результате удешевления изготовления этих машин в новых условиях с использованием элементов научно-технического прогресса. Моральный износ здесь вызван уменьшением стоимости выпуска аналогичных машин той же конструкции. Моральный износ первого вида связан не с продолжительностью срока службы оборудования, не степенью его физического износа, а с темпами НТП, ведущего к снижению стоимости изготовления продукции вследствие роста производительности труда в отраслях народного хозяйства, производящих новые средства производства.

Моральный износ второго вида приводит к сокращению срока службы машин и оборудования. Это обусловлено уменьшением их производительности и мощности. В

связи с этим дальнейшая эксплуатация морально устаревших машин и оборудования по сравнению с аналогичными новыми приводит к росту издержек производства.

Моральный износ ведет к появлению особых видов стоимости основных фондов. Это так называемая полная восстановительная стоимость (разница между полной первоначальной стоимостью машин и оборудования и потерями от морального износа) и так называемая остаточная восстановительная стоимость (разница между полной восстановительной стоимостью и величиной материального износа).

Моральный износ первого вида, в процентах, определяется при переоценке основных производственных фондов сопоставлением их полной первоначальной стоимости с восстановительной по формуле:

$$MI_1 = \frac{П - В}{П} \times 100, \quad (1)$$

где MI_1 – моральный износ первого вида в процентах; $П$ – полная первоначальная стоимость основных производственных фондов, руб.; $В$ – восстановительная стоимость основных производственных фондов, руб.

Моральный износ второго вида устанавливается сопоставлением технических характеристик новых и старых основных производственных фондов по формуле:

$$MI_2 = \frac{П_n - П_c}{П_n} \times 100, \quad (2)$$

где MI_2 – моральный износ второго вида в процентах; $П_n$ и $П_c$ – соответственно производительность новой и морально устаревшей машины.

Годовые потери от морального износа первой степени в сфере применения оборудования можно определять по формуле:

$$P_1 = П \times (\rho_1 + E_n) - \frac{В}{\alpha} \times (\rho_2 + E_n) \quad (3)$$

где P_1 – годовые потери от морального износа первой степени, руб.; ρ_1 и ρ_2 – доля отчислений на реновацию соответственно для оцениваемой и выпускаемой в данный период машины; $П$ – полная первоначальная стоимость основных производственных фондов, руб.; α – отношение производительности производимого и оцениваемого оборудования; $В$ – восстановительная стоимость основных производственных фондов, руб.; E_n – реальный коэффициент экономической эффективности, который может быть принят на уровне ставки платы за кредит или банковского процента.

Моральный износ второй степени оценивать более сложно. Поэтому нередко в качестве критерия морального износа принимается возраст средств труда либо их производительность.

Первый показатель не может служить мерилom морального изделия, так как не учитывает его технико-экономического уровня. Причем такой подход нельзя приме-

нять для оценки морального износа отдельных машин в масштабе страны. Область его применения – оценка отдельных изделий на конкретных предприятиях.

Что касается принятия производительности в качестве критерия морального износа, то этот показатель отражает технико-экономический уровень машин лишь с точки зрения их пригодности экономить живой труд. При этом не учитываются трудоемкость и материалоемкость производства машин, а также энергетические и материальные затраты в сфере их эксплуатации. Следует отметить, что адекватная оценка морального износа необходима для своевременной замены оборудования, разработки и освоения новых моделей машин, обеспечения необходимых темпов научно-технического прогресса. Этот перечень вопросов развития предприятий и отраслей имеет стратегическое значение.

Более обоснованной следует считать оценку морального износа по соотношению затрат на производство продукции, обеспечиваемых оцениваемой и заменяемой техникой. Моральный износ второй степени наступает, когда удельные приведенные затраты для новой машины ниже, чем для старой. Однако в этих случаях остается неясной степень распространения новой техники; либо внедряются первые экземпляры новой техники, либо она уже определяет общественно необходимые затраты на производство продукции. В связи с этим ряд авторов для сопоставления принимают среднеотраслевой уровень затрат. Так, предлагается измерять моральный износ второго рода на основе сопоставления себестоимости единицы продукции, обеспечиваемой оцениваемым оборудованием, и существующей в среднеотраслевом разрезе. Либо предлагается сопоставлять индивидуальные затраты со среднеотраслевыми, но вместо себестоимости единицы брать приведенные удельные затраты. Последнее более правильно, так как себестоимость продукции в отличие от приведенных затрат не отражает полностью общественные затраты труда.

Многие исследователи утверждают, что моральный износ существующих средств труда имеется лишь в том случае, когда технический прогресс обеспечивает эффективность вложений в данную технику. С учетом изложенного предлагается в общем случае оценивать степень морального износа в экономическом аспекте по формуле:

$$MI_2 = \left(\frac{Z_n}{Z_6} - 1 \right) \times 100 \quad (4)$$

где Z_n и Z_6 – средние приведенные затраты на единицу продукции (или на сопоставимый объем) за нормативный срок службы соответственно для оцениваемой техники и взятые за базу для сравнения, руб.

Расширение практики сравнительной экономической оценки с техникой мирового уровня целесообразно степень морального износа второго рода выражать как функцию от времени с учетом темпов развития данной техники E :

$$MI_2 = \left(\frac{Z_n}{Z_6} \times (1 + E)^t - 1 \right) \times 100 \quad (5)$$

Потери от морального износа второго рода в экономическом аспекте возникают из-за повышенных затрат общественного труда на производство единицы продукции или сопоставимого объема работ морально устаревшей машиной по сравнению с более прогрессивной. Исходя из этого, годовые потери от использования морально устаревшей техники определяется по формуле:

$$P_2 = (C_1 + E_n \times K_1) - \frac{1}{\alpha} \times (C_2 + E_n \times K_2) \quad (6)$$

где P_2 – годовые потери от морального износа второй степени, руб.; C_1 и C_2 – годовые текущие эксплуатационные затраты соответственно по морально устаревшей и новой технике, руб.; K_1 и K_2 – годовые текущие затраты по капитальным вложениям при эксплуатации в расчете на одну машину соответственно по морально устаревшей и новой технике, руб.; E_n – реальный коэффициент экономической эффективности, который может быть принят на уровне ставки платы за кредит или банковского процента.

Выделив из текущих эксплуатационных затрат амортизационные отчисления на реновацию, а из капитальных затрат – стоимость машин, проведя несколько преобразований вышеприведенной формулы (6), получим:

$$P_2 = (I_1 + E_n \times K_1) - \frac{1}{\alpha} \times (I_2 + E_n \times K_2) + \Pi_1 \times (E_n + \rho_1) - \frac{1}{\alpha} \times \Pi_2 \times (E_n + \rho_2) \quad (7)$$

где I_1 и I_2 – годовые текущие эксплуатационные затраты без учета отчислений на реновацию по устаревшей и новой технике соответственно; K_1 и K_2 – капитальные сопутствующие вложения в расчете на одно изделие по устаревшей и новой технике соответственно; Π_1 и Π_2 – оптовая цена соответственно устаревшей и новой машины.

В формуле (7) последняя разность представляет собой годовые потери от морального износа первого рода по устаревшей машине, т.е. они являются частью потерь морального износа второго рода, тогда формула (7) примет вид:

$$P_2 = (I_1 + E_n \times K_1) - \frac{1}{\alpha} \times (I_2 + E_n \times K_2) + P_2 \quad (8)$$

ЛИТЕРАТУРА

1. С.А. Соколицын, Б.И. Кузин. Организация и оперативное управление машиностроительным производством – С-Пет.: Машиностроение, 1988. – 523с. 2. Яковлев А.И., Тимофеев В.Н., Педос В.А. Создание новых технических систем: эффективность, планирование, оптимизация в условиях рыночных отношений – Киев: Машиностроение, 1995. – 387с.

ВОПРОСЫ ОЦЕНКИ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ И ЦЕНООБРАЗОВАНИЯ НА ПРОЕКТИРУЕМУЮ ТРАКТОРНУЮ ТЕХНИКУ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

В современных условиях формирования рыночных отношений особое значение приобретают проблемы повышения конкурентоспособности промышленной продукции, доля которой в экономике Республики Беларусь занимает значительный удельный вес.

Потребность в постоянном совершенствовании качества выпускаемой продукции, расширении модельного ряда, учете особенностей сбытовых регионов и усиливающаяся конкуренция требуют проведения продуманной и взвешенной маркетинговой политики, направленной на обеспечение устойчивого развития предприятия, увеличение объемов производства и диверсификацию рынков, в связи с чем актуальными становятся вопросы ценообразования на новую, технически сложную продукцию, которой является тракторная техника.

Конкурентоспособный товар должен превосходить по потребительским свойствам модели-аналоги при цене, удовлетворяющей потребителя. Однако фирмы-производители обычно ориентируются на стратегию снижения цен или повышения качества продукции. Наиболее рациональной можно считать стратегию повышения конкурентоспособности изделия при цене соответствующей потребительской стоимости технико-экономических показателей товара. Конкурентоспособность товара тем выше, чем больше полезный эффект и ниже затраты, которые несет потребитель в процессе приобретения и эксплуатации объекта.

Осваивая производство новой продукции, прежде всего необходимо установить ее ценность для потребителя (потенциальную конкурентоспособность), и только после этого выбрать методику, на основе которой будет формироваться цена проектируемой модели.

Базовым параметром, определяющим полезность трактора, является его мощность. По мощности тракторы группируются в семь классов. Все остальные параметры дополняют полезность трактора. Дополнительными источниками полезного эффекта является комплекс возможных технических решений, интегрирующих достижения мировых производителей по удовлетворению требований клиентов.

При изучении характеристик проектируемой модели необходимо учитывать условия работы, для которой она предназначена. Большую ценность имеет трактор,

обеспечивающий колею 1200, 1350, 1400, 1800 мм, что обеспечивает допустимые защитные зоны для растений и лучшие урожаи. Ценность трактора повышает агротехнический просвет 800 мм, обеспечивающий возможность промежуточной обработки картофеля, свеклы, кукурузы по современным технологиям. Давление трактора на грунт не более 1.1 кг/см^2 не снижает урожай и не разрушает структуру почвы.

При проектировании нового изделия, на первом этапе выбирается лучшая система его технико-экономических параметров из возможных вариантов. На втором этапе проектирования параметров система оптимизируется с улучшением качества без нарастания стоимости.

При оценке потенциальной конкурентоспособности изделия на первом этапе, могут использоваться методы, учитывающие весомость изучаемых показателей, экспертные методы, сопоставление базового и оцениваемого образцов и т.д. Однако на стадии разработки товара необходимо равноценное рассмотрение различных технико-эксплуатационных характеристик изучаемого объекта. Это обусловлено целостностью восприятия потребителем предлагаемого товара, на основе сравнения с идеальным в его представлении, продуктом исходя из осведомленности о наилучших показателях предлагаемых на рынке аналогов. В данном случае ряд авторов предлагают использовать методы профилей или радаров.

На рис. 1 изображен профиль конкурентоспособности проектируемого трактора МТЗ-2522. При его построении величина каждой характеристики была представлена в интервале от 0 до 1, исходя из ширины диапазона ее изменения в ряду модель-аналогов. Единица присваивается характеристике в том случае, если она соответствует наилучшему значению, 0 -наихудшему. Чем больше площадь построенного профиля, тем более конкурентоспособным является изучаемое изделие. Кроме того, данный метод позволяет наглядно выявить имеющиеся резервы повышения конкурентоспособности.

Представленный в сравнении с аналогом, профиль конкурентоспособности МТЗ-2522 показывает, что эта модель обладает достаточно высокими характеристиками и уровнем конкурентоспособности.

Для установления и обоснования цен на проектируемую тракторную технику, необходимо учитывать, что минимальное значение цены должно покрывать затраты на изготовления продукции и обеспечивать получение определенной доли прибыли, а максимальная цена обеспечивает производителю получение сверхприбыли, но при условии ее правильного определения, исходя из качества товара. В классическом понимании цена определяется редкостью и полезностью объекта. Для средств труда, выпускаемых крупными сериями, цена определяется только его полезностью. Поэтому, для определения верхнего предела цены предлагается использовать статистические методы корреляционно-регрессионного анализа, использование которых обеспечивает:

- возможность предварительного прогноза цены проектируемой модели с высоким уровнем достоверности;
- выявление существующих взаимосвязей между параметрами и потребительскими свойствами тракторной техники с одной стороны и ее ценой с другой, установление между ними функциональной (количественной) зависимости;
- создание открытой, адаптируемой экономико-математической модели, позволяющей беспрепятственно вводить в нее дополнительную информацию с целью модифицирования и актуализации функциональной зависимости "цена - характеристики трактора" таким образом, чтобы последняя учитывала все аспекты, способные повлиять на рыночную стоимость тракторной техники.

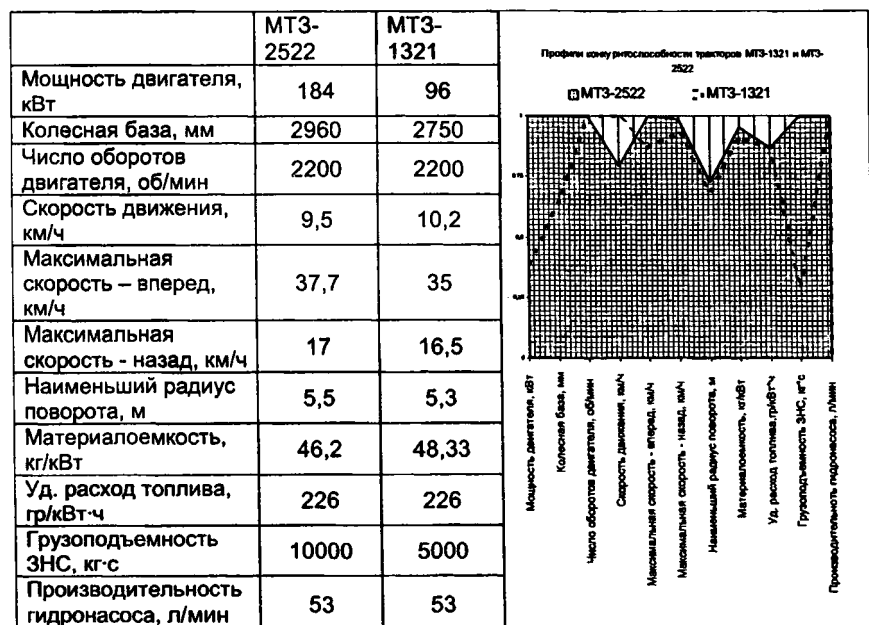


Рис.1. Профиль конкурентоспособности тракторов MT3-2522 и MT3-1321

При образовании многофакторных корреляционных зависимостей большое значение имеет отбор конструктивно-эксплуатационных характеристик, которые оказывают наибольшее влияние на себестоимость, и как следствие - цену, а также выбор аналитических зависимостей.

С целью определения вида существующей связи между ценами на выпускаемую тракторную технику и ее технико-эксплуатационными свойствами, проведен графичес-

кий анализ парного совместного распределения факторных и результативного признаков. Для этой цели построены соответствующие корреляционные плоскости, проведена аппроксимация исходных данных и оценена адекватность соответствия различных типов связей распределению данных исследуемой совокупности с помощью коэффициента множественной детерминации. Примеры корреляционных плоскостей для важнейших пар признаков приведены на рис. 2.

На основании результатов графического анализа, а также положения линий тенденции, можно утверждать о существовании зависимости конкретного вида между ценой тракторов анализируемого модельного ряда и их технико-эксплуатационными характеристиками, что подтверждается данными табл. 1. Значения R^2 указывают на тесную связь между номинальной мощностью двигателя, материалоемкостью, колесной базой и ценой на тракторную технику.

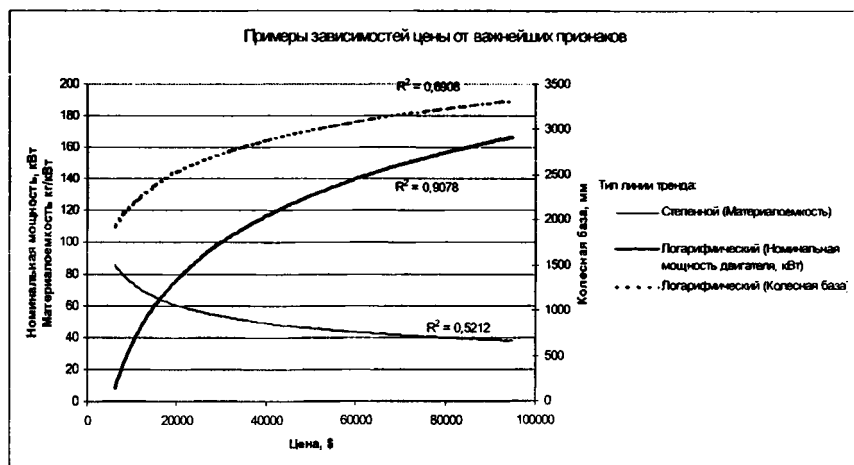


Рис. 2. Примеры зависимостей цены от важнейших признаков трактора

Таблица 1

Значения величин достоверности аппроксимации
(коэффициентов множественной детерминации R^2)

| Признак | Тип линии тренда | | |
|----------------------|------------------|-----------------|-----------|
| | линейный | логарифмический | степенной |
| Колесная база | 0,3548 | 0,6908 | 0,6207 |
| Номинальная мощность | 0,8229 | 0,9078 | 0,7914 |
| Материалоемкость | 0,7116 | 0,4724 | 0,5212 |

Для дальнейших расчетов эта зависимость, с некоторым допущением, была принята линейной, что в таких случаях допускается условиями к точности расчетов и не требует трудоемких вычислений.

Определение подсистемы информативных признаков-параметров тракторной техники, выполнялось на основе матрицы парных коэффициентов корреляции, которые позволяют исключить функционально-связанные признаки, искажающие достоверность результатов. В результате анализа данной матрицы была выделена система информативных параметров, состоящая из технико-эксплуатационных характеристик представленных в табл. 2.

Таблица 2

Система информативных технико-эксплуатационных характеристик

| №п/п | Название характеристики | Номер переменной в уравнении регрессии | Единицы измерения |
|------|--------------------------------------|--|-------------------|
| 1. | Номинальная мощность двигателя | X_1 | кВт |
| 2. | Материалоемкость | X_2 | кг/Квт |
| 3. | Колесная база | X_3 | мм |
| 4. | Коэффициент запаса крутящего момента | X_4 | % |
| 5. | Удельный расход топлива | X_5 | г/кВтч |
| 6. | Наименьший радиус поворота | X_6 | м |
| 7. | Число оборотов двигателя | X_7 | об/мин |
| 8. | Производительность гидронасоса | X_8 | л/мин |
| 9. | Габаритная высота | X_9 | мм |

Анализ полученных результатов показывает, что вероятность обращения в ноль коэффициентов при x_3 , x_4 , x_5 и x_7 выше 5%, допустимых статистической методикой проверки надежности вычисленных параметров регрессии. Это значит, что данные параметры не являются надежными и должны быть исключены из уравнения регрессии. После корректировки оно выглядит следующим образом:

$$P = a_0 + a_1 N_e + a_2 m + a_3 R + a_4 Qr + a_5 Nb$$

где N_e – номинальная мощность двигателя трактора; m – материалоемкость, R – наименьший радиус поворота трактора; Qr – производительность гидронасоса ЗНС; Nb – габаритная высота трактора.

Коэффициенты при переменных в данном уравнении определяются исходя из информации о тракторах аналогах, в качестве которых принимается техника того же мощностного класса, что и проектируемая модель. Выбор машин также зависит от региональных рынков, среди которых выделяют: рынок развитых стран, рынок пост-социалистических и развивающихся стран.

На основании данного уравнения был осуществлен прогноз цены для модели трактора МТЗ-2522, находящегося на стадии проектирования. Определенная на основе исходных статистических данных она должна составить порядка 88 378 долл. США.

Установленное значение цены находится в диапазоне от 82824 долл. США до 93935 долл. США, что определяется рассчитанным доверительным интервалом.

Разработанная методика может быть использована для прогноза цен на разные виды промышленной продукции, а также в других отраслях народного хозяйства Республики Беларусь.

УДК 338.45:621

Т.В. Романькова

УПРАВЛЕНИЕ РЕСУРСОПОТРЕБЛЕНИЕМ В МАШИНОСТРОЕНИИ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Республика Беларусь имеет самую сильную отрасль – машиностроения. Она является ведущей отраслью промышленности. Ее доля в общем объеме промышленного производства к началу 90-х годов достигала почти 36% и теперь, несмотря на произошедший резкий спад производства, она составляет почти 26% (по итогам за 1998).

Отраслевая структура весьма многообразна. В нее входят: энергетическое, горнорудное и горношахтное машиностроение, электротехническая промышленность, химическое и нефтехимическое машиностроение, станкостроительная и инструментальная промышленность, промышленность межотраслевых производств, приборостроение (включая специализированные заводы авиационной, судостроительной и радиопромышленности), автомобильная и подшипниковая промышленность, другие отрасли машиностроения, тракторное и сельскохозяйственное, строительное-дорожное и коммунальное машиностроение, машиностроение для легкой и пищевой промышленности и бытовых приборов.

В настоящее время предприятия машиностроения находятся в тяжелом финансовом положении из-за снижения объемов производства продукции, серьезных трудностей с ее сбытом и проблемой энергосбережения.

Эта отрасль относится к одной из энергоемких отраслей Республики Беларусь, так как в структуре затрат на производство продукции машиностроения энергия и топливо, входящие в состав материальных затрат с каждым годом увеличивается. С 1990 года по 1999 почти в 5 раз возросли в составе себестоимости продукции эти затраты. Анализ структуры энергопотребления и энергосбережения по отраслям народного хозяйства представлен на рис. 1. На столбиках гистограммы расположены отрасли: первая – энергетика, вторая – химия и нефтехимия, затем машиностроение и металлообработка, далее топливная, стройматериалов, пищевая, прочие отрасли про-

мышленности, коммунально-бытовой сектор и прочие потребители соответственно. Высота светлых столбиков – суммарное потребление энергоресурсов.

Бесприорышное направление на этом пути – энергосбережение всех видов энергии и топлива на основе высокоэффективных технологий и промышленных комплексов в связи с тем, что Беларусь испытывает огромный дефицит энергоресурсов. По насыщенности энергоресурсами она является одной из самых бедных стран в мире. 85% энергоресурсов мы экспортируем в основном из России. На энергоресурсы тратится около 3,0 млрд. \$ США в год. И объясняется это тем, что топливно-энергетический комплекс (ТЭК) РБ формировался в составе бывшего СССР при наличии “дешевых” энергоресурсов, что не способствовало проведению жесткой политики энергосбережения и не стимулировало интенсивное внедрение энерго сберегающих технологий и оборудования. В результате энергоёмкость валового внутреннего продукта (ВВП) и национального дохода республики в настоящий момент более, чем в два раза превышает аналогичные показатели государств Европейского Сообщества. Между тем, вся структура производства Республики Беларусь чрезвычайно расточительна. Мы не в состоянии в ближайшие 25-30 лет за счет собственных источников энергоресурсов покрыть потребности нашей экономики. Предпосылок к этому нет. Что касается реалий альтернативных источников энергии в Белоруссии, то их по разным оценкам в балансе энергоресурсов всего 15-20%. Потенциал энергосбережения в анализируемых отраслях – темная часть столбиков (рис. 1).

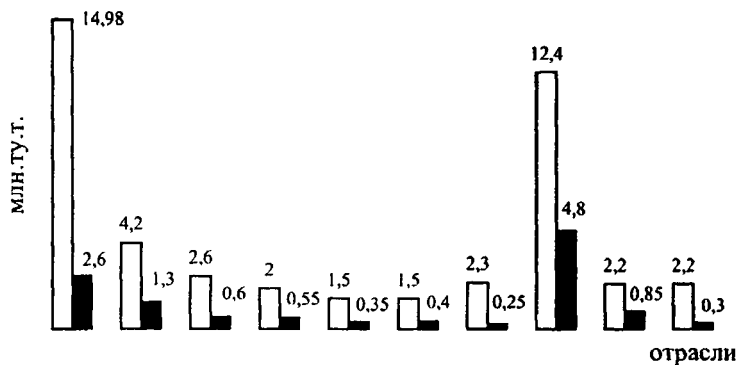


Рис. 1. Потенциал энергосбережения в наиболее энергоёмких отраслях

С целью экономного использования энергоресурсов на предприятиях ведется управление энергоиспользованием (политика энергосбережения). Энергосбережение – это процесс сокращения потребности в энергоресурсах и энергоносителях в расчете на единицу конечного полезного эффекта их применения.

Энергосбережение, складывается из следующих основных составляющих:

- 1) организационно-управленческой;
- 2) политической;

- 3) профессиональной;
- 4) нормативно-законодательной;
- 5) перевооруженческой;
- 6) технологической;
- 7) экологической;
- 8) нравственной;
- 9) образовательной;
- 10) эвристической.

Приведенная дифференциация не является абсолютно бесспорной. Ее главный смысл - объяснить природу этой важной проблемы и выявить пути ее решения.

На сегодня первая составляющая это самый скорый, простой и дешевый способ экономии некоторой части энергоресурсов на основе принятия правильных организационно-управленческих решений.

Политическая составляющая предполагает заключение высшим руководством страны таких договоров и соглашений с другими государствами, которые бы создавали энергетическую выгоду именно для нас.

Хорошая профессиональная подготовка руководящих работников является неотъемлемой частью принятия продуманных решений. Это многоплановая составляющая и она предполагает хорошее знание и умение выбирать оптимальные варианты энергосбережения и их реализовывать.

Нормативно-законодательная составляющая - это определенные правила игры под названием «Энергосбережение». Их много, но они у нас пока в полной мере не работают, а если честно сказать, только начинают входить в жизнь. В целом это очень трудная и ответственная работа.

Под понятием перевооруженческое энергосбережение будем понимать все то, что связано с получением топлива и энергии, их хранением, перевозкой, трансформацией и передачей, работой всех существующих видов машин, оборудования, транспорта, коммуникаций, связи, систем управления и контроля.

Технологическое перевооружение всех сфер деятельности человека невозможно без учета энергетических факторов. Для нас это тем более важно, т.к. должны совершать переход на новый технологический уклад, а это невозможно без системного анализа современного научно-технического прогресса.

Анализ пятого и шестого пунктов энергосбережения позволяет разделить его на две составляющие - прямое и косвенное энергосбережение. В первом случае эффект получается у производителя, например, экономится энергия при производстве эффективного стенового материала, во втором - уже созданный материал экономит тепло при эксплуатации построенного здания.

Экологическая компонента энергосбережения неуклонно возрастает и приобретает значимость прямого достижения искомой цели. Это обусловлено проведением

широкомасштабных мероприятий охранного характера, переработкой и утилизацией отходов, защитой литосферы, охраной здоровья человека и потребует огромных средств в обслуживании производственной сферы и быта человека.

Восьмая и девятая составляющие должны быть понятны без пояснений. Их прямая роль в энергосбережении учету не поддается, но они формируют культуру ее восприятия и претворения в жизнь.

Различают контуры внешнего и внутреннего управления энергоиспользованием предприятия. Основными задачами внутреннего управления энергоиспользованием являются:

- принятие энергосберегающих решений и их реализация на стадиях проектирования;
- организационная согласованность финансовой, технологической и энергетической политики и дисциплины на предприятии;
- экономическое стимулирование и мотивация всех подразделений, служб, персонала предприятия на энергосбережение;
- учет и контроль потоков всех энергоресурсов и энергоносителей и т.д.

Внешнее управление энергоиспользованием предприятий осуществляется посредством правовых, экономических, финансовых, административных механизмов, определенных государственной политикой энергосбережения и осуществляемых через государственные органы энергосбережения.

Внедрение энергоэффективных технологий, энергосберегающего оборудования позволит резко поднять качество выпускаемой продукции, снизит энергетическую составляющую в ее себестоимости, будет способствовать конкурентоспособности белорусской продукции на мировом рынке. По сути, энергосбережение – одно из кардинальных условий становления Беларуси как независимого индустриального и аграрного развития государства.

УДК 658.588.8

В.М. Садков, Ж.М. Банзекуливахо

О НАПРАВЛЕНИЯХ РАЗВИТИЯ РЕМОНТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

*Полоцкий государственный университет
Новополоцк, Беларусь*

Реформирование народного хозяйства Республики, которое наиболее активно проявилось за последнее десятилетие, привело к обострению отрицательных явлений в промышленности. Разрыв экономических связей, гиперинфляция, коренные изменения в налоговом и правовом законодательстве сломали развитую систему производства материальных благ, которая складывалась на территории бывшего Советско-

го Союза десятилетиями. Получив при этом некоторую свободу, каждое предприятие было вынуждено самостоятельно находить выход из кризисной ситуации. Переход к рыночным отношениям потребовал мобилизации финансов для пополнения оборотных средств, поскольку предприятия в первую очередь старались остановить падение объемов производства в условиях инфляции и взаимных неплатежей. Очень часто дефицит оборотных средств ликвидировался за счет снижения капитальных вложений, что в конечном итоге привело к оттоку денежных средств из сферы инвестиций.

В следствии существенного спада объемов капитальных вложений, которые за период 1990-1997 гг. сократились в 1,7 раза, износ основных фондов нарастал и сопровождался понижением их качественного уровня. Согласно данным [1], износ активной части фондов машиностроения и металлообработки к 1998 году достиг 77%, до 50% машин и оборудования эксплуатируются с двух-, трёхкратным превышением нормативного срока службы, что свидетельствует об острой необходимости модернизации и технического перевооружения парка машин.

В целом по промышленности износ основных фондов возрос с 33,3% в 1990 г. до 58,8% в 1998 г. Самый значительный уровень износа основных фондов отмечен в химической и нефтехимической отрасли, в машиностроении и металлообработке. Если рассматривать отрасль машиностроения в частности, то здесь наиболее благоприятная ситуация с основными фондами сложилась в легкой промышленности и промышленности бытовых приборов, наименее благоприятно – в станкостроительной и инструментальной.

Поскольку пассивная часть основных фондов, составляющая не более 40% от их общего объема, непосредственно не воздействует на предметы труда, интерес представляет и износ активной части основных фондов, которые участвуют в процессе производства и определяют технические возможности выпуска продукции и её качественный уровень (табл. 1).

Таблица 1

Коэффициент износа активной части основных фондов, %

| Отрасль | 1993 | 1994 | 1995 | 1996 | 1997 | 1998 |
|---|------|------|------|------|------|------|
| Промышленность | 60 | 64 | 68 | 72 | 75 | 69 |
| Электроэнергетика | 57 | 55 | 55 | 60 | 63 | 60 |
| Топливная | 51 | 56 | 61 | 64 | 71 | 56 |
| Химическая, нефтехимическая | 69 | 79 | 80 | 83 | 85 | 76 |
| Машиностроение, металлообработка | 58 | 64 | 70 | 76 | 79 | 77 |
| Лесная, деревообрабатывающая | 51 | 59 | 56 | 64 | 69 | 55 |
| Легкая | 50 | 61 | 66 | 74 | 74 | 61 |

Наиболее быстрыми темпами увеличивался износ активной части основных фондов в машиностроении и металлообработке. В машиностроении велик износ в станко-

строительной промышленности, в тракторо- и сельхозмашиностроении – наиболее фондоемких подотраслях, поэтому нехватка инвестиционных средств для обновления отразилась для них в большей степени.

В особом положении оказались предприятия, производственная деятельность которых связана с ремонтом и восстановлением машин. Казалось бы, обслуживание огромного парка изношенной техники, который имеет сейчас любое крупное предприятие, должно обеспечить полную загрузку производственных мощностей ремонтных заводов. Однако на практике наблюдается обратная ситуация. Если до начала 90-х годов в промышленности наблюдалось расширение масштабов капитального ремонта (основной услуги ремонтных заводов), то, благодаря повышению с 1991 г. норм амортизационных отчислений и ориентации их только на восстановление (строительство и приобретение), объёмы ремонтов снизились 20-30% и эта тенденция продолжает сохраняться.

К тому же положение усугубляет тяжёлое состояние самих ремонтных предприятий. Поскольку совершенствование ремонтного производства не является приоритетным направлением развития народного хозяйства республики, ремонтники вынуждены полагаться, прежде всего, на собственные силы и средства.

Поскольку большинство ремонтных заводов были созданы в советское время, все они столкнулись с проблемой перехода к новым методам хозяйствования. Заложённая изначально узкая специализация (в организации производственного процесса можно часто наблюдать элементы массового производства) не позволила этим предприятиям оперативно адаптироваться к изменившимся условиям. Многие ремонтные заводы сохранили старую производственную систему, ориентированную на узкую номенклатуру ремонтируемых машин. Недостаточная загрузка производственных фондов, которая при этом имеет место, и высокая степень их износа приводит к снижению фондоотдачи, высокой материало- и энергоёмкости процесса производства, что в конечном итоге увеличивает себестоимость восстановления единицы продукции.

Оценивая конкурентоспособность ремонта по отношению к покупке новой машины, необходимо сравнивать стоимость восстановления машины с учетом стоимости её дальнейшей эксплуатации. В большинстве случаев вариант восстановления оказывается менее выгодным, хотя единовременные вложения при ремонте несколько ниже. Последнее ещё может привлечь убыточные и малоприбыльные предприятия, однако ориентация ремонтников на этот сегмент рынка неизбежно приведет к проблемам неплатежеспособности клиентов и невозврата долгов.

Таким образом, каждому ремонтному предприятию необходимо иметь программу по выходу из кризисной ситуации, которая позволила бы им найти и занять свою рыночную нишу, обеспечить максимальную загрузку оборудования и прибыль. Для этого производство необходимо ориентировать на те виды продукции, ремонт которых способен обеспечить заданный уровень рентабельности, при условии платёжеспособности клиента.

Поскольку особенностью ремонтного производства является предоставление в качестве товара услуги, эффективным может стать поиск и использование маркетинговых решений, как, например, гарантийное и сервисное обслуживание. Установление прямых связей и взаимное сотрудничество при этом с отечественными и иностранными производителями, которые поставляют технику предприятиям региона, будет способствовать сокращению сроков, уменьшению стоимости и повышению качества ремонта. Значительную прибыль может принести организация собственного производства запасных частей и комплектующих с последующей реализацией.

Поиск новых видов продукции неизбежно связан с расширением производственной программы, оперативного изменения величины партии ремонтируемых объектов в зависимости от складывающейся на рынке ситуации, что в свою очередь требует определённого уровня гибкости как на этапах технической подготовки производства, так и в самом процессе ремонта.

Достичь необходимого уровня гибкости позволяют методы групповой обработки, проектирование типовых технологических процессов широкое использование элементов гибких перенастраиваемых линий (ГПЛ) и гибких перенастраиваемых участков (ГПУ). Для этого необходимо прежде всего классифицировать технологические воздействия на предмет труда, которые присутствуют при восстановлении изделия.

Гистограмма распределения трудоемкости технологических воздействий при ремонте двигателей Горьковского и Ульяновского автомобильных заводов на Полоцком АРЗ по видам воздействий приведена на рис. 1 [2]. Вариационный ряд трудоемкостей имеет вид: ремонт деталей - 55,1 %; сборка - 20,7; приработка - 6,6; разборка - 6,0; очистка - 4,7; комплектование - 2,9; дефектация - 1,6; перемещение - 1,6; окраска - 0,8 % . На участки разборки, очистки, ремонта деталей и сборки, определяющих специфику и технический уровень РП, приходится 86,5 % трудоемкости.



Рис. 1. Гистограмма распределения трудоемкостей технологических воздействий, %

В свою очередь можно выделить три этапа ремонта деталей:

- мехобработка, связанная с подготовкой поверхностей;
- операции, связанные с нанесением изношенного слоя (наплавка, напыление, сварка и т.д.);
- мехобработка, направленная на получение заданного качества обрабатываемых поверхностей.

Необходимо так же выделить основные группы деталей, обработку которых будет возможно проводить по одному технологическому маршруту с минимальной переналадкой оборудования. Так, например, при ремонте двигателей все детали распределены на 13 групп: блоки цилиндров, шпильки, головки цилиндров, шатуны, поршневые пальцы, коленчатые валы, маховики, распределительные валы, клапана, коромысла, впускные трубы, масляные картеры, другие детали.

Таким образом, при проектировании технологического процесса восстановления изделия необходимо ориентироваться на обработку группы деталей по одному технологическому маршруту. Выбор оборудования и приспособлений должны производиться с учетом возможности реализации такого технологического процесса, который позволял бы оперативно переключить производство на новые виды продукции.

Отсюда следует, что ремонтным предприятиям необходимо отказаться от простого наращивания объемов ремонта освоенных видов продукции. Перспективным может быть только путь, связанный с расширением производственной программы, предложением новых видов сервисного обслуживания, повышением гибкости производственных процессов и адаптивности управления к динамически изменяющейся ситуации на рынке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Таганов Н.Ю., Пинчук А.А. Проблемы амортизации основных фондов промышленности // Белорусская экономика: анализ, прогноз, регулирование. – 2000. – №3. – С.40-44.
2. Иванов В.П., Коробко В.И., Семёнов В.М. Технологическое оснащение ремонтного производства – Мн.: Университетское, 1994. - 140с.

УДК 621.002.003.13

Н.С.Сачко

О ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОМ АНАЛИЗЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

(Направленне анализа. Показатели функционирования, их взаимосвязь и взаимодействие)

Цель анализа – выявить факторы, оказывающие влияние на эффективность производства, установить их взаимосвязь, выявить резервы улучшения показателей деятельности предприятия и наметить основные пути их использования в ходе текущей производственной деятельности.

Сложность анализа работы машиностроительного предприятия состоит в сложности и многообразии выпускаемых видов продукции, частой сменой ее выпуска, применением разнообразных видов материалов, изменением показателей и параметров производства во времени.

В силу сложности процесса производства на предприятии и множества факторов, оказывающих влияние на результаты его деятельности, измерить эффективность функционирования одним показателем не представляется возможным. Поэтому для качественного и глубокого анализа необходима совокупность взаимосвязанных показателей, т.е. система их, которая характеризовала бы деятельность предприятия и его подразделений с разных сторон. При помощи такой системы показателей можно было бы выявить динамику и в то же время сделать оценку работы предприятия за различные периоды времени. Причем показатели должны легко интегрироваться между собою на разных уровнях оценки [1].

В условиях рыночной экономики итоговым, результирующим показателем функционирования предприятия, в котором фокусируются все стороны его деятельности, является отношение размера прибыли (P) к капиталовложениям (инвестициям) или в общей сумме основных и оборотных средств (K), т.е.

$$\frac{P}{K}, \% \quad (1)$$

Вместе с тем величина этого показателя зависит от рентабельности единицы продукции, т.е. соотношения прибыли к объему выпуска продукции (V) и величины фондотдачи, т.е. отношения объема выпуска к инвестициям, т.е.

$$\frac{P}{K} = \frac{P}{V} \cdot \frac{V}{K} \quad (2)$$

В свою очередь рентабельность продукции определяется разницей между объемом реализации продукции (R) к объему выпуска и ее себестоимостью (S) отнесенной тому же объему выпуска и таким образом

$$\frac{P}{V} = \frac{R}{V} - \frac{S}{V} \quad (3)$$

Второй сомножитель формулы (2) зависит по крайней мере от трех показателей: уровня использования производственной мощности; капвложений на единицу мощности и удельного веса затрат на основные фонды в общей сумме капвложений, т.е.

$$\frac{V}{K} = \frac{V}{W} \cdot \frac{W}{K_{oc}} \cdot \frac{K_{oc}}{K} \quad (4)$$

где W – производственная мощность предприятия или его подразделения; K_{oc} – капиталовложения (инвестиции) в основные фонды.

Таким образом формулу (2) можно записать:

$$\frac{P}{K} = \left(\frac{R}{V} - \frac{S}{V} \right) \cdot \frac{V}{W} \cdot \frac{W}{K_{oc}} \cdot \frac{K_{oc}}{K} \quad (5)$$

Из формулы (5) видно, что показатель рентабельности к фондам (P/K) как центральный (результатирующий) показатель деятельности предприятия связан с пяти другими: ценой на продукцию (R/V), ее себестоимостью или удельными затратами (S/V), уровнем использования производственной мощности (V/W), эффективностью вложения в основные фонды (W/K_{oc}) и долей вложения в основные фонды в общей сумме инвестиций (K_{oc}/K). Чем лучше (выше) эти показатели, тем выше эффективность производства. Взаимосвязь показателей схематически показана на рис. 1, из которого видны и направления анализа деятельности предприятия.

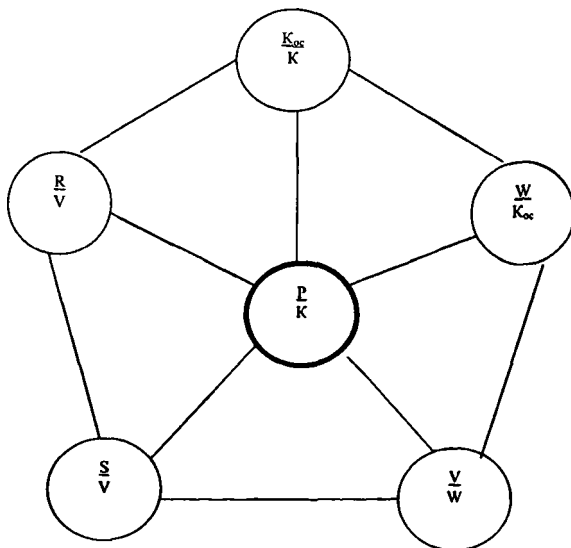


Рис. 1. Схема взаимосвязи показателей эффективности функционирования предприятия

Из пяти показателей, связанных с (P/K), три непосредственно определяются результатами текущей деятельности предприятия (R/V , S/V и V/W), т.е. объемом выпуска продукции и затратами на ее производство. Два других показателя (W/K_{oc} и K_{oc}/K) зависят от результатов долгосрочной деятельности предприятия (расширения дей-

ствующих или создания новых мощностей, изменения общей суммы капложений, в том числе и в основные фонды) на осуществление которых как правило требуется несколько лет.

Если принять во внимание, что на цену продукции, т.е. на соотношений (R/V) влияние предприятия имеет свой предел (в стабильной экономике цены как правило либо вообще не растут, либо возрастают в небольшой мере (то основным показателем, определяющим величину (P/K) в текущей деятельности предприятия является удельная величина затрат, т.е. себестоимость единицы продукции.

Но себестоимость складывается из трех основных элементов затрат: на предметы труда, на труд и на средства труда. Первое характеризует величину затрат на материалы (M), второе на заработную плату (З) и третьи затраты на амортизацию (А). При этом дело несколько не меняется, если к каждому элементу затрат добавляются другие расходы (налог или начисления на зарплату, на недвижимость, дополнительные расходы, связанные с обеспечением материалами, включая пошлину, и т.д).

Следовательно себестоимость продукции можно выразить формулой

$$\frac{S}{V} = \frac{M}{V} + \frac{З}{V} + \frac{A}{V} \quad (6)$$

Формула (6) характеризует структуру себестоимости продукции.

Степень влияния каждого из элементов затрат на себестоимость продукции зависит от его доли в ней. Чем выше доля того или иного элемента, тем больше это влияние. Так, например, при доле затрат на зарплату 20%, характерной для машиностроения, уменьшение затрат на нее на 5% обеспечит снижение общих затрат лишь на один процент, тогда как при доле затрат на материалы 60% снижение расходов на те же 5% обеспечивает снижение себестоимости уже на 3%.

Поэтому при анализе деятельности предприятия необходимо не только определить структуру себестоимости, но и степень влияния каждого из взаимосвязанных элементов затрат на ее величину, поскольку изменение одного элемента может повлечь за собою изменение другого в противоположном направлении. Так, сокращение затрат труда может быть достигнуто путем повышения уровня его механизации и автоматизации за счет дополнительных инвестиций и затрат материалов, степень влияния которых на уровень себестоимости намного выше затрат труда. Кроме того снижение доли затрат на труд может быть достигнуто и без роста его производительности, за счет повышения в себестоимости доли кооперированных поставок или комплектующих изделий. Все это требует более глубокого анализа структуры себестоимости продукции.

При этом связь между исходной себестоимостью, ее структурой S/V_1 и себестоимостью в любой другой период S_n/V_n определится формулой

$$\frac{S_n}{V_n} = \frac{S_1}{V_1} \left[\left(\frac{M_1}{S_1} \cdot \frac{M_n}{M_1} \right) + \left(\frac{З_1}{S_1} \cdot \frac{З_n}{З_1} \right) + \left(\frac{A_1}{S_1} \cdot \frac{A_n}{A_1} \right) \right], \quad (7)$$

где M_n, Z_n, A_n – те же затраты в анализируемом году.

При этом $\frac{M_1}{S_1}, \frac{Z_1}{S_1}$ и $\frac{A_1}{S_1}$ удельный вес (доля в исходной себестоимости соответ-

ственно материалов, зарплаты, амортизационных отчислений, а $\frac{M_n}{S_1}, \frac{Z_n}{S_1}$ и $\frac{A_n}{S_1}$ соответственно, их показатели в анализируемом году.

Абсолютная величина каждого элемента затрат зависит от ряда факторов, которые должны быть подтверждены дальнейшему анализу. Так, затраты на труд (зарплату) определяются уровнем производительности или обратной ей величиной трудоемкостью продукции, выраженной, например, в человеко-часах и часовой ставкой зарплаты: на материалы нормами расхода и ценой на них; на средства труда величиной инвестиций и нормами отчислений. Но в свою очередь трудоемкость (производительность) зависит от степени фондовооруженности труда и т.д. И таким образом структура и абсолютный уровень себестоимости непосредственно определяется взаимосвязанными показателями, охватывающими основные факторы производства: труд, предметы труда и средства труда (инвестиции). схема взаимосвязи этих показателей показана на рис. 2.

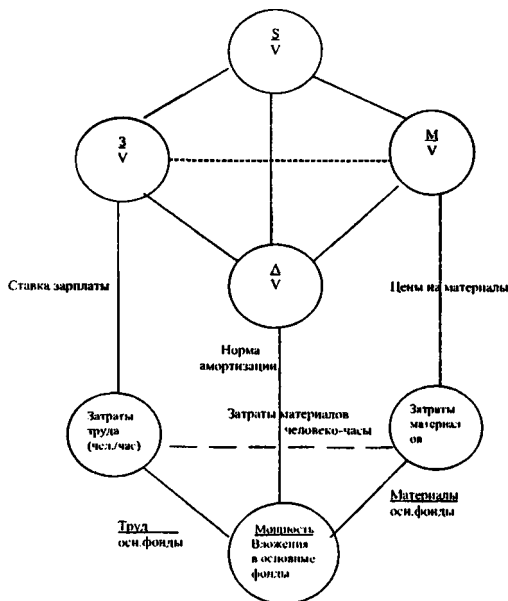


Рис. 2. Взаимосвязь и взаимодействие показателей, определяющих себестоимость продукции и контрольные показатели для управления [1]

Как видно из схемы, приведенной на рис. 2, все три основных показателя, характеризующих затраты ресурсов на единицу продукции труда (Z), материалов (M) и капиталовложений (A), связаны взаимным влиянием друг на друга, так как изменение одного из них влечет за собою изменение другого. Так например, частичная замена труда дополнительными машинами увеличивает выработку на один чел/час. Но увеличение выработки потребует либо сокращения рабочей силы, если выпуск продукции не меняется ($V = \text{const}$), либо увеличение объема затрат материалов с ростом объема производства при тех же затратах труда ($Z = \text{const}$). В свою очередь увеличение доли материалов с более глубокой обработкой (полуфабрикатов) или комплектующих изделий ведет к уменьшению затрат труда при том же выпуске продукции ($V = \text{const}$). Чтобы оставить ту же численность работников (т.е. оставить неизменными затраты труда) необходимы дополнительные капиталовложения в расширение производства.

Изложенные выше направления анализа показателей функционирования позволяют глубоко проанализировать работу отдельных подразделений машиностроительного завода и предприятия в целом за любой период времени по всем основным технико-экономическим показателям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Эйлон С., Гольд Б., Сёзан Ю. Система показателей эффективности производства производства. – М.: Экономика, 1980. – 192 с.

УДК 621.002.003.13

Н.С.Сачко

О МЕТОДИКЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА РАБОТЫ ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ ЦЕХОВ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Белорусская государственная политехническая академия

Минск, Беларусь

В предыдущей статье “О технико-экономическом анализе функционирования машиностроительного предприятия” обоснованы основные показатели, характеризующие работу предприятия и их взаимосвязь и взаимодействие. В данной статье делается попытка показать применимость изложенных методов для анализа работы отдельных цехов и в частности заготовительных по трем основным показателям – затратам труда, материалов и капвложений.

Работа заготовительных цехов связана с первичным формоизменением материалов, продукция которых в виде заготовок затем направляется в обрабатыва-

ющие цехи для дальнейшей механической обработки деталей, подаваемых на сборку машин. Между показателями работы заготовительных и обрабатывающих цехов существует непосредственная взаимосвязь и взаимозависимость. Чем ближе будут приближены формы и размеры заготовок к формам и размерам готовых деталей, тем меньше потребуется затрат всех ресурсов для их обработки в механических цехах.

Но с другой стороны, чем будет более глубокая переработка исходных материалов в заготовительных цехах, тем больше потребуется затрат ресурсов на единицу выпускаемой ими продукции и поэтому ее стоимость будет повышаться. Но эти повышенные затраты в заготовительных цехах с лихвой перекрываются экономией ресурсов в обрабатывающих, поскольку на одну тонну металла в заготовительных цехах затрачивается примерно в 10 раз меньше труда, чем в механических.

Обычно повышенное качество заготовок отражается в более высоких внутренних ценах на них. Поэтому цены на более качественные отливки и поковки или штамповки будут выше, чем на менее качественные.

Это диктует необходимость измерять выпуск продукции цеха не только в натуральных показателях (обычно в тоннах), но и в стоимостном выражении V , который определится по формуле:

$$V = V_a \Pi_a + V_b \Pi_b + \dots + V_n \Pi_n, \quad (1)$$

где V_a, V_b, \dots, V_n – объем выпуска заготовок в натуральном выражении различными методами в тоннах;

$\Pi_a, \Pi_b, \dots, \Pi_n$ – соответственно цены за единицу, т.

При сопоставлении показателей различных периодов важно установить индекс изменения объема выпуска за этот период I_v , который при неизменных ценах определится по формуле:

$$I_v = \frac{V_n}{V_1} \quad (2)$$

где V_n и V_1 – соответственно объем выпуска продукции в исходном (первом) и в анализируемом n -м году.

При изменении цен индекс выпуска может быть определен [1]:

а) путем пересчета объема выпуска (V_n и V_1) по средним ценам

$$\Pi_{\text{ср}} = 1/2 (2\Pi_{a1} + \Pi_{an}), \quad (3)$$

б) либо по среднегеометрическим

$$\Pi_{\text{ср}} = \sqrt{\Pi_{a1} \cdot \Pi_{an}}, \quad (4)$$

в) либо по средневзвешенным ценам и выпуску по формуле

$$I_v = \sqrt{\frac{V_{a1} \cdot \Pi_{a1} + V_{b1} \cdot \Pi_{b1}}{V_{a1} \cdot \Pi_{a1} + V_{b1} \cdot \Pi_{b1}} \cdot \frac{V_{a1} \cdot \Pi_{a1} + V_{b1} \cdot \Pi_{b1}}{V_{a1} \cdot \Pi_{a1} + V_{b1} \cdot \Pi_{b1}}} \quad (5)$$

Рассмотрим методику анализа работы цеха на примере условных данных литейного цеха в условиях высоких темпов инфляции (табл. 1).

Таблица 1

Показатели работы литейного цеха за исходный (первый) год и за анализируемый (2-й) год

| № п/п | Наименование показателей | Единица измер. | Годы | |
|-------|-------------------------------------|----------------|--------|--------|
| | | | 1-й | 2-й |
| 1 | Выпуск отливок, всего | тонн | 52100 | 51500 |
| | в т.ч. чугуновых | « | 51000 | 50000 |
| | точных (прецизионных) | « | 1100 | 1500 |
| 2 | Цена чугуновых отливок (Π_a) | тыс.руб/т | 300 | 1500 |
| | цена точных (Π_b) | « | 1500 | 6000 |
| 3 | Выпуск отливок по стоимости (V) | млн.руб. | 16950 | 84000 |
| | в т.ч. чугуновых (V_a) | « | 15300 | 15000 |
| | точных (V_b) | « | 1650 | 9000 |
| 4 | Затраты труда | тыс.чел/час. | 2000 | 2050 |
| | Средняя тарифная ставка с начислен. | « | 0,6 | 2,4 |
| | Заработная плата | млн.руб. | 1200 | 4920 |
| 5 | Затраты материалов (всех видов) | тонн | 200000 | 191000 |
| | Средняя цена материалов | тыс.руб./т | 65 | 363 |
| | Стоимость материалов | млн.руб. | 13000 | 71500 |
| 6 | Основные фонды (с переоценкой) | млн.руб. | 15000 | 45000 |
| | Норма амортизации | % | 10 | 11,1 |
| | Амортизационные отчисления | млн.руб. | 15700 | 5000 |
| 7 | Совокупные затраты (себестоимость) | « | 15700 | 81420 |

Объем выпуска отливок в натуральном выражении снизился на 1,1%. В стоимостном выражении возрос в 4,96 раза как из-за роста цен, так и за счет увеличения доли более качественных отливок.

В сравнимых цехах, определенных по формуле (3), прирост составил 1,2%, по формуле (4) – 1,41% и по формуле (5) – 1,34%.

Затраты на труд возросли в 4,1 раза в основном за счет инфляции и небольшая часть за счет увеличения затрат труда на 50 тыс. ч/ч, т.е. на 2,5%.

К сожалению, малый объем статьи не позволяет привести расчетную таблицу трудовых показателей. Поэтому воспользуется отдельными ее показателями для анализа их.

Из данных следует, что трудоемкость одной тонны отливок повысилась на 3,6%, что привело к снижению производительности труда в натуральных показателях на 3,5%. В стоимостном выражении показатели выглядят значительно лучше. Однако несмотря на то, что объем выпуска отливок по стоимости возрос на 1,34% за счет роста выпуска наиболее эффективных (точных) отливок, эффективность использования труда (его производительность) снизилась на 1,1% и составила 98,9%.

Основная причина – увеличение затрат труда на 50000 чел. часов за счет роста численности рабочих на участке литья по выплавляемым моделям (со 100 до 125 человек), в то время как на остальных участках затраты труда остались на прежнем уровне. Но поскольку на участке точного литья выпуск в тоннах возрос в 1,36 раза, то производительность труда на нем возросла на 10,9%. Следовательно, снижение производительности в литейном цехе произошло за счет уменьшения выпуска чугунных отливок в земляные формы на 1 тыс. тонн при той же численности рабочих.

Данные анализа трудовых показателей свидетельствуют о более высоких темпах роста цен на продукцию по сравнению с ростом зарплаты. За истекший период выпуск продукции на 1 рубль зарплаты возрос с 14,12 руб. до 17,08%, т.е. на 21%, тогда как доля зарплаты в себестоимости отливок снизилась с 7,64% до 6,04, т.е. на 21%.

Затраты на материалы. Материальные затраты в стоимостном выражении возросли в 5,5 раза при уменьшении общего расхода материалов на 3000 тонн (на 1,5%). Таким образом рост затрат произошел за счет роста цен на материалы, которые в среднем возросли в 5,85 раза выпуска чугунных отливок, на тонну которых затрачивается около 4-х тонн различных материалов (чугуна, лома, кокса, флюсов, формовочной земли и др.) и некоторым увеличением расхода материалов на отливки по выплавляемым моделям, на тонну которых расходуется около 2-х тонн материалов. Данные о материальных затратах приведены в табл. 2.

Из приведенных данных видно снижение эффективности использования материалов. Повзросел расход материалов на тонну отливок, снизился выпуск продукции в расчете на единицу стоимости материалов, повзросел расход материалов на рубль зарплаты. Значительно возрос (85%) расход материалов на рубль стоимости основных фондов. Все это привело к повышению общей суммы издержек литейного цеха. Дальнейший анализ расхода материалов может быть осуществлен путем анализа структуры затрат: на металл, формовочные и прочие материалы.

Инвестиции. Стоимость основных фондов увеличилась в 3 раза, в том числе за счет переоценки на начало 2-го года в 3,33 раза, т.е. с 1500 до 50000 млн.руб. Однако в 1-м году списано амортизационных отчислений на 1500 млн.руб. Во втором году дополнительно вложено в оборудование участка точного литья 1500 млн.руб., мощность которого увеличилась на 400 т. Таким образом на конец 2-го года стоимость основных фондов должна составить 50000 млн.руб. Но так как во 2-м году списано на стоимость продукции 5000 млн.руб. амортизационных отчислений, то стоимость фондов составила на конец года 45000 млн.руб. (табл. 3).

Таблица 2

Затраты на материалы и эффективность их использования

| № п/п | Показатели | Обозначение | Единица измер. | 1-й год | 2-й год | в % 1-й ко 2-му |
|----------------------------------|--|----------------------|------------------------|---------|---------|-----------------|
| В натуральных показателях | | | | | | |
| 1 | Расход материала на 1 т отливок в т.ч. металла | $\frac{M_n}{V_n}$ | тонн на т отлну | 3,81 | 3,825 | 100,4 |
| | | $\frac{M_n}{V_n}$ | тонн на т отлну | 1,19 | 1,21 | 98,3 |
| 2 | Выпуск отливок на 1 т материала | $\frac{V_n}{M_n}$ | тонн на т отлну | 0,265 | 0,261 | 98,6 |
| 3 | Расход материала на 1 чел./час. | $\frac{M_n}{V_n}$ | тонн чел.час. | 0,1 | 0,096 | 96 |
| В текущих ценах | | | | | | |
| 4 | Материалоемкость отливок | $\frac{M_n}{V_c}$ | тонн млн.руб. | 3,07 | 0,613 | 20 |
| 5 | Стоимость отливок на 1 т материала | $\frac{V_c}{M_n}$ | тыс.руб. на т отлну | 325,33 | 1631,07 | 501,3 |
| 6 | Стоимость отливок на 1 млн.руб. | $\frac{V_c}{M_c}$ | рубли на рубль | 1,30 | 1,17 | 90,0 |
| 7 | Стоимость материала на 1 руб. зарплаты | $\frac{M_c}{Z}$ | « | 10,8 | 14,5 | 134,3 |
| 8 | Затраты на материалы в себестоимости | $\frac{M_c}{S}$ | « | 0,828 | 0,878 | 106 |
| В сравнимых ценах | | | | | | |
| 9 | Расход материала на 1 т отливок | $\frac{V_c}{M_n}$ | тыс.руб. на т отлну | 18,7 | 193 | 103 |
| 10 | Расход материала на 1 рубль основных фондов | $\frac{M_c}{K_{ос}}$ | рубли на рубль | 0,867 | 1,59 | 183 |

Данные таблицы указывает на ухудшение использования основных фондов во 2-м году, несмотря на то, что рост фондов намного отставал от объема выпуска продукции по стоимости. Мощность цеха увеличилась на 0,7%, а ее использование уменьшилось на 2%. Снизилась также фондовооруженность труда и особенно соотношения фондов к стоимости материалов, что свидетельствует об отрицательной тенденции переработки материалов на все более низкой технической основе, в результате чего повышается материалоемкость продукции.

Таблица 3

Движение и использование инвестиций

| Показатели | Обозначение | Единица измерения | 1-й год | 2-й год | % |
|---|------------------------------------|----------------------|---------|---------|-------|
| 1.Производственная мощность цеха | W | тонн | 52100 | 52500 | 100,7 |
| 2.Основные фонды за минусом износа | K_{oc} | млн.руб. | 15000 | 45000 | 300 |
| 3.Использование мощности | $\frac{V_n}{W}$ | тонн на тонну | 1,0 | 0,98 | 98 |
| 4.Активно используемые основные фонды | $K_{oc} \frac{V_c}{M_n}$ | млн.руб. | 15000 | 44100 | 98 |
| 5.Активно используемые фонды в сравнительных ценах | $K_{oc} \frac{V_c}{M_n} I_v$ | млн.руб. | 15000 | 14905 | 99,4 |
| 6.Активно используемые фонды на 1 чел. час | $\frac{K_{oc} V_n I_v}{W \cdot M}$ | тыс.руб. чел.час. | 7,5 | 7,27 | 96,9 |
| 7.Активно используемые фонды на единицу стоимости материала | $\frac{K_{oc} V_n}{W \cdot M}$ | руб. руб. | 1,15 | 0,62 | 53,6 |

Себестоимость отливок и ее структура. Совокупные затраты на производство отливок увеличились с 15700 до 81320 млн.руб., а средняя себестоимость тонны возросла с 301,3 до 1580 тыс.руб. На увеличение себестоимости отдельные ее составляющие оказали различное влияние, которое можно определить подставив соответствующие значения M, Z и A в формулу 7 [2]. При этом доля материалов увеличилась с 82,8 до 87,8%, доля зарплаты снизилась с 7,64 до 6,04%. А амортизационных отчислений с 9,55 до 6,16%. Дальнейшие расчеты по методике [2] показали, что почти 90% прироста себестоимости отливок во 2-м году произошло за счет расхода на материалы. Из этого можно сделать вывод, что рост зарплаты не оказал существенного влияния на темпы инфляции. Цены на материалы растут опережающими темпами по отношению к росту зарплаты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Эйлон С., Гольд Б., Сёзан Ю. Система показателей эффективности производства. М.: Экономика, 1980. – 192 с. 2. Сачко Н.С. О технико-экономическом анализе функционирования машиностроительного предприятия. // Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 535–540.

ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

УДК 378(07.07)

А. В. Бань

ПРАКТИЧЕСКОЕ ОБУЧЕНИЕ СТУДЕНТОВ В ВУЗЕ КАК МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ УМЕНИЙ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Эффективность практической деятельности молодого специалиста напрямую зависит от меры соответствия структуры практического обучения студентов в ВУЗе структуре деятельности специалиста в общественном производстве. Как известно, элементами структуры практической подготовки студентов в ВУЗе (в условиях учебно-производственной деятельности, обеспечивающей формирование у будущих специалистов профессиональных знаний, умений и навыков) являются: практическая деятельность на всех видах практики, учебно-исследовательская и научно-исследовательская работа, а также стажировка молодых специалистов.

Реальная структура практической деятельности специалиста в общественном производстве включает технико-технологическую, конструкторскую, проектную, исследовательскую, экономическую, управленческую и инженерно-педагогическую деятельность.

Анализ опыта организации и проведения производственного обучения в различных ВУЗах страны (включая ВУЗы культуры, здравоохранения и др.) показал, что практическое обучение студентов проводится наиболее квалифицированно и поставлено на должный уровень в тех сферах деятельности, где без надлежащих знаний, умений, навыков выпускник ВУЗа не может быть допущен к исполнению своих профессиональных обязанностей. Таковы: врач-хирург, инженер-геодезист, инженер-настройщик радиоэлектронной радиоаппаратуры и приборов и др. Отсюда вытекает необходимость дальнейшей разработки методов выявления и оценки практических умений специалистов и непрерывного совершенствования форм и методов обучения этим умениям.

Перед нами стоит задача: разработать принципы и методы совершенствования производственного обучения и практики. Однако эта проблема не может быть решена в отрыве от комплекса других проблем, возникающих в процессе практической подготовки, так как методы обучения, прежде всего, предполагают определенное содержание обучения и организацию условий, обеспечивающих этот процесс. Поэтому исследование нацелено на анализ основных требований к содержанию практической под-

готовки и совершенствованию организаций и методов производственного обучения и производственной практики. При этом необходимо рассматривать как объективные, так и субъективные факторы, определяющие особенности практического обучения студентов.

К объективным факторам относятся: существующий на сегодняшний день уровень подготовки специалистов в ВУЗах и требования к будущим специалистам, вытекающие из тенденций развития науки.

К субъективным же факторам относятся: отношение самого субъекта к практике и условия, при которых наиболее эффективным образом происходит формирование практических умений.

Изучение совокупности этих факторов и позволит определить требования к содержанию производственной практики и процессу управления обучением во время практики.

Анализ совокупности факторов, влияющих на качество подготовки специалистов в процессе производственного обучения, и выявление обучающих возможностей производственной практики как необходимого звена в общем учебном процессе обеспечат основу для разработки методов совершенствования обучения в процессе производственной практики.

Учебная деятельность в ВУЗе организуется в двух основных формах: теоретическая и практическая подготовка студентов.

В результате теоретической подготовки специалист получает преимущественно знания, обеспечивающие фундамент для развития теоретического мышления, общих и профессиональных способностей.

В процессе практической подготовки можно выделить две стороны: 1) практика для закрепления конкретного теоретического знания; 2) практика для применения комплекса полученных знаний и формирования обобщенных профессиональных умений.

В данном случае рассматриваются в основном вопросы практической подготовки, характерные для второго случая. К этому виду практической подготовки, прежде всего, следует отнести производственное обучение студентов.

Производственная практика является по своей сути активной формой усвоения и приобретения знаний, развития умений, навыков и формирования самостоятельной профессиональной деятельности.

Следует подчеркнуть, что с педагогической точки зрения производственное обучение в высшей школе – очень мало разработанная проблема. Однако, с одной стороны, практическим путем накоплен определенный опыт этого обучения; с другой, – в области педагогической психологии и психологии труда проведены интересные исследования вопросов применения знаний на практике, условий формирования умений и навыков, достаточно изучены и другие психологические особенности трудовой деятельности.

Так в исследованиях Т. В. Кудрявцева [1], Е. А. Милеряна [2] и других ученых было установлено, что в процессе формирования и функционирования практических умений познавательные возможности обучаемых значительно расширяются, так как полученные ими знания непрерывно проверяются, совершенствуются, закрепляются, приобретают действенность. Таким образом, сформированные умения выступают в качестве условия приобретения человеком новых знаний, а последние часто являются необходимой предпосылкой формирования новых умений.

Производственное обучение должно отвечать общим педагогическим, психологическим и учебно-организационным требованиям, и здесь немалую роль играет знание условий и закономерностей успешного формирования умений и навыков. Но существует ряд организационно-методических трудностей, как в постановке производственного обучения, так и в проведении исследований по формированию умений и применению знаний на практике. Трудности эти заключаются в том, что изучается не просто процесс обучения и даже не просто реальный производственный процесс, а эти два процесса в их единстве. Для этого нужно еще вычленив в реальном производственном процессе материал для обучения и формирования профессиональных умений.

В. В. Чебышева [3] отмечает, что в подобных случаях зачастую трудно соблюсти основные учебно-методические условия:

- 1) разделение учебного материала на части для последовательного их изучения;
- 2) последовательное усложнение материала в соответствии с логикой их усвоения;
- 3) повторное изучение отдельных частей до их полного усвоения.

Каким образом избежать подобного рода организационных трудностей, можно установить лишь после проведения соответствующих исследований и постановки обучающих экспериментов.

В связи с этим актуальной задачей является выявление факторов, характеризующих особенности производственного процесса и влияющих на систему производственного обучения. Не менее важно найти критерии, которые можно использовать для выделения требований к учебному процессу на производстве и которые помогут ответить на вопрос, каковы психологические условия и сам механизм формирования практических умений.

Производственная практика имеет своей задачей закрепление теоретических знаний, полученных студентами в процессе теоретического обучения, овладение профессиональными умениями, навыками и перспективными методами работы. Для обеспечения эффективности обучения во время производственной практики ВУЗ должен решить три основных вопроса: 1) организация практики; 2) содержание практики; 3) методы обучения и возможности управления процессом обучения во время практики. Каждый из этих вопросов требует своего отдельного изучения, но нельзя забывать, что они не только взаимосвязаны, но и взаимозависимы друг от друга. К их решению необходим комплексный подход.

Организация практического обучения на производстве тесно связана с вопросом обеспечения условий, при которых наилучшим образом формируются те или иные умения, и с управлением процессом обучения, включенным в реальный производственный процесс.

Сложность решения этой задачи состоит в том, что, с одной стороны, еще недостаточно исследованы и определены условия и закономерности формирования практических умений, с другой, - вопросы управления учебным процессом в реальных производственных условиях еще почти не исследовались и решались главным образом эмпирическим путем. Поэтому простое обобщение и распространение накопленного опыта по вопросам организации практики и управления процессом производственного обучения не может пока дать достаточной информации для обоснованных выводов и оптимальных прогнозов.

В некоторых ВУЗах страны разрабатываются квалификационные характеристики специалистов по отдельным специальностям (специализациям). При их разработке составляется перечень умений и навыков, необходимых специалисту данной отрасли. Нужно отметить, что этот перечень недостаточно комплексно отражает уровень обучения и подготовки специалистов. Иными словами, требования, предъявляемые в них к специалистам, представляют собой не систему, а лишь перечень знаний и эмпирический набор практических умений без их взаимной обусловленности и соподчиненности.

Кроме того, в ВУЗах не уделяется достаточного внимания исследованию условий, в которых оптимальным образом формируются профессиональные умения, а, следовательно, и способам их формирования. Поэтому перед нами стоит задача не только исследования профессионально значимых качеств, которые в итоге определяют содержание обучения в процессе производственной практики, но и осуществление анализа условий формирования профессиональных умений.

В заключении можно отметить, что одним из основных путей успешной профессиональной деятельности специалистов является улучшение качества профессиональной подготовки студентов в ВУЗах.

Для эффективного воплощения в жизнь достижений науки специалист должен обладать не только фундаментальными знаниями теории, но и иметь отличную практическую подготовку, обеспечивающую ему успешное функционирование в условиях современного производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудрявцев Т.В. Психология технического мышления. – М., 1975. – 303с.
2. Миллерян Е.А. Психология формирования общетрудовых, политехнических умений. – М., 1973. – 299с.
3. Чебышева В.В. Психология трудового обучения. – М., 1969. – 38с.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ БОРИСОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО КОЛЛЕДЖА

*Борисовский государственный политехнический колледж
Борисов, Беларусь*

В современных условиях с элементами рыночной экономики, с многопрофильной деятельностью учебного заведения, в том числе коммерческой и производственной для повышения оперативности и эффективности принимаемых решений, необходимую помощь окажет автоматизированная система обработки информации в среднем специальном учебном заведении.

Основное назначение системы – повышение эффективности управления учебным заведением, улучшения оперативности принятия решений, автоматизация информационных работ, выполняемых различными подразделениями.

Цель разработки системы автоматизации – создание комплексной информационной системы, основанной на применении современных информационных технологий подготовки, приема, обработки, передачи, учета, поиска, контроля информации и документов для повышения оперативности и качества управления учебным заведением, повышение качества подготовки учащихся.

Система должна иметь модульную структуру, состоящую из нескольких подсистем. Это позволит обеспечить ее поэтапное внедрение и ведение разработки программных продуктов отдельных подсистем одновременно несколькими разработчиками.

Система должна иметь единообразный пользовательский интерфейс для всех решаемых задач (например, совместимый с Windows), это позволит упростить обучение персонала, ускорить внедрение отдельных частей системы.

В системе должно быть обеспечено ограничение доступа к информации различным категориям пользователей.

Система должна иметь возможность адаптации к изменению структуры учебного заведения, к изменению информационных связей между отдельными подразделениями.

В системе должна быть обеспечена информационная совместимость между отдельными информационными блоками и подсистемами.

Должна быть обеспечена совместимость с глобальной информационной системой Internet.

Территориально система размещается в одном здании, состоящем из трех корпусов (рис. 1).

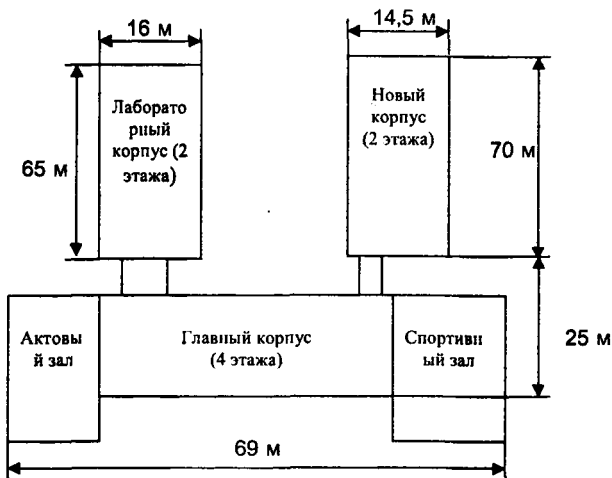


Рис. 1. Схема размещения корпусов

Основные задачи, которые необходимо решить с помощью автоматизированной системы обработки информации:

- обеспечение электронного документооборота;
- автоматизация работы отдела кадров;
- автоматизация подготовки и обработки учебно-планирующей документации;
- автоматизация работы бухгалтерии;
- автоматизация работы библиотеки;
- автоматизированный учёт успеваемости и посещаемости учащихся;
- обеспечение информационной поддержки при принятии решений;
- доступ к современным информационным технологиям и на их основе организация дистанционного обучения.

Система должна иметь возможность диагностирования как технических, так и программных средств.

В системе должны использоваться Windows-приложения для создания, корректировки и обработки документов, так как они наиболее доступны и широко распространены.

Программные средства компонентов системы должны иметь возможность работы в сети и распределенными базами данных.

Согласно положений о структурных подразделениях колледжа основные информационные связи колледжа изображены на схеме рис. 2, на схеме приведен перечень документов, которые готовят и используют отдельные подразделения.

Согласно анализа приведенных структур одним из основных информационных узлов в колледже является отдел кадров, где собирается и обрабатывается информа-

Основные информационные связи

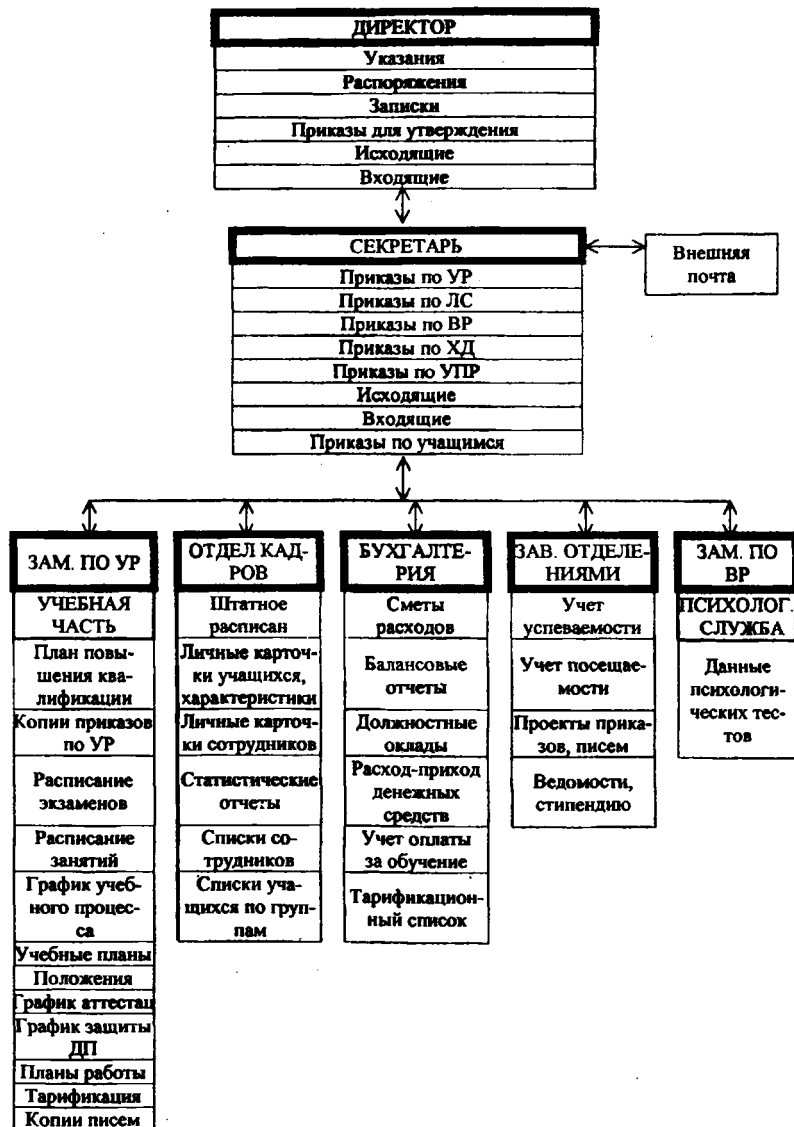


Рис. 2

ция по различным направлениям от момента поступления учащегося (работника) в колледж, до его расставания с ним. Информация отдела кадров, например списки групп, анкетные данные учащихся являются первичной информацией для других подразделений, в личных делах всех работников и учащихся непрерывно накапливаются информация об этапах их пребывания в рамках колледжа: изменение анкетных данных, поощрения, наказания, успеваемость учащихся и др.

Согласующим информационным узлом в информационной структуре колледжа является учебная часть, которая непосредственно подчиняется заместителю директора по учебной работе, здесь согласно учебных планов создается и корректируется расписание, тарификация преподавателей, отслеживается выполнение графика учебного процесса, контролируется нагрузка преподавателей и студентов.

Работа непосредственно с учащимися в группах осуществляется на уровне отделений, здесь осуществляется ежемесячный и семестровый контроль за успеваемостью и посещаемостью каждого учащегося, эти сведения передаются в учебную часть и отдел кадров.

В бухгалтерии сконцентрирована обработка экономической информации по всем направлениям, здесь своя структура и особенности обработки информации.

В связи с созданием психологической службы колледжа у заместителя директора по воспитательной работе накапливается информация о результатах психологических исследований в группах.

Данные о состоянии здоровья учащихся и их физическом развитии собираются в медпункте колледжа и цикловой комиссии физического воспитания.

В информационном обеспечении учебного процесса не обойтись без библиотеки, где накапливается информация о имеющейся и поступающей литературе.

Координацию многих информационных потоков, особенно в области делопроизводства, осуществляет секретарь директора. Контроль и руководство всей деятельностью техникума осуществляет директор.

Согласно перечисленных выше функций, структура автоматизированной системы обработки информации колледжа будет иметь вид, приведенный на рис. 3.

Ядром автоматизированной система обработки информации является сервер баз данных и приложений, который осуществляет накопление информации в своих базах данных по различным направлениям и представляет различным пользователям доступ к соответствующим базам данных для получения информации или корректировки её в зависимости от уровня доступа. Данный сервер может также включать функции файлового сервера для обмена информацией между отдельными рабочими местами и функции сервера приложений для запуска отдельных программ с рабочих мест пользователя.

Очень важным в системе составляет автоматизированное рабочее место отдела кадров. Именно здесь будет создаваться электронное личное дело на каждого учащегося и сотрудника, будет осуществляться сортировка учащихся по группам и отделениям — рис. 4.

Структура автоматизированной системы обработки информации колледжа

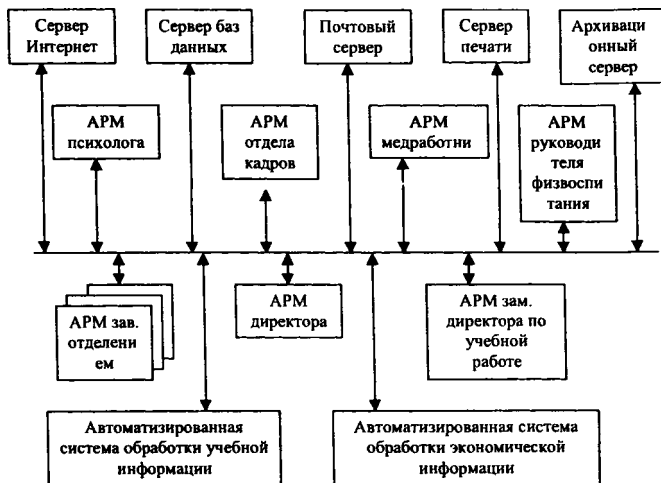


Рис. 3.

Схема информационной службы колледжа

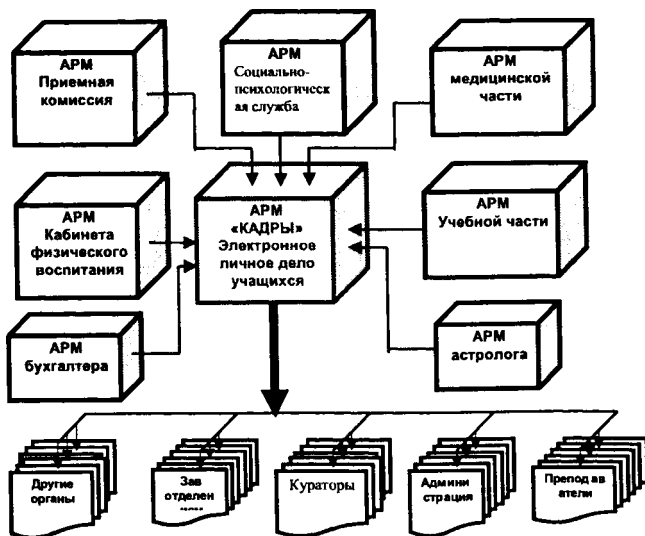


Рис. 4.

Созданное личное дело сохраняется в базе данных отдела кадров, где к нему получают доступ руководители структурных подразделений со своих автоматизированных рабочих мест, в зависимости с уровнем доступа.

Автоматизированное рабочее место психолога должно содержать комплексные психологические тесты по различным направлениям и средства обработки результатов тестирования, программы должны быть сетевыми, чтобы протестировать одновременно большое количество учащихся, особенно на первом курсе. Обобщенный психологический портрет учащегося поступает в соответствующее поле базы данных по кадрам, где становится доступным определенным категориям пользователей.

Автоматизированное рабочее место медработника служит для создания и обработки информации о состоянии здоровья учащихся, краткая медицинская справка затем сохраняется в общей базе данных по кадрам.

На автоматизированном рабочем месте руководителя физвоспитания создается и обрабатывается информация о физическом развитии каждого учащегося, краткая справка по физическому развитию так же сохраняется в базе данных по кадрам.

На автоматизированном рабочем месте библиотекаря создаются тематические каталоги по различным изданиям и публикациям, и представляется возможность электронного поиска информации для учащихся и работников колледжа с различных рабочих мест.

На автоматизированных рабочих местах заведующих отделений осуществляется ввод информации в базу данных об успеваемости и посещаемости учащихся по отдельным группам и предметам, и обработка этой информации для составления приказов о назначении стипендии.

С автоматизированных рабочих мест директора и заместителя директора по учебной работе должен осуществляться доступ ко всей информации по отдельным учащимся, группам и отделениям, должна быть предусмотрена статическая обработка информации, данная информация должна служить информационной базой для выработки и принятия решений по управлению техникумом и для формирования отчетности в вышестоящие организации.

Сервер электронной почты служит для организации обмена информацией как внутри учебного заведения, так и с другими организациями, в том числе с вышестоящими.

Сервер печати позволит организовать высококачественную и скоростную печать на одном рабочем месте, например на лазерном принтере, что позволит сэкономить на приобретении дорогостоящей техники, на отдельных рабочих местах при этом могут использоваться более дешевые матричные принтеры для черновой печати.

Сервер Интернет должен обеспечить доступ отдельных пользователей колледжа к глобальной сети, создание собственного Web-узла, в дальнейшем на его основе развить новые формы обучения с удаленным доступом к методическому обеспечению и удаленным контролем знаний.

В разрабатываемой системе предусматривается функционирование двух подсистем.

Это подсистема автоматизированной обработки информации учебной части, в которой на основе учебных планов должна планироваться нагрузка преподавателей и студентов, составляется расписание, контролируется процесс выполнения учебного плана. Подсистема должна быть связана с базой данных отдела кадров, являющийся базовым источником информации. Результаты работы данной системы в первую очередь необходимы бухгалтерии для правильного начисления зарплаты преподавателям.

Подсистема обработки экономической информации базируется на специализированных бухгалтерских программах предназначенных для начисления зарплаты, учета материальных ценностей, составления балансовых счетов и др., часть экономической информации в обособленном виде должна с определенной периодичностью предоставляться директору.

Для обеспечения безопасности информации, архивного хранения баз данных необходим сервер архивации

Средством для передачи информации внутри учебного заведения будет служить локальная вычислительная сеть. Для обеспечения электронной почты и Интернет технологий, на первом этапе – телефонная коммутационная линия, в дальнейшем по мере

Техническое обеспечение

Основные автоматизированные рабочие места директора, заместителя по учебной работе, учебной части, заведующих отделениями, библиотеки и др. должны быть снабжены ПЭВМ, обеспечивающие определенный запас по мощности с учетом развития системы. Их технические характеристики должны быть не ниже процессор Pentium II 233 МГц, оперативное запоминающее устройство 64 Мб, жесткий диск 4 Гб.

Рабочее место

| Наименование устройства | Минимальное значение параметров |
|---------------------------------------|---------------------------------|
| Процессор | Тактовая частота 466 Мгц |
| Объем ОЗУ | 64 Мбайт |
| Накопитель на жестком магнитном диске | 8,4 Гбайт |
| Накопитель на гибком магнитном диске | 3,5» 1,44 Мбайт |
| Видеоконтроллер | SVGA, AGP, 4 Мбайт |
| Привод CD-ROM | 32x |
| Звуковой контроллер | Sound Bluster 16 |
| Сетевой контроллер | Ethernet, 10 Мбит/с, BNC/UTP |
| Видеомонитор | 15», 800 x 600, 75 Гц |
| Колонки активные | |
| Наушники + микрофон | |
| Клавиатура | 104 кл., Рус/Лат |
| Манипулятор «мышь» + «коврик» | |

Основной сервер так же должен обеспечивать развитие системы на перспективу, минимальные требования – это двухпроцессорный сервер не менее Pentium 233; жесткий диск не менее 10ГБ. Необходимо, чтобы сервер для связи с жесткими дисками использовал интерфейс Ultra Wide SCSI или Ultra SCSI, это позволит обеспечить работы с 15 устройствами и общую пропускную способность до 40 Мбайт/с. [6]. Необходимо, чтобы сервер поддерживал в перспективе массивы дисков RAID. Необходимо оснастить сервер устройством бесперебойного питания. Для архивации данных необходимо оснастить сервер ленточным или магнитооптическим устройством резервного копирования. Оперативное запоминающее устройство не менее 64 Мб, сервер должен иметь возможность наращивание оперативное запоминающее устройство.

Примерная спецификация оборудования сервера :

CPU Athlon-1.2ГГц,
RAM 256Mb SDRAM 133,
MB GB7ZXR, ATX,
VC RIVA TNT2 Vanta 16Mb,
HDD 2x18 Gb SCSI,
CD-ROM 50x ASUS,
FDD 1.44
Monitor 17”,
Keyb+Mouse

Желательно иметь модем на выделенную линию типа: ZYXEL PRESTIGE 681 или Zyxel Omni 128L

Почтовый сервер и сервер Internet не требуют больших вычислительных мощностей из-за низкоскоростных линий связи, могут быть объединены на одной ПЭВМ с минимальными системными требованиями Pentium II 233, оперативное запоминающее устройство – 32 Мб, накопитель на жестком диске – 3 Гб.

Сервер печати может быть объединен с одним из рабочих мест, например, секретаря, достаточно ПЭВМ, нормально работающего с офисными приложениями.

Локальную сеть необходимо выполнить с использованием кабелей “не витой пары”, таким образом, чтоб обеспечить запас по скорости передачи информации, лучше использовать экранированный кабель (STP), такой кабель обеспечит высокую помехоустойчивость системы [5].

Сетевое обеспечение

Для обмена информацией внутри учебного заведения, для обеспечения доступа к базам данных, обеспечения электронного документооборота необходима локальная вычислительная сеть. Для обеспечения доступа к сетям других уровней (сеть РИПО, министерство образования и др.) необходимо иметь доступ к сети Internet. Для построения сети лучше использовать модель с централизованным администрированием.

ем, в дальнейшем с развитием отдельных сетей подразделений (например, сеть бухгалтерии) возможно будет перейти на применение распределенного смешанного администрирования.

Использование протокола TCP/IP в локальной сети обеспечит лучшую совместимость с глобальной сетью, обеспечит в дальнейшем возможность разбить сеть на сегменты. При этом первоначально необходимо сделать сеть по модели с одним доменом, в дальнейшем такую сеть можно развить на сеть по модели с одним главным доменом [3]. При этом сеть будет иметь структуру типа “звезда”.

При организации сети по структуре “звезда” необходимо использовать специальные концентраторы (HUB) на определенное количество нагрузок, при проектировании их размещения необходимо учитывать, что максимальная длина сегмента для “витой пары” не более 100 метров. Примерная структура локальной вычислительной сети приведена на рис. 5.

Примерная структура локальной вычислительной сети

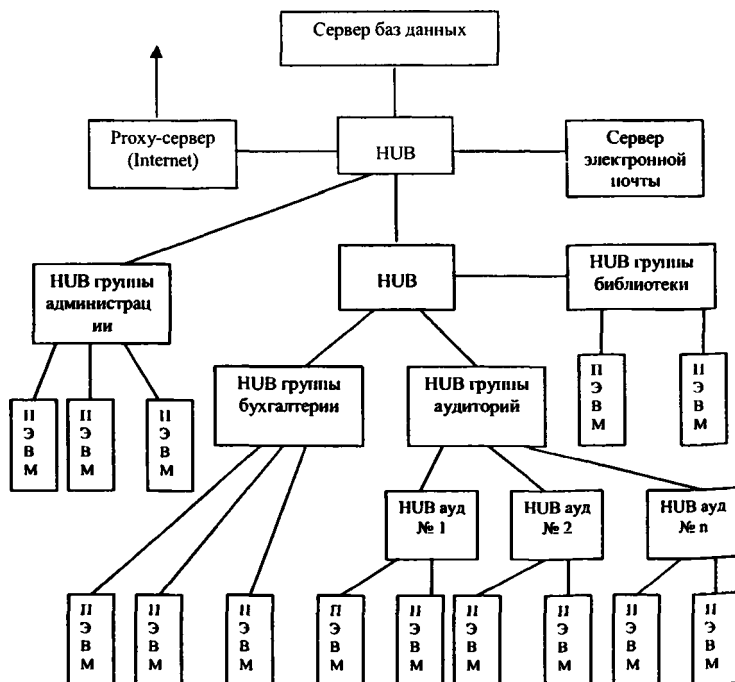


Рис. 5

Топология типа “звезда” имеет следующие основные достоинства [7,8]:

- простота и быстрота установки сети;
- легкость организации рабочих групп и взаимодействие между ними;
- легкость расширения сети путем добавления к ней новых рабочих групп;
- нарушение соединения можно быстро исправить, не останавливая работы всей сети;
- поиск неисправности упрощается благодаря наглядным световым индикаторам на каждом концентраторе.

Для уменьшения графика сети, необходимо пользователей разбить на группы с учетом объема их взаимодействия, а так же согласно ограничений доступа к сети, что позволит для каждой группы сформировать определенную политику администрирования.

В некоторых группах, имеющих такую сетевую нагрузку (например, некоторые учебные аудитории) для существенного снижения затрат на концентраторы и кабельные соединения возможно использование топологии типа “общая шина”.

Проекционная аппаратура позволяет проектировать компьютерное изображение на экран, что позволяет более эффективно проводить лекции, семинары, доклады и другие массовые мероприятия. Известны отечественные проекторы моделей: MP 8620, MP 8640, MP 8660, MP 8730, а также импортные фирмы SANYO модели: PLC 9000, PLC – XP10, PLC-SP10, PLC-SU10 обладающих достаточной яркостью и размерами изображения, пультом дистанционного управления и портативностью. Для проектирования изображения в аудиториях возможно применение мультимедийных телевизоров фирмы PHILIPS модели 42PF9952/58, PANASONIC модель TC-42PD1F, TOSHIBA модель 43N9UXR Dramatic-Theatre, SONY KP-61/53/48PS1

Для нормального обеспечения работы вычислительного центра в его арсенале должны быть: цифровой аппарат или цифровая камера фирмы Sony модели DSC-S70, DSC-S50, DSC-S30, MVC-FD90, MVC-FD85 или Olympus моделей: C-2000 ZOOM, C-1400XL, C-900 ZOOM, C-830L которые позволяют, с отличным качеством изображения, получать фотографии объектов, записывать клипы и сразу показывать их на компьютере. Желательно иметь цифровую видеокамеру формата DV фирмы SONY модели DCR-PC100E, DCR-PC3E, DCR-TRV11, CCD-TRV57, CCD-TRV67. Благодаря Memory Stick и цифровому входу/выходу i.Link они полностью совместимы со средой мультимедиа и превращают монтаж изображения в простое и увлекательное занятие.

Следует отметить, что для размножения документов желательно иметь в сети лазерный принтер фирмы PHASER модели: 740N, 740P, 740DX, 780N, 780GN, 780P.

Операционная система для автоматизированной системы обработки информации, должна быть сетевой, иметь возможность работы на различных компьютерных платформах, обеспечивать поддержку файловых систем различных оперативных систем, обеспечивать защищенность, иметь высокую надежность и отказоустойчивость,

удобный современный интерфейс. В настоящее время на рынке наиболее популярны следующие сетевые операционные системы:

Microsoft Windows 2000 Advanced Server, Novell NetWare 5.1, Red Hat Linux 6.1 и Santa Cruz Operation Unix Ware 7.11. Из них наиболее многоцелевой операционной системой со всеми удобствами является Microsoft Windows 2000. При чем на рабочих станциях может использоваться как модификация данной операционной, так и такие операционные системы как Windows 95, Windows 98, Windows NT.

Сервер на основе операционной системы Windows 2000 может выполнять функции:

- файл-сервера;
- сервера печати;
- сервера приложений;
- сервера баз данных;
- сервера обеспечения безопасности;
- сервера резервирования данных;
- сервера удаления доступа;
- сервера связи.

Данная операционная система поддерживает все приложения Windows 95 и Windows 98, в том числе Microsoft Office, что создает определенные удобства для пользователей.

Средства организации баз данных и работа с ними

В автоматизированной системе будет функционировать несколько баз данных:

- база данных отдела кадров;
- база данных психолога;
- база данных медработника;
- база данных учебной части;
- информационные базы данных (юридических документов и др.)

Основной базой данных является база данных отдела кадров, причем здесь могут быть созданы две независимые базы:

- база данных по учащимся;
- база данных по работникам.

Из этих двух баз данных наибольшей по объему и по интенсивности работы с ней, является база данных по учащимся, количество учащихся техникума в данный момент около 1500 человек и именно обработка информации об учащихся и является одной из самых основных задач автоматизированной системы обработки информации.

Данную базу данных необходимо строить по технологии “клиент-сервер” с управлением SQL-сервером.

Преимущества такой системы:

- снижается требования к вычислительным мощностям периферийных компьютеров;

- упрощается наращивание мощностей;
- значительно увеличивается защищенность базы данных;
- возрастает безопасность всей системы в целом [4]

Остальные базы данных должны формировать краткие справки по различным направлениям по каждому учащемуся, которые затем сохраняются в основной базе данных.

Базы данных бухгалтерии практически независимы и доступ к ним ограничен всем кроме работников бухгалтерии.

Прикладное программное обеспечение

Для работы с базами данных необходимо установить на рабочие места специальные программное обеспечение для соответствующих баз данных, которые учитывают структуры баз данных, особенности доступа отдельных пользователей.

Для ведения делопроизводства, подготовка текстовых материалов лучше всего использовать стандартные средства Microsoft Office: текстовый процессор Word, табличный процессор Excel, почтовый клиент MS Outlook, который имеет множество функций по планированию работы и организации электронного документооборота. Так как они наиболее известны и доступны для большинства пользователей и могут работать с различными форматами данных.

Для бухгалтерии, возможно, использовать существующие комплексные интегрированные пакеты (например, 1С и др.), однако при этом все равно потребуются настройка и увязка программ с другими базами данных.

Информационное обеспечение

Первичным источником информации в базе данных отдела кадров по учащимся являются анкеты, которые заполняют учащиеся при поступлении в техникум, затем ежемесячно личное дело учащихся пополняется сведениями, вносимыми на отделениях по успеваемости и посещаемости занятий. Информационную поддержку баз данных по учащимся обеспечивают также психологическая служба, медработник, руководитель физического воспитания.

Информационную поддержку администрации и бухгалтерии по юридическим вопросам и различным нормативным актам республики осуществляет специальная информационная система (юрэксперт), которая ежедневно обновляется.

Наиболее мощной информационной системой по всем направлениям является глобальная сеть Internet, но для беспрепятственного пользования ею всем пользователям АСОИ колледжа необходимо выделенная линия до ближайшего поставщика услуг Internet.

Режимы работы с сетью

Рабочие места в локальной сети в основном работают в режиме Full-duplex (двухнаправленная передача).

При редактировании и просмотре содержимого баз данных рабочие станции работают в режиме online (непосредственное подключение). При работе с почтой используют режим offline (подключение в момент передачи).

Режимы работы с сетью Internet.

На первом этапе доступ к Интернет обеспечивается через телефонную линию с использованием модема, в дальнейшем для расширения возможностей и количества пользователей необходимо получить выделенную линию.

На первом этапе подключение через коммутируемую телефонную линию режим работы будет сеансовым, что не позволяет организовать общедоступного сервера, однако для почтового обмена и для кратковременное периодической работы в режиме online такой режим подходит.

Включая online, можно будет пользоваться службами глобальной сети:

- 1) Служба удаленного управления компьютерами (Telnet).
- 2) Служба электронной почты (E-mail).
- 3) Служба списков рассылки (Mail List).
- 4) Служба телеконференций (Usenet).
- 5) Служба World Wide Web (WWW).
- 6) Служба имен доменов (DNS).
- 7) Служба передачи файлов (FTP)
- 8) Служба IRC (Internet Relay Chat).
- 9) ICQ Служба поиска сетевого IP-адреса, подключенного в данный момент к Интернету.

Режимы работы с базами данных.

Каждая группа пользователей имеет свои уровни доступа к базам данных. Например, медработник, психолог, руководитель физической культуры имеют полный доступ к своим базам данных для их создания и изменения, все остальные пользователи имеют доступ только к открытой информации этих баз данных без права изменения содержимого.

В базе данных по учащимся каждый заведующий отделением имеет полный доступ только к учащимся своего отделения. Все остальные пользователи имеют доступ, только без права изменения.

К информации учебной части имеют полный доступ только работники учебной части, в соответствии с должностными обязанностями и заместитель директора по учебной работе, все остальные пользователи должны иметь доступ без права изменения.

К информации бухгалтерии должны иметь доступ только работники бухгалтерии согласно их должностных обязанностей, ограниченный доступ может иметь директор, остальные не должны иметь доступ к данной информации.

С некоторых рабочих мест может быть доступ к базам данных вообще запрещен, например, рабочие места в учебных классах

Обслуживание системы

Обслуживанием системы должно заниматься отдельное подразделение, которое должно выполнять следующие функции:

- диагностика и обслуживание технических средств;
- администрирование локальной сети;
- настройка параметров работы с Интернет;
- установка программного обеспечения;
- администрирование баз данных;
- получение резервных копий баз данных на компакт дисках;
- восстановление баз данных с резервных копий;
- разработка планов автоматизации по отдельным подразделениям;
- разработка технических проектов и заданий на отдельные компоненты систем автоматизированной обработки информации;
- обеспечение безопасности системы на организационном, техническом и программном уровне;
- обучение персонала по работе с системой автоматизированной обработки информации;
- разработка вопросов по развитию и модернизации системы;

Безопасность системы должна обеспечиваться на техническом, программном и организационном уровне.

Безопасность на техническом уровне должна обеспечиваться:

- закупкой надежного оборудования;
- использование бесперебойного источника питания на сервере;
- использование дублирующих устройств для хранения информации, (например “зеркальный” накопитель на жестком диске);
- использование архивных устройств хранения данных стримеры, CDRW и др.

Безопасность на программном уровне должна обеспечиваться:

- разграничение доступа к базам данных с помощью специальных паролей и даже на уровне конкретных рабочих мест;
- работа с удаленным доступом по телефонной линии, также с использованием паролей и шифрацией передаваемых сообщений;
- должен вестись учет обращений к базам данных, в том числе несанкционированных обращений;
- использование активируемых программ.

Для обеспечения безопасности на организационном уровне необходимо:

- разработать систему ограничения доступа персонала к серверам и информационным ресурсам: сервер и объекты архивного хранения данных должны находиться в специальном помещении с ограниченным доступом;
- разработать инструкции по режимам работы с информационными базами данных и контролировать их выполнение;
- разработать инструкции о действиях персонала в случае отказов в работе оборудования.

Перечисленные выше требования и мероприятия обеспечат надежное функционирование системы и информационную безопасность.

Внедрение системы в учебные подразделения позволит:

- повысить оперативность и эффективность управления, за счет оперативности получения информации по любому подразделению в кратчайшие сроки;
- позволит повысить исполнительную дисциплину за счет повышения качества контроля учебного процесса;
- за счет электронного документооборота уменьшится время на составления и доставку отчетных документов;
- позволит поставить воспитательный процесс на новый уровень за счет получения оперативности и достоверности информации о психическом и физическом состоянии отдельных учащихся и целых коллективов;
- позволит ускорить внедрение в учебный процесс новых информационных технологий.

Все перечисленное в целом позволит повысить качество преподавания. Для уменьшения разовых затрат на автоматизированную систему обработки информации, ее можно внедрять поэтапно, на первом этапе автоматизировать работу отдела кадров по личным делам учащихся, как ключевое звено системы.

Примерные затраты на внедрение автоматизированной системы обработки информации в колледже:

- стоимость сервера – 1 шт. – 3000 у.е.;
 - ПЭВМ (рабочие станции) – 10 шт. – 6000 у.е.;
 - системное программное обеспечение на рабочие станции и сервер – 1000 у.е.;
 - прикладное программное обеспечение – 1000 у.е.;
 - работы по созданию локальной сети – 500 у.е.;
 - другие организационные вопросы и непредвиденные расходы – 1000 у.е.;
- Итого: 12500 у.е.

За счет расширения коммерческих форм обучения, с применением, например, нетрадиционных форм обучения, так же за счет конкурентоспособности колледжа на рынке предоставления услуг образования за счет повышения качества образования система может окупиться за несколько лет.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зборнік нарматыўных дакументаў па дзейнасці вярэдніх спецыяльных навучальных устаноў Рэспублікі Беларусь. Пастановы, загады, палажэнні і інструктыўныя дакументы /Склад. В.В.Вагін; Пад рэд. Прафесара А.М.Гарнака, Л.Я.Кірылюка. – Мн.: НМЦэнтр, 1997. – 424 с. 2. Положение о психологической службе Борисовского политехникума. 3. Microsoft Windows NT Server версия 4.0. Основные понятие и пла-

нирования. Microsoft Corporation 1998. 4. Основы экономической информации: учеб. Пособие /Под ред. А.Н.Морозевича. Мн., 1998. 5. Как создать локальную сеть для небольшого офиса. "СW" № 34–37 за 1998 г. 6. Серверы для начинающих "СW" № 3-4 за 1999 г. 7. Простые решения для простых сетей "Компьютерная газета" № 38 1998 г. 8. О построении современных вычислительных сетей "Компьютерная газета" № 5,6 за 1998. 9. Учебное пособие для специалистов MCSE:TCP/IP Тодд Леммл, Моника Леммл, Джеймс Челлис. Издательство "Лори" 1997. 10. Кирсанов Д. Факс-модем от покупки и подключения до выхода в Интернет – СПб: Символ-Плюс, 1998.

УДК 378.371.3

Е.А. Гриневич

ДИАГНОСТИКА АДАПТАЦИИ СТУДЕНТОВ К ПРОФЕССИОНАЛЬНО-ПЕДАГОГИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ.

Белорусская государственная политехническая академия

Минск, Беларусь

В профессионально-педагогической деятельности довольно сложно определить четкие критерии ее успешности. Весьма значительное влияние оказывает сформированность умений и навыков адаптироваться к условиям окружающей действительности. В рамках учебного заведения невозможно научить студента правилам поведения в различных конфликтных ситуациях, возникающих в учебном процессе. В данных обстоятельствах весьма значимыми становятся умения самостоятельно принимать профессионально-грамотные решения на основе собственного педагогического опыта [1]. Первые шаги в этом направлении студент совершает именно в период педагогических практик. Успешность адаптации к профессионально-педагогической деятельности во многом зависит от статуса студента в академической группе.

Типом общения и структурой взаимоотношений, которые складываются в академических группах, определяются как общегрупповые успехи, так и индивидуальные достижения каждого студента. Известно, что показателем объективного места человека в группе является его социометрический или социально-психологический статус. Можно предположить, что социально-психологический статус студента выступает одновременно и в качестве результата влияния различных внешних и субъективных факторов (состав группы, особенности конкретной совместной деятельности, успех и индивидуальный вклад в нее, индивидуально-психологические качества личности, ее социально-демографические характеристики и др.), и в качестве условия дальнейшего становления и развития студента как личности и субъекта деятельности [2].

В исследовании, проводимом среди студентов инженерно-педагогического факультета, была поставлена задача выяснить, насколько индивидуальные и социально-

психологические характеристики личности студентов соотносятся с успешностью адаптации и индивидуальными достижениями в учебной деятельности.

Диагностика адаптации к профессионально-педагогической деятельности проводилась в период прохождения студентами шестинедельной педагогической практики в качестве преподавателей технологий.

Целью исследования 42 студентов было изучение индивидуальных особенностей ряда свойств нервной системы, мотивации, интеллекта, характерологических и социально-психологических качеств личности, уровня учебной успешности, активности и педагогического мастерства. Основой анализа экспериментальных данных, в соответствии с задачами исследования, были результаты измерения социально-психологического статуса членов студенческих групп. После проведения исследования социометрического статуса студенты разделились на три группы. В первую группу вошли 16 студентов, имеющих положительный статус. Вторую группу составили 12 студентов, получивших отрицательный статус. К третьей группе были отнесены все остальные. Наибольший интерес для анализа представляли лица, имеющие наиболее высокий и наиболее низкий социометрический статус. Согласно общепринятой классификации результатов социометрических исследований, первую группу принято называть лидерами, вторую – отверженными. Тех и других, оказалось, по пять человек.

В процессе исследования применялся метод обобщения независимых характеристик.

Анализ результатов оценки уровня интеллекта не обнаружил наличие значимых различий между лидерами и отверженными, следовательно правомерно предположение о том, что студенты, получившие самое большое число выборов по своим деловым качествам, не могут не обладать высоким интеллектуальным потенциалом.

В период педагогической практики студенты сталкиваются с реальностью школьной жизни, которая оказываются далеко не столь радужной. Оказавшись неподготовленными к столкновению с негативными сторонами школьной жизни, студенты теряются, у них появляется разочарованность [3]. Как среди лидеров, так и среди отверженных проявляется тенденция к снижению общего уровня самооценки с высокой и адекватной до низкой. В табл. 1 представлены результаты, которые наглядно демонстрируют, что лидеры и отверженные на начало практики значительно выше оценивают в себе, чем на конец практики, такие профессионально-значимые качества, как эмпатию, уровень умственных и коммуникативных способностей. Самооценка уровня организаторских способностей к моменту окончания практики среди лидеров имеет тенденцию к увеличению, а среди отверженных наоборот – весьма значительно снижается. Такие изменения, как общей самооценки, так и отдельных ее показателей мы объясняем разной успешностью деятельности лидеров и отверженных в период педагогической практики.

Неожиданными оказались полученные результаты при оценке мотивов деятельности. Показатели стремления к доминированию среди лидеров оказались ниже, чем

среди отверженных. Вероятно, обнаруженное у отверженных ярко выраженное свойство доминирования выступает при самооценки как тенденция, стремление компенсировать свою низкую реальную позицию в группе.

Подобным образом, по-видимому, можно истолковать и высокие показатели у отверженных по критериям осуществления самоконтроля. Низкая позиция в группе заставляет прибегать отверженных к более строгой регламентации и тщательному контролю своих чувств и поведения.

Таблица 1

| Уровень самооценки | Самооценка эмпатии | | Самооценка умственных способностей | | Самооценка коммуникативных способностей | | Самооценка организаторских способностей | |
|--------------------|--------------------|-------|------------------------------------|-------|---|-------|---|-------|
| | начало | конец | начало | конец | начало | конец | начало | конец |
| Лидеры | 59,4% | 21,9% | 62,5% | 25% | 43,5% | 31,3% | 15,6% | 43,4% |
| Отверженные | 71,9% | 37,5% | 43,8% | 28,2% | 41,7% | 29,4% | 61,4% | 16,3% |

Заслуживают внимания результаты ответов на вопрос: “Узнают ли Вас в кругу незнакомых сверстников и взрослых как представителя преподавательской профессии?” Ответы предлагалось представить в виде перечисления указанных признаков. Количество ответов не ограничивалось. Результаты опроса приведены в табл. 2.

Полученные результаты согласуются и с оценкой уровня конфликтной компетентности студентов, полученной с помощью методики анализа учебных и педагогических ситуаций. Оказалось, что студенты-лидеры в большей степени предпочитают неформализованные способы решения учебно-педагогических задач, им более свойственно стремление проникнуть в психологический мир учащегося установить с ним эмоциональный контакт и, не унижая его достоинства, в доброжелательной форме разрешать возникающие конфликты. Наряду с этим лидеры отвергают способы решения педагогических задач, ориентированные на строгое соблюдение формализованных правил, предписа-

ний, требований. Таким образом, лидеры больше обращены к людям, отверженные – к системе официальных регламентаций и строгому их соблюдению.

Таблица 2

| № | Указанные признаки | Кол-во указавших признак | |
|---|---|--------------------------|-------------|
| | | Лидеры | Отверженные |
| 1 | По манере держаться (степенности, серьезности, строгости, сдержанности, рассудительности) | 31,6% | 31,9% |
| 2 | По тону речи, постановке голоса | 19,9% | 23,7% |
| 3 | По особенностям общения (содержанию, тематике разговора) | 12,7% | 10,2% |
| 4 | По склонности наставлять, указывать, исправлять ошибки, оказывать помощь) | 10,9% | 14,6% |
| 5 | По внешним признакам (мимике, жестам, походке, одежде, наличию очков) | 9,7% | 11,4% |
| 6 | По особенностям характера (добросовестности, дисциплинированности, такту, скромности, доброжелательности) | 8,4% | 5,2% |

Оценка уровня умений создания доверительной атмосферы при общении с учащимися показала, что отверженные больше склонны к проявлению подозрительности, зависти, социальной несовместимости, тогда как лидеры более доверчивы, покладисты, уживчивы с другими людьми, заботливы, хорошо работают в групповых условиях.

В течение шести недель педагогической практики мы наблюдали лидеров и отверженных в роли преподавателей технологии, в этой связи имеет смысл остановиться на различиях, обнаруженных в успешности овладения ими педагогическими умениями. Средняя оценка успешности педагогической деятельности, вынесенная преподавателями по стандартным шкалам, составила у лидеров 4,5, а у студентов – отверженных – 3,6. В этом отношении показательна краткая характеристика, данная преподавателем одному из отверженных – Максим Л.: “При изложении нового материал “перескакивает” с одного на другое, с классом контакта установить не сумел. Всякое его предложение по внеклассной работе ребятами принимается “в штыки”. Прямолинейный, некоммуникабельный”. Следует отметить, что оценка преподавателя совпадает с самооценкой студента. В отчете по педагогической практике он указал ряд трудностей, которые вызвала у него педагогическая деятельность, выделив среди них такие виды умений, как планирование материала и его изложение на уроке, поддержание дисциплины и контроль самостоятельной работы учащихся, индивидуальная работа с ними и организация учебного коллектива. Противоположную характеристику подучила от того же преподавателя одна из лидеров – Светлана Ф.: “Профессионально владеет учебным материалом. Ребята расставаться с ней не хотят. Вполне готовый специалист и уже сейчас может работать”. (После окончания педагогической практики Светлана

Ф. работает в школе в качестве преподавателя технологии). К сказанному следует добавить, что студенты с высоким социально-психологическим статусом имеют более высокий средний балл по академической успеваемости, у них намного выше показатели учебной и общественной активности.

Таким образом, проведенное исследование позволяет сделать общий вывод о том, что студенты – будущие преподаватели технологии, имеющие высокий социально-психологический статус, обладают комплексом индивидуально-психических характеристик личности, который обеспечивает достижение ими более высокого уровня как учебной, так и профессионально-педагогической деятельности.

В данном случае социально-психологический статус приобретает прогнозирующее значение в определении перспектив профессионального становления будущих преподавателей технологии, чем он выше, тем, по-видимому, быстрее и с меньшими трудностями будет происходить процесс адаптации к профессионально-педагогической деятельности и освоение профессиональной роли преподавателя и классного руководителя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гриневич Е.А. Структурно-функциональная модель профессиональной самостоятельности инженера-педагога. // Проблемы непрерывного многоуровневого профессионального образования: структура, технологии, кадры. Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. – Мн., 1999. – 316 с.
2. Собчик Л.Н. Стандартизированный многофакторный метод исследования личности: Методическое руководство. – М., 1990. – 75с.
3. Яницкий М.С. Состояние дезадаптации у студентов и пути оптимизации адаптационного процесса в вузе. – Кемерово, 1998. – 67 с.
4. Clayton T. Shorkey and Victor L. Whiteman. Development of the rational behavior inventory: Initial validity and reliability. – Educational and Psychological Measurement, 1997. – 527p.

УДК 378.1.147

Е.П. Дирвук

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ КУЛЬТУРА КАК ИНТЕГРАТИВНЫЙ КРИТЕРИЙ КАЧЕСТВА ОБРАЗОВАНИЯ ИНЖЕНЕРА-ПЕДАГОГА

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Последней четверти нынешнего столетия принадлежит ряд замечательных открытий и достижений в области науки и техники. На этот периода также приходится обострение противоречий в экономическом и социальном развитии общества. По оцен-

кам специалистов Центра проблематики XXI века – одного из ведущих экспертов Совета Европы в области образования, стратегия развития международного сообщества в целом, а также отдельных образовательных систем будет направлена на преодоление этих противоречий.

В настоящее время обострилось противоречие между значительным ростом информации и возможностью обучаемых её усвоить и осмыслить. Игнорирование такой проблемы образовательными структурами, несомненно, будет сказываться как на качестве образования, так и на здоровье учащихся и студентов.

Нынешние и будущие достижения науки и техники, а также растущее значение когнитивных и нематериальных факторов в сфере производства товаров и услуг, обуславливают необходимость создания нового общества. Непременным условием при этом будет опережающий характер человеческого воображения по отношению к различным технологическим достижениям. Другими словами, образование должно постоянно адаптироваться к изменениям, происходящим в обществе, одновременно сохраняя достижения, основные знания технологического опыта. В этой связи особую значимость приобретает проблема качества образования.

С.Е. Шишов, В.А. Кальней [1, с.78] утверждают, что качество образования определяется совокупностью показателей, характеризующих различные аспекты учебной деятельности: содержанием образования, формами и методами обучения, материально-технической базой, кадровым составом образовательного учреждения и т.п.

В свою очередь содержание образования, его объем, структура, понятийно-терминологический аппарат неразрывно связаны с деятельностью специалиста. Выражением качества выполняемой деятельности, ее регуляторами выступают теория и культура.

Важность культуросообразной ориентации в образовании и подготовке специалистов с высшим образованием подчеркивалось в работах М.М. Бахтина, Д.И. Водзинского, А.С. Зубра, Н.Б. Крыловой, И.С. Ладенко, Н.И. Латыша, Д.С. Лихачева, В.А. Слостенина и др.

По – мнению Л. Уайта, «открытие» культуры когда-нибудь будет по своему оценено человечеством также, например, как осознание гелиоцентрической системы или клеточной теории.

Культура как интегральный способ человеческой деятельности рассматривалось в работах В.Е. Давидовича и Ю.А. Жданова, Э.С. Маркаряна и др. Исходя из широкой интерпретации культуры, Э.С. Маркарян определил, что культура как «специфический способ деятельности», есть технология.

М.С. Каган исследовал культуру с позиции системного подхода. Он отмечал, что «культурой мы называем совокупность того, что человек создает и как он это создает в своей сознательно направленной, свободно и постоянно совершенствующейся деятельности».

Специфическое понимание культуры представлено в работе В.С. Библера: «Культура – это изобретение «мира впервые».

В понимании культуры мы отдаем предпочтение ее философской трактовке, предложенной М.С. Каганом. Такой подход позволяет рассматривать культуру в единстве с человеком и его деятельностью, т.е. во всей их реальной полноте.

Культура инженера-педагога представляется нам в виде системного образования и определяется ведущим видом его деятельности. Выражаясь математической терминологией, направленность деятельности специалиста обуславливает приоритет педагогической культуры и является необходимым условием качества образования вышеозначенного специалиста. Однако немаловажное значение имеет формирование также технологической культуры, которая определяется характером деятельности и её формирование является достаточным условием качества образования.

Технологическая культура инженера-педагога – это подсистема педагогической культуры, рассмотренной в контексте обучения и воспитания. Она взаимосвязана с другими видами культур, например, гностической и проектной. Однако в отличие от гностической культуры, где основной акцент сделан на получении новых технологических знаний, технологическая культура актуализирует сферу их практического применения. При этом не исключаются сами знания и процесс их получения с целью повышения эффективности обучения. Совпадая по многим параметрам с проектной культурой, технологическая культура обеспечивает сопряжение всех позиций инновационно – педагогической деятельности и усиление их в результате коммуникативного взаимодействия субъектов педагогического процесса.

Такое понимание технологической культуры инженера-педагога позволило сформулировать ряд ее специфических функций:

- рационально – праксиологическую (здесь в концентрированном виде представлены эффективные, проверенные экспертами средства обучения, а также способы и средства педагогических практик);
- дидактическую (организационно – упорядочивающую);
- описательно – объяснительную (объяснение и описание сущности и преобразований процесса обучения);
- прогностическо – управленческую (управление и коррекция процесса обучения путем создания надлежащих условий и критериев оценивания);
- коммуникативно – трансляционную (обмен продуктами и процедурами инновационно – методической деятельности).

Во всех образовательных системах сегодня оценке и ее процедуре придается все возрастающее значение. Это неудивительно, поскольку оценка, как предполагается, позволяет студентам, работодателям, учреждениям, руководству системы образования политической власти и всему обществу оценить, в виде эффективности и успеваемости – используя терминологию “качество” – результаты образования. Проблема заключается лишь в том, что оценивать. [3]

Мы полагаем, что оценивать необходимо, прежде всего, уровень культуры того или иного специалиста.

Поскольку технологическая культура инженера-педагога наиболее ярко отражает специфику его подготовки, обратимся именно к ней.

Современные исследователи систем инновационной подготовки специалистов гуманитарной сферы (И.И. Цыркун, 2000) в качестве количественной оценки индивидуальной инновационной культуры применяют интегральные показатели [2, с. 83]. Но поскольку технологическая культура инженера-педагога на макроуровне является амбивалентной, содержит в себе элементы стохастического и предполагает неоднозначность интерпретации профессиональных проблем, то эти показатели будут справедливы и для нее:

$$G_i = \frac{A_i + B_i + C_i + D_i}{4},$$

где G_i – кумулятивный индекс технологической культуры инженера-педагога; A_i – индекс личностного развития; B_i – индекс осведомленности в области промышленных и педагогических технологий; C_i – индекс сформированности технологического мышления; D_i – индекс методического произведения.

Показатель **личностного развития** студента предполагает проявление адекватных педагогической деятельности технологических предпочтений и личностных свойств.

Осведомленность оценивается по наличию у студентов необходимого объема методологических и предметных знаний в сфере технологической культуры.

Показатели **технологического мышления** проявляется в степени сформированности у студента интеллектуальных и практических технологических умений и включенных в структуру профессионально-педагогического мышления инженера-педагога.

Методическое произведение оценивается по выраженности в нем аксиологического, гносеологического, проективного, управленческого, инновационного потенциалов.

Каждый из частных индексов измеряется в интервале от 0 до 1. Следует заметить, что при осуществлении количественной оценки индивидуальной технологической культуры специалиста идеальным бы явилось отражение в кумулятивном индексе всех ее элементов на разных уровнях.

Значение кумулятивного индекса технологической культуры инженера-педагога, а также качественные характеристики стали определяющими при выделении ее уровней: **докультурного, формального, начального, нормативного, самоорганизации, протокультурного.**

Соотношение значения кумулятивного индекса технологической культуры инженера-педагога, ее уровней и качественных характеристик отображено в табл. 1 и 2.

**Соотношение уровней и кумулятивного индекса
технологической культуры инженера-педагога**

| Уровень технологической культуры инженера-педагога | Значение кумулятивного индекса |
|--|--------------------------------|
| 1. Докультурный | $G < 0,2$ |
| 2. Формальный | $0,2 < G < 0,4$ |
| 3. Начальный | $0,4 < G < 0,6$ |
| 4. Нормативный | $0,6 < G < 0,8$ |
| 5. Самоорганизации | $0,8 < G < 1$ |
| 6. Протокультурный | $G < 1$ |

Таблица 2

Характеристика уровней технологической культуры инженера-педагога

| Отношение к деятельности | Уровень знаний и интерпретация составляющих культурной традиции | Степень сформированности технологического мышления | Методические новшества |
|--|---|---|---|
| 1. Индифферентное или отрицательное | Отрывочные знания | Не сформировано | Не применяет и не создаёт |
| 2. Осознание значения деятельности | Фрагментарные знания | Неразвитое конвергентное | Эмпирические новшества на интуитивной основе |
| 3. Устойчивый интерес к культурной традиции | Применение в стандартных ситуациях | Преобладающее конвергентное | Единые научные обоснования (тезисы доклады, методические рекомендации) |
| 4. Целенаправленное изучение культурной традиции | Уровень аналитико-синтетической деятельности | Проявление дивергентного мышления (комбинирование) | Комбинаторные научные обоснования, наличие рефлексии (статьи, методич. пособия) |
| 5. Наличие собственных интересов, убеждений, установок в области производственных технологий | Уровень синтетической деятельности | Органичное сочетание дивергентной и дивергентной составляющих | Конфигуративные научные обоснования с высоким уровнем рефлексии, обладают научной новизной (статьи, монографии, учебники) |
| 6. Наличие собственной инновационной парадигмы | Уровень рефлексии культурной традиции | Высокий уровень креативности мышления | Метапроизведения, формирование новых инновационных проблем, средств их решения, критериев оценки |

Технологическая культура отражает в себе всю совокупность процессов, осуществляемых в системе подготовки инженерно-педагогических работников, поэтому чрезвычайно важным становится её дидактический статус как источник обоснования и средства осуществления профессионально-педагогической деятельности в высшей технической школе.

Технологическая культура инженера-педагога является содержательным обобщением разрозненных знаний в сфере его профессиональной деятельности.

Фонд технологической культуры выполняет праксиологическую функцию по отношению к организации эффективного обучения в техническом вузе. Перечисленные выше аргументы позволяют рассматривать технологическую культуру как системообразующий компонент культурно – праксиологической концепции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шишов С.Е., Кальней В.А. Мониторинг качества образования в школе. – М.: Российское педагогическое агентство, 1998. – 354с. 2. Цыркун И.И. Система инновационной подготовки специалистов гуманитарной сферы. – Мн.: Тэхналогія, 2000. – 326 с. 3. Оценка и аттестация кадров за рубежом / Под редакцией Ю.Р. Алфёрова и В.С. - Лазарева. – М.: 1997.– 145 с.

УДК 378.1.147

Е.П. Дирвук

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ПОДХОДЫ К ОТБОРУ СОДЕРЖАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ ИНЖЕНЕРОВ-ПЕДАГОГОВ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Реформа высшей школы нацелена на удовлетворение потребностей общества, современного производства и научно-технического прогресса. К числу её приоритетных задач сегодня относят уточнение образовательных целей и приведение в соответствие содержания образования.

В техническом вузе это уточнение предполагает :

- упорядочение и профессиональную направленность технологической информации;
- её обновление путём интеграции и компрессии;
- преодоление технократизма в обучении путём его гуманизации, гуманитаризации и демократизации.

О принципиальном значении чёткой постановки дидактических целей свидетельствуют работы многих учёных (И.С. Якиманская, 2000 г.). Она заостряет внимание на

том, что «нельзя менять содержание образования, оставляя прежними его цели и функции». Очевидно несоответствие традиционных целей образования как познания мира только через информацию (при её постоянном росте и интенсивном обновлении) и новых задач образования, опирающихся сегодня не только на опыт научного познания.[5, с.11]

Современные исследователи (Э.М. Калицкий, 1996г.) справедливо отмечают, что «существующее противостояние профессионального и гуманитарного образования имеет корни в философской доктрине гуманизма».[2, с.31]

Движение гуманизма, которое лежит в основе современной цивилизации, зародилось в эпоху Возрождения. Эта философская школа превыше всего ставила нравственно-эстетические ценности и существенно повлияла на дальнейшее развитие и структуру образования. Её некоторые идеи сохранились до наших дней. Одна из них гласит, что настоящая культура и соответствующее ей образование не должны иметь утилитарных свойств и связей с материальной сферой. Поэтому в обыденном понимании культура – это система проявления лишь духовной жизни человека или эпохи и подразумевает, прежде всего, искусство, литературу и философию.

Понятие культура происходит от латинского «cultura» – что означает возделывание, обрабатывание земли с целью повышения её плодородия. В своём первоначальном смысле культура связывалась с материальной деятельностью человека и продуктов его деятельности.

В настоящее время производственные технологии органично входят в структуру культуры. Жизнь миллионов людей связана с техникой, разумным или нерациональным использованием промышленных технологий.

Справедливы, однако, опасения гуманистов, считающих, что перенос принципов и методов организации производства в сферу управления образовательным процессом способствует его технократизации – превращение обучаемого в объект управления и манипулирования.

Современное инженерное образование предполагает глубокую интеграцию гуманитарных и специальных знаний, которая бы обеспечивала необходимую многосторонность личностного развития студентов.

В условиях рыночной экономики значительно повышаются требования к качеству подготовки специалистов всех уровней. Высшая школа не является исключением. Отличительной особенностью профессиональной подготовки инженеров-педагогов следует считать её принадлежность к системе подготовки кадров, обеспечивающей адаптацию будущего специалиста к современным условиям производства и оперативно реагирующей на изменения конъюнктуры рынка образовательных услуг. Кроме того, многозначность профессиональной подготовки обуславливает сочетание в ней технологической и педагогической культур.

Развитие производственной сферы и сферы образовательных услуг обостряют противоречия, которые можно охарактеризовать как квалификационные противоречия [1]:

1. Система профессионального образования не успевает быстро реагировать на современные процессы на рынке труда из-за недостаточного образовательного уровня работающих специалистов, обнаруживая несоответствие между требованиями государства, общества и производства, предъявляемые к профессиональному уровню профессиональных педагогов, и возможностями их выполнения существующим корпусом инженерно-педагогических работников.

2. В новых условиях обостряется противоречие между существующей потребностью в высококвалифицированных кадрах профессиональных педагогов и возможностью обеспечить масштабы такой подготовки в вузах республики.

3. Конкуренция на рынке образовательных услуг приводит к экономическим диспропорциям: популярности одних профессий и непрестижности других, являющихся профессиями ключевых отраслей экономики, противоречию между общественной значимостью ряда профессий и их непривлекательностью для населения.

4. Динамизм рыночных отношений входит в противоречие с консерватизмом образовательных структур, призванных заниматься подготовкой и переподготовкой кадров для рынка труда, порождённым людьми, профессионализация которых проходила в иных условиях, а также отсутствием капитальных вложений в реорганизацию материально-технической базы учебных заведений.

5. Нуждается в обновлении содержание, формы и методы технологического образования инженеров-педагогов. Современная парадигма профессионального образования является лично-ориентированной (антропоцентрический принцип) и гуманизированной. Назрела необходимость:

- в либерализации содержания, предполагающей формирование учебных планов и программ внутри образовательного учреждения;
- в интегративности содержания, пришедшей на смену примитивизму межпредметных связей;
- в актуализации технологической подготовки, т.е. органической взаимосвязи теоретического и практического обучения.

Непосредственной задачей профессиональной подготовки инженеров-педагогов является обеспечение профессионально-образовательных учреждений такими специалистами, которые в состоянии организовывать и осуществлять необходимую фундаментальную, общетехнологическую и специальную технологическую подготовку по актуальным образовательным направлениям и профессиям.

Процесс обновления содержания технологического образования инженера—педагога в техническом вузе ориентирован на современные и перспективные отраслевые производственные технологии, а в педагогическом – на частные методики, направленные главным образом на рецептурное обучение [1].

Проблема содержания образования (чему учить?) является наиболее сложной в дидактике средней и высшей школы. Она обсуждалась в работах С.А. Архангельско-

го, Ю.К. Бабанского, В.С. Безруковой, М.В. Кларина, В.В. Краевского, В.С. Леднева, И.Я. Лернера, В. Оконя, В.А. Сластенина, А.М. Сохора и др. Их анализ показал, что в этой области решаются две основные задачи: определение теории содержания и установление определённых норм по его построению.

К наиболее значимым в дидактике теориям содержания образования относят следующие: энциклопедизма (Я.А. Коменский, Дж. Мильтон), дидактического прагматизма (Дж. Дьюн, Г. Кершенштейнер), проблемно-комплексная теория (Г. Суходольский), структурализма (К. Сосницкий), экземпляризма (Г. Шейерлем), функционального материализма (В. Оконь), комплексного усвоения социального опыта (И.Я. Лернер), структурного единства на разных уровнях содержания образования, а также предметно-научной и процессуальной целостности (В.В. Краевский), оптимизации содержания образования (Ю.К. Бабанский). Каждая из перечисленных выше концепций имеет свои сильные и слабые стороны. Например, теория энциклопедизма ориентирована на объём усвоенных субъектом знаний, их особую значимость в обучении, игнорируя уровень их осмысления; с позиции теории формального обучения образование рассматривается как средство развития познавательных способностей обучаемых, принижая значение жизненно важной информации.

Проблема целостной теории содержания образования и процесса обучения с позиции системно-деятельностного подхода рассматривалась в работах В.В. Краевского.

Многообразие концепций, относящиеся к отбору содержания свидетельствует о сложности проблемы. Неопределённый характер содержания образования подчёркивался В. Оконею. Он писал: «...мы должны согласиться с тем, что это содержание до некоторой степени произвольно и зависит от теоретической концепции системы обучения, на которую опираются создатели программ, от школы и от социально-политических условий данного государства». [3, с.94]

Содержание технологического образования инженеров-педагогов нами трактуется как система научных знаний, интеллектуальных и практических умений, овладение которыми обеспечивает профессиональное развитие и саморазвитие личности студентов, включая потребность использовать дидактические нововведения для овладения основами профессионального мастерства.

Формирование содержания технологического образования инженеров-педагогов опирается на определённую совокупность принципов отбора необходимой информации. Они определяются : технологической культурой, канонической технологической деятельностью, логикой развёртывания деятельности; спецификой процесса технологического образования как целостного педагогического явления; своеобразия субъектов педагогического процесса формирования технологического образования, их возможностей и предпочтений.

Принцип **междисциплинарности** подчёркивает широкий контекст отбора содержания, его интегративность с различными научными дисциплинами.

Принцип **фундаментальности** содержания определяет приоритет более универсальных и информативных элементов содержания, абсолютно необходимых для раскрытия сущности теории и практики производственных технологий, а также знаний и умений, обеспечивающих эффективное и наиболее рациональное решение типовых профессиональных задач.

Принцип **востребованности**, соответствия потребностям рынка образовательных услуг указывает на необходимость и своевременность изучения данного содержания, обсуждения технологических проблем и современных дидактических нововведений. Этот принцип отражает динамизм и открытость содержания технологического образования, зависимость его от времени, конкретных условий и обстоятельств.

Принцип **верифицируемости** позволяет оценить технологичность педагогической подготовки на предмет её научного и практического значения, её связи с жизнью, практикой обучения предметам общей и специальной технологии в техническом вузе.

Принцип **дифференциации** предполагает определение объёма и глубины подготовки в соответствии с её видами: базовой (согласно образовательному стандарту), расширенной и углубленной (в зависимости от потребностей и возможностей студентов).

Любые дидактические нововведения предполагают должное научное обоснование, которое выполняет функцию теории эффективного обучения. Для выявления минимального, но достаточного количества источников научного обоснования необходимо осуществить их классификацию и определить приоритеты с учётом специфики предмета.

В этом плане представляется убедительной концепция И.И. Цыркуна, который выделяет следующие источники научного обоснования нововведения: предметные, психофизиологические, дидактико-методические и непедагогические [4, с. 132].

Для научного обоснования проектируемой модели технологического образования инженеров-педагогов в техническом вузе помимо предметных мы выделяем следующие виды источников (табл. 1)

Таблица 1

Приоритетные источники научного обоснования модели технологического образования инженеров-педагогов.

| Типы научного обоснования | Доминирующие источники научного обоснования |
|---------------------------|--|
| Общенаучные | Деятельностный, системный, синергетический подходы |
| Психофизиологические | Теория функциональных систем П.К. Анохина, концепция развивающего обучения (Дж. Брунер, П.Я. Гальперин, Л.С. Выготский) |
| Дидактико-методические | Управление дидактической системой (В.П. Беспалько), укрупнение дидактических единиц усвоения (П.М. Эрдниев, Б.П. Эрдниев) |
| Непедагогические | Кибернетика, логика, проблемология |

ЛИТЕРАТУРА

1. Жученко А.А., Романцев Г.М., Ткаченко Е.В. Профессионально-педагогическое образование России. Организация и содержание. – Екатеринбург: Изд-во Урал. гос. пед. ун-та, 1999.– 234 с.
2. Калицкий Э.М. Профессия. Профессиология и профессиональное образование: методологические аспекты – Мн.: РИПО, 1996.– 37 с.
3. Оконь В. Введение в общую дидактику.- М.: Высшая школа, 1990.– 381 с.
4. Цыркун И.И. Система инновационной подготовки специалистов гуманитарной сферы. – Мн.: Тэхналогія, 2000.– 326 с.
5. Якиманская И.С. Технология личностно-ориентированного обучения в современной школе – М.: Сентябрь, 2000.– 176 с.

УДК 371.3

П.А. Палазков

ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПЕДАГОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ: МОДЕЛЬНОЕ ВИДЕНИЕ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

1. Введение

Одним из направлений развития национальной образовательной системы является диверсификация образования. Она дает каждому человеку возможность строить свою личностно-значимую образовательную траекторию и профессиональную карьеру. Мы являемся свидетелями становления новых многофункциональных и многопрофильных учебных заведений, разрабатывающих собственные образовательные модели и учебные программы, внедряющих новаторские педагогические технологии в процесс обучения. Проектирование образовательных систем является сложной и ресурсоемкой работой, требующей высокой квалификации участвующих в ней специалистов. До сих пор системная подготовка профессиональных проектировщиков для сферы образования не велась, поэтому на практике проектирование педагогических систем выполняется на интуитивном уровне неформализованными методами. Все это приводит к разработке педагогических систем, не отвечающих потребностям субъектов обучения и современным тенденциям развития педагогического знания, культуры и технологий. В этой связи особую актуальность приобретает методологический аспект проблемы проектирования высокотехнологических образовательных систем.

Объектно-ориентированная парадигма зарекомендовала себя в качестве одно из универсальных и эффективных решений проблемы проектирования высокоорганизованных систем. Целью данной работы является рассмотрение основных идей и поло-

жений проектирования высокотехнологических педагогических систем (ВПС) в рамках объектно-ориентированного подхода (ООП).

2. Методологические аспекты анализа высокоорганизованных структур

Проблема педагогического проектирования образовательных систем все чаще попадает во внимание отечественных и зарубежных исследователей и практиков. Актуальность разработки методологических основ проектирования в контексте проблем развития образовательных систем озвучена в трудах Н.Г.Алексеева, О.С.Анисимова, О.И.Генисаретского, Г.П.Щедровицкого, Ю.В.Громыко, Н.А.Масюковой, Б.В.Пальчевского и др. В нашей республике по результатам проектировочной деятельности в различных сферах образования защищены диссертации Л.К.Волченковой, С.А.Крупник, Н.А.Сидоровича, Л.С.Смотрицкого и др. Авторы, выступая с позиций системного подхода, исследуют теоретические основы проектирования и синтезируют свои проекты развития образовательной практики.

В то же время проведенный анализ литературы по данной проблематике показал, что большинство концепций педагогического проектирования или недостаточно технологичны, излишне абстрактны и декларативны, или же слишком привязаны к конкретной предметной области.

В первую очередь, данная проблема связана со сложностью педагогических систем как предмета проектирования. Высокая организация систем, динамичность их связей являются существенными, а не второстепенными свойствами социокультурных систем. Попытки анализа этих систем при абстрагировании сложности, приводят к абстрагированию их сущности. Использование заведомо ограниченных аналитических моделей вынуждает исследователя ориентироваться на простые и статичные схемы реконструкции целого из его частей. В силу этого свойства и особенности познаваемых явлений и процессов, отражающие сложные взаимосвязи частей целого (а также целого и его частей с их окружением), остаются вне рамок педагогических конструкций.

В этой связи все более четко стала проявляться потребность в методах, способах и приемах, альтернативных системному анализу. Сейчас разрабатываются новые концептуальные платформы методологических установок и технологий научного анализа: методы исследования сложности процессов в открытых нелинейных средах, методология симметрии и суперсимметрии, объектно-ориентированный подход, теория решения изобретательских задач, концепция времени как пространства для событий и др. Все они сходятся на общем представлении о единстве разных качеств объекта анализа [1].

3. Концептуальные основы объектно-ориентированного подхода

Одной из перспективных парадигм анализа и проектирования высокоорганизованных систем в настоящее время выступает объектно-ориентированный подход ООП. Подход был разработан с целью преодоления барьера между высоким уровнем абст-

реакции модели и низким уровнем абстрагирования на уровне реализации. Сейчас ООП является ведущей теоретико-методологической основой научно-познавательной и создающей деятельности в сфере программной инженерии.

Общепризнанная трактовка ООП опирается на категории объект, свойства объекта, класс, метод, наследование и полиморфизм [2]. Под объектом понимается некоторая сущность, представленная в форме единой структуры ее свойств. Свойства объекта определяются состоянием, поведением и индивидуальностью объекта. Состояние объекта характеризуется перечнем всех возможных (статических) свойств данного объекта и текущими (динамическими) значениями каждого из этих свойств. Поведение объекта определяется его воздействием на другие объекты (и наоборот) относительно изменения состояния этих объектов и передачи сообщений. Индивидуальность – это свойства объекта, отличающие его от других объектов.

Определенное воздействие одного объекта на другой с целью вызвать соответствующую реакцию называется операцией (методом). Классом определяется как совокупность объектов, связанных общностью структуры и поведения. Наследование означает построение новых классов на основе существующих с возможностью добавления или переопределения данных и методов. Способность класса принадлежать более чем одному типу определяется как полиморфизм. Множество объектов разных классов, связанных определенными отношениями и взаимодействующих друг с другом посредством обмена сообщений, составляют объектную модель системы.

Объектно-ориентированная система изначально строится с учетом ее эволюции. Наследование и полиморфизм обеспечивают возможность определения новой функциональности классов с помощью создания производных классов – потомков класса. Потомки наследуют характеристики родительских классов без изменения их первоначального описания и добавляют собственные структуры и методы. Определение производных классов, при котором задаются только различия и уточнения, значительно экономят время и усилия на стадии разработки системы.

Концепция ООП предусматривает принципы анализа (декомпозиции) системы на объекты. Г.Буч выделяет четыре главных принципа: абстрагирования (abstraction), ограничения доступа (encapsulation), модульности (modularity), иерархии (hierarchy), а также три дополнительных: типизации (typing), параллелизма (concurrency) и устойчивости (persistence) [2]. Исследование высокоорганизованных систем или разработка сложных прототипов предполагает комплексное и многократное использование методологических принципов и приемов ООП. Сейчас происходит развитие объектно-ориентированной методологии, внедряются международные стандарты на технологию проектирования и разрабатываются спецификации типичных архитектур объектных систем и их компонентов.

4. Архитектура ВПС

В любой дисциплине под проектированием обычно понимается некий унифицированный подход, с помощью которого мы ищем пути решения определенной проблемы, обеспечивая выполнение поставленной задачи. По предположению Г.Страуструпа: «Цель проектирования – выявление ясной и относительно простой внутренней структуры, иногда называемой архитектурой... Проект есть окончательный продукт процесса проектирования» [3]. Его продуктами являются модели, позволяющие нам понять архитектуру будущей системы, сбалансировать требования и наметить схему реализации.

Множество организаций во всем мире совершенствуют свои модели и предлагают авторские архитектуры педагогических систем [4]. Наиболее авторитетной организацией, чьи разработки определили деятельность Американского национального института стандартизации (ANSI) в данном направлении, является Институт инженеров по электротехнике и электронике США (IEEE). Следует отметить, что комплекс стандартов IEEE находится в постоянном обновлении и развитии, а рабочие версии документов свободно распространяются и обсуждаются в обществе.

Ключевым документом, определяющим архитектуру ВПС, является стандарт Learning Technology Systems Architecture (LTSA, IEEE P1484.1/6). Именно он устанавливает методологию, рамки, уровни и компоненты модели ВПС как конечного продукта проектирования, приводит основные нотации. Другие стандарты группы IEEE P1484 уточняют спецификации компонентов системы [5].

Однако, несмотря на универсальность LTSA, проблемы педагогического проектирования компонентов ВПС вышли за рамки рассмотрения стандартов и требуют дальнейшей проработки.

5. Модель педагогического проектирования ВПС

К настоящему времени наибольшее распространение получили три модели проектирования и разработки систем: каскадная модель, модель с промежуточным контролем и спиральная модель [6].

Принципиальное отличие каскадной модели заключается в линейной направленности процесса проектирования системы: переход на последующий этап осуществляется после полного завершения работ на текущем. Результаты последнего служат в качестве исходных данных для следующего этапа. Критерием качества разработки системы является точность выполнения спецификаций технического задания каждого этапа.

На практике реальный процесс проектирования редко укладывается в жесткие рамки каскадной модели, поэтому чаще применяется модель с промежуточным контролем. В этом случае результаты очередного этапа могут вызывать изменения или уточнения в проектных решениях предыдущих этапов. Пример модели педагогического проектирования с промежуточным контролем приведен в работе [7]. Автор вы-

деляет следующие стадии проектирования: анализ социокультурной ситуации (фиксация потребности), предпроектное проектирование (постановка задачи, составление задания на проектирование); концептуальное проектирование (разработка модели специалиста и его подготовки); процессуальное проектирование (разработка технологии обучения), программирование (планирование обучения, составление карты ресурсов), функционирование и оценка проекта. Межстадийные связи, предусмотренные автором, обеспечивают большую надежность по сравнению с каскадной, хотя и увеличивают период разработки.

Главным недостатком вышеназванных моделей является высокий риск создания системы, не адекватной изменениям во внешней среде или требованиям пользователей (спецификации системы фиксируются на весь период разработки, а изменения допускаются только после завершения работы над системой). Для преодоления данной проблемы необходимо применение спиральной модели проектирования, с использованием метода прототипирования (рис. 1).

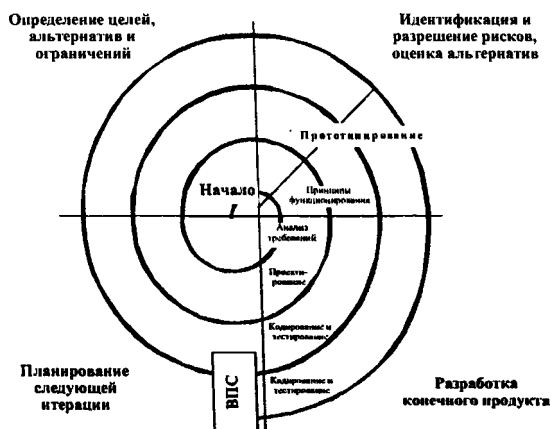


Рис. 1. Спиральная модель педагогического проектирования VPC

Под прототипом понимается действующий компонент системы, реализующий отдельные функции разрабатываемой системы. Создание прототипов осуществляется в несколько итераций (витков спирали). Каждая итерация соответствует созданию фрагмента системы или ее варианта. Во время итерации уточняются цели и характеристики проекта, оценивается качество полученных результатов, планируется работа следующей итерации, степень полноты требований к системе, а также целесообразность прекращения проекта. Неполное завершение работ на каждой стадии позволяет переходить на следующую, т.к. ее можно будет выполнить во время следующей ите-

рации. Главная задача итерации – как можно быстрее предоставить пользователям продукт, чтобы активизировать процесс уточнения и дополнения требований. Таким образом педагогический конструкт, эволюционируя в течение ряда итераций, углубляется и насыщается деталями.

Объектно-ориентированная архитектура, заложенная в LTSA, упрощает декомпозицию системы и способствует снижению затрат на подготовку прототипов системы за счет повторного использования объектных компонентов ВПС, а спиральная модель позволяет эффективно распределять ресурсы проекта в течении эволюции системы и добиваться высокотехнологичной организации труда субъектов проектирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Деревянко А.П., Холюшкин Ю.П., Воронин В.Т. и др. Математические методы в археологических реконструкциях. – Новосибирск: Сиб. отд-ние, 1995. – 256 с. (<http://x.archaeology.nsc.ru/Home/pub/index.html?id=210>). 2. Буч Г. Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений на С++. – М.: "Изд-во Бином", 1998. – 560 с. 3. Страуструп Б. Язык программирования С++. – СПб: "Невский диалект", 1999. – 1009 с. 4. Международные стандарты по технологиям обучающих информационных систем (http://dl.nw.ru/stand_home.htm). 5. IEEE LTSC Drafts & Documents (<http://ltsc.ieee.org/doc/index.html>). 6. Вендров А.М. Проектирование программного обеспечения экономических информационных систем: Учебник. – М.: Финансы и статистика, – 2000. – 352 с. 7. Волченкова Л.К. Научно-методическое обеспечение процесса педагогического проектирования многоступенчатой подготовки специалистов. – Мн.: Нац. ин-т образования, 1999. – 284 с.

УДК 371.3

П.А. Палазков

ОРГАНИЗАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗРАБОТКИ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

1. Введение

Прогрессирующая информатизация общества и связанное с ней широкое распространение вычислительной техники, современных средств коммуникации и методов обработки информации предлагают новые возможности для реализации высокотехнологических систем дистанционного обучения (ВСДО). Данные системы, основанные на технологически опосредованном информационном взаимодействии субъектов

образовательного процесса вне зависимости от времени и пространства, интегрируют распределенные информационные ресурсы в высокоорганизованную гипермедиа среду. Разработка гипермедиа сред ВСДО требует привлечения высококвалифицированной рабочей силы, большого количества материально-технических и информационных ресурсов, организации их в сложную совокупность взаимосвязанных работ, жестко регламентируемых во времени. В этой связи приобретает актуальность организационно-методический аспект проблемы разработки ВСДО.

В данной работе рассматриваются основные идеи и положения об организации разработки ВСДО на основе концепции унифицированного процесса проектирования гипермедиа систем.

2. Методологические аспекты разработки гипермедиа сред

Современные гипермедиа среды представляют собой высокоорганизованные программные совокупности, которые обладают определенным содержанием, характеризуются гиперпространственной структурой связей и снабжены компонентами пользовательского интерфейса [1]. Существенным этапом жизненного цикла гипермедиа как программируемой информационной системы является стадия разработки. Согласно международному стандарту ISO/IEC процесс разработки программного обеспечения (ПО) включает: подготовительный этап, анализ требований к системе, проектирование архитектуры системы на высоком уровне абстракции, анализ требований к ПО, проектирование архитектуры ПО, детальное проектирование ПО, кодирование и тестирование компонентов ПО, интеграцию компонентов ПО, квалификационное тестирование, интеграцию системы, установку и приемку системы [2].

Высокая сложность анализа и проектирования современных гипермедиа сред привела к появлению ряда методологических установок, специфичных для данной области программной инженерии. В последние годы зарубежными исследователями активно развиваются концепции, способствующие пониманию гипермедиа архитектуры и определению схем их реализации. Наибольшее распространение получили Hypermedia Design Method, Relationship Management Methodology, Araneus, HDM Lite, Web-based Intelligent Information Infrastructure Object-Oriented Hypermedia Design Method, Unified Process of Hypermedia Design, методы Баумистера и Конналена [3].

Последние аналитические исследования и обзоры деятельности компаний в области программных разработок показали, что наиболее технологичными являются программные продукты, выполненные на основе объектно-ориентированной парадигмы анализа и проектирования информационных систем [4]. В первую очередь это связано с тем, что объектная декомпозиция системы существенно повышает уровень унификации компонентов системы и позволяет перейти от трудоемкого программирования алгоритмических структур к высокотехнологичной объектной сборке системы. Кроме того, применение данного подхода допускает эволюционный путь развития системы

на базе относительно независимых объектных подсистем, что уменьшает риск создания громоздких конструкций, не адекватных изменениям во внешней среде или в требованиях пользователей.

В этой связи весьма многообещающей концепцией в контексте разработки ВСДО, на мой взгляд, является объектно-ориентированная концепция унифицированного процесса разработки гипермедиа сред UPHD (Unified Process of Hypermedia Design) [5].

3. Унифицированный процесс разработки гипермедиа сред UPHD

Концепция UPHD описывает весь жизненный цикл гипермедиа сред, начиная от этапа принятия решения о разработке и заканчивая снятием среды с эксплуатации. В то же время она акцентирует внимание на технологических аспектах разработки гипермедиа сред.

В основе UPHD лежит унифицированный процесс разработки ПО с использованием методики построения прототипов. Согласно ему, разработка ПО носит эволюционный характер и осуществляется на протяжении ряда циклов: начального (inception), уточняющего (elaboration), конструирующего (construction), тестирующего (transition) и сопроводительного (maintenance). Итеративность данной концепции заключается в том, что в течение каждого цикла проводится анализ, планирование, проектирование, разработка, внедрение и оценка качества текущего прототипа системы. Разработчики, пройдя один из циклов, реализуют версию прототипа системы и оказываются у истоков следующего итеративного цикла; оценивают полученные результаты и риски, связанные с возможным переходом на следующую итерацию; составляют план производственных работ и снова приступают к реализации всех этапов созидательной деятельности, но уже на более детализованном уровне. UPHD предполагает итерационную разработку гипермедиа сред при взаимодействии одновременно протекающих процессов разработки, управления и обеспечения качества проекта (рис. 1) [5].

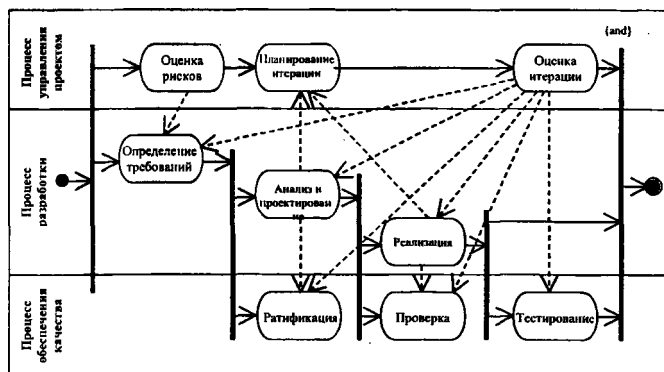


Рис. 1. Итеративная модель UPHD

Концепция UPHD отличается технологичностью, так как регламентирует все стадии процесса разработки (phases), четко определяет роли участников процесса (workers) и фиксирует продукты их деятельности (artifacts). Диаграммы деятельности субъектов проектирования UPHD (activity diagrams) выполнены с учетом нотаций универсального языка моделирования UML (Unified Modeling Language) и дают адекватное представление об итеративном, эволюционном характере разработки гипермедиа среды. Следует отметить, что UML является перспективным стандартом в области моделирования бизнес-процессов. На данный момент уже имеется достаточное количество инструментальных CASE-средств (Computer Aided Software Design), напрямую поддерживающих UML-абстракции или допускающих импорт/экспорт моделей данного типа.

4. Организационно-методические аспекты процесса разработки ВСДО

Одним из перспективных способов реализации UPHD является быстрая разработка приложений RAD (Rapid Application Development) [6]. В контексте разработки ВСДО, она предусматривает:

- использование итеративно-прототипной модели разработки;
- вовлечение пользователей в процесс разработки;
- применение CASE-средств, обеспечивающих целостность проекта;
- использование генераторов программного кода;
- тестирование и развитие проекта, осуществляемые одновременно с разработкой;
- организацию субъектов проектирования в небольшие группы, выполняющие работы по проектированию отдельных компонентов ВСДО;
- грамотное руководство разработкой системы, четкое планирование и контроль выполнения работ.

Команда разработчиков ВСДО представляет собой группу профессионалов, имеющих опыт в проектировании, программировании и тестировании гипермедиа компонентов. Разработчики должны уметь эффективно взаимодействовать с экспертами предметной области и пользователями системы, быстро трансформировать их предложения в рабочие прототипы системы. В зависимости от стадии, в группу входят: системный архитектор, гипермедиа аналитик, разработчик пользовательского интерфейса, гипермедиа дизайнер, гипермедиа инженер, разработчик текста, мультимедиа дизайнер, гипермедиа инженер, системный интегратор. Для успешной реализации технологии разработки ВСДО (табл. 1) необходима четкая координация проекта, исключающая дублирование результатов работ рабочих групп.

На начальной стадии проекта эксперты предметной области (методисты, администраторы, преподаватели) и разработчики системы совместно определяют функции, которые ВСДО должна выполнять, выделяют наиболее приоритетные из них, описывают информационные потребности. На данной стадии ограничивается масштаб про-

Таблица 1

Технология разработки ВСДО

| Стадия | Цель | Субъекты | Деятельность | Продукты |
|-------------------------|--|---|--|--|
| ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ | <p>Определение нефункциональных и функциональных потребностей</p> | <ul style="list-style-type: none"> - архитектор - эксперт предметной области - гипермедиа аналитик - разработчик пользовательского интерфейса - пользователи | <ul style="list-style-type: none"> - классификация пользователей системы - определение информационных потребностей - определение навигационных потребностей - определение ресурсного оснащения проекта - определение характера пользовательского интерфейса - распределение обязанностей участников проекта - определение приоритетов проекта - анализ поведения системы - составление словаря предметной области | <ul style="list-style-type: none"> - профиль пользователя - описание содержания - сценарии - диаграммы вариантов использования - архитектура системы (высокий уровень абстракции) - производственный план - глоссарий предметной области |
| АНАЛИЗ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ | <p>Преобразование потребностей в семантическую структуру, описывающую процесс разработки системы</p> | <ul style="list-style-type: none"> - архитектор - эксперт предметной области - гипермедиа дизайнер - гипермедиа инженер - пользователи | <ul style="list-style-type: none"> - концептуальный дизайн - навигационный дизайн - разработка элементов оформления данных - архитектурный дизайн - уточнение проектируемых классов - определение поджестов и интерфейсов | <ul style="list-style-type: none"> - концептуальная модель (классы, атрибуты, связи, иерархия, зависимости объектов) - навигационная модель (классы объектов, их структура, содержание, доступность) - модель представления данных (статическая и динамическая) - спецификации архитектуры (подсистемы, интерфейсы, проектируемые классы объектов) |
| РЕАЛИЗАЦИЯ | <p>Преобразование спецификаций в программный код</p> | <ul style="list-style-type: none"> - архитектор - эксперт предметной области - гипермедиа дизайнер - гипермедиа инженер - системный интегратор - пользователи | <ul style="list-style-type: none"> - программирование архитектуры - обеспечение содержания - программирование гипермедиа структур - программирование пользовательского интерфейса - разработка плана интеграции компонентов - интеграция компонентов | <ul style="list-style-type: none"> - модель программного кода компонентов - модель размещения данных (архитектура системы (низкий уровень абстракции)) - план интеграции системных компонентов - содержание - гиперпространственная структура - пользовательский интерфейс - гипермедиа система |

екта, определяются временные рамки для каждой из последующих стадий и оценивается возможность реализации проекта. Результатом данной стадии должны быть списки функций и приоритетов будущей системы, предварительные информационные модели. При разработке высокоуровневой модели архитектуры ВСДО следует руководствоваться стандартом LTSA [7].

На стадии анализа и проектирования эксперты и пользователи системы под руководством специалистов-разработчиков принимают участие в техническом проектировании системы. На данном этапе CASE-средства используются для быстрого получения работающих прототипов и устранения недопонимания субъектов проектирования. Пользователи, непосредственно взаимодействуя с прототипами, уточняют и дополняют требования к системе, которые не были выявлены на предыдущей стадии. Разработчики, в свою очередь, трансформируют эти требования в UML модели, разрабатывают концептуальный и навигационный дизайн, составляются спецификации архитектуры системы. Здесь же осуществляется декомпозиция системы на объектные компоненты, поддающиеся реализации одной командой разработчиков за приемлемое время. Применение CASE-средств и нотаций UML помогает определить сферы разработки системы, распределить обязанности между различными командами и ограничить доступ к данным.

На стадии разработки, команды, используя уже наработанные компоненты и модели, производят быстрое программирование компонентов ВСДО. Программный код частично формируется при помощи автоматических генераторов, получающих информацию непосредственно из репозитория CASE-средств. Конечные пользователи оценивают получаемые результаты и, если система неадекватна, вносят коррективы в требования, учитываемые во время следующей итерации.

После завершения работ над компонентами и подсистемами ВСДО, производится их интеграция в гипермедиа систему, формируется полный программный код, выполняется тестирование компонентов на совместимость и завершающее тестирование всей системы. Результатом разработки является вариант ВСДО, удовлетворяющий требованиям всех заинтересованных сторон.

ЛИТЕРАТУРА

1. Isakowitz T., Stohr E., Balasubramanian P. A Methodology for the Design of Structured Hypermedia Applications // Communications of the ACM. – 1995. - №8. – P. 34-44 (<http://citeseer.nj.nec.com/isakowitz95rmm.html>).
2. ISO/IEC 12207: 1995 "Information Technology-Software Life Cycle Processes".
3. Retschitzegger W., Schwinger W. Towards Modeling of DataWeb Applications – A Requirements' Perspective//AMCIS. -2000. – vol. 1 (<http://citeseer.nj.nec.com/retschitzegger00towards.html>).
4. Howard A. Software – A Risky Business//Standlish Report. – 1995. – №32. – P. 4.
5. Koch N. Hypermedia Systems Development based on the Unified Process (Technical Report). – Munchen: Ludwig-

Maximilians-Universitat. – 2000. – 44 p. 6. Вендров А.М. Проектирование программного обеспечения экономических информационных систем: Учебник. – М.: Финансы и статистика, 2000. – 352 с. 7. IEEE LTSC Drafts & Documents (<http://ltsc.ieee.org/doc/index.html>).

УДК 378.1

Л.А. Пилипенко

ПРОБЛЕМЫ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ В СОВРЕМЕННЫХ СОЦИОКУЛЬТУРНЫХ УСЛОВИЯХ

Борисовский государственный политехнический колледж

Борисов, Беларусь

Обсуждение проблем образования на современном этапе развития общества показывает, что для успешной подготовки специалистов среднего звена необходим комплексный подход для преодоления разрывов между требованиями общества к обученному и воспитанному гражданину и существующей системой обучения и воспитания [28].

Во-первых, производство требует все больших специальных знаний, которые затрагивают не только промышленность, но и науку, обучение и воспитание, организацию и управление производством, современные компьютерные технологии и многое другое.

Во-вторых меняется сам характер знаний, которые приобретают абстрактную и обобщенную форму, то есть, предполагают развитие способности к творческой деятельности.

В-третьих, нестабильная ситуация на современном рынке труда, где постоянно происходят массовые переливы людей из одной отрасли в другую, неизбежно влечет необходимость в переучивании кадров, а, следовательно, необходимость в общем научном и техническом образовании, повышении ответственности самого человека за полученное образование и дальнейшее трудоустройство.

В-четвертых, развитие современных информационных технологий и появление высокоскоростных каналов связи сделало актуальной задачу использования информационных технологий в обучении, подготовке специалистов и научных исследованиях.

XXI век – это век информационного общества, которое характеризуется тем, что информация становится важнейшим продуктом социальной практики, обеспечивает интенсификацию экономики, ускорение научно-технического прогресса, повышение уровня жизни, решение проблем экологии и сохранения культуры за счет более эффективного использования имеющихся ресурсов и управления на основе оперативной и объективной информации [17, 20].

Для разрешения стоящих перед обществом конкретных экономических и социокультурных проблем особая роль отводится системе образования, ее деятельности по

подготовке профессиональных кадров [1, 12], владеющих механизмами познавательной [6, 11], управленческой [16] и исполнительской направленности, эффективность и результативность функционирования которой, определяется степенью информатизации [3, 14]. Следует отметить, что философия образования и современная наука в одинаковой степени поднимают вопрос воспитания и образования человечества, переосмысления и преодоления “конфронтации между естественными, техническими и гуманитарными науками” [18, с.152]. Этот вывод подтверждается в исследованиях по методологии технических наук, где показано, что “современные научно-технические знания, синтезируя естественнонаучные, общественные и технические знания, не являются их простой совокупностью, а представляют качественно новое образование со своей структурой и системными свойствами” [13, с. 23].

Функции, взаимосвязи с другими социальными институтами, перспективы профессионального образования в условиях проведения социально-экономических преобразований детально исследованы Э.М. Калицким [12]. Необходимость совершенствования системы профессионального образования исходит из новой парадигмы, затрагивающей его инновационность и непрерывность [10, 27], связь с “ценностями образования” [8], с разработкой качественно новых подходов к решению задач управления данным процессом, ориентиром в котором выступает квалификационная характеристика. Она в полной мере тоже не является адекватной моделью специалиста, т.к. не предусматривает качества, определяющие успешность и эффективность профессиональной деятельности, и профессиональное долголетие [22, 23]. Для развития соответствующих качеств, необходимо внедрять в образовательную практику культуру “многокритериальной постановки и решения задач”. При таком подходе обучаемый сам, исходя из впечатлений, знаний, понятий, строит алгоритм познавательной ситуации [13, 15]. “Человека в процессе профессионального образования надо не столько готовить управлять технологией, сколько развивать в нем основы для самостоятельной деятельности” [12, с.35].

Изучение психологического компонента содержания деятельности и исследование формирования профессиональной пригодности человека с точки зрения успешности профессиональной работы, связано со способностью личности к творчеству [22, 23]. Важно отметить, что формирование информационной среды общества [20, с. 9 – 22], которая может изменяться, совершенствоваться, благодаря целенаправленным действиям, накладывает свой отпечаток на профессиональные, личностные и деловые качества специалиста. Наибольшую ценность среди них представляют: способность к критическому анализу, к принятию нестандартных новаторских решений (особенно в нетипичных ситуациях), к разработке новых идей и их перспективности и эффективности, к оценке рыночной конъюнктуры с позиции получения наибольшей дополнительной прибыли, профессиональное самоопределение, компетентность и т.д. [3, 15, 27].

Задача современного профессионального обучения – готовить конкурентоспособную личность с преобладающим интеллектом, способную решать конкретные про-

блемы с помощью информационных технологий, позволяющих самостоятельно приобретать необходимые знания и применять их в практической деятельности. “Способность понимания, прогнозирования, учета в процессе деятельности влияния комплекса самых различных факторов характеризует технологический подход к производству. Соответственно возникает проблема формирования технологического подхода в трудовой, профессиональной подготовке” ..., что “предполагает развитие системного стиля мышления, интегрирующего характерные признаки современного технического, технологического, экономического, экологического, гуманитарного мышления. Такой стиль мышления должен лежать в основе политехнического образования, формирования технической культуры современного человека” [13, с. 21]. Профессиональное образование “в информационно насыщенном обществе перестает быть средством усвоения готовых знаний” и необходим переход от потребления знаний к обмену информацией, что требует оценки ее истинности, достоверности, важности и “радикального изменения характеристик деятельности участников образовательного процесса и моделей их взаимодействия” [15, с. 32]. Лавинообразный темп приращения знаний в существующих социокультурных условиях и ограниченные возможности усвоения их обучаемыми составляют основное противоречие современной системы образования, заставляющее отказаться от подготовки специалиста с полным объемом знаний, и перейти к системе обучения, способствующей максимальному развитию способностей человека к самореализации (самообразованию) [19, с. 51 – 53]. Обучение специалистов любого уровня становится не простым преподнесением готовых истин, а нелинейной ситуацией “открытого диалога прямой и обратной связи между человеком и каналами средств информации” [18, с. 61 – 62].

Соединение знания и информации переросло в, так называемый, “информационный ресурс” и предопределило переход общества в новую фазу информационного общества, где технической основой информатизации является компьютеризация, всемерное развитие средств связи и использование информационных технологий (ИТ). Исходя из классификации технологий, предложенной Г.К. Селевко, ИТ относятся к группе технологий по ориентации на личностные структуры, формируя знания умения, навыки по предметам [25]. Когда компьютеры стали широко использоваться в образовательной практике, появился термин “новые информационные технологии” (НИТ) обучения, которые рассматриваются как процессы подготовки, передачи, регистрации, сбора, поиска, накопления, хранения, обновления, обработки, представления и анализа информации на базе компьютерной техники, а также выработки новых знаний (новой информации) в соответствии с информационными потребностями общества [18, 20, 26]. Они рассматриваются как особый вид деятельности, “связанный с организацией и осуществлением полного информационного цикла на основе компьютеризации его операций и связи между ними” [2, с. 115]. Использование НИТ обусловлено тем, что компьютер в современных социокультурных условиях стал средством

повышения производительности труда во всех сферах деятельности человека. С другой стороны резко возрос объем необходимых знаний и с помощью традиционных методик и способов преподавания уже невозможно подготовить высокопрофессиональных специалистов. Компьютеризация *открыла перспективы* использования электронно-вычислительных средств в дидактическом процессе с целью активизации учебной познавательной деятельности [19, с. 55–56]. Важнейшим фактором повышения качества и интенсификации обучения, являются возможности, предоставляемые применением ИИТ. Степень их использования становится одним из важнейших показателей соответствия системы образования современным требованиям, ее конкурентоспособности, потенциальной возможности применения новейших технологий обучения. Факторами, способствующими информатизации образования, являются: научно-технический прогресс, развитие информационной структуры, формирование единого информационного и образовательного пространства [20, 21], развитие современных средств связи, глобальных, региональных и локальных информационных сетей; насыщение учебных заведений современной компьютерной и мультимедийной техникой; вариативное использование мультимедийных и телекоммуникационных сред [10, 14, 26]. Мультимедийные среды представляют собой компьютерные интерактивные интегрированные системы, обеспечивающие работу с неподвижными изображениями, движущимся видео, анимированной компьютерной графикой, текстом, речью, высококачественным звуком. Применение мультимедийных сред в сфере образования может развиваться в нескольких направлениях: тренажеры, справочники, электронные учебники, видеоэнциклопедии, интерактивные путеводители, ситуационно-ролевые игры, моделирование (вплоть до полного погружения – виртуальная реальность), системы самотестирования и т.п. Мультимедийная компьютерная среда представляет собой совокупность текстовых, графических, аудио, видео и других образов, объединенных единым алгоритмом реагирования на действия пользователя [20, с. 9 – 22]. Мультимедийные среды обеспечивают возможность сочетания компьютерных технологий с изучением новой информации, применением в учебном процессе методов исследовательского моделирования, изучаемого объекта [5], снижения нагрузки на зрение ученика и переноса части нагрузки на слух, а коммуникационные среды – интерактивность обучаемого и преподавателя.

ИИТ достигли такого уровня, что позволяют автоматизировать и интенсифицировать интеллектуальную деятельность, связанную с обработкой информации [20, с. 9–22], максимально удовлетворить информационные запросы и потребности пользователя на любом уровне детализации и обобщений, повысить степень самостоятельной подготовки с учетом индивидуальных способностей личности [20, с. 177–180].

В системе подготовки специалистов технического профиля можно выделить два поля проблем: создание качественных программных продуктов и применение их в образовательной практике.

В контексте первого поля, положительным моментом является появление в последние годы серий книг, доступных широкому кругу пользователей, выполненных

высокопрофессиональными коллективами разработчиков, позволяющих самостоятельно любому желающему овладеть приемами программирования, работой с разнообразными программными продуктами на любом профессиональном уровне (от начальных знаний, до серьезной компьютерной компетентности). Во втором поле НИТ определяют довольно широкий спектр подходов к подготовке специалистов, а “реализация функциональных возможностей информационных технологий, обеспечивая интенсификацию педагогического процесса, значительно обогащает готовность специалиста к профессиональной деятельности” [11]. НИТ включают программированное и интеллектуальное обучение, экспертные системы, гипертекст, технику для мультимедиа презентаций и видеоконференций, системы интерактивного управления обучающими программами, системы автоматизированного проектирования, сеть Internet, CD-rom, нестандартные экранные устройства, средства видеокomпьютерной проекции, аудиторные доски с возможностями выдачи бумажных копий или сохранения информации в компьютере и т.п. [10, 21, 26].

Наиболее узким местом в системе профессиональной подготовки является недостаточное количество современных мультимедийных программ, позволяющих учащему интерактивно общаться с компьютером. Создание мультимедийных электронных учебников (МЭУ), силами опытных преподавателей, в совершенстве владеющих компьютерной техникой, не привело к получению качественных программных продуктов. Это объясняется огромным количеством технологических проблем (по интерфейсу, по протоколам обмена данными и ряду других характеристик), что не всегда позволяет использовать МЭУ, разработанные в разных авторских коллективах. Л.В. Белецкая и М.Ф. Поснова [19, с. 55–56] заостряют внимание еще на одной проблеме: среди разработчиков программного обеспечения (ПО) практически нет профессиональных дидактов, что позволяет решать в процессе обучения и подготовки только традиционные дидактические задачи, хотя “научно доказано, что природа средств передачи информации вполне определенным образом влияет на формирование и развитие психических структур человека, в том числе и мышления, а потому для компьютеризованного дидактического процесса необходимо прежде всего определить конкретные цели и содержание обучения. Если окажется, что цели могут достигаться с помощью традиционных дидактических средств, то лучше всего обратиться именно к ним. Компьютеризация обучения целесообразна лишь в том случае, если разработка и усвоение содержания не возможны без компьютера” [19, с. 56]. Промышленное производство информационных продуктов, организация программно-технологических комплексов для конвейерного создания мультимедийных электронных учебников, позволяет решить проблемы ввода, хранения, преобразования и переработки получаемых мультимедийных данных, осуществить необходимый дизайн интерфейса, непрерывное отслеживание современных достижений в области алгоритмического, программного и технического обеспечения, соответствие стандартам качества и т.д. Обеспечить

качество и технологичность может только коллектив профессионалов, специализирующийся в создании информационного продукта. Создание же информационных технологий обучения любой предметной или научной дисциплины, современное техническое оснащение учебного процесса, использование всех достижений мировой культуры, современной науки и техники невозможно без сотрудничества преподавателей-предметников, разработчиков программного обеспечения, графических дизайнеров, радио- и телеинженеров [21], дидактов [19, с. 55–56]. Только при таком подходе программные продукты будут соответствовать современным требованиям профессионального образования, научной организации современного дидактического процесса, позволять учесть закономерности системы человек-машина, не допускать введение в них асоциального содержания [20, с. 9–22].

Наибольшего успеха в информатизации подготовки специалистов можно добиться тогда, когда “разумно сочетаются персонификация информационных технологий применительно к конкретному учителю, персонификация решаемых информационных задач применительно к конкретному ученику и деперсонификация компьютера” [21, с. 106].

Внедрение НИТ невозможно без изучения, отбора и использования огромного рынка программных продуктов [20, 21] и наличия специалистов, способных качественно провести экспертизу и сориентировать преподавателей в выборе наиболее эффективных, т.к. не все из них соответствуют дидактическим целям обучения. В связи с этим, открывается еще одна проблема – информатизация образования не может проходить без информационной подготовки и переподготовки кадров, способных решать поставленные задачи [1, 7]. Но проблема заключается в том, что современному профессиональному образованию необходим инженер-педагог [1, 24], имеющий “оптимальное соотношение общего, инженерно-технического и профессионально-педагогического образования” [1, с. 27], способный все современные информационные средства и способы обработки информации сделать реальным инструментом своей профессиональной деятельности [21].

Следует отметить еще одну проблему, напрямую связанную с использованием НИТ – организацию дистанционного обучения [10, 18]. Объективные потребности современного общества привели к развитию данной системы, создающей возможности для получения образования или повышения квалификации большому количеству людей. Предсказывают, что дистанционное обучение может стать основной технологией образования XXI века. В концепции открытого образования дистанционное обучение рассматривается как новая технология, имеющая ряд неоспоримых преимуществ: открытость (возможность получения образования всеми слоями населения), гибкость (выбор по желанию набора курсов, темпа обучения, преподавателей), технологичность (прохождение обучения посредством Internet, телевидения, CD-rom, ресурсов библиотек) [18, с. 313 – 314].

Учитывая интенсивное развитие НИТ, назрела необходимость в научно-обоснованной организации процесса подготовки специалистов в новых социокультурных условиях, что приведет к серьезным качественным изменениям в методике подготовки специалистов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Батышев С.Я. Прогностическая ориентация профессионального образования / Педагогика. – 1998. – № 6. – С. 22–27.
2. Борисевич Э.М. Новые информационные технологии в образовании // Информатизация адукацыі. – 1995. – Вып. 1. – С. 46–66.
3. Бузмакова У.И. и др. Информатизация среднего профессионального образования: задачи, проблемы и пути их решения / У.И. Бузмакова, Ю.Ф. Кузнецов, Т.Ф. Петрова // Информатика и образование. – 1999. – № 4. – С. 47–51.
4. Волченкова Л.К. Научно-методическое обеспечение процесса педагогического проектирования многоступенчатой подготовки специалистов / Национальный институт образования. – Минск., 1999. – 284 с.
5. Галимов А.М. Дидактические условия применения компьютерных моделей в процессе проблемного обучения: Автореф. дис. ... канд. пед. наук. – Казань, 1999.
6. Гарунов М. Развитие творческой самостоятельности специалиста // Высшее образование в России. – 1998. – № 4. – С. 83–86.
7. Голуб С.В. Концептуальная модель активной профессиональной подготовки студентов // Специалист. – 1997. – № 4. – С. 20–23.
8. Гомыко Ю.В. Мыследеятельностная педагогика (теоретико-практическое руководство по освоению высших образцов педагогического искусства). – Минск: Технопринт, 2000. – 376 с.
9. Грошев И.В. Половые различия психологических характеристик обучаемых и успешность овладения новыми информационными технологиями // Мир психологии. – 2000. – № 2 (22). – С. 132–143.
10. Губонин Н.С. Информационные технологии и инновационное образование деятельности // III Академические чтения “Образование и наука на рубеже XXI века: проблемы и перспективы развития”. / Раздел 3. Инновационное образование – от концепции к технологиям. Мн. – 1997. – С. 138–140.
11. Денисова А.Л. Теория и методика профессиональной подготовки студентов на основе информационных технологий: Автореф. дис. ... д-ра пед. наук – Московский педагогический государственный университет имени В.И. Ленина. – М., 1994. – 32 с.
12. Калицкий Э.М. Трансформация профессионального образования в современном обществе / РИПО. – Минск, 1997. – 113 с.
13. Калюга С.У. Научно-технический прогресс и проблемы профессиональной подготовки // Методологические и теоретические проблемы всеобщей профессиональной подготовки молодежи: Сб. науч. тр. / Отв. ред. В.А. Поляков, – М.: изд. АПН СССР, 1991. – С. 17–24.
14. Конференция Восток – Запад по новым информационным технологиям в образовании. 6 – 9 апреля 1992 г. – Москва, Россия. – 215 с.
15. Левченко В.Г. Среднее профессиональное образование: смысл происходящего и контуры будущего // Специалист. – 1999. – № 8. – С. 27 – 28.
16. Масюкова Н.А. Проектирование в образовании / Под ред. профессора

Б.В. Пальчевского. – Минск: Технопринт, 1999. – 288 с. 17. Международная научно – практическая конференция “Философия социального действия и перспективы демократии. Тезисы докладов (6 – 7 апреля 1994). – Мн. – 1994. 18. Наука и образование на пороге III тысячелетия = The Science and Education on the Threshold of 3rd Millennium: Тезисы докладов Международного конгресса (г. Минск, 3–6 октября 2000 г.). – Минск, 2000. – Кн. 1. 19. Новые информационные технологии в образовании: Труды третьей междунар. конф., Минск, 12 – 13 нояб. 1998 г. / Отв. за вып. д-р техн. наук, проф. А.Н. Мордевич, канд. фил.-матем. наук, доц. Т.А. Ткалич – Минск, 1998. – Т.1. 20. Проблемы создания информационных технологий: Сб. науч. трудов. Вып.2, том 1. / Науч. редак. член-кор. НАН Беларуси, акад. МАИТ, докт. техн. наук Маньшин Г.Г., Минск, 1998. 21. Пронин В.Н. Информационное пространство и современные технологии обучения // Информатика и образование. – 1996. – № 4. – С. 104–110; № 6. – С.135–139. 22. Ростунов А.П. Психологические аспекты профессиональной подготовки специалиста // Высшая школа. – 1996. – 3 л. – С. 20–21. 23. Ростунов А.П. Психологические предпосылки профессиональной пригодности // Адаптация и выживание. – 1997. – № 3. – С. 70–86. 24. Савелова С.Б. Управление профессиональным развитием инженера-педагога: Учебно-методическое пособие для организации и проведения педагогической практики по специальности П 03.01.00 “Профессиональное обучение” / РИПО. – Минск, 1998. – 135 с. 25. Селевко Г.К. Взгляд на проблему // Народное образование. – 1997. – № 9. – С. 27–32. 26. Селевко Г.К. Современные образовательные технологии: Учебное пособие. – М.: Народное образование, 1998. – 256 с. 27. Темник В.В. Прогностическая модель выпускника – специалиста XXI века. // Профессионал. – 1998. – № 8 – 9. – С. 6–7. 28. Щедровицкий Г.П. Система педагогических исследований // Педагогика и логика: Сб. – М.: Касталь, 1993. – С. 16–201.

УДК 378.371.3

Л.И. Шахрай

ТРЕБОВАНИЯ К ПОДГОТОВКЕ ИНЖЕНЕРА В УСЛОВИЯХ СТАНОВЛЕНИЯ РЫНОЧНОЙ ЭКОНОМИКИ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Машиностроение является ведущей базовой отраслью по развитию и подъему экономики всей страны. В настоящее время машиностроение находится на этапе перехода от резкого падения к стабилизации, подъему и развитию. При малых экономических ресурсах для успешного преодоления этого этапа необходима научно обоснованная техническая политика развития машиностроения.

Научно-техническая политика в области машиностроения – это некоторый образ действий, направленный на реализацию определенных целей в области машиностроения на достаточно длительном интервале времени, при сложившихся на данный период экономических, социальных и политических условиях. Длительность периода зависит от устойчивости экономических условий [1].

Целями научно-технической политики в области машиностроения являются:

- Выход на конкурентоспособный уровень на внутреннем рынке.
- Выход на конкурентоспособный мировой уровень в целом по машиностроению.
- Обеспечение потребностей внутрипромышленного комплекса страны, ее социальных и экологических программ со стороны отечественного машиностроения при минимальных затратах.

Общий состав необходимого обеспечения машиностроительного производства включает следующие ресурсы: научные, кадровые, финансовые, производственные технологии и технологические машины, информационные технологии инжиниринга, нормативные, организационные и др.

Конец XX– начало XXI века – это период перехода человечества в эру постиндустриального общества, в промышленном производстве он характеризуется следующими параметрами:

1. Становление сферы информационных технологий инжиниринга, рынка предоставления информационных услуг. Эти технологии превращаются в самостоятельную отрасль, имеющую приоритетное значение для развития машиностроения.
2. Наука становится самостоятельным элементом производительных сил общества. Возрастает объем производства наукоемких изделий. Их разработки базируются на опережающих фундаментальных исследованиях, а не на доминирующем эмпирическом подходе к созданию новых изделий.
3. Доминирующим фактором развития предприятий становится конкуренция при регулирующей роли государства.
4. Происходит реструктуризация предприятий исходя из рыночных законов экономики. Структура предприятия обеспечивает выполнение полного жизненного цикла изделий (ЖЦИ). Корпоративные стремления находят развитие в виде появления виртуальных предприятий.
5. Индивидуализация заказов и частая смена моделей изделий приводят к возрастанию трудоемкости технической подготовки производства.
6. Время выполнения и надежность выполнения заказов, качество и себестоимость изделий становятся основными показателями предприятий.
7. Расширение кооперации между предприятиями, расширение рынков сбыта изделий и сотрудничества предприятий приводят к необходимости создания для производств единой информационной базы.

Все эти особенности приводят к тому, что тейлоровские принципы организации производства перестают работать эффективно. Обозначается переход к интеллектуальным машиностроительным производствам.

На основе анализа работы предприятий в новых экономических условиях можно утверждать, что современное конкурентоспособное предприятие должно иметь:

- отработанную на уровне опытной партии или образца гамму наукоемких изделий, пользующихся повышенным стабильным спросом на мировом рынке;
- технологии и технологическое оснащение, обеспечивающие серийный и экономичный выпуск изделий;
- сохранившийся кадровый потенциал и производственные опыт и знания;
- устойчивые рынки и службы сбыта продукции;
- сформированные сети обслуживания и ремонта эксплуатируемых изделий мирового сервисного уровня;
- формы организации предприятия и методы управления, обеспечивающие высокоэкономичное, динамичное управление им с быстрой реакцией на все изменения внешней среды и условий;
- перспективные планы реконструкции инжиниринга и развития предприятия, базирующиеся на научных методах анализа и моделировании сложных производственных систем, на разработанных перспективных моделях предприятия;
- современные методы информационной поддержки и обеспечения по всем этапам производственной деятельности предприятия (ПДП), базирующиеся на новых информационных технологиях инжиниринга (ИТИ) (в том числе на CALS, RAD, SADT технологиях);
- системы комплексной автоматизации всех этапов ПДП на основе интеллектуальных корпоративных систем и программно-методического инструментария их ускоренной разработки и саморазвития;
- систему корпоративных связей с предприятиями-смежниками, поставщиками, эксплуатационниками на основе единой методологии, информационной интеграции, телекоммуникационных сетей;
- учебно-научный комплекс подготовки профессиональных кадров и проведения научных исследований, в том числе и в области применения, создания и использования современных достижений ИТИ.

Исходя из вышеперечисленного, изменяются требования к современному инженеру.

Инженер должен получить знания по всему жизненному циклу изделия. Они включают самую разнородную информацию: правовую, маркетинговую, технологическую, менеджмент, планирование, управление и др., которая позволяет работать в условиях современного предприятия, легко адаптироваться к его быстрым изменениям.

Конкуренция на рынке интеллектуального труда ставит перед инженерными вузами проблемы удовлетворения рыночного спроса на специалистов определенного уровня и качества подготовки.

Образовательная политика вуза в этих условиях должна быть ориентирована на подготовку конкурентоспособных специалистов, что достигается качеством образования.

Многоукладная экономика и многообразие профессионально-образовательных интересов населения формируют рыночный спрос на инженерное образование различного уровня и характера: инженеры-универсалы (инженерная элита), инженеры-энциклопедисты, инженеры-эксплуатационщики и инженеры-исследователи (рис.1).



Рис.1. Направленность инженерной подготовки

Изменение структуры предприятий, их целей, методов организации и осуществления производственной деятельности привели к изменениям требований, предъявляемых к инженерным кадрам предприятия. Причем, если узкопрофессиональные знания выпускников большинства высших технических учебных заведений могут удовлетворить руководство предприятий, то их производственная эрудиция, методы работы, знания в области информационных технологий инжиниринга и навыки командной работы не соответствуют современному и, тем более, перспективному уровню подготовки инженеров. Ниже приведены некоторые новые требования к инженерной деятельности будущего, вытекающие из анализа деятельности предприятий.

- Знание задач ПДП по всем этапам ЖЦИ.
- Умение активно работать в производственной команде по обеспечению всех этапов ЖЦИ.
- Умение быстро адаптироваться к изменениям производственной обстановки.
- Умение работать в единой информационной среде предприятия.

- Умение работать в рамках CALS технологий.
- Умение использовать методологии SADT и RAD технологий при разработке сложных машин и систем.
- Навыки работы со знаниями и умение их обработки, передачи, накопления, развития, умение создавать интеллектуальные модели и осуществлять моделирование машин и систем.
- Умение выполнять начальные этапы проектирования и разрабатывать бизнес планы.
- Умение работать в глобальных сетях и единой сети предприятия с общим доступом к базам данных и знаний.
- Умение с помощью программных инструментальных средств оснащать свое рабочее место программным обеспечением.
- Знание и навыки владения инженерной системологией.
- Умение разрабатывать и реализовывать модели процесса проектирования.
- Умение работать в условиях “виртуального предприятия”.

ЛИТЕРАТУРА

1. Казаков В.А. Перспективы развития машиностроения в России. // Технология машиностроения. – 2001. – №1. – С. 3–4.
2. Обзор отрасли машиностроения // Технология машиностроения.-2000.- №5.- С. 66–69.
3. Братухин А.Г. CALS – стратегия наукоемкого машиностроения и // Технология машиностроения. – 2000.– № 6. – С. 3–15.
4. Братухин А.Г. CALS –стратегия наукоемкого машиностроения и // Технология машиностроения. – 2001.– № 1.– С. 5–17.

РЕФЕРАТЫ

УДК 621.002

Иванов Б.В., Реут О.П. **Состояние и перспективы вузовской науки**// *Машиностроение*. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 3–8.

Рассмотрено современное состояние развития науки в вузах Республики Беларусь. Дана характеристика научного потенциала вузов и намечены перспективы развития их научной деятельности.

УДК 621.9.

Бачанцев А.И., Туромша В.И. **Повышение эффективности обработки на токарных станках с ЧПУ** // *Машиностроение*. – Мн., 2001. – Вып.17. – С. 9–15.

Выполнен анализ традиционной методики назначения режимов резания при точении и критериев производительности обработки. Даны рекомендации и разработана методика по назначению режима резания повышенной производительности. – Ил. 3. Табл. 1. Библиогр. 9.

УДК 621.831.002

Громыко П.Н., Макаревич Д.М., Хатетовский С.Н. **К проблеме повышения точности обработки зубьев сателлита планетарной прецессионной передачи** // *Машиностроение*. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 15–18.

Рассмотрена кинематика процесса формирования зубьев сателлита планетарной прецессионной передачи, а также даны рекомендации по уменьшению погрешности цепи деления зубообрабатывающих станков при обработке данных зубьев. – Ил. 3. Библиогр. 2.

УДК 621.9.01

Зеленин В.А., Мельников Г.Г., Сенько С.Ф. **Особенности резки монокристаллических слитков кремния на пластины** // *Машиностроение*. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 19–23.

Рассмотрены особенности резки монокристаллических слитков кремния ориентации (001) на пластины, используемые для изготовления БИС. Показано, что учет кристаллографических факторов при резке слитков монокристаллического кремния привел к значительному снижению прогиба и к увеличению процента выхода годных пластин. – Ил. 2. Табл. 1. Библиогр. 2.

УДК.621.95

Э.Я. Ивашин, В.Э. Ивашин. **Особенности обработки плоских поверхностей** / *Машиностроение*. – Мн., 2001. – Вып.17. – С. 24–27.

В статье рассматривается один из методов обработки плоских длинномерных деталей с учетом деформаций, которые испытывает обрабатываемая деталь при ее закреплении. – Библиогр. 3.

УДК 621.7

Климентьев А.Л., Мисевич В.С. **Формализация выбора методов формообразования для деталей широкой номенклатуры** // *Машиностроение*. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 27–31.

Изложена формализованная методика выбора методов/способов формообразования для деталей широкой номенклатуры. Приведены фрагменты справочно-информационных материалов для выбора методов формообразования. – Табл. 3. Библиогр. 4.

УДК 621.787

Лабер А., Лабер С. **Влияние смазочного вещества на трибологические характеристики сфероидального чугуна после обработки ППД** // *Машиностроение*. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 31–35.

Представлены результаты исследований трибологических характеристик поверхностного слоя сфероидального чугуна с феррито-перлитной структурой после ППД роликом. Обкатка осуществляется с применением разных смазочных жидкостей: масло SN-150, моторное масло TITAN CFE 1040 MC, содержащее 3% MoS₂, а также препараты MOTOR – LIFE и R – 2000. Использование смазочных сред позволяет формировать поверхностные слои с различными трибологическими характеристиками. – Ил. 3. Библиогр. 2.

УДК 621.9

Лабер С. **Влияние СОЖ на силы резания и износ сверл при сверлении стали** // *Машиностроение*. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 35–37.

Представлены результаты исследований процесса сверления стали 45 всухую и с использованием различных СОЖ. СОЖ способствует снижению крутящего момента в 1,6...2 раза, размеров площадки износа в 3...5 раз и снижает высоту нароста почти в 6 раз. – Ил. 2. Табл. 1. Библиогр. 4.

УДК 621.923

Махаринский Е.И., Масилевич А.В. **Рабочие характеристики глубинного шлифования** // *Машиностроение*. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 38–42.

С учётом особенностей глубинного шлифования, для оценки рабочих свойств шлифовального круга предлагаются два новых показателя: обобщенный коэффициент режущей способности и коэффициент теплоотвода, а также методика их определения. – Ил. 2. Библиогр. 3.

УДК 621.9.048.6

Минченя Н.Т., Куптель В.Г. **Об определении оптимальной мощности генератора высокочастотных акустических колебаний для вибрационного точения** // *Машиностроение*. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 42–47.

Получены зависимости необходимой мощности генератора для обеспечения заданной амплитуды колебаний режущей кромки резца при различных нагрузках. – Ил. 3. Библиогр. 2.

УДК 621.9.02.001

Михайлов М. И. **Методика расчета профиля фрезы с учетом характера винтовой кинематической поверхности детали**//Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып.17.– С. 47–53.

Рассмотрена методика расчета профиля дисковой фрезы для формообразования аппроксимированной винтовой поверхности с переменным радиусом кривизны обрабатываемой. – Ил. 2. Библиогр. 7.

УДК 621.941.229

Молочко В.И., Вольнец А.А. **О шероховатости обработанной поверхности при вибрационном резании** // Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 53–57.

Дан теоретический анализ изменения величины осевых расстояний между траекториями движения инструмента при резании с осевыми вибрациями, на основе которого произведена количественная оценка высоты гребешков шероховатости при вибрационном точении по сравнению с обычным. – Ил.3. Библиогр. 3.

УДК 621.941.1

Мрочек Ж.А., Арбузов В.И., Хартон В.Л. **Шероховатость поверхности чугуновых стальных и алюминиевых образцов после хонингования, шлифования и расточки** // Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып.17. – С. 57–62.

Рассмотрено влияние различных параметров и условий чистовой и получистовой обработки заготовок деталей из различных материалов на систему параметров состояния поверхности. – Ил. 3. Библиогр. 4.

УДК 621.941.1

Мрочек Ж.А., Шатуров Г.Ф. **Профилирование рабочей поверхности набивных бумажных валов каландра** // Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 62–68.

Рассмотрены вопросы точности обработки длиномерных каландровых валов, имеющих статический прогиб. Приведены зависимости и алгоритм нахождения установочных параметров чашечного реза, обеспечивающие необходимую точность обработки. – Ил. 5. Табл. 1. Библиогр. 2.

УДК 621.9.014

Соловей С.А., Куптель В.Г. **Влияние режимов резания на процесс дробления стружки при продольном наружном точении**//Машиностроение. – Мн., 2001.– Вып.17. – С.68–71.

Рассмотрены вопросы взаимосвязи формы стружки и направления ее движения на протяжении периода стойкости инструмента при продольном наружном точении. Приведены результаты исследований влияния режимов резания на процесс стружкодробления. – Ил.3. Библиогр.4.

УДК 621.914.6

Сюбаров В.В., Мисевич В.С. **Резервы повышения эффективности многоза-**

ходных червячных фрез // *Машиностроение.* – Мн., 2001. – Вып. 17. – С.

Установлена зависимость между параметрами процесса обработки зубчатых колес многозаходными червячными фрезами и повышением производительности при условии сохранения стойкости по сравнению с однозаходными фрезами. – Библиогр. 4.

УДК 621.923.04:621.922.8

Устинович Д. Ф. **Исследование процесса обработки стали У8 полимерно-абразивными волоконными композитами** // *Машиностроение.* – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 74–77.

Приведены данные о влиянии технологических параметров обработки на показатели качества обработанной поверхности стали У8. Рассмотрены основные закономерности формирования микрогеометрии поверхностного слоя. – Табл. 2. Библиогр. 2.

УДК 621.941.1

Шатуров Г. Ф. **Обоснование эффективности совмещенной обработки резанием с опережающим пластическим деформированием** // *Машиностроение.* – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 77–81.

Представлен новый подход оценки эффективности совмещенной обработки резанием с опережающим пластическим деформированием (ОПД) с учетом расположения элюры остаточных тангенциальных сжимающих напряжений в поверхностном слое заготовки после ОПД. – Ил. 3. Библиогр. 3.

УДК 621.941.1

Шатуров Г. Ф. **Механика процесса ротационного резания** // *Машиностроение.* – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 81–86.

Рассмотрены особенности сил действующих на рабочих поверхностях самовращающегося ротационного резца. Разработана методика определения коэффициентов трения при резании самовращающимся чашечным резцом. – Ил. – 3, Табл. 1, Библиогр. 1.

УДК 621.38.029.6.01

Адамович А. Л., Грозберг Ю. Г., Капралов М. Е. **Использование СВЧ энергии для обработки материалов** // *Машиностроение.* – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 87–90.

Рассмотрены вопросы и опыт применения СВЧ энергии для обработки различных материалов и сред, описана конструкция экспериментальной установки СВЧ обработки. Приведена методика расчета размеров щелевого коллиматора. – Ил. 2. Библиогр. 4.

УДК 621.924.8+621.7

Баршай И. Л. **Технологическое обеспечение комбинированной и совмещенной обработки иглофрезерованием и ППД** // *Машиностроение.* – Мн., 2001. – Вып. – С. 91–96.

Изложены кинематические особенности совмещения процессов иглофрезерования и ППД. Описаны способы реализации совмещенной и комбинированной обработки указанных процессов. – Ил. 2, Библиогр. 9.

УДК 658.512

Беляков Н.В., Махаринский Е.И. **Формализация проектирования схемы базирования заготовок корпусных деталей машин** // *Машиностроение.* – Мн., 2001. – Вып.17. – С. 97–101.

В работе решается задача повышения уровня формализации проектирования схемы базирования заготовок корпусных деталей машин. Геометрическую модель объекта производства предлагается строить с помощью иерархической системы параметризованных функциональных модулей (ФМ). Приводятся принципы классификации ФМ. Излагаются формальные правила синтеза схем базирования заготовок корпусных деталей машин. – Ил. 3. Библиогр. 4.

УДК 621.762.4

Голубев А.Н. **Влияние содержания пластификатора в составе передающей среды на равноплотность порошковых прессовок, полученных способом квазиизостатического прессования**//*Машиностроение.* – Мн., 2001. – Вып. 17. – С.101–105.

Экспериментально исследовано распределение плотности по длине прессовок из железных порошков, полученных способом квазиизостатического прессования. Рассмотрена возможность применения в качестве передающих давление сред пластифицированных металлических порошков. – Ил. 3. Библиогр. 2.

УДК 621.357.6

Груздев Д.А., Клименков С.С. **Получение композиционных электрохимических покрытий с высоким содержанием дисперсной фазы** // *Машиностроение.* – Мн., 2001. – Вып.17. – С.106–110.

Предложен способ получения композиционного электрохимического покрытия с высоким содержанием дисперсной фазы и с равномерной структурой, а также значительно интенсифицирован процесс осаждения композиционного покрытия. – Ил. 2. Библиогр. 3.

УДК 621.83.06:622.248.13

Игнатищев Р.М., Макаревич Д.М., Лустенков М.Е. **Исследование процесса изнашивания сепараторов синусоцилиндрических шариковых редукторов** // *Машиностроение.* – Мн., 2001. – Вып.17. – С. 110–112

Рассмотрены факторы и их влияние на износ прорезей сепаратора синусоцилиндрических шариковых редукторов на основе проведенного полного факторного эксперимента. – Табл.1, Библиогр.2.

УДК 621.831

Кане М.М., Медведев А.И. **Обеспечение параметров качества поверхности зубьев при обработке цилиндрических шестерен** // *Машиностроение.* – Мн., 2001. – Вып.17. – С. 113–118.

Предложены методики и рекомендации выбора технологического маршрута обработки зубьев цилиндрических шестерен и требований к качеству поверхности зубьев

ев на промежуточных операциях с целью обеспечения необходимых значений данных параметров в готовых деталях с учетом закономерностей их изменения при обработке цилиндрических шестерен на отдельных операциях.

УДК 621.791

Кожуро Л.М., Лугаков Н.Ф., Точило В.С., Хейфец М.Л. **Технологический процесс индукционной наплавки погружением в расплав** // Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 118–123.

Рассмотрено обеспечение износостойкости деталей машин при нанесении покрытий индукционной наплавкой погружением в расплав. Даны рациональные режимы технологического процесса наплавки и закалки детали с покрытием. – Ил. 3, Библиогр. 2.

УДК 621.923

Кривко Г.П. **Модульный принцип анализа и совершенствования технологических процессов механической обработки деталей** // Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 123–128.

Предложен модульный принцип анализа и совершенствования технологических процессов механической обработки деталей подшипников. Получены уравнения регрессии зависимости точности обрабатываемых поверхностей колец от отдельных технологических факторов процесса обработки. – Ил. 3. Библиогр. 2.

УДК 620.178.162.43

Мрочек Ж.А., Шатуров Г.Ф., Спасский И.В. **Прогрессивная технология обработки рабочих поверхностей гильз цилиндров двигателей внутреннего сгорания** // Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 128–133.

Представлены результаты исследований и новой технологии обработки гильз цилиндров ДВС импульсно-силовым вибронакатыванием, обеспечивающей повышение их износостойкости в 2...3 раза. Приведены результаты ресурсных испытаний гильз цилиндров двигателей СМД-62 и КАМАЗ-740. – Ил. 3. Табл. 1. Библиогр. 3.

УДК 621.357.6

Новиков А.К., Клименков С.С. **Исследование свойств композиционных гальванических покрытий** // Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 133–136.

Исследована зависимость эксплуатационных свойств композиционного гальванического покрытия от вида используемых металла матрицы и дисперсных частиц. – Ил. 3. Библиогр. 3.

УДК.621.941.01-529

Пармон С.И., Бельская Т.И., Кухарчик Е.С. **Использование математических методов и средств вычислительной техники при решении некоторых технологических задач** // Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 137–139.

Предложена методика решения некоторых технологических задач на примере

расчета скорости резания заготовок из проката для различных сталей с использованием приложения Microsoft Office- Excel2000, использование которой позволяет повысить эффективность и гибкость процесса производства различных изделий. – Ил. 1. Табл. 3. Библиогр. 4.

УДК 621.3.06:658.516.3

Свирский Д.Н., Сухиненко Б.Н. **Развитие лазерной технологии послойного синтеза в компактном производстве** // *Машиностроение*. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 140–144.

Рассмотрены особенности развития лазерного формообразования в компактных производственных системах. Определены аспекты компактности и их проявление в конструкции опытно-промышленных установок. – Ил. 3. Табл. 1. Библ. 4.

УДК 621.923.7

Синькевич Ю.В., Беляев Г.Я. **Использование технологии электроимпульсного полирования в производстве высокотехнологичных изделий** // *Машиностроение*. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 144–147.

Приведены результаты сравнительного анализа технологий удаления термических окисных пленок с поверхности ТВЭЛов. Показано, что замена штатных технологий на электроимпульсное полирование позволило снизить трудоемкость обработки, значительно повысить качество поверхности и экологическую безопасность производства. – Табл. 1. Библиогр. 2.

УДК 621.791

Авсиевич А.М., Спиридонов Н.В., Константинов В.М., Гришанов С.А. **Нанесение износостойких газотермических покрытий из диффузионно легированных самофлюсующихся (ДЛС) порошков на железной основе** // *Машиностроение*. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 148–153.

Рассмотрены результаты комплексных исследований по разработке технологии нанесения износостойких покрытий из диффузионно легированных самофлюсующихся порошков на железной основе. Приведены данные по прочности сцепления, структуре, пористости, твердости и износостойкости покрытий. – Ил. 2. Библиогр. 5.

УДК 621.723

Акулович Л.М., Миранович А.В., Тризна В.В. **Оптимизация геометрических параметров полюсных наконечников** // *Машиностроение*. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 153–156.

Обосновано влияние геометрических параметров полюсных наконечников на распределение сил магнитной индукции в рабочем зазоре в процессе электромагнитной наплавки. Выполнена оптимизация геометрических параметров полюсных наконечников, где в качестве параметра оптимизации принята производительность процесса наплавки. В результате определили следующие оптимальные значения: угол заострения $\alpha_3=12^\circ$, высота рабочего торца полюсного наконечника $h=5,7$ мм. – Ил. 2. Табл. 1. Библиогр. 3.

УДК 621.762.5

Белявин К.Е., Минько Д.В., Мазюк В.В., Кузнецик О.О. **Основные закономерности теплообмена в частицах порошка при электроимпульсном спекании / Машиностроение.** – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 157–161.

Рассмотрены особенности теплообмена при электроимпульсном спекании пористого материала. Разработана модель процесса, которая позволяет рассчитать для сферических частиц порошка толщину расплавленного слоя, скорость его охлаждения и относительную величину усадки. Модель позволяет оптимизировать технологический режим формования пористого материала на высоковольтных конденсаторных установках. – Ил. 3. Библиогр. 5.

УДК 621.792

Иващенко С.А. **Тепловое взаимодействие при формировании упрочняющих покрытий // Машиностроение.** – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 162–165.

В работе исследованы процессы теплофизического взаимодействия в системе покрытие-подложка при формировании вакуумно-плазменных покрытий. – Ил. 5. Табл. 1. Библиогр. 2.

УДК 621.81.408

Иващенко С.А. **Технологические методы снижения коробления деталей с покрытием // Машиностроение.** – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 166–170.

В работе приведены основные технологические методы снижения коробления деталей с покрытием. – Ил. 3. Библиогр. 3.

УДК 621.923.7

Кожуро Л.М., Мрочек Ж.А., Пашкевич М.Ф., Макаревич С.С. **Определение макронапряжений в покрытии, сформированном электромагнитной наплавкой // Машиностроение.** – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 171–174.

Приведены результаты исследований остаточных напряжений в покрытиях, полученных электромагнитной наплавкой различных порошков. Показано, что при электромагнитной наплавке с поверхностным пластическим деформированием в покрытиях формируются остаточные напряжения сжатия. – Ил. 1. Библиогр. 3.

УДК 621.923.7

Кожуро С.Л., Шадуя В.Л. **Оптимизация магнитно-абразивной обработки по физико-механическим свойствам покрытий // Машиностроение.** – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 174–177.

Выполнена многопараметрическая оптимизация магнитно-абразивной обработки износостойких покрытий, полученных электромагнитной наплавкой с поверхностным пластическим деформированием. – Табл. 1. Библиогр. 4.

УДК 621.620.193

Мрочек Ж.А. Арбузов В.И. Хартон В.Л. **Исследование коррозионной стойко-**

сти поверхностей тормозных цилиндров автомобилей//Машиностроение.– Мн., 2001.– Вып.17.– С. 177–179.

Рассмотрены особенности коррозионной стойкости поверхностей тормозных цилиндров автомобилей, корпуса которых изготовлены из различных материалов и рабочие поверхности которых обработаны по различным технологиям. Выполнен анализ результатов исследований. Приводятся рекомендации по выбору методов коррозионной защиты деталей и узлов тормозной системы. – Табл.2. Библиогр.3.

УДК 621.793.1

Ж.А.Мрочек, И.А.Иванов, В.А.Соколовский Сравнительный анализ применения вакуумно-плазменных методов в инструментальном производстве// Машиностроение.– Мн., 2001.– Вып. 17.– С. 179–183.

Проведен сравнительный анализ вакуумно-плазменных методов по эффективности их использования в инструментальном производстве.– Табл.2. Библиогр. 8.

УДК 621.785.048:669

Спиридонов Н.В., Володько А.С., Зенкевич В.В., Пилецкая Л.И. Упрочнение никель-титановых плазменных покрытий лазерной обработкой // Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып.17. – С. 183–185.

Исследованы режимы лазерной обработки плазменных покрытий из окиси алюминия, при которых образуется наибольшая прочность сцепления с основой. – Табл.1.

УДК 621.793

Спиридонов Н.В., Зенкевич В.В. Исследование теплофизических характеристик лазерного упрочнения покрытий из окиси алюминия // Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып.17. – С. 185–189.

Рассмотрена тепловая задача нагрева покрытий из окиси алюминия, на основании которой произведен выбор режимов лазерной обработки. – Ил.2. Библиогр.4.

УДК 621.793.18

Фролов И.С. Основные закономерности формирования шероховатости поверхности при осаждении вакуумно-плазменных покрытий на немагнитные подложки // Машиностроение. – Мн., 2001.– Вып.17.– С. 190–195.

Исследовалось изменение топографии подложек из немагнитных материалов при электродуговом осаждении нитрида титана и углеродной алмазоподобной пленки в вакууме. Установлены основные закономерности формирования шероховатости поверхностей с вакуумно-плазменными покрытиями. – Ил. 6. Библиогр.4.

УДК 621.757

Вериго Е.Б., Курч Л.В., Политов И.А. Методика учета влияния ошибки позиционирования схвата промышленного робота на вероятность сборки // Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 196–199.

В работе представлена методика учета точности позиционирования рабочего

органа сборочного манипулятора, позволяющая наиболее точно планировать собираемость сборочных комплектов за счет рационального выбора точностных характеристик автоматизированного сборочного оборудования на основе вероятностной модели сборки с зазором и расчете размерных цепей сборочных соединений методами полной и неполной взаимозаменяемости. – Ил. 1. Библиогр. 5.

УДК 621.91.04

Данилов В.А. Интенсификация технологий формообразования сложных поверхностей на этапе проектирования станочного оборудования// *Машиностроение*. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С.200–204.

Рассмотрен комплексный подход к интенсификации процессов обработки сложных поверхностей на стадии концептуального проектирования станков, основанный на выборе эффективных методов обработки, синтезе рациональных схем формообразования и оптимизации кинематической структуры обрабатывающих систем. – Библиогр. 13.

УДК 624.91.04

Данилов В.А., Киселев Р.А. Определение параметров схемы формообразования и геометрии червячного инструмента для непрерывной обработки плоского зубчатого контура // *Машиностроение*. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 205–209.

Рассмотрена прогрессивная схема нарезания плоских зубчатых контуров червячным инструментом на зубофрезерных станках. Даны рекомендации по определению параметров схемы формообразования и инструмента. – Ил.3. Библиогр. 1.

УДК 621.91.04:621.824.42

Данилов В.А., Костюченко А.И., Спиридонов С.В. Конструкторско-технологическое обеспечение применения профильных моментопередающих соединений в трансмиссиях машин// *Машиностроение*. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 209–214.

Решена задача замены шлицевых соединений на профильные при модернизации редукторов трансмиссий машин. Обоснован выбор геометрии, параметров и схемы формообразования моментопередающих поверхностей на универсальном оборудовании. – Ил. 3. Табл. 1. Библиогр. 8.

УДК 621.433

Исаевич Л.А., Качанов И.В. Газодинамическая установка для скоростной штамповки материалов // *Машиностроение*. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 215–221.

На основе критического анализа существующих конструкций машин разработана и создана газодинамическая установка ГДУ-1 для скоростной штамповки материалов. В установке в качестве энергоносителя используется водородно-кислородная смесь (ВКС), вырабатываемая и нагнетаемая в камеру сгорания методом электролиза. Электролиз в ГДУ-1 осуществляется за счет прохождения постоянного тока $J = 3+5A$ под напряжениями $U = 24+42 В$ через электролит (20% р-р КОН). Параметры

установки: энергия $E_n = 4+20$ кДж; скорость ударника $V=45+105$ м/с; давление P_0 в камере сгорания перед поджигом ВКС $2+10$ МПа. Установка работает по замкнутому циклу без вредного воздействия на окружающую среду (конечным продуктом реакции горения ВКС является вода). – Ил. 3. Библиограф 8.

УДК 621.9.06-52

Каштальян И.А., Жуковский П.К. **Адаптивная система управления токарным станком с ЧПУ**// *Машиностроение*. – Мн., 2001. – Вып.17. – С. 221–226.

Приведен анализ методов повышения производительности и точности обработки нежестких деталей на токарных станках с ЧПУ. Описана система поддержания заданной закономерности изменения тангенциальной составляющей силы резания в функции пути. – Ил. 2. Библиогр. 2.

УДК 621.923

Кожуро Л.М., Филонов И.П. **Роторный станок для полирования фасонных поверхностей вращения** // *Машиностроение*. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 227–232.

Описан роторный станок для полирования фасонных поверхностей вращения, дана его техническая характеристика, приведены технологические возможности. – Ил. 3. Библиогр. 5.

..!

УДК 621. 91. 02

Попок Н.Н., Терентьев В.А. **Рациональное инструментообеспечение предприятий на основе создания блочно-модульных конструкций режущего инструмента** // *Машиностроение*. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 233–238.

Рассмотрены проблемы рационального инструментообеспечения машиностроительных предприятий и предложен вариант сокращения затрат на инструмент на основе создания блочно-модульных конструкций универсального применения. – Ил. 2. Библиогр. 5.

УДК 621.793

Худолей А.Л., Кузнечик О.О. **Автоматизация процесса индукционной наплавки** // *Машиностроение*. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 238–242.

Разработана система адаптивного управления, позволяющая автоматизировать процесс индукционной наплавки порошковых покрытий. – Ил.3. Библиогр. 4.

УДК 621.914.6:621.883

Иванов Б.В. **Определение статистических характеристик стойкости червячных фрез на основе ускоренных испытаний**// *Машиностроение*. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 243–247.

На основе математического моделирования процесса изнашивания червячных фрез предложена методика определения статистических характеристик их стойкости. Экспериментальная проверка полученных выводов подтвердила возможность использования данной методики при исследовании режущих инструментов высокой износостойкости в однородных условиях их эксплуатации. - Ил. 1. Библиогр. 5.

УДК 539.3

Акимов В.А. Символический метод решения задачи равновесия упругой полосы жестко сцепленной с твердым телом // *Машиностроение*. – Мн., 2001. – Вып.17. – С. 248–251.

Рассматривается равновесие упругой изотропной полосы жестко сцепленной нижним основанием с неподвижным твердым телом. Предлагается символический метод решения поставленной задачи. – Ил. 2. Библиогр. 1.

УДК 539.3

Акимов В.А. Применение несобственных интегралов и неортогональных рядов для расчета упругой полосы на жестком основании // *Машиностроение*. – Мн., 2001. – Вып.17. – С. 252–256.

Рассматривается равновесие упругой изотропной полосы жестко сцепленной нижним основанием с неподвижным твердым телом. Решение рассматриваемой задачи записывается в символическом виде, содержащем операторы бесконечно высокого порядка. Строится два новых решения, соответствующих двум классам произвольно выбранных функций, представленных в виде несобственных интегралов и неортогональных рядов. – Библиогр. 2.

УДК 546.01:621.785

Василевич Е. Ю., Шепелевич В. Г. Структура и свойства быстрозатвердевших фольг сплавов системы алюминий-никель // *Машиностроение*. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 256–260.

Представлены результаты исследования структуры и микротвердости фольг сплавов системы алюминий-никель, полученные сверхбыстрой закалкой из жидкой фазы. Фольги имеют мелкокристаллическую структуру и текстуру (111). Нестабильность быстрозатвердевших фольг при термической обработке обусловлена распадом пересыщенного твердого раствора, выделением частиц второй фазы и их коалесценцией. – Ил. 3. Табл. 2. Библиогр. 11.

УДК 539.3

Василевич Ю.В., Алейникова О.И., Акимова С.В. Решение пространственной контактной задачи термоупругости методом потенциала // *Машиностроение*. – Мн., 2001. – Вып.17. – С. 261–263.

Дано решение контактной задачи термоупругости в случае внедрения в анизотропное полупространство нагретого жесткого штампа. – Библиогр. 3.

УДК 629.11.011.38

Ворожун И.А. Моделирование работы упругих элементов крепления труб на железнодорожной платформе при соударениях вагонов // *Машиностроение*. – Мн., 2001. – Вып.17. – С. 263–267.

Рассмотрено влияние предварительного натяжения упругих элементов крепления на величину продольного смещения труб, размещенных на железнодорожной

платформе, в процессе соударения вагонов.– Ил. 3. Библиогр. 4.

УДК 621.831

Громыко П.Н., Макаревич Д.М., Титенков А. И. **Анализ относительных скоростей скольжения в контактирующих звеньях коническо–цилиндрической планетарной прецессионной передачи типа КНУ** // *Машиностроение.*–Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 267–271.

Рассмотрены особенности анализа относительных скоростей скольжения в контактирующих звеньях коническо–цилиндрической планетарной прецессионной передачи. Разработана методика определения относительных скоростей скольжения. – Ил. 2. Библиогр. 2.

УДК 519.10: 539.3

Громыко О.В. **Исходные соотношения для расчета прочности и жесткости мягкой цилиндрической оболочки** // *Машиностроение.* – Мн., 2001. – Вып.17. – С. 271–276.

Приведены уравнения равновесия, физические и геометрические соотношения для мягкой замкнутой цилиндрической оболочки под действием внутреннего давления. Получена полная система уравнений, необходимых для исследования деформированной формы оболочки, и разработан алгоритм ее численного интегрирования. В результате линеаризации уравнений получены приближенные аналитические решения. – Ил. 2. Библиогр.4

УДК 539.3

Громыко О.В. **Напряженно-деформированное состояние мягкой цилиндрической оболочки** // *Машиностроение.* – Мн., 2001. – Вып.17. – С. 281–284.

Выполнено численное интегрирование системы уравнений, необходимых для исследования деформированной формы оболочки, с использованием пакета математических расчетов Mathcad 2000. Проведено сравнение результатов, полученных с помощью линеаризованных уравнений, и точных решений при различных нагрузках. Получены простые выражения для ошибок в определении погонных усилий и деформаций. – Ил.4. Библиогр. 5.

УДК 539.3

Громыко О.В. **Напряженно-деформированное состояние подкрепленной панели** // *Машиностроение.* – Мн., 2001. – Вып.17. – С. 285–289.

На основе разработанного метода выполнено исследование НДС подкрепленной ребрами цилиндрической панели под действием распределенной нагрузки. Проведено сравнение полученных результатов с аналогичными решениями, выполненными с помощью метода конечных элементов. – Ил.7. Библиогр. 5.

УДК 621. 831. 01

Даньков А.М., Гобралев Н.Н. **Исследование динамических характеристик передачи с переменным передаточным отношением на базе составных зубча-**

тых колес // Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 285–289.

Рассмотрены особенности кинематики передачи с составными зубчатыми колесами, являющиеся причиной погрешности ее передаточного отношения. Приведены амплитудно-частотные характеристики передачи, полученные в результате стендовых испытаний ее модификаций. – Ил. 2. Библиогр. 3.

УДК 621.88.084

Эльмессауди Д. Влияние условий работы и монтажа подшипников на деформацию тел качения // Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 290–294.

Рассмотрено влияние различных факторов, связанных с условиями монтажа и эксплуатации, на работоспособность подшипников качения. – Ил. 2. Библиогр. 6.

УДК 621.88.084

Эльмессауди Д. Влияние некоторых конструктивных факторов на распределение нагрузки между телами качения подшипников // Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 294–296.

Рассмотрено влияние точностных параметров деталей подшипников на распределение нагрузки между телами качения. Показано, что разноразмерность тел качения не должна превышать допустимых значений. – Ил. 2. Библиогр. 2.

УДК 629.4.015

Ефремова З.Г., Коваленко А.В. Оценка параметров упругих связей рессорного подвешивания тележек грузовых вагонов с учетом двух режимов скольжения колес по рельсам // Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 297–301.

Рассматривается движение грузового вагона по участку пути, имеющему неровности. С целью уточнения рациональных параметров упругих связей рессорного подвешивания выполнены расчеты значений сил, действующих на рессорные комплекты, при учете двух режимов скольжения колес по рельсам. – Ил. 1. Библиогр. 2.

УДК 621.793

Завистовский В.Э. Формирование зоны сплавления и характер разрушения покрытия из сплава ПГ-СР4-ОМ на стали 20 // Машиностроение. – Мн., 2001. Вып. 17 – С. 301–304.

Приводятся результаты исследований структуры зоны сплавления и прочности сцепления покрытия при наплавке самофлюсующего сплава ПГ-СР4-ОМ на образцы из стали 20. Отмечено, что основным процессом, определяющим структурообразование зоны сплавления, является диффузия атомов углерода и бора из материала покрытия и встречная диффузия атомов железа из основного металла. – Ил. 1. Библиогр. 5.

УДК 621.792

Иващенко С.А. Тепловое взаимодействие при формировании упрочняющих покрытий // Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 304–309.

В работе исследованы процессы теплофизического взаимодействия в системе покрытие-подложка при формировании вакуумно-плазменных покрытий. – Ил. 5. Табл.1. Библиогр. 2.

УДК 669.018

Ивашенко С.А. Исследование износостойкости образцов из стали 12x18n10t с упрочняющими покрытиями // Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 310–314.

Приведены результаты исследования износостойкости упрочняющих покрытий на образцах из стали 12X18H10T при трении скольжения. – Ил. 4, Библиогр. 2.

УДК 629.114-585

Калина А. А. Моделирование элементов трансмиссии с использованием пакета ADAMS// Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С.315–317.

Темой данной статьи является моделирование и изучение работы элементов трансмиссии с использованием программы ADAMS (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems). Приведен пример создания непосредственно в среде ADAMS модели предохранительной кулачковой муфты и некоторые результаты ее исследования. — Ил.1. Библиогр. 3.

УДК 621. 81: 621 – 192

Капуста П.П. Теоретический анализ распределения Вейбулла применительно к оценке нагруженности деталей машин// Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 317–323.

Показано, что функция Вейбулла достаточно чувствительна к изменению всех ее параметров в случае описания вариационных рядов механических напряжений. Определяющее значение на изменение ее величины оказывает параметр с размерностью напряжений, стоящий в знаменателе и разность текущего и минимального напряжений для нерегулярного нагружения или размах максимального и минимального напряжений для случая регулярного нагружения. Менее значимым является параметр – показатель степени. Указан способ получения, для описания режимов нерегулярного и регулярного нагружения с использованием распределения Вейбулла, зависимости между отношениями разности текущего и минимального напряжений к размаху максимального и минимального напряжений и номера текущего напряжения к размеру нагрузочного блока. Это позволит количественно интерпретировать зависимость возможных нагрузочных режимов деталей машин и их сравнительный анализ. – Ил. 3, Библиогр. 6.

УДК 621. 81: 621-192

Капуста П.П. Уравнения нерегулярной нагруженности деталей машин// Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 323–327.

На основании анализа распределения Вейбулла предложены уравнения для описания нерегулярной и регулярной нагруженности деталей машин в механических напряжениях. Уравнения базируются на представлении нагрузочного блока в виде

убывающего вариационного ряда напряжений, получаемых после схематизации случайного нагружения и приведения к эквивалентным по повреждающему воздействию симметричным или асимметричным напряжениям. Уравнения позволяют описать все возможные по степени тяжести нагрузочные режимы, включая и регулярное нагружение, устраняя недостаток использования для этих целей большого количества различных распределений, и дают возможность сопоставления различных режимов нагружения, что особенно актуально при проведении проектных расчетов на долговечность. – Библиогр. 1.

УДК 593.3

Крылов Г.С., Попков П.Г. **Релятивистские методы в механике сред. Релятивизм в М.Д. Т. //** Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып.17. – С. 330–334.

Дано однозначное соответствие классического и релятивистского подхода к механике среды, введением равноправной четвертой координаты время – скорость распространения продольной и поперечной волн в пространстве. Дан анализ силовых и деформационных полей, полей напряжений и перемещений; указаны оптимальные условия использования информации записывающих диаграмму машин, предназначенных для учебных целей. – Ил.1., Библиогр.6.

УДК 539.3

Крушевский А.Е., Лудеманн Т. **Исследование частного уравнения изгибных колебаний прямоугольной шарнирно – опертой пластинки в точной постановке//** Машиностроение.– Мн., 2001.– Вып.17. – С. 327–329.

Проведено исследование частотного уравнения изгиба прямоугольной шарнирно опертой упругой пластинки в точной постановке. Показано получение частотного уравнения указанной задачи в приближенной постановке на основе гипотез Кирхгофа-Лява и других уточненных теорий.– Библиогр. 3.

УДК 593.3

Курбачев А.В. **Об эффективности изоляции волн щелью в твердой среде /** Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С.334–338.

Рассмотрена постановка задачи виброизоляции продольной волны щелью в твердой упругой среде. В результате теоретических исследований получены волновые поля и условия оптимального функционирования щели как эффективного виброизолирующего экрана. – Ил.3. Библиогр. 2.

УДК 539.3.

Миклашевич И. А. **Об относительной упорядоченности состояний тела в случае структурной деформации//** Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып.17. – С. 338–341.

Проведен термодинамический анализ процессов образования структуры при деформировании твердых тел. Показано, что структурная энтропия твердого тела при изотермическом и адиабатическом деформировании уменьшается при образо-

вании полос сдвига и является термодинамически более выгодной. – Ил. 1. Библиогр. 3.

УДК 539.3

Миклашевич И. А. Анализ устойчивости распространения трещины // Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 341–343.

Проведен анализ устойчивости решения нелинейного дифференциального уравнения второго порядка, описывающего траекторию распространения трещины в неоднородных средах. Показано, что типы критических точек, возникающих в системе, зависят от неоднородности среды, как вдоль траектории трещины, так и в направлении перпендикулярном траектории. – Библиогр. 9.

УДК 658.562.3:674.76

Невзорова А.Б. Оптимизация технологического процесса торцово-прессового деформирования древесины // Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 344–347.

Представлена технология изготовления вкладыша из древесины торцово-прессового деформирования. Проведена оптимизация конструкционных параметров для нового класса подшипников скольжения на основе древесины путем установления взаимосвязи между отдельными технологическими подсистемами, производимыми ими процессами и конструкционными параметрами. – Ил. 1. Табл. 1. Библиогр. 4.

УДК 539.3

Подлюзный Э.Д. О распространении продольных волн вдоль стержня при пенетрации его в упругую среду – ч.1// Машиностроение. – Мн., 2001 – Вып. 17.– С. 347–351

Рассматривается задача о распространении продольных волн напряжений при ударе нижнего конца стержня с одночастотным вибратором о присоединенную массу на линейной пружине, моделирующих упругую среду. Решение находится методом Даламбера в классе простейших обобщенных функций на начальном этапе распространения ударной волны. – Ил. 1. Табл. 1. Библиогр. 6.

УДК 539.3

Подлюзный Э.Д. О распространении продольных волн вдоль стержня при пенетрации его в упругую среду – ч.2// Машиностроение Мн., 2001 – Вып. 17.– С. 351–356.

Работа является продолжением статьи – ч. 1. Показан процесс нахождения “продолжающего” решения волнового уравнения при заданных граничных и начальных условиях методом Даламбера в интервале распространения волн $[-l, 0]$ и $[l, 2l]$. – Ил. 1. Библиогр. 3.

УДК 621.891.8

Присевок А.Ф. Теоретические и экспериментальные основы выбора водородостойких композиционных материалов// Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып.

17. – С. 356–363.

Рассмотрены особенности формирования газотермических водородостойких покрытий с заданными и управляемыми физико – механическими и эксплуатационными свойствами. Описанная методика построения термодинамического анализа адсорбции и абсорбции водорода металлами в системе “металл – водород”, приведенные закономерности распределения водорода в металлах и сплавах, установленная степень сродства металла с водородом, позволили определить влияние концентрации легирующих элементов на термодинамическое равновесие системы металл – водород, что является основой при формировании микроструктуры и фазового состава водородостойких покрытий из композиционных материалов. – Ил. 2. Библиогр. 15.

УДК 621.791.92

Романова Т.К., Митрофанова А.Б., Кожуро Д.Л. Усталостная прочность деталей, восстановленных электромагнитной наплавкой порошков из быстрорежущих сталей //Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып.17. – С. 363–365.

Рассмотрены вопросы влияния на усталостную прочность метода наплавки и химического состава порошка. – Ил.3. Библиогр. 2

УДК 621. 833. 01

Скойбеда А.Т., Даньков А.М. Определение основных размеров передач с составными зубчатыми колесами, взаимодействующими с промежуточными колесами внутреннего зацепления // Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 365–371.

Приведены зависимости, полученные в результате рассмотрения условий взаимодействия составного и цельного с внутренними зубьями колес и позволяющие определять основные размеры образованной этими колесами передачи. – Ил. 3. Библиогр. 3.

УДК 629.11.011.5+629.114-03.80

Скойбеда А.Т., Капустя П.П., Шаров В.А. Оценка напряженно-деформированного состояния рамы шасси автомобильного крана с использованием конечноэлементного моделирования// Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 372–380.

В работе приводится расчет внешних активных и реактивных нагрузок и напряженно-деформированного состояния рамы шасси автомобильного крана МЗКТ-79081 грузоподъемностью 75 т. Расчет произведен методом конечных элементов (МКЭ) с помощью прикладного пакета Pro_MECHANICA. Описана методика создания расчетной модели. Приведены оценка статического НДС при различных нагрузочных режимах, анализ результатов расчета; даны рекомендации по изменению конструкции и снижению уровня нагруженности опасных локальных элементов и зон. – Ил. 3.

УДК 621.833.12

Тетерюков Д.О. Влияние на контактную прочность геометрических параметров ортотрохойдной передачи //Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 380–384.

Определены рациональные значения геометрических параметров ортотрохондной передачи с точки зрения контактной прочности. Получено условие выбора радиуса цевки для исключения случая подрезания профиля зубчатой рейки. – Ил. 2. Библиогр. 3.

УДК 539.3

Тульева М.В. Влияние геометрических характеристик на устойчивость стержней // Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 384–387.

Рассмотрено влияние геометрических характеристик сечения стержня на его устойчивость под действием нагрузки и собственного веса. Результаты исследования приведены для стержней из стали и из кирпича. – Ил. 3. Библиогр. 2.

УДК 621.762.4:539

Хмелев А.А., Сидоров В.А. Об оценке значений ударной вязкости по результатам измерения твердости // Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 387–391.

В работе предлагается метод теоретической оценки значений ударной вязкости, как браковочного критерия металла контролируемых элементов, только по результатам измерения твердости.

Метод позволяет используя сертификатные данные механических свойств исследуемой стали и результаты измерения твердости контролируемых зон, определять значения ударной вязкости металла этих зон, не прибегая к разрушающим методам контроля. – Ил. 2. Табл. 1. Библиогр. 4.

УДК 621.865.8

Шепелевич В. Г. Датчик угла поворота на основе эффекта Холла // Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 391–393.

Рассмотрена конфигурация аналогового датчика угла поворота на основе эффекта Холла с диапазоном измерений 110 и 220°. Его чувствительность составляет 28 и 14 мкВ/град. – Ил. 2. Библиогр. 3.

УДК 531.39:629.4.015

Шимановский А. О. Динамика цистерны, частично заполненной жидкостью, при движении по закруглению // Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 394–397.

Исследуется движение цистерны, частично заполненной жидкостью, по криволинейному участку пути. С учетом относительного перемещения жидкости внутри котла найдены значения скоростей цистерны, при которых обеспечивается движение по кривой без опрокидывания. – Ил. 3. Библиогр. 5.

УДК 621.941

Адаменко В.М. Теоретические предпосылки оптимизации процесса резания по энергопотребляющим показателям // Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 398–404.

Даны теоретические предпосылки возможности оптимизации процесса резания по энергопотребляющим показателям технологического оборудования в зависимости от расчетной мощности резания. Показана целесообразность анализа технологичности процесса изготовления детали по потребляемой мощности в конкретных производственных условиях. – Ил. 3. Табл. 2.

УДК 681.327.12.001.362

Гамзелева Т. В., Коваленко М.Н., Концевой В.Л., Мирончик В.М. Программный комплекс обработки и анализа изображений для решения металлургических задач // Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 404–409.

Рассмотрен программный комплекс для проведения обработки и автоматизированного анализа изображений. Приведено его описание, технические характеристики и возможности. – Ил. 3. Библиогр. 3.

УДК 621.313

Гречихин Л.И., Тимошевич В.Б. Техническая диагностика технологических процессов и энергетических устройств в машиностроении путем анализа генерируемого радишума // Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 409–421.

Предложена модель промышленного радишума. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено модулирующее воздействие на радишум механических колебаний внешнего электромагнитного поля, различных пар трения и электрических разрядов, генерируемых двигателями внутреннего сгорания и электродвигателями. Показана возможность использования промышленных радишумов для контроля и диагностики технологических процессов. – Ил. 7. Библиогр. 8.

УДК 621.941.2/.31-83

Гурецкий П.Н. Численное исследование величины энергетических потерь токарного станка // Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 421–424.

Проведены численные исследования влияния на величину энергетических потерь суппорта токарного станка законов распределения давлений по рабочим поверхностям направляющих скольжения, с использованием ЭВМ. – Ил. 3. Библиогр. 2.

УДК 53.087.92

Довгяло Д. А., Мильто П. В. Алгоритм расчета гофрированной мембраны с присоединенной массой // Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 425–428.

Рассмотрены вопросы проектирования гофрированных мембран с неравномерной гофрировкой с целью их применения в датчиках давления. Приведены результаты экспериментальных исследований металлической мембраны. Разработан алгоритм расчета упругой характеристики мембраны при различных величинах масс, присоединенных к жесткому центру мембраны. – Ил. 3. Библиогр. 3.

УДК 004:621.952.5

Жолобов А.А. К вопросу прогнозирования качества поверхности при растачивании отверстий // Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 429–434.

Рассмотрены особенности создания математической модели процесса растачивания отверстий. Разработана методика и программное обеспечение для определения шероховатости поверхности отверстий. – Ил.1, Библиогр.4.

УДК 620.179.118.4

Зеленин В.А., Сенько А.С., Сенько С.Ф.. **Дифференциальная диагностика дефектов поверхностей высокого класса обработки** // Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 434–437.

Разработан неразрушающий метод дифференциальной диагностики поверхностей высокого класса обработки, применяемых в точном машиностроении, приборостроении, микроэлектронике и др. Рассмотрены вопросы взаимосвязи конкретных видов дефектов поверхностей и причин их возникновения. Показана высокая эффективность разработанного метода для контроля поверхностей с $R_z < 50$ нм. – Ил.1. Библиогр.4.

УДК 621.37/39:534

Колешко В.М., Баркалин В.В., Полюнкова Е.В. **Интеллектуальные акустоэлектронные микросистемы на основе углеродных и алмазоподобных пленок** // Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып.17. – С. 437–443.

Рассмотрены вопросы технологии и акустоэлектронные свойства микросистем на основе углеродных и алмазоподобных пленок с содержанием следующих фаз: 1) алмазная (sp^3 -гибридизация); 2) графитовая (sp^2); 3) полимерная ($CH_{n-1,2,3}$, sp^2 и sp^1); 4) карбиновая. – Ил.3. Табл.2. Библиогр.6.

УДК 621.88.084

Колешко В.М., Таратын И.А., Сергейченко А.В. **Интегральные микросенсоры – основные элементы “электронного носа” для мониторинга газовых сред** // Машиностроение. Мн., 2001. – Вып.17. – С. 443–445.

Приведены результаты исследования чувствительности к газовым средам интегральных микросенсоров электронного носа. При изготовлении сенсоров, входящих в микросистему, использовались многокомпонентные составы: $In_2O_3+SnO_2+Co_3O_4+Au$, $In_2O_3+SnO_2$, ИТО. – Ил.3. Библиогр. 2.

УДК 681.327.(0.88)

Колешко В.М., Самошкин М.А. **Математическое моделирование компьютерного зрения при считывании графической информации и фильтрации видеосигналов** // Машиностроение. – Мн.,2001. – Вып.17. – С. 445–451.

Предложена методика и получены математические выражения для моделирования процессов параллельно-последовательного считывания информации компьютерным зрением. – Ил.1. Табл.1.

УДК 621.75.002

Кусков Д.В., Курч Л.В., **Применение программного обеспечения CAD/CAM/**

CAE/PDM при проектировании и изготовлении главного тормозного цилиндра // Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 451–455.

На примере проектирования сдвоенного главного тормозного цилиндра автомобилей ВАЗ были рассмотрены особенности применения специализированного программного обеспечения CAD/CAM/CAE/PDM в области проектирования и изготовления изделий машиностроения – Ил. 3. Библиогр. 3.

УДК 001.891.573

Мисевич В.С. Резонансные математические модели технологических задач // Машиностроение. — Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 456–461.

Рассмотрены особенности математических моделей, базовые функции которых аналогичны функции, дающей амплитуду вынужденных колебаний в зависимости от частоты возмущающей силы. Рассмотрены особенности применения таких моделей для исследования экстремумов отклика, зависящего от нескольких факторов. – Ил. 3. Библиогр. 2.

УДК 621.791

Мрочек Ж.А., Хейфец М.Л., Кухта С.В., Пальвинский С.В. Моделирование процесса индукционной наплавки погружением в расплав // Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 462–466.

Рассмотрено моделирование процесса наплавки погружением детали в расплав. Получены зависимости толщины наплавляемого слоя от температурных и временных характеристик процесса. – Ил. 2. Библиогр. 5.

УДК 620.178.7:669.14

Серебряков В.И. Баланс энергии в процессе дробеупрочнения поверхностей деталей машин // Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 467–471.

Приведены расчеты распределения кинетической энергии при ударе жесткого шара о упругопластическое пространство применительно к технологическому процессу дробеупрочнения стальными шариками с целью формирования требуемых свойств поверхностного слоя. – Ил. 2. Библиогр. 2.

УДК 621.91

Фельдштейн Е.Э. Компьютерное моделирование колебаний при точении консольного вала // Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып. 17 – С. 472–476.

Рассмотрена математическая модель колебательных процессов при точении консольно закрепленного вала. Показаны возможности возникновения автоколебательных процессов и подрывания. Установлено влияние условий обработки вала из стали 45 на амплитуду колебаний. – Ил. 1. Библиогр. 2.

УДК 621.75.002

Филонов И.П., Курч Л.В., Шавель А.В. Особенности проектирования компьютеризированного стенда управления процессами и проведения испытаний //

Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 476–478.

В работе рассмотрены возможности использования прикладных систем для сбора данных и управления процессами при создании испытательных стендов на машиностроительных предприятиях. Приведен пример программы VisiDAQ – прикладного инструмента разработки приложений оперативной автоматизации для использования в среде Windows. – Ил. 1. Библиогр. 1.

УДК 621.75.002

Филонов И.П., Курч Л.В., Ревяко В.С. Сокращение сроков технологической подготовки производства за счет использования систем компьютерного моделирования // Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 478–480.

Рассмотрены возможности использования программного продукта MSC/NASTRAN для автоматизации работы инженера-конструктора и инженера-технолога при проектировании деталей и узлов машиностроительного профиля. Рассмотрены различные варианты его использования с другими CAD/CAM/CAE/PDM продуктами на этапе технологической подготовки производства. – Библиогр. 2.

УДК 621.75.002

Филонов И.П., Курч Л.В., Политов И.А. Эффективность применения PDM – систем на этапе технической подготовки производства // Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 480–484.

В работе представлен обзор возможностей систем ведения проектов (PDM) и даны рекомендации по повышению эффективности применения данных систем на предприятиях машиностроительной отрасли Республики Беларусь. – Ил. 2. Библиогр. 2.

УДК 621.785

Ярмак Ю.Ю., Пуховой А.А., Фюссель У., Эккарт Г. Моделирование процесса плазменного нанесения твердосплавных карбидных покрытий // Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 484–488.

Рассмотрен процесс плазменного нанесения твердосплавных карбидных покрытий. Проведена оптимизация процесса и определены зависимости качества покрытий от режимов их нанесения и содержания металлической матрицы. – Ил. 1. Табл. 2. Библиогр. 2.

УДК 338.45:621

Александров А.В. Повышение эффективности материалопотребления как стратегический путь развития машиностроительного комплекса // Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 489–494.

Исследована эффективность использования материальных ресурсов в машиностроительном комплексе Республики Беларусь и ее динамика в 1995–1999 гг., а также зависимость материалоемкости от степени износа основных фондов. Рассмотрены направления повышения эффективности материалопотребления в машиностроении. – Ил. 1. Табл. 1. Библиогр. 4.

УДК 338

Бербасова Н. Ю. **Метод оценки состояния сварочного производства** // *Машиностроение*. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 494–498.

Рассмотрены вопросы оценки состояния сварочного производства. Предложена методика расчета агрегированной оценки уровня состояния сварочного производства, включающая расчеты частных показателей сварочного производства и весовых коэффициентов. При расчете весовых коэффициентов показателей и групп показателей в работе использованы теория графов и метод попарных сравнений частных критериев.

Применение агрегированной оценки уровня срочного производства позволит определить, насколько приближается или, напротив, отдалается анализируемое производство от максимально достижимого, сравнивать производства между собой, независимо от вида выпускаемой продукции, оценивать в целом динамику его развития.

УДК 38.2(075.8)

Гриневич М.Н., Зеленковская Н.В. **Алгоритм оценки конкурентоспособности предприятия** // *Машиностроение*. – Мн., 2001. – Вып.17. – С. 499–503.

Рассмотрены особенности определения конкурентоспособности предприятия с учетом производимых товаров и результатов его работы. Предложена процедура и программный продукт для оценки конкурентоспособности субъектов хозяйствования. Ил.1. Библиогр.4.

УДК 336.713

Гриневич М.Н., Устинович В.А. **Алгоритм оценки и управления рыночной стоимостью предприятия** // *Машиностроение*. – Мн.,2001. – Вып.17.– С. 503–508.

Показаны актуальность и проблемы оценки стоимости предприятия в экономических условиях Республики Беларусь. Предложено применять метод дисконтированного денежного потока, а также использовать показатель экономической прибыли. Разработан алгоритм оценки и управления стоимостью субъектов хозяйствования. Ил.1. Библиогр.1.

УДК 65.011.56

Горюшкина Н.И., Свирский Д.Н. **Применение матричного метода для оценки эффективности функционирования предприятия** // *Машиностроение*. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 509–513.

Исследована возможность применения матричного метода для анализа эффективности производственно-хозяйственной деятельности машиностроительного предприятия. Даны примеры матриц локальных показателей эффективности. – Табл. 2. Библиогр. 4.

УДК 621.002.5.003.13

Королько А.А., Гронская Л.С. **Влияние морального износа на экономическую эффективность технических систем** // *Машиностроение*. – Мн., 2001. – Вып.17. – С. 514–517.

Рассмотрены причины возникновения, виды морального износа и его влияние на экономическую эффективность машин и оборудования. Приведены методики оценки степени морального износа и годовых потерь от него в сфере машиностроения. – Библиогр. 2.

УДК 338.5:629.114.2.002

Похабов В.И., Антипенко Д.Г. **Вопросы оценки конкурентоспособности и ценообразования на проектируемую тракторную технику** // Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып.17. – С. 518–523.

Рассмотрены вопросы оценки конкурентоспособности тракторной техники на стадии проектирования. Представлена методика определения цены на проектируемую модель на основе использования методов корреляционно-регрессионного анализа. – Ил. 2. Табл. 2.

УДК338.45:621

Романькова Т.В. **Управление ресурсопотребление в машиностроении** // Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып.17. – С. 523–526.

Проведен анализ энергопотребления и энергосбережения в различных отраслях народного хозяйства. Предложены мероприятия по эффективному использованию энергоресурсов в машиностроении. – Ил. 1

УДК 658.588.8

Садков В.М., Банзекуливахо Ж.М. **О направлении развития ремонтного производства**//Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 526–530.

Рассмотрены проблемы ремонтного производства. Предложена классификация технологических воздействий на объекты ремонта. Выделены основные направления развития ремонтного производства. Ил. 1. Табл. 2. Библиогр. 2.

УДК 621.002.003.13

Сачко Н.С. **О технико-экономическом анализе функционирования машиностроительного предприятия** // Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып.17. – С. 530–535.

Рассмотрены методические основы технико-экономического анализа машиностроительного производства. Обоснованы основные показатели, определяющие эффективность работы предприятия, главным из которых является его прибыльность, определяемая уровнем общих издержек производства. – Ил. 2. Библиогр. 1.

УДК 621.002.003.13

Сачко Н.С. **О методике технико-экономического анализа работы заготовительных цехов машиностроительного предприятия**//Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 535–540.

Излагается методика анализа технико-экономических показателей на примере литейного цеха. Указываются пути снижения общих издержек на производство отливок за счет экономии затрат на труд, за счет лучшего использования материалов и инвести-

УДК 378(07.07)

Бань А.В. **Практическое обучение студентов в ВУЗе как метод формирования профессиональных умений** // *Машиностроение*. – Мн., 2001. – Вып.17.– С. 541–544.

Одним из основных путей успешной профессиональной деятельности специалистов является улучшение качества профессиональной подготовки студентов в ВУЗах.

Производственная практика является по своей сути активной формой усвоения и приобретений знаний, развития умений, навыков и формирования самостоятельной профессиональной деятельности. Производственная практика имеет своей задачей закрепление теоретических знаний, полученных студентами в процессе теоретического обучения, овладение профессиональными умениями, навыками и перспективными методами работы. Для обеспечения эффективности обучения во время производственной практики ВУЗ должен решить три основных вопроса: 1) организация практики; 2) содержание практики; 3) методы обучения и возможности управления процессом обучения во время практики. Каждый из этих вопросов требует своего отдельного изучения, но нельзя забывать, что они не только взаимосвязаны, но и взаимозависимы друг от друга. К их решению необходим комплексный подход.

Для эффективного воплощения в жизнь достижений науки специалист должен обладать не только фундаментальными знаниями теории, но и иметь отличную практическую подготовку, обеспечивающую ему успешное функционирование в условиях современного производства. – Библиогр. 3.

УДК 378.1

Галаганюк Н.Н. **Автоматизированная система обработки информации Борисовского государственного политехнического колледжа**// *Машиностроение*. – Мн., 2001. – Вып.17.– С. 545–560.

В статье на примере БГПК описано назначение, требования предъявляемые к АСОИ. Разработана структура и состав потоков информации учебного заведения. Рассмотрены вопросы системного сетевого обеспечения учебного процесса, предложены элементы технического обеспечения, программные продукты, периферийные устройства для АСОИ как отечественного так и зарубежного производства. Рассмотрены вопросы организации баз данных, режимов работы, обслуживания и защиты, приведена оценка экономических затрат. – Ил. 5. Библиогр. 10

УДК 378.371.3

Гриневич Е.А. **Диагностика адаптации студентов к профессионально-педагогической деятельности** // *Машиностроение*. – Мн., 2001. – Вып.17. – С. 560–564.

Приведены результаты диагностики адаптации студентов ИПФ в зависимости от их социально-психологического статуса в группе. – Табл.2. Библиогр.4.

УДК 378.1.147

Дирвук Е.П. Технологическая культура как интегративный критерий качества образования инженера-педагога// *Машиностроение*. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 564–569.

Дана сущностная характеристика понятия технологической культуры инженера-педагога, выявлен генезис и современное состояние проблемы. Разработаны количественные критерии оценки сформированности технологической культуры инженеров-педагогов. Определены уровни технологической культуры инженеров-педагогов, представлена их характеристика. – Табл. 2. Библиогр. 3

УДК 378.1.147

Дирвук Е.П. **Концептуальные подходы к отбору содержания технологического образования инженеров-педагогов**// *Машиностроение*. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 569–574.

Рассмотрены концептуальные положения технологического образования инженеров-педагогов. Определён генезис и современное состояние технологического образования в техническом вузе. Выделены принципы и источники научного образования технологического образования инженеров-педагогов. – Табл. 1. Библиогр. 5.

УДК 371.3

Палазков П.А. **Объектно-ориентированный подход к проектированию высокотехнологических педагогических систем: модельное видение** // *Машиностроение*. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 574–579.

Рассмотрены основные концептуальные идеи и положения проектирования высокотехнологических педагогических систем (ВПС) в рамках объектно-ориентированного подхода. Разработана модель педагогического проектирования ВПС. – Ил. 1. Библиогр. 7.

УДК 371.3

Палазков П.А. **Организационно-методические аспекты разработки высокотехнологических систем дистанционного обучения**//*Машиностроение*. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 579–585.

Рассмотрены основные идеи и положения об организации разработки высокотехнологических систем дистанционного обучения на основе концепции унифицированного процесса проектирования гипермедиа систем. – Ил. 1. Табл. 1. Библиогр. 7.

УДК 378.1

Пилипенко Л.А. **Проблемы подготовки специалистов технического профиля в современных социокультурных условиях**//*Машиностроение*. – Мн., 2001. – Вып. 17. – С. 585–592.

Анализируются современные социокультурные условия, необходимость совершенствования системы профессионального образования и пути преодоления разрывов между требованиями общества к современному специалисту и существующей системой подготовки специалистов технического профиля в век информационного

УДК 378.371.3

Шахрай Л.И. Требования к подготовке инженера в условиях становления рыночной экономики // Машиностроение. – Мн., 2001. – Вып.17. – С. 592–596.

Рассмотрены особенности подготовки инженеров в условиях становления экономики. Приведены некоторые новые требования к инженерной деятельности будущего, вытекающие из анализа деятельности предприятий. Определена направленность инженерной подготовки. – Ил. 1, Библиогр.4.

Рефераты докладов не включенных в сборник

УДК 541.18.057

Лапунов С.А., Рубаник В.В., Угольников А.А. Получение эмульсий в поле акустических колебаний //Машиностроение.– Мн., 2001. – Вып.17.– С. 624.

Объектом исследования является процесс эмульгирования. Предложена методика приготовления эмульсий с помощью ультразвуковых колебаний. Обоснована сущность физического явления - кавитации. Рассмотрены и изучены физико-химические явления происходящие при приготовлении водно-масленных эмульсий. Представлена на рассмотрение установка для инжекторного смешивания. – Ил. 2. Библиогр. 2.

УДК 631.358.44

Ладутько С.Н., Филиппов А.И. Обоснование выбора коэффициента разделения камней и клубней картофеля// Машиностроение. – Мн., 2001.– Вып. 17.– С. 624.

Проведены экспериментальные исследования по созданию рабочих органов и усовершенствованию установки для разделения компонентов картофельного вороха.

Произведена математическая обработка проведенных опытов.

Рассмотрены размерно-весовые показатели клубней картофеля и камней, которыми засорены почти все поля РБ. Обосновывается возможность разделения компонентов картофельного вороха, поступающего из комбайна по коэффициенту, равному делению массы компонента на произведение его трех размеров – длина, ширина и толщина, что стало возможным при использовании элементов микроэлектроники. По разработкам получен ряд авторских свидетельств СССР и патент РБ. – Ил. 4. Табл. 6.

УДК 338.22

Гнатюк С.Н. Инновации как фактор экономического прогресса //Машиностроение. – Мн. 2001.– 17. – С. 624.

Рассмотрены особенности научно-инновационной стратегии фирмы и государства в условиях постиндустриального общества и выявлены тенденции государственного регулирования инноваций в Республике Беларусь.

УДК 659.1

Силкова Л.А. **Реклама прямой почтовой рассылкой – эффективное средство продвижения технически сложной продукции** // *Машиностроение*. – Мн., 2001. – Вып.17. – С. 625.

Рассмотрены важность рекламы прямой почтовой рассылкой для продвижения технически сложной продукции, ее преимущества по сравнению с другими способами рекламы. Предложены рекомендации по тактике проведения почтовой рекламы и средства для достижения наибольшей эффективности.

УДК 338.45:621

Плаксына Г.Н. **Региональный машиностроительный комплекс: проблемы конкуренции и устойчивости предприятий, пути их решения** // *Машиностроение*. – Мн., 2001. – Вып.17. – С. 625.

Одним из показателей эффективности развития машиностроительного комплекса региона является величина его вклада в социально-экономическое развитие территории. Рост указанного вклада возможен при увеличении доли выпуска продукции машиностроительных предприятий, предназначенной для технологической модернизации отраслей региональной экономики, а также продукции, идущей на непрямое потребление и накопление в регионе. Вместе с тем значительная часть продукции машиностроительного комплекса потребляется за пределами региона. Поэтому социально-экономическое развитие региона напрямую зависит от конкурентоспособности и устойчивости машиностроительных предприятий на соответствующих рынках техники.

УДК 338.45:621

Л.В. Наркевич, Л.Г. Козлова **Анализ производственных результатов в управлении предприятием** // *Машиностроение*. – Мн., 2001. – Вып.17. – С. 625.

Представлена усовершенствованная методика анализа производственной деятельности предприятия машиностроительной отрасли и апробирована по материалам прокатного цеха Рославльского автомобильного завода. Предлагаемая методика анализа производственной деятельности предприятия учитывает трудоемкость изготовления отдельных видов продукции, четко определяет влияние экстенсивных и интенсивных факторов. – Табл. 4

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| Б.В. Иванов, О.П. Реут СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ВУЗОВСКОЙ НАУКИ..... | 3 |
| ПРОЦЕССЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ | |
| А.И. Бачанцев, В.И. Туромша ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ НА ТОКАРНЫХ СТАНКАХ С ЧПУ | 9 |
| П.Н. Громыко, Д.М. Макаревич, С.Н. Хатстовский К ПРОБЛЕМЕ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ ЗУБЬЕВ САТЕЛЛИТА ПЛАНЕТАРНОЙ ПРЕЦЕССИОННОЙ ПЕРЕДАЧИ | 15 |
| В.А. Зеленин, Г.Г. Мельников, С.Ф. Сенько ОСОБЕННОСТИ РЕЗКИ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СЛИТКОВ КРЕМНИЯ НА ПЛАСТИНЫ | 19 |
| Э.Я.Ивашин, В.Э.Ивашин ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ | 24 |
| А.Л. Климентьев, В.С. Мисевич ФОРМАЛИЗАЦИЯ ВЫБОРА МЕТОДОВ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ШИРОКОЙ НОМЕНКЛАТУРЫ | 27 |
| А.Лабер, С.Лабер ВЛИЯНИЕ СМАЗОЧНОГО ВЕЩЕСТВА НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СФЕРОИДАЛЬНОГО ЧУГУНА ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ ППД | 31 |
| С.Лабер ВЛИЯНИЕ СОЖ НА СИЛЫ РЕЗАНИЯ И ИЗНОС СВЕРЛ ПРИ СВЕРЛЕНИИ СТАЛИ | 35 |
| Е.И. Махаринский, А.В. Масилевич РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЛУБИННОГО ШЛИФОВАНИЯ | 38 |
| Н.Т. Минченя, В.Г. Куптель ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ОПТИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ГЕНЕРАТОРА ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ ВИБРАЦИОННОГО ТОЧЕНИЯ | 42 |
| М. И. Михайлов МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРОФИЛЯ ФРЕЗЫ С УЧЕТОМ ХАРАКТЕРА ВИНТОВОЙ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛИ | 47 |
| В.И. Молочко, А.А. Волынц О ШЕРОХОВАТОСТИ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ВИБРАЦИОННОМ РЕЗАНИИ | 53 |
| Ж.А.Мрочек, В.И.Арбузов, В.Л.Хартон ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ ЧУГУННЫХ, СТАЛЬНЫХ И АЛЮМИНИЕВЫХ ОБРАЗЦОВ ПОСЛЕ ХОНИНГОВАНИЯ, ШЛИФОВАНИЯ И РАСТОЧКИ | 57 |
| Ж.А.Мрочек, Г.Ф.Шатуров ПРОФИЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ НАБИВНЫХ БУМАЖНЫХ ВАЛОВ КАЛАНДРА | 62 |
| С.А. Соловей, В.Г. Куптель ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ НА ПРОЦЕСС ДРОБЛЕНИЯ СТРУЖКИ ПРИ ПРОДОЛЬНОМ НАРУЖНОМ ТОЧЕНИИ | 68 |
| В. В. Сяборов, В. С. Мисевич РЕЗЕРВЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ МНОГОЗАХОДНЫХ ЧЕРВЯЧНЫХ ФРЕЗ | 71 |
| Д. Ф. Устинович ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ СТАЛИ У8 ПОЛИМЕРНО-АБРАЗИВНЫМИ ВОЛОКОННЫМИ КОМПОЗИТАМИ | 74 |
| Г. Ф. Шатуров ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОВМЕЩЕННОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ С ОПЕРЕЖАЮЩИМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ | 77 |
| Г.Ф. Шатуров МЕХАНИКА ПРОЦЕССА РОТАЦИОННОГО РЕЗАНИЯ | 81 |
| ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ | |
| А.Л. Адамович, Ю.Г. Грозберг, М.Е. Капралов ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЧ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ | 87 |

| | |
|---|-----|
| И. Л. Баршай ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОМБИНИРОВАННОЙ И СОВМЕЩЕННОЙ ОБРАБОТКИ ИГЛЮФРЕЗЕРОВАНИЕМ И ППД | 91 |
| Н.В. Беляков, Е.И. Махаринский ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СХЕМЫ БАЗИРОВАНИЯ ЗАГОТОВОК КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН | 97 |
| А.Н. Голубев ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ПЛАСТИФИКАТОРА В СОСТАВЕ ПЕРЕДАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА РАВНОПЛОТНОСТЬ ПОРОШКОВЫХ ПРЕССОВОК, ПОЛУЧЕННЫХ СПОСОБОМ КВАЗИИЗОСТАТИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ | 101 |
| Д.А. Груздев, С.С. Клименков ПОЛУЧЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ | 106 |
| Р.М. Игнатищев, Д.М. Макаревич, М.Е. Лустенков ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗНАШИВАНИЯ СЕПАРАТОРОВ СИНУСОЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ШАРИКОВЫХ РЕДУКТОРОВ | 110 |
| М.М. Канс, А.И. Медведев ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ЗУБЬЕВ ПРИ ОБРАБОТКЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ШЕСТЕРЕН ... | 113 |
| Л.М. Кожуро, Н.Ф. Лугаков, В.С. Точило, М.Л. Хейфец ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКИ ПОГРУЖЕНИЕМ В РАСПЛАВ | 118 |
| Г.П. Кривко. МОДУЛЬНЫЙ ПРИНЦИП АНАЛИЗА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ | 123 |
| Ж.А. Мрочек, Г.Ф. Шатуров, И.В. Спасский ПРОГРЕССИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ГИЛЬЗ ЦИЛИНДРОВ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ | 128 |
| А.К. Новиков, С.С. Клименков ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ | 133 |
| С.И. Пармон, Т.И. Бельская, Е.С. Кухарчик ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ ПРИ РЕШЕНИИ НЕКОТОРЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ | 137 |
| Д.Н. Свирицкий, Б.Н. Сухинско РАЗВИТИЕ ЛАЗЕРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОСЛОЙНОГО СИНТЕЗА В КОМПАКТНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ | 140 |
| Ю.В. Синькевич, Г.Я. Беляев ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО ПОЛИРОВАНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ | 144 |
| ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ОБРАБОТКИ МЕТЕРИАЛОВ | |
| А.М. Авсиевич, Н.В. Спиридонов, В.М. Константинов, С.А. Гришанов НАНЕСЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ДИФфуЗИОННО ЛЕГИРОВАННЫХ САМОФЛЮСУЮЩИХСЯ (ДЛС) ПОРОШКОВ НА ЖЕЛЕЗНОЙ ОСНОВЕ | 148 |
| Л.М. Акулович, А.В. Миранович, В.В. Тризна ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛЮСНЫХ НАКОНЕЧНИКОВ В УСТРОЙСТВАХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ НАПЛАВКИ | 153 |
| К.Е. Белявин, Д.В. Минько, В.В. Мазюк, О.О. Кузнечик ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА В ЧАСТИЦАХ ПОРОШКА ПРИ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОМ СПЕКАНИИ | 157 |
| С.А. Иващенко ТЕПЛОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА | |

| | |
|--|-----|
| ПОКРЫТИЕ–ОСНОВА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ УПРОЧНЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ | 162 |
| С.А. Иващенко ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ КОРОБЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ С ПОКРЫТИЕМ | 166 |
| Л.М. Кожуро, Ж.А. Мрочек, М.Ф. Пашкевич, С.С. Макаревич ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКРОНАПРЯЖЕНИЙ В ПОКРЫТИИ, СФОРМИРОВАННОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ НАПЛАВКОЙ | 171 |
| С.Л. Кожуро, В.Л. Шадуя. ОПТИМИЗАЦИЯ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ПО ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИМ СВОЙСТВАМ ПОКРЫТИЙ | 174 |
| Ж. А. Мрочек, В. И. Арбузов, В. Л. Хартон ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТОРМОЗНЫХ ЦИЛИНДРОВ АВТОМОБИЛЕЙ ... | 177 |
| Ж.А. Мрочек, И.А. Иванов, В.А. Соколовский СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫХ СПОСОБОВ ОСАЖДЕНИЯ ПОКРЫТИЙ В ИНСТРУМЕНТАЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ | 179 |
| Н.В. Спиридонов, А.С. Володько, В.В. Зенкевич, Л.И. Пилецкая УПРОЧНЕНИЕ НИКЕЛЬ-ТИТАНОВЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ..... | 183 |
| Н. В. Спиридонов, В. В. Зенкевич ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАЗЕРНОГО УПРОЧНЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ИЗ ОКСИДИ АЛЮМИНИЯ | 185 |
| И.С. Фролов ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ОСАЖДЕНИИ ВАКУУМНО- ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ НА НЕМАГНИТНЫЕ ПОДЛОЖКИ | 190 |
| ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И СРЕДСТВА ОПТИМИЗАЦИИ | |
| Е.Б. Вериго, Л.В. Курч, И.А. Полятов МЕТОДИКА УЧЕТА ВЛИЯНИЯ ОШИБКИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ СХВАТА ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА НА ВЕРОЯТНОСТЬ СБОРКИ | 196 |
| В.А. Данилов ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТАНОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ | 200 |
| В.А. Данилов, Р.А. Киселев ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ И ГЕОМЕТРИИ ЧЕРВЯЧНОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОЙ ОБРАБОТКИ ПЛОСКОГО ЗУБЧАТОГО КОНТУРА | 205 |
| В.А. Данилов, А.И. Костюченко, С.В. Спиридонов КОНСТРУКТОРСКО- ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОФИЛЬНЫХ МОМЕНТОПЕРЕДАЮЩИХ СОЕДИНЕНИЙ В ТРАНСМИССИЯХ МАШИН | 209 |
| Л.А. Исаевич, И.В. Качанов ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ СКОРОСТНОЙ ШТАМПОВКИ МАТЕРИАЛОВ | 215 |
| И. А. Каштальян, П. К. Жуковский АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТОКАРНЫМ СТАНКОМ С ЧПУ | 221 |
| Л.М. Кожуро, И.П. Филонов РОТОРНЫЙ СТАНОК ДЛЯ ПОЛИРОВАНИЯ ФАСОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВРАЩЕНИЯ | 227 |
| Н.Н. Попок, В.А. Терентьев РАЦИОНАЛЬНОЕ ИНСТРУМЕНТООБЕСПЕЧЕНИЕ ПРЕДПРИЯТИЙ НА ОСНОВЕ СОЗДАНИЯ БЛОЧНО-МОДУЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА | 233 |
| А.Л. Худoley, О.О. Кузнечик АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКИ | 238 |

| | |
|--|-----|
| Б.В. Иванов ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТОЙКОСТИ ЧЕРВЯЧНЫХ ФРЕЗ НА ОСНОВЕ УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ | 243 |
|--|-----|

ДИНАМИКА И ПРОЧНОСТЬ МАШИН

| | |
|--|-----|
| В.А. Акимов СИМВОЛИЧЕСКИЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ РАВНОВЕСИЯ УПРУГОЙ ПОЛОСЫ ЖЕСТКО СЦЕПЛЕННОЙ С ТВЕРДЫМ ТЕЛОМ | 248 |
| В.А. Акимов ПРИМЕНЕНИЕ НЕСОБСТВЕННЫХ ИНТЕГРАЛОВ И НЕОРТОГОНАЛЬНЫХ РЯДОВ ДЛЯ РАСЧЕТА УПРУГОЙ ПОЛОСЫ НА ЖЕСТКОМ ОСНОВАНИИ | 252 |
| Е. Ю. Василевич, В. Г. Шпелевич СТРУКТУРА И СВОЙСТВА БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШИХ ФОЛЫГ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ АЛЮМИНИЙ-НИКЕЛЬ | 256 |
| Ю.В. Василевич, О.И. Алёйникова, С.В. Акимова РЕШЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЗАДАЧИ ТЕРМОУПРУГОСТИ МЕТОДОМ ПОТЕНЦИАЛА | 261 |
| И. А. Ворожун МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ КРЕПЛЕНИЯ ТРУБ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ПЛАТФОРМЕ ПРИ СОУДАРЕНИЯХ ВАГОНОВ | 263 |
| П.Н. Громыко, Д.М. Макаревич, А. И. Титенков АНАЛИЗ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ СКОРОСТЕЙ СКОЛЬЖЕНИЯ В КОНТАКТИРУЮЩИХ ЗВЕНЬЯХ КОНИЧЕСКО-ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПЛАНЕТАРНОЙ ПРЕЦЕССИОННОЙ ПЕРЕДАЧИ ТИПА КНУ | 267 |
| О.В. Громыко ИСХОДНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ И ЖЕСТКОСТИ МЯГКОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ | 271 |
| О.В. Громыко. НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ МЯГКОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ | 276 |
| О.В. Громыко НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПОДКРЕПЛЕННОЙ ПАНЕЛИ | 281 |
| А.М. Даньков, Н.Н. Гобралсв ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРЕДАЧИ С ПЕРЕМЕННЫМ ПЕРЕДАТОЧНЫМ ОТНОШЕНИЕМ НА БАЗЕ СОСТАВНЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС | 285 |
| Д. Эльмессауди ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ РАБОТЫ И МОНТАЖА ПОДШИПНИКОВ НА ДЕФОРМАЦИЮ ТЕЛ КАЧЕНИЯ | 290 |
| Д. Эльмессауди ВЛИЯНИЕ НЕКОТОРЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ ФАКТОРОВ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗКИ МЕЖДУ ТЕЛАМИ КАЧЕНИЯ ПОДШИПНИКОВ | 294 |
| З.Г. Ефремова, А.В. Коваленко ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ УПРУГИХ СВЯЗЕЙ РЕССОРНОГО ПОДВЕШИВАНИЯ ТЕЛЕЖЕК ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ С УЧЕТОМ ДВУХ РЕЖИМОВ СКОЛЬЖЕНИЯ КОЛЕС ПО РЕЛЬСАМ | 297 |
| В.Э.Завистовский ФОРМИРОВАНИЕ ЗОНЫ СПЛАВЛЕНИЯ И ХАРАКТЕР РАЗРУШЕНИЯ ПОКРЫТИЯ ИЗ СПЛАВА ПГ-СР4-ОМ НА СТАЛИ 20 | 301 |
| С.А. Иващенко РАСЧЕТ ВЕЛИЧИНЫ ДЕФОРМАЦИИ ПЛОСКИХ ДЕТАЛЕЙ С ПОКРЫТИЕМ ИЗ САМОФЛЮСУЮЩЕГО СПЛАВА | 304 |
| С.А. Иващенко ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ОБРАЗЦОВ ИЗ СТАЛИ 12Х18Н10Т С УПРОЧНЯЮЩИМИ ПОКРЫТИЯМИ | 310 |
| А. А. Калина МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ТРАНСМИССИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАКЕТА ADAMS | 315 |
| П. П. Капуста ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЙБУЛЛА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ОЦЕНКЕ НАГРУЖЕННОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН | 317 |
| П.П. Капуста УРАВНЕНИЯ НЕРЕГУЛЯРНОЙ НАГРУЖЕННОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН | 323 |

| | |
|---|-----|
| А.Е. Крушевский, Т. Лудсманн ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТНОГО УРАВНЕНИЯ ИЗГИБНЫХ КОЛЕБАНИЙ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ШАРНИРНО-ОПЕРТОЙ ПЛАСТИНКИ В ТОЧНОЙ ПОСТАНОВКЕ | 327 |
| Г.С. Крылов, П.Г. Попков РЕЛЯТИВИСТСКИЕ МЕТОДЫ В МЕХАНИКЕ СРЕД. РЕЛЯТИВИЗМ В М.Д.Т. | 330 |
| А. В. Курбачев ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗОЛЯЦИИ ВОЛН ЩЕЛЬЮ В ТВЕРДОЙ СРЕДЕ | 334 |
| И. А. Миклашевич ОБ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ УПОРЯДОЧЕННОСТИ СОСТОЯНИЙ ТЕЛА В СЛУЧАЕ СТРУКТУРНОЙ ДЕФОРМАЦИИ | 338 |
| И. А. Миклашевич АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТРЕЩИНЫ | 341 |
| А.Б.Невзорова ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ТОРЦОВО-ПРЕССОВОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ | 344 |
| Э.Д. Подлозный О РАСПРОСТРАНЕНИИ ПРОДОЛЬНЫХ ВОЛН ВДОЛЬ СТЕРЖНЯ ПРИ ПЕНЕТРАЦИИ ЕГО В УПРУГУЮ СРЕДУ – Ч.1 | 347 |
| Э.Д. Подлозный О РАСПРОСТРАНЕНИИ ПРОДОЛЬНЫХ ВОЛН ВДОЛЬ СТЕРЖНЯ ПРИ ПЕНЕТРАЦИИ ЕГО В УПРУГУЮ СРЕДУ – Ч. 2 | 351 |
| А.Ф. Присвек ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ВЫБОРА ВОДОРОДОСТОЙКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ | 356 |
| Т.К. Романова, А.Б. Митрофанова, Д.Л. Кожуро УСТАЛОСТНАЯ ПРОЧНОСТЬ ДЕТАЛЕЙ, ВОССТАНОВЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ НАПЛАВКОЙ ПОРОШКОВ ИЗ БЫСТРОРЕЖУЩИХ СТАЛЕЙ | 363 |
| А.Т.Скойбеда, А.М. Даньков ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ ПЕРЕДАЧ С ОСТАВНЫМИ ЗУБЧАТЫМИ КОЛЕСАМИ, ЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИМИ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ КОЛЕСАМИ ВНУТРЕННЕГО ЗАЦЕПЛЕНИЯ | 365 |
| А. Т.Скойбеда, П. П. Капуста, В. А. Шаров ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ РАМЫ ШАССИ АВТОМОБИЛЬНОГО КРАНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ | 372 |
| Д.О. Тетерюков ВЛИЯНИЕ НА КОНТАКТНУЮ ПРОЧНОСТЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОРТОТРОХОИДНОЙ ПЕРЕДАЧИ | 380 |
| М.В. Тульсва ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НА УСТОЙЧИВОСТЬ СТЕРЖНЕЙ | 384 |
| В.А. Сидоров, А.А. Хмслев ОБ ОЦЕНКЕ ЗНАЧЕНИЙ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЯ ТВЕРДОСТИ | 387 |
| В. Г. Шепелевич ДАТЧИК УГЛА ПОВОРОТА НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА ХОЛЛА | 391 |
| А. О. Шимановский ДИНАМИКА ЦИСТЕРНЫ, ЧАСТИЧНО ЗАПОЛНЕННОЙ ЖИДКОСТЬЮ, ПРИ ДВИЖЕНИИ ПО ЗАКРУГЛЕНИЮ | 394 |

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ

| | |
|--|-----|
| В.М. Адамснко ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ ПО ЭНЕРГОПОТРЕБЛЯЮЩИМ ПОКАЗАТЕЛЯМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ | 398 |
| Т.В. Гамзалева, М.Н. Ковалснко, В.Л. Концсвой, В.М. Мирончик ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ | 404 |
| Л.И. Гречихин В.Б. Тимошсвич ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ В МАШИНОСТРОЕНИИ ПУТЕМ АНАЛИЗА ГЕНЕРИРУЕМОГО РАДИОШУМА | 409 |

| | |
|--|-----|
| П.Н. Гурсцкий ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ СУППОРТА ТОКАРНОГО СТАНКА | 421 |
| Д.А. Довгяло, П.В. Мильто АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ГОФРИРОВАННОЙ МЕМБРАНЫ С ПРИСОЕДИНЕННОЙ МАССОЙ | 425 |
| А.А.Жолобов К ВОПРОСУ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ПРИ РАСТАЧИВАНИИ ОТВЕРСТИЙ | 429 |
| В.А. Зеленин, А.С. Сенько, С.Ф. Сенько ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА ДЕФЕКТОВ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВЫСОКОГО КЛАССА ОБРАБОТКИ | 434 |
| В.М. Колешко, В.В. Баркалин, Е.В. Полянкова ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ АКУСТОЭЛЕКТРОННЫЕ МИКРОСИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ И АЛМАЗОПОДОБНЫХ ПЛЕНОК | 437 |
| В.М.Колешко, И.А.Таратын, А.В.Серебряченко ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСЕНСОРЫ – ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ “ЭЛЕКТРОННОГО НОСА” ДЛЯ МОНИТОРИНГА ГАЗОВЫХ СРЕД | 443 |
| В.М. Колешко, М.А. Самошкин МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ ПРИ СЧИТЫВАНИИ ГРАФИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ И ФИЛЬТРАЦИИ ВИДЕОСИГНАЛОВ | 445 |
| Д.В. Кусков, Л.В. Курч ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ CAD/CAM/CAE/PDM ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ИЗГОТОВЛЕНИИ ГЛАВНОГО ТОРМОЗНОГО ЦИЛИНДРА | 451 |
| В.С. Мисевич РЕЗОНАНСНЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ | 456 |
| Ж.А. Мрочск, М.Л. Хейфец, С.В. Кухта, С.В. Пальвинский МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКИ ПОГРУЖЕНИЕМ В РАСПЛАВ | 462 |
| В. И. Серебряков БАЛАНС ЭНЕРГИИ В ПРОЦЕССЕ ДРОБЕУПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН | 467 |
| Е.Э.Фельдштейн КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ПРИ ТОЧЕНИИ КОНСОЛЬНОГО ВАЛА | 472 |
| И.П. Филонов, Л.В. Курч, А.В. Шавель ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОМПЬЮТЕРИЗИРОВАННОГО СТЕНДА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ И ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ | 476 |
| И.П. Филонов, Л.В. Курч, В.С. Рсвьяко СОКРАЩЕНИЕ СРОКОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ | 478 |
| И.П. Филонов, Л.В. Курч, И.А. Политов ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ PDM – СИСТЕМ НА ЭТАПЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА | 480 |
| Ю.Ю. Ярмач, А.А. Пуховой, У. Фюссель, Г. Эккарт МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАЗМЕННОГО НАНЕСЕНИЯ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ КАРБИДНЫХ ПОКРЫТИЙ. 484 | |

ЭКОНОМИКА, ОРГАНИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ

| | |
|---|-----|
| А. В. Александров ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАТЕРИАЛОПОТРЕБЛЕНИЯ КАК СТРАТЕГИЧЕСКИЙ ПУТЬ РАЗВИТИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА | 189 |
| Н.Ю.Бербасова МЕТОД ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА | 191 |
| М.Н. Гриневич, Н.В. Зсленковская. АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ | 199 |

| | |
|--|-----|
| М.Н.Гриневич, В.А.Устинович. АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ И УПРАВЛЕНИЯ РЫНОЧНОЙ СТОИМОСТЬЮ ПРЕДПРИЯТИЯ | 503 |
| Н.И. Горюшкина, Д.Н. Свирский. ПРИМЕНЕНИЕ МАТРИЧНОГО МЕТОДА ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ | 509 |
| А.А. Королько, Л.С. Гронская. ВЛИЯНИЕ МОРАЛЬНОГО ИЗНОСА НА ЭКОНОМИЧЕСКУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ | 514 |
| В.И. Похабов, Д.Г. Антипенко. ВОПРОСЫ ОЦЕНКИ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ И ЦЕНООБРАЗОВАНИЯ НА ПРОЕКТИРУЕМУЮ ТРАКТОРНУЮ ТЕХНИКУ | 518 |
| Т.В. Романькова. УПРАВЛЕНИЕ РЕСУРСОПОТРЕБЛЕНИЕМ В МАШИНОСТРОЕНИИ | 523 |
| В.М. Садков, Ж.М. Банзскуливахо. О НАПРАВЛЕНИЯХ РАЗВИТИЯ РЕМОНТНОГО ПРОИЗВОДСТВА | 526 |
| Н.С.Сачко. О ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОМ АНАЛИЗЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ | 530 |
| Н.С.Сачко. О МЕТОДИКЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА РАБОТЫ ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ ЦЕХОВ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ | 535 |
| ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ | |
| А. В. Бань. ПРАКТИЧЕСКОЕ ОБУЧЕНИЕ СТУДЕНТОВ В ВУЗЕ КАК МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ УМЕНИЙ | 541 |
| Н.Н. Галаганюк. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ БОРИСОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО КОЛЛЕДЖА | 545 |
| Е.А. Гриневич. ДИАГНОСТИКА АДАПТАЦИИ СТУДЕНТОВ К ПРОФЕССИОНАЛЬНО-ПЕДАГОГИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ | 560 |
| Е.П. Дирвук. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ КУЛЬТУРА КАК ИНТЕГРАТИВНЫЙ КРИТЕРИЙ КАЧЕСТВА ОБРАЗОВАНИЯ ИНЖЕНЕРА-ПЕДАГОГА | 564 |
| Е.П. Дирвук. КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ПОДХОДЫ К ОТБОРУ СОДЕРЖАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ ИНЖЕНЕРОВ-ПЕДАГОГОВ | 569 |
| П.А. Палазков. ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПЕДАГОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ: МОДЕЛЬНОЕ ВИДЕНИЕ | 574 |
| П.А. Палазков. ОРГАНИЗАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗРАБОТКИ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ | 579 |
| Л.И. Шахрай. ТРЕБОВАНИЯ К ПОДГОТОВКЕ ИНЖЕНЕРА В УСЛОВИЯХ СТАНОВЛЕНИЯ РЫНОЧНОЙ ЭКОНОМИКИ | 592 |
| РЕФЕРАТЫ | 597 |

Научное издание
МАШИНОСТРОЕНИЕ
выпуск 17

Ответственный за выпуск А.П. Аношко
Технический редактор Н.Д. Константинова

Сдано в набор 27.07.2001. Подписано в печать 4.09.2001.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Формат 60x84/16 Усл. печ. л. 36,8.
Тираж 200 экз. Зак. 830.

Налоговая льгота по ОКРБ 007-98 ч. 1. 22.11.20.500

Издательство УП «Технопринт», ЛВ № 380 от 29.04.1999
Отпечатано на УП «Технопринт», ЛП № 203 от 26.01.1998
220027, Минск, пр-т Ф. Скорины, 65, корп. 14, оф. 215, тел. 231-86-93