

Министерство образования Республики Беларусь
Министерство промышленности Республики Беларусь
Национальная академия наук Беларуси
Государственный комитет по науке и технологиям Республики Беларусь
Белорусский национальный технический университет
Государственное научно-производственное объединение «ЦЕНТР»
ЗАО «МИНСКЭКСПО»

**«ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ
МАШИНОСТРОЕНИЯ И МЕТАЛЛООБРАБОТКИ»**

**«ТЕХНОЛОГИЯ – ОБОРУДОВАНИЕ –
ИНСТРУМЕНТ – КАЧЕСТВО»**

Тезисы докладов 35-ой Международной научно-технической конференции
в рамках международной специализированной выставки
«Машиностроение–2021»

(Минск, 8 апреля 2021 г.)

Минск
БНТУ
2021

УДК 621 (082)
ББК 34.4.я43
П27

Редакционная коллегия:
В.К. Шелег (ответственный редактор),
Л.А. Колесников (ответственный секретарь),

О.К. Яцкевич, В.А. Данилов, В.В. Булавицкий, В.И. Бородавко,
К.Е. Белявин, А.И. Сафонов, М.Л. Хейфец, А.М. Якимович,
М.М. Кане, Ю.В. Синькевич

П27 «Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки» «Технология – Оборудование – Инструмент – Качество» : тезисы докл. междуна. науч.-техн. конф. (Минск, 8 апреля 2021 г.) / редкол.: В.К. Шелег (отв. ред.) [и др.]. – Минск: Бизнесофсет, 2021. – 156 с.

Рецензенты:

академик НАН Беларуси, д.т.н., профессор **Клубович В.В**
академик НАН Беларуси, д.т.н., **Ласковнёв А.П.**

Тезисы докладов, представленные на 35-ой Международной научно-технической конференции «Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки» «Технология–Оборудование–Инструмент–Качество», посвящены новым процессам механической обработки материалов, созданию специального инструмента и технологической оснастки и их влиянию на качество обрабатываемых поверхностей.

Тезисы докладов предназначены для специалистов промышленных предприятий, научных сотрудников, аспирантов, магистрантов и преподавателей высших учебных заведений.

Тезисы докладов приняты к опубликованию в оригинале без правок.

УДК 621 (082)
ББК 34.4.я43

ISBN 978-985-6939-26-9

© Национальная академия наук Беларуси, 2021
© БНТУ, 2021
© ГНПО «Центр»
© МИНСКЭКСПО, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

Августовский П.А. Современные вакуумные физические методы нанесения тонких пленок, основанные на методе испарения материала	8
Авсиевич А.М., Довнар С.С., Резник С.В., Соколов И.О., Кудин В.В., Шашко А.Е., Кругликов А.Е. Динамическая устойчивость модели вертикального пятикоординатного обрабатывающего центра с ЧПУ	10
Ажар А.В., Петрович А.С. Анализ эффективности обработки поверхностей вращения на токарно-фрезерном станке с ЧПУ многофункциональным инструментом	12
Ажар А.В., Петрович А.С., Лавренов Е.В., Шейбак Д.В. Применение технологий комплексной обработки комбинированными инструментами на станках с ЧПУ	14
Алексеев Ю.Г., Королёв А.Ю., Нисс В.С., Паршутто А.Э., Сорока Е.В. Исследование процесса электролитно-плазменного полирования на основе управляемых импульсных режимов	16
Андреева Н.А., Баранов А.А., Корзун А.Е., Кулешов Н.М., Подгорный Г.В. Функционирование интегрированной системы менеджмента качества на ОАО «НПО Центр»	18
Антипов В.И., Виноградов Л.В., Колмаков А.Г., Крутько В.С., Мухина Ю.Э., Баранов Е.Е. Разработка экономнолегированной сверхтвёрдой износостойкой стали с повышенной вязкостью	21
Антипов В.И., Виноградов Л.В., Колмаков А.Г., Сенють В.Т. Влияние карбидов ледебуритной эвтектики на твёрдость и износостойкость экономнолегированных сталей	22
Антипов В.И., Виноградов Л.В., Колмаков А.Г., Хейфец М.Л., Мухина Ю.Э., Баранов Е.Е. Вольфрам-молибдено-кобальтовые быстрорежущие стали повышенной вязкости с твердостью в изделиях 71 HRC	23
Базров Б.М., Хейфец М.Л., Попок Н.Н. Конструкторско-технологические решения при подготовке многономенклатурного производства	25
Белоцерковский М.А., Комаров А.И., Сосновский И.А., Курилёнок А.А., Орда Д.В., Искандарова Д.О. Изучение процесса нанесения покрытия из алюминиево-кремниевого сплава с бронзовым подслоем на стальную поверхность детали	27
Белявин К.Е., Белоцерковский М.А., Сосновский И.А., Курилёнок А.А. Технология нанесения покрытий на детали узлов трения путевых машин центробежным индукционным методом	29
Белявин К.Е., Минько Д.В., Шелег В.К., Белый А.Н. Особенности получения металлофторопластовых материалов для работы в узлах трения	31
Белявин К.Е., Щукин В.Я., Кожевникова Г.В. Разработка новой технологии производства черновых вагонных осей	33

Беляков Н.В., Махаринский Ю.Е., Попок Н.Н. Система поддержки принятия решений синтеза универсально-сборных приспособлений для корпусных деталей	35
Бохан С.Г. Исследование влияния технологии подготовки поверхностей перед напылением на прочность сцепления покрытия с основой	37
Василевич Ю.В., Неумержицкая Е.Ю. Определяющие технологические параметры при производстве торовых оболочек	40
Василевич Ю.В., Неумержицкая Е.Ю., Скворцов К.Г., Федотов Д.А. Альтернатива проколотого отверстия – просверленному, при соединении конструкционных изделий из армированных композитных материалов	43
Веремейчик А.И., Онысько С.Р., Сазонов М.И., Хвисевич В.М. Поверхностное упрочнение деталей движущейся плазменной дугой	45
Виноградов Л.В., Антипов В.И., Колмаков А.Г., Бородавко В.И. Повышение служебных свойств низколегированной инструментальной стали ШХ15СГ в процессе работы в изделиях	47
Витязь П.А., Колмаков А.Г., Антипов В.И., Виноградов Л.В., Мухина Ю.Э., Баранов Е.Е. Исследование влияния карбидов ледебуритной эвтектики на свойства быстрорежущих сталей после радиально-сдвиговой прокатки	48
Данилов А.А. Топология поверхности с профилем в виде треугольника Рело при полигональном формировании методом огибания	50
Данилов В.А., Селицкий А.Н. Исследование точения синусоидальных цилиндрических поверхностей эксцентрично установленным принудительно вращающимся круглым резцом	52
Жорник В.И., Ковалева С.А., Шелег В.К. Оценка качества правящих алмазных карандашей с механоактивированной связкой	54
Жорник В.И., Сенють В.Т., Парницкий А.М., Валькович И.В. Алмазный сверхтвердый материал инструментального назначения полученный в условиях высоких давлений и температур с добавками УДА	56
Кане М.М., Шелег В.К., Кравчук М.А., Кот П.И. Оптимизация режимов зубофрезерования цилиндрических шестерён червячными фрезами, исходя из их влияния на параметры качества шестерён	58
Каштальян И.А., Шпак А.В., Небышинец А.С. Обработка нежестких заготовок на двухсуппортных токарных станках с ЧПУ	61
Колесников Л.А. Дифференциальная оценка жесткости направляющих качения металлорежущих станков	63
Колмаков А.Г., Антипов В.И., Виноградов Л.В., Гайко В.А. Пути повышения свойств и работоспособности низколегированных заэвтектоидных валковых сталей	66
Кравчук А.С., Резник С.В., Соколов И.О., Авсиевич А.М., Шашко А.Е., Кругликов А.Е. Расчет консольно-фрезерного станка с ЧПУ на динамическую жесткость в процессе обработки	67

Кудина А.В., Мысливчик Е.Ю. Современный взгляд на критерии оценки качества металлоповерхностей деталей машин и механизмов в аспекте требований международных стандартов	69
Михайлов М.И., Кузьмич В.И., Хихлуха А.В. Исследование параметров концевых фрез на их виброустойчивость	71
Нисс В.С., Алексеев Ю.Г., Королёв А.Ю., Будницкий А.С. Применение микросекундных импульсных режимов для электрохимического полирования поверхности легкоокисляемых металлов и сплавов	73
Нисс В.С., Паршутто А.Э., Сенченко Г.М., Королёв А.Ю., Янович В.А. Моделирование процесса электрохимического полирования сталей с повышенным содержанием углерода	75
Парфиевич А.Н., Драган А.В., Нерода М.В., Сокол В.А. Информативные частотные составляющие при виброакустической диагностике локальных повреждений зубьев эвольвентных цилиндрических прямозубых колес в составе многовального привода	77
Пилипчук Е.В. Оптимизация технологических режимов метода ЭДПГИ при формировании хромовых покрытий	79
Подгорный Г.В., Ермаченок А.Г. Аддитивные технологии – направление снижения затрат на производство	81
Польский Е.А., Звягинцев Ф.Д., Песиков М.С., Нагоркина Е.М. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств при изготовлении сложнопрофильных высоконагруженных деталей	84
Польский Е.А., Симкин А.З., Воронина И.Д., Скибо А.А. Технологическое обеспечение долговечности элементов оснастки пресс-форм	86
Польский Е.А., Швыряев М.В., Абрамов Р.В., Михневич Д.Н. Надежность технологического обеспечения наработки на отказ при проектировании элементов оснастки пресс-форм	88
Попок Н.Н., Портянко С.А., Анисимов В.С., Косяк Л.Н. Оценка параметров точности и шероховатости поверхностей деталей блочно-модульного режущего инструмента, полученных 3D печатью	90
Реут Л.Е., Шабунько А.А., Шороп А.А. Методика определения деформаций в балках переменного сечения	93
Реут Л.Е., Шабунько А.А., Шороп А.А. Особенности изгиба тонкостенных балок открытого профиля	95
Сакович Н.А. Поверхностная высокотемпературная термомеханическая обработка и эксплуатационные характеристики металлических покрытий	97
Сенють В.Т., Витязь П.А., Хейфец М.Л., Валькович И.В., Колмаков А.Г. Синтез поликристаллического наноструктурного материала на основе КНБ из гексагонального VN после комплексного механо-химического модифицирования	99
Синькевич Ю.В. Методика определения адгезионной прочности вакуумно-плазменных и гальванических покрытий	101

Соколовский С.С. Методика выполнения измерений объема деталей из пористых композиционных материалов с открытыми порами	103
Соколовский С.С., Янчиленко А.С. Концептуальная модель системы автоматизированного проектирования оптимизированных методик выполнения измерений геометрических параметров деталей	105
Соломахо В.Л., Багдюн А.А. Современные подходы к определению размера наночастиц	107
Соломахо В.Л., Цитович Б.В. Ретроспектива контроля параметров макрогеометрии в машиностроении	109
Соломахо В.Л., Цитович Б.В. Технический контроль в машиностроении. Характерные особенности	111
Сорокин С.В., Кузнецов В.А., Петреску Ю.С. Автоматизация качественной оценки технологичности деталей машин	113
Сорокин С.В., Якушев С.М., Полищук Д.Н. Разработка автоматизированной подсистемы расчета технологической себестоимости выполнения механической операции	115
Тамаркин М.А, Тищенко Э.Э., Новокрещенов С.А., Морозов С.А. Исследование формирования качества поверхностного слоя при обработке шарико-стержневым упрочнителем	117
Фролов И.С. Триботехнические характеристики вакуумно-плазменных покрытий на стальной немагнитной основе	119
Фролов И.С., Иващенко С.А., Фролов Ю.И. Формирование мультислойных полосчатых покрытий в вакууме	121
Чижик С.А., Кузнецова Т.А., Бородавко В.И., Хейфец М.Л, Грецкий Н.Л., Батаев А.А., Панин А.В., Колмаков А.Г., Кречетов А.А., Блюменштейн В.Ю. Управление наследованием свойств и обеспечением качества материалов и поверхностей изделий в ресурсосберегающих технологиях	123
Шаройкина А.В., Ярмак Ю.Ю. Влияния термической обработки на износостойкость плазменных карбидных покрытий	125
Шелег В.К., Жигалов А.Н., Кравчук М.А. Исследование износа режущего твердосплавного инструмента, упрочненного аэродинамическим звуковым методом, от скорости резания	128
Шелег В.К., Кардаполова М.А., Луцко Н.И., Лапковский А.С., Пилецкая Л.И. Эволюция микротвердости покрытия из бронзы в процессе его нанесения методом лазерной наплавки	130
Щукин В.Я., Дубенец С.С. Определение пластических свойств металла методом поперечной прокатки	132
Щукин В.Я., Кожевникова Г.В., Кожевников Д.А. Разработка технологии формирования точных заготовок лопатки авиационного двигателя	134
Якубовская С.В., Лебедев В.Я., Бабич В.Е. Влияния структуры ферроабразивных композиционных порошков на морфологию поверхности твердого сплава ТК-15 при магнитно-абразивной обработке	136

Яцкевич О.К., Девойно О.Г., Кардаполова М.А. Структурные превращения в керамических порошках для плазменного напыления в процессе термодиффузионной модификации	138
Stanislau Dounar, Alexandre Iakimovitch, Pavel Shirvel, Anastasiya Penkina, Tanishq John Mathew FEA-audit and redesign of practice-proved centrifuge machine	142
Stanislau Dounar, Alexandre Iakimovitch, Andrzej Jakubowski FEA-analysis of the coupled portal structure in the large horizontal milling machine	146
Ма Минь, Шелег В.К., Леванцевич М.А. Снижение шума зубчатых передач плакированием рабочего профиля зубьев	150
Ажар А.В. Структура, модель и метод расчета надежности сборных торцовых фрез	154

СОВРЕМЕННЫЕ ВАКУУМНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ НАНЕСЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК, ОСНОВАННЫЕ НА МЕТОДЕ ИСПАРЕНИЯ МАТЕРИАЛА

Августовский П.А.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Современные вакуумные физические методы нанесения тонких плёнок PVD (Physical Vapour Deposition) применяются для создания на рабочих поверхностях инструментов, деталей, оборудования покрытий с улучшенными функциональными свойствами, по сравнению со свойствами основного материала изделия. PVD-методы позволяют получать покрытия практически с любыми заданными свойствами: коррозионностойкие, износостойкие, эрозияустойчивые, изолирующие, барьерные, антифрикционные.

Отдельно можно выделить физические методы испарения. Они базируются на испарении материала, из которого формируется плёнка (подложка) путём нагрева. Общими преимуществами группы методов испарения являются: большая энергоэффективность; высокая скорость напыления; температура процесса не более 500°C; возможность селективного нанесения покрытий только на определённые части поверхности, оставляя другие без нанесённого слоя; в качестве подложки может выступать практически любой металл; небольшая толщина слоя, что позволяет сохранить острую режущую кромку инструмента (особенно важно для чистовой обработки); возможность получения многокомпонентных покрытий; малая вероятность появления дефектов в виде пор, трещин; небольшой размер партии деталей, что позволяет легко перепрофилировать производство или же расширить номенклатуру изделий.

Достоинства группы данных методов и сформировали области их применения: инструменты из быстрорежущей стали, т.к. температура процесса не превышает температуру отпуска закаленной стали (около 550°C); детали машин, испытывающие трение и износ; формообразующие штампы и пресс-формы; литейные формы для сплавов цветных металлов, алюминия, пластмасс и резины [1].

Одним из методов испарения является термическое испарение. Подложка, на которую проводится напыление, закреплена на держателе. К держателю примыкает нагреватель резистивного типа (напыление, как правило, проводится на нагретую подложку для улучшения адгезионных свойств покрытия). Испаритель включает в себя нагреватель и источник напыляемого вещества. Поворотная заслонка перекрывает поток паров от испарителя к подложке, напыление длится в течение времени, когда заслонка открыта. Достоинства резистивного нагрева – высокий КПД, низкая стоимость оборудования, безопасность в работе (низкое напряжение на зажимах), малые габаритные размеры, простота в эксплуатации. Недостаток – сложность испарения тугоплавких материалов.

При вакуумно-дуговом испарении (Arc-PVD), в камере создается вакуум с давлением порядка 10^3 Па. Между анодом, поджигающим электродом и катодом, выполненным из наносимого материала, подается напряжение. Поджигающий электрод служит для зажигания электрической дуги. Это действие производится кратковременным касанием поджигающего электрода поверхности катода. Локальная температура катодного пятна чрезвычайно высока (около 15000°C), что вызывает интенсивное испарение и ионизацию в них материала катода и образование высокоскоростных потоков плазмы (до 10 км/с), распространяющихся из катодного пятна в окружающее пространство. Испарение материала производится из области катодных микропятен вакуумной дуги. Достоинства метода вакуумно-дугового испарения: получаемые покрытия имеют высокую прочность сцепления с подложкой, дисперсную структуру и малую пористость; возможность распылять металлы и сложные сплавы; хорошая производительность. Недостатком – если катодное пятно остаётся в точке испарения слишком долго, оно эмитирует большое количество макрочастиц или капельной фазы.

Ещё одним из методов испарения является испарение электронным лучом (Electron-beam PVD). В установках, использующих испарение электронным лучом, к катоду с подводится высокое напряжение (от 1 до 10 кВ). В результате создается сфокусированный и ускоренный пучок электронов (около 200 А), который направляется на мишень с металлическим материалом покрытия. К мишени подведено положительное напряжение. К противоположной подставке с покрываемыми деталями подведено отрицательное напряжение, так называемое напряжение смещения. Положительные ионы испаренного вещества сразу осаждаются на подложке, либо сначала вступают в реакцию с активным газом, а затем осаждаются в виде какого-либо соединения. Достоинствами данного метода являются: высокая интенсивность процесса нанесения; возможность многослойного нанесения покрытий. Недостатки метода: неоднородность толщины получаемых плёнок; сложность аппаратуры питания и управления; трудность испарения металлов высокой теплопроводности (Cu, Al, Ag, Au); питание высоким напряжением; во время процесса нанесения происходит генерация электромагнитного излучения, которое является рентгеновским [2].

Примером оборудования, в котором одновременно реализовано 2 метода испарения (термическое испарение и испарение электронным лучом) является вакуумное технологическое оборудование «Stratnanotech Libra 700M» разработанное и произведённое компанией ООО «СтратНаноТек Инвест», предназначенное для нанесения неравнотолщинных многослойных прецизионных оптических покрытий на оптические детали в вакууме. Установка имеет вакуумную камеру размерами 750x750x950 мм, представленную на рисунке 1. Узел испарения электронным лучом расположен слева в камере, термического испарения – справа. Образцы (диаметр 7...154 мм, толщина 1...100 мм) фиксируются оператором на универсальном подложкодержателе купольного типа вручную, вакуумная камера откачивается до вакуума порядка

8×10^{-6} мБар, сначала механическим, а затем турбомолекулярным насосами. Далее включаются нагреватели и начинается вращение подложкодержателя (для улучшения адгезионных свойств покрытий). Затем производится напуск технологического газа и включаются технологические устройства: электронно-лучевой или резистивный испарители, ионный источник для очистки/ассистирования. Контроль процесса напыления осуществляют при помощи кварцевого измерителя толщины и/или системы оптического контроля.

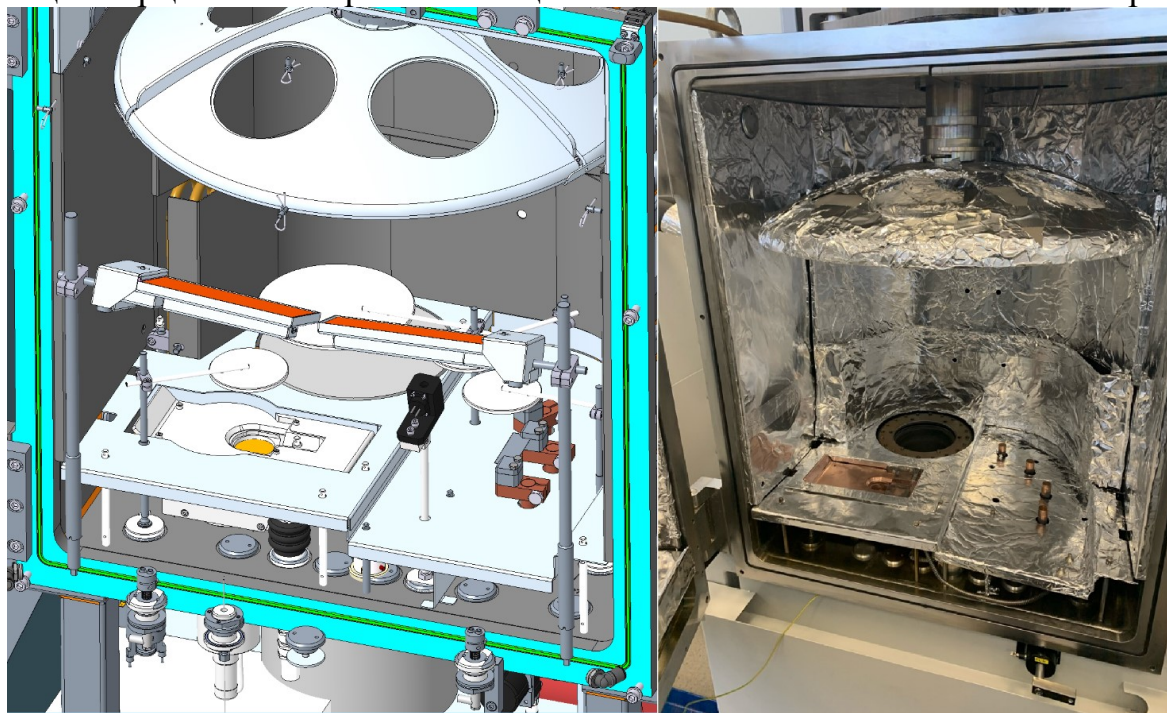


Рисунок 1 – Вакуумная камера установки «Stratnanotech Libra 700M» (слева – в CAD среде Creo Parametric, справа – во время пусконаладочных работ)

На основе описанных ранее характеристик и возможностей каждого из методов, а также рассмотрения установки «Stratnanotech Libra 700M» можно сделать следующие выводы: 1. Группа методов испарения широко применяется для получения тонких покрытий, благодаря малым ограничениям по напыляемым материалам, высокой энергоэффективности и производительности. 2. Максимальная эффективность достигается правильным выбором необходимой технологии для конкретной задачи. 3. Благодаря возможности совмещения в одном вакуумном технологическом оборудовании сразу нескольких методов испарения появляется возможность создания сложных многокомпонентных и многослойных покрытий в пределах одного рабочего пространства. В связи с чем актуальна задача автоматизации выбора необходимого метода или группы методов для получения требуемых покрытий с заданными свойствами.

1. Износостойкое покрытие инструмента PVD и CVD. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pitools.ru>. – Дата доступа: 24.02.2021.
2. Панин А.В. Металлы и полупроводники: Технологии и процессы : курс лекций / А.В. Панин. – Томск : ТПУ, 2016. – 433 с.

ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ МОДЕЛИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПЯТИКООРДИНАТНОГО ОБРАБАТЫВАЮЩЕГО ЦЕНТРА С ЧПУ

**Авсиевич А.М.¹, Довнар С.С.¹, Резник С.В.², Соколов И.О.¹, Кудин В.В.¹,
Шашко А.Е.¹, Кругликов А.Е.¹**

1) Белорусский национальный технический университет, Минск

2) ОАО «СтанкоГомель», Гомель,
Республика Беларусь

Качество создаваемых новых образцов техники определяется качеством проектирования и изготовления. На сегодняшний день качество проектирования играет все большую роль и на этом этапе возможен и необходим учет технологических возможностей изготовителя с соответствующей коррекцией конструкции. Для сложных механических систем эффективным инструментом при проектировании является проведение виртуальных компьютерных испытаний и анализ конструкции по установленным критериям.

Данная работа посвящена виртуальным компьютерным испытаниям вибрационных процессов и исследованию устойчивости к возникновению колебаний вновь проектируемого обрабатывающего центра. В ходе математического моделирования методом конечных элементов (МКЭ) проведены испытания на жесткость конструкции, определены собственные частоты и частоты возбуждаемых резонансов. Для выполнения этих задач разработана 3D-модель обрабатывающего центра [1]. На основании 3D-модели создана конечно-элементная модель, которая состоит из сеток конечных элементов, соединенных контактными парами. В МКЭ-модель добавлены шарниры, пружины и сосредоточенные массы. Обеспечено корректное отображение направляющих качения, подшипников, приводов подачи [1].

Проведены статические конечно-элементные расчеты (рисунок 1). В ходе их выявлена картина перемещений станка под действием внешних сил. Определены жесткости элементов конструкции, влияющие на ее вибрационное состояние. Проведены виртуальные эксперименты по выявлению жесткости на шпинделе по трем координатам.

При модальном анализе выявлены возможные резонансные частоты станка. Для каждой резонансной моды выяснена собственная частота и характерная форма колебаний [2].

Гармонический МКЭ-анализ произведен для изучения воздействия на станок гармонически изменяющихся внешних сил. Построены амплитудно-частотные (АЧХ) и амплитудно-фазо-частотные характеристики (АФЧХ) (рисунок 2). На основании анализа АЧХ определены возбуждаемые собственные частоты, а по АФЧХ выполнен анализ устойчивости обрабатывающего центра к возникновению резонансов [3]. Оценен запас

устойчивости для колебаний основных узлов станка в направлении координатных осей.

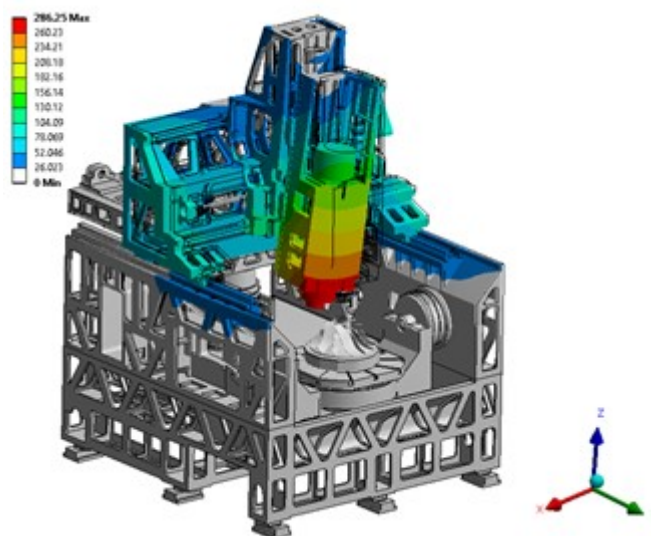


Рисунок 1 – Результаты расчетов суммарных перемещений при определенном виде нагружения

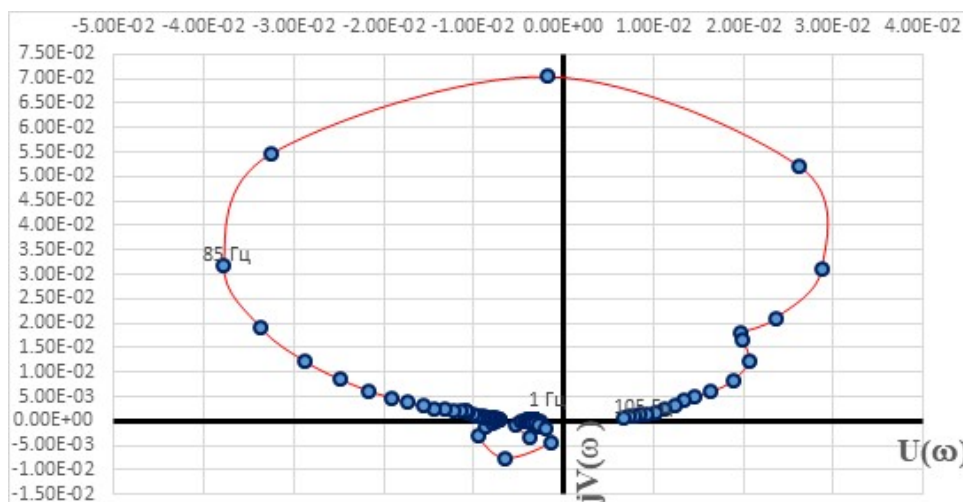


Рисунок 2 – АФЧХ заготовки ZForce, Az-axes

По результатам моделирования и анализа полученных данных предложены рекомендации по совершенствованию конструкции обрабатывающего центра.

1. Инженерный анализ в Ansys Workbench. / В.А.Бруйка [и др.]. — Учебное пособие. — Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2010. — 271 с.

2. Василевич Ю.В., Довнар С.С., Шумский И.И. Модальный анализ несущей системы тяжелого горизонтального многоцелевого станка с помощью МКЭ // Наука и техника. 2014. - № 4. С.14 - 24.

3. Вибрации в технике: Справочник в 6-ти т. / Ред. совет: В.Е. Челомей (пред.). – М.:Машиностроение, 1978 – Т.1. Колебания линейных систем / Под ред. В.В. Болотина. 1978. – 352 с.

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВРАЩЕНИЯ НА ТОКАРНО-ФРЕЗЕРНОМ СТАНКЕ С ЧПУ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

Ажар А.В.¹, Петрович А.С.²

1. Белорусский национальный технический университет Минск, Республика Беларусь;
2. ЗАО «Белробот» Минский р-н, Минская обл., Республика Беларусь.

Частными критериями оценки эффективности применения многофункционального инструмента являются: производительность, выраженная в машинном и штучном времени с учетом вспомогательного времени на смену инструмента, энергозатраты, выраженные часовой и удельной мощностью резания за время обработки детали, расход и удельная стоимость инструмента на деталь или партию. Возможность применения многофункционального инструмента рассмотрена на примере обработки детали «Крышка» 82-2301051 (рисунок 1, 2), входящей в передние ведущие мосты тракторов «Беларус-82.1/82У/82Р» изготавливаемой из чугуна ВЧ-50 ГОСТ 7293-85, твердостью 153...245 НВ. Маршрут обработки отверстий (рисунок 1), торцевых, наружных и внутренних поверхностей вращения (рисунок 2) реализован на агрегатных станках, входящих в состав автоматической линии ЛБ0390. Для обработки отверстий $\varnothing 25 \text{ H}11^{+0,13}$, $\varnothing 26 \text{ H}12^{+0,21}$ и бобышек применяется 5 операций и 9 переходов с соответствующим числом инструментов. Полный цикл токарной обработки происходит за 8 операций. Присутствует частичное совмещение переходов за счет одновременной обработки 2-х групп отверстий, а далее наружных и внутренних поверхностей вращения.

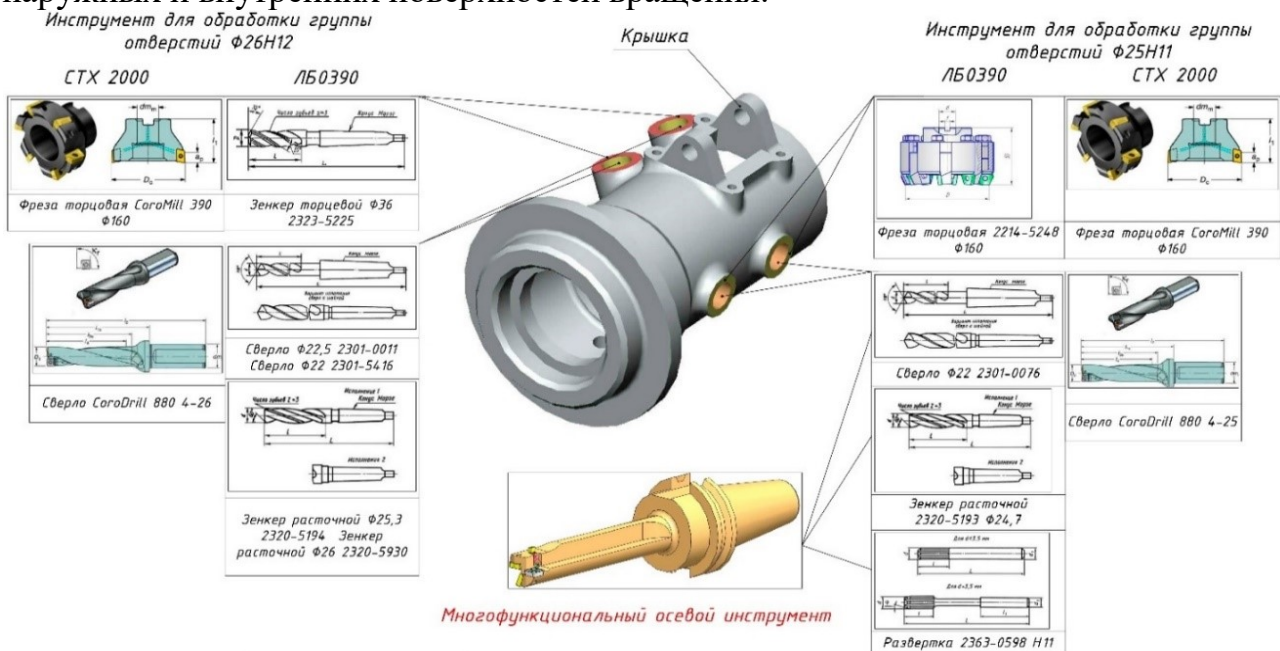


Рисунок 1 – Обработка отверстий и бобышек в детали «Крышка»

Проект обработки на токарно-фрезерном станке СТХ gamma 2000 ТС фирмы DMG MORI [1] для 6-стороннего резания включает три инструмента, в том числе разработанный сборный осевой многофункциональный токарно-сверлильный с 4-мя СНП (рисунок 1, 2). Две пластины для сверления отверстий Ø25. Третья - выполняет наружное точение, подрезку торца и растачивание отверстия. Четвёртая – для обработки наружной канавки.

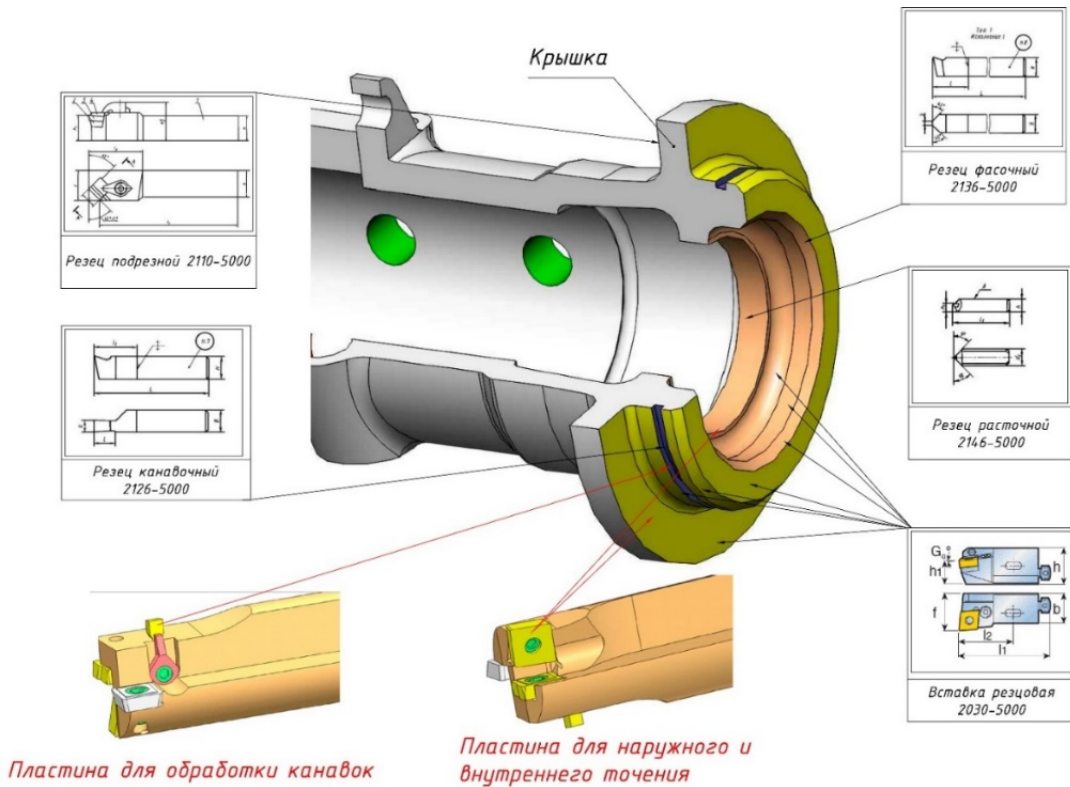


Рисунок 2 – Обработка цилиндрических и торцевых поверхностей

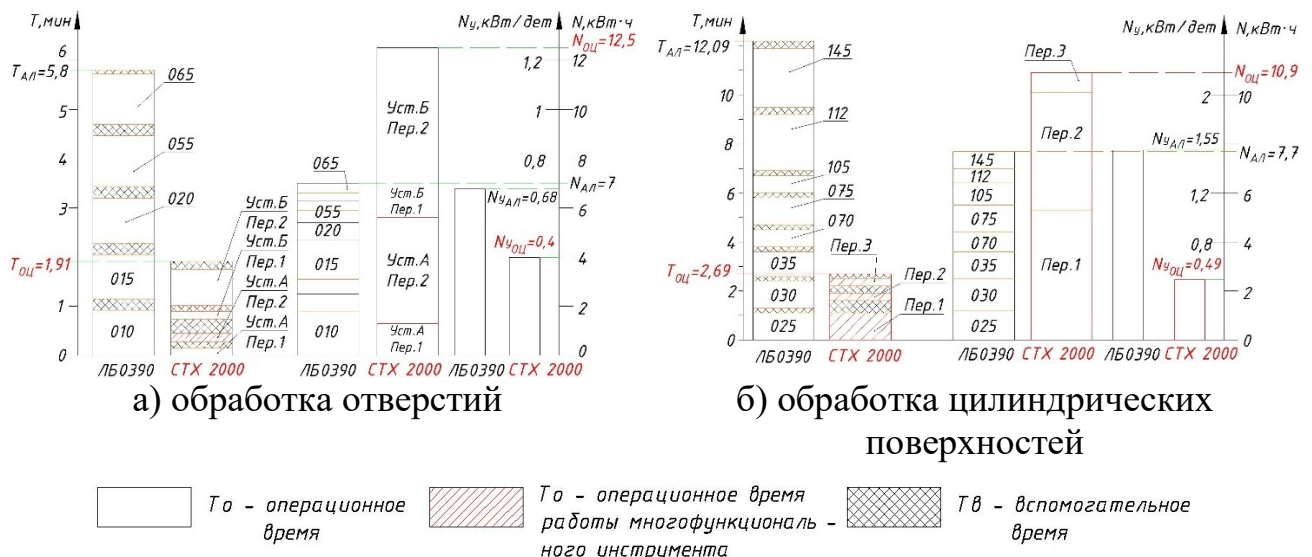


Рисунок 3 – Сравнение загрузки станков по времени и мощности

Сравнение единичных технико-экономических показателей производительности и энергозатрат подтверждает эффективность применения новых методов обработки, оборудования и инструмента (рисунок 3) [2, 3].

Сокращение штучного времени почти в 4 раза, сопровождается ростом в 1,6 раза часовых энергозатрат, которые компенсируются более важным показателем уменьшением удельной мощности на обработку детали в 2,5 раза. Многократное сокращение номенклатуры инструментов, количества единиц оборудования наряду с расширением технологических возможностей еще в большей степени подтверждает эффективность методов многофункциональной обработки резанием осесимметричных, резьбовых поверхностей со сложным пространственным расположением.

1. <https://ru.dmgmori.com/products/machines/turning/turn-mill/ctx-tc/>
2. Справочник технолога-машиностроителя: в 2-х т. Т. 2. / А. М. Дальский [и др.]. - 5-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 2001. – 944 с.
3. <https://www.sandvik.coromant.com/ru-ru/products/Pages/toolguide.aspx>

УДК 621.9.04

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ КОМПЛЕКСНОЙ ОБРАБОТКИ КОМБИНИРОВАННЫМИ ИНСТРУМЕНТАМИ НА СТАНКАХ С ЧПУ

Ажар А.В.¹, Петрович А.С.², Лавренов Е.В.³, Шейбак Д.В.¹

1. Белорусский национальный технический университет, Минск;
2. ЗАО «Белробот» Минский р-н, Минская обл.,
3. ОАО «МЭТЗ им. В.И.Козлова», Минск

Комбинируемая механическая обработка является наиболее эффективным методом повышения производительности. Технологии совмещения операций за счет многошпиндельной и многосторонней обработки с одновременным выполнением нескольких технологических переходов на агрегатных станках и токарных автоматах потеряли актуальность в связи с сокращением номенклатуры изделий крупносерийного и массового производства. Основным элементом комплексной механизации обработки в мелкосерийном производстве, является использование станков с ЧПУ. Экономически данная технология оправдывает себя при увеличении сложности обработки и максимальной загрузки станка по времени. Стратегия одноинструментальной последовательной обработки сложных поверхностей благодаря кинематической гибкости оборудования и быстрой автоматической смене инструмента вполне себя оправдывает в условиях широкой номенклатуры выпускаемых корпусных и деталей типа тел вращения. Однако и в данных условиях остается достаточный резерв для роста технико-экономических показателей процесса резания. Стратегия комбинированного резания получила новое «дыхание» на оборудовании для комплексной (фрезерно-сверлильно-расточной, токарно-фрезерной) многокоординатной обработки специальным цельным и сборным многофункциональным

инструментом на основе стандартных и унифицированных элементов (сменных пластин, вставок и модулей). Для обработки отверстий, бобышек, внутренних и наружных резьб, торцов, наружных цилиндров применяются комбинированные инструменты, реализующие схемы токарной, сверлильной, фрезерной обработки с главным вращательным движением, как детали, так и инструмента. Для таких инструментов наиболее эффективной является форма в виде тела вращения с расположением режущих лезвий по окружности с различным вылетом в радиальном и осевом направлении. Наличие привода позиционирования инструмента относительно обрабатываемой поверхности позволяет совмещать в одном корпусе до 6-ти инструментов разного функционального назначения и выполнять до 10 различных операций. Последними примерами таких конструкций являются цельные и сборные токарно-фрезерные инструменты используемые, как в качестве вращающегося при сверлильно-фрезерной обработке, так и в качестве не вращающегося при токарной обработке [1, 2, 3]. В конструкции токарно-фрезерного инструмента фирмы Sandvik (рисунок 1) фрезерные пластины устанавливаются в корпусе немного выше токарных пластин и в осевом, и в радиальном направлении, т.к. токарные пластины в момент фрезерования не должны участвовать в резании.

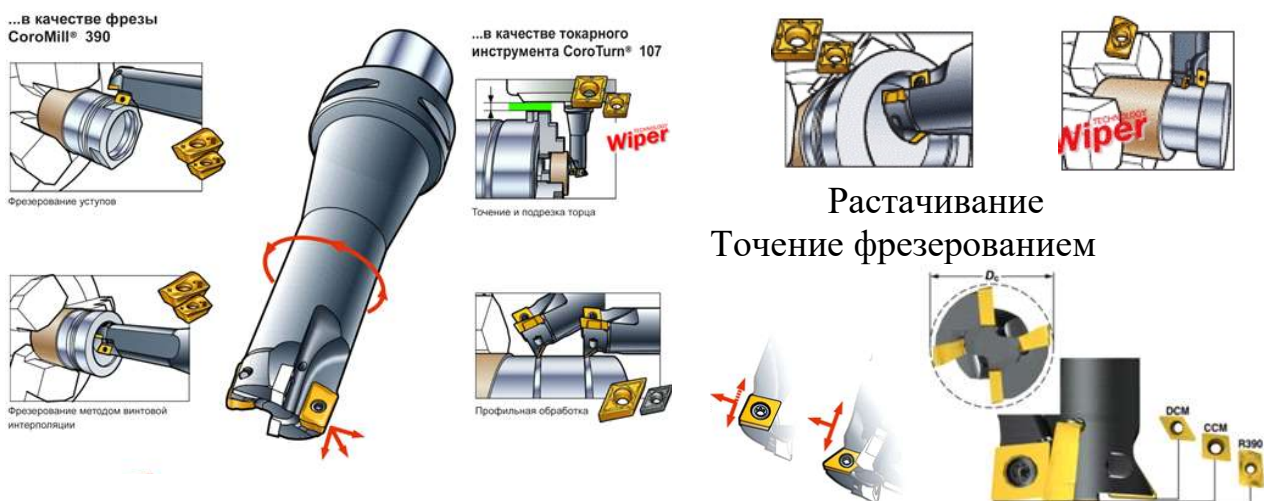


Рисунок 1 – Многофункциональный токарно-фрезерный инструмент серии Coro Plex MT [1]

Многофункциональный инструмент фирмы Iscar (рисунок 2) способен выполнять до 10 операций: черновое и чистовое точение и расточка в упор и с подрезкой, сверление, нарезание резьб, фрезерование линейное и с интерполяцией. Несимметричное расположение пластин в радиальном сечении с различным вылетом кромок расширяет возможности инструмента. Инструмент фирмы Ceratizit серии EcoCut (рисунок 3) содержит всего одну специальную пластину с углом при вершине 88° , которой выполняет сверление, наружное точение, растачивание, заменяя собой 3 обычных инструмента, а в исполнении ProfileMaster дополнительно обеспечивает проточку канавок.

Таким образом, при технологической подготовке производства изделий с развитой структурой поверхностей вращения необходимо проводить детальный анализ возможности оснащения станков с ЧПУ многофункциональными комбинированными инструментами на основе технико-экономических показателей эффективности обработки. При увеличении числа взаимосвязанных координат (2-5), реализуемых станком, возрастает сложность конструкций инструментов наравне с эффективностью их применения.

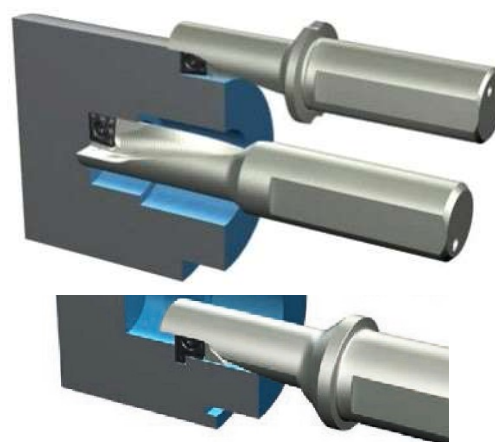
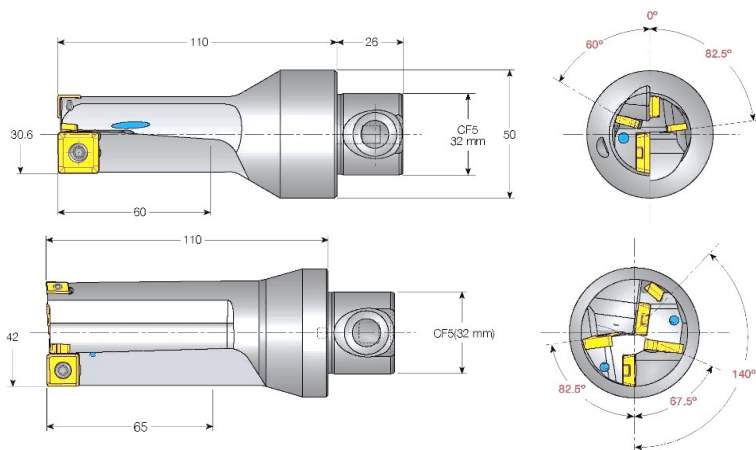


Рис. 2. Инструмент Iscar серии DMTT-MF [2] Рис. 3. Инструмент Ceratizit [3]

1. [https://www.sandvik.coromant.com/ru-ru/products/coroplex mt](https://www.sandvik.coromant.com/ru-ru/products/coroplex%20mt)
2. <http://www.lab2u.ru/katalog-iscar-2008-tokarnyi-lab2u.html>
3. <http://www.lab2u.ru/katalog-ceratizit-2016-metallorzhushchii-lab2u.html>

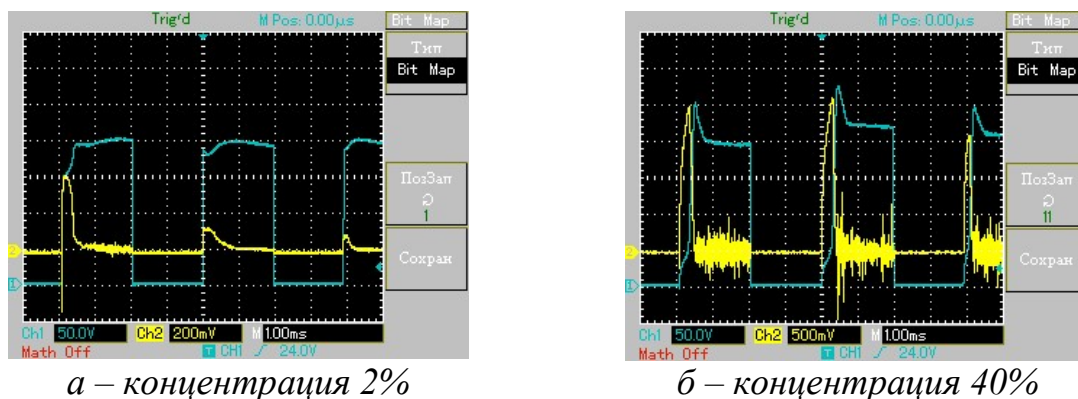
УДК 621.9.047.7

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОГО ПОЛИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ УПРАВЛЯЕМЫХ ИМПУЛЬСНЫХ РЕЖИМОВ

Алексеев Ю.Г., Королёв А.Ю., Нисс В.С., Паршутто А.Э., Сорока Е.В.
Белорусский национальный технический университет,
Минск, Республика Беларусь

Для снижения энергоемкости и повышения эффективности процесса электролитно-плазменного полирования металлических материалов при сохранении высокой интенсивности, качества обработки и экологической безопасности разработан принципиально новый импульсный метод, совмещающий преимущества как электрохимической, так и электролитно-плазменной обработки. Метод реализуется за счет совмещения в пределах одного импульса миллисекундной длительности амплитудой более 200 В двух чередующихся стадий: электрохимической и электролитно-плазменной [1].

В работе исследовалось изменение удельного съёма в процессе обработки поверхности и плотности тока. Для обработки образцов использовались электролиты двух составов: 1) раствор сульфата аммония в дистиллированной воде с концентрацией от 2 до 40%; 2) раствор сульфата аммония в дистиллированной воде с концентрацией от 2 до 40% с добавлением 1% лимонной кислоты. Импульсный процесс в электролите при достаточно высоком напряжении (рисунок 1) имеет две различные стадии: электрохимическую (импульс постоянного тока), и электролитно-плазменную (высокочастотный переменный ток намного меньшей амплитуды).



а – концентрация 2%

б – концентрация 40%

Рисунок 1 – Осциллограммы импульсов тока и напряжения при обработке стали AISI 316 в водном растворе сульфата аммония

С повышением концентрации электролита съём увеличивается. Этим обработка с применением управляемых импульсных режимов существенно отличается от традиционной электролитно-плазменной обработки, при которой съём практически не зависит от концентрации электролита. Как видно из зависимостей на рисунке 2, съём при электролитно-плазменном полировании в импульсном режиме в три раза больше даже при малой концентрации электролита (4%), когда ещё нет режима полирования. В режиме полирования при концентрации 40% съём больше в шесть раз по сравнению с режимом традиционной электролитно-плазменной обработки.

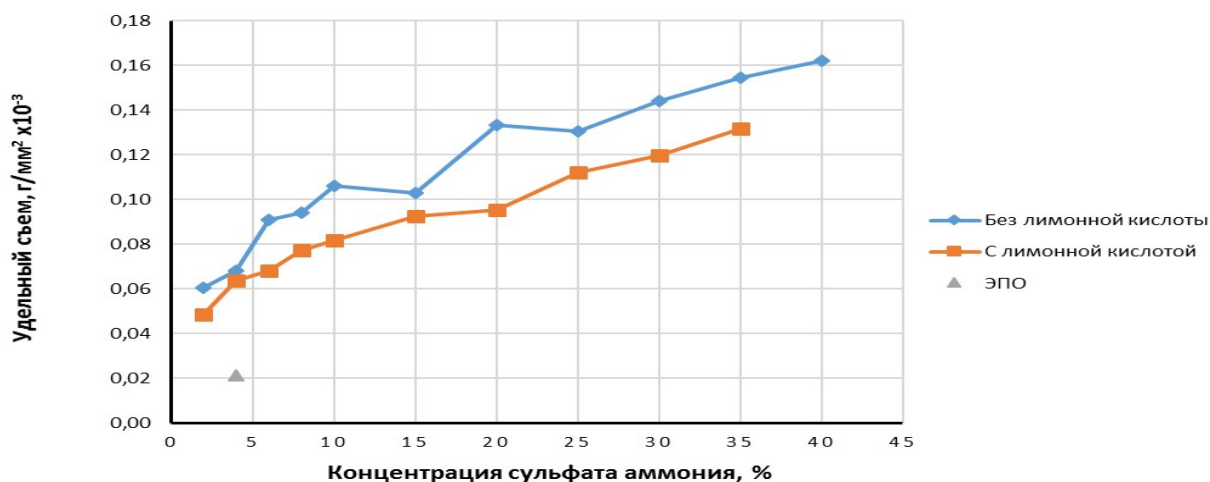


Рисунок 2 – Зависимости удельного съёма с поверхности образца из нержавеющей стали AISI 316 при полировании с применением управляемых импульсных режимов электролитно-плазменной обработки

Установлено, что повышение концентрации сульфата аммония с 2 до 40% приводит к изменению значения плотности тока обработки: для электрохимической стадии от 4–12 А/см² при 2% до 45–64 А/см² при 40%; для электролитно-плазменной стадии от 1–3 А/см² при 2% до 13–15 А/см² при 40%. Примеры изделий из коррозионностойкой стали после полирования с применением управляемых импульсных режимов электролитно-плазменной обработки представлены на рисунке 3.



Рисунок 3 – Образцы изделий из коррозионностойкой стали после полирования с применением управляемых импульсных режимов электролитно-плазменной обработки

1. Королёв, А.Ю. Технология полирования с применением комплексного электрохимического и электролитно-плазменного воздействия в управляемых импульсных режимах / А.Ю. Королёв, В.С. Нисс, А.Э. Паршутто // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: мат. Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 25–26 апреля 2019 г. – Могилев: БРУ, 2019. – С. 51–52.

УДК 388:621

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА НА ОАО «НПО Центр»

Андреева Н.А., Баранов А.А., Корзун А.Е., Кулешов Н.М., Подгорный Г.В.
ОАО «НПО Центр» НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

ОАО «НПО Центр» является ведущей организацией по разработке и производству центробежной техники, испытательных стендов, дробильно-измельчительного, классифицирующего и пылеулавливающего оборудования для процессов переработки и обогащения рудных и нерудных материалов,

металлоконструкций различной степени сложности, технологического оборудования, технологических линий и комплексов, медицинских центрифуг, комплексов плазменной и гидроабразивной резки, аттракционов и обладает новыми для Республики Беларусь технологиями электронно-лучевой сварки ответственных узлов и высоконагруженных механизмов для энергетического и транспортного машиностроения, приборостроения, авиакосмической отрасли, технологии центробежного литья черных и цветных металлов и другие.

Система менеджмента качества на соответствие требованиям СТБ ISO 9001 в организации разработана, внедрена, сертифицирована и успешно функционирует с 2007 года. В мае 2018 г. проведена периодическая оценка системы менеджмента качества (СМК) с внедрением новой версии СТБ ISO 9001-2015. В соответствии с новой версией стандарта, в организации определены внутренние и внешние факторы, влияющие на способность достигать намеченного результата СМК и внедрено риск-ориентированное мышление. В то же время сохранен процессный подход, который включает цикл «планируй-делай-проверяй-действуй».

В организации определены основные процессы имеющие наибольшее значение для достижения установленных целей. Такими процессами являются: процесс «Маркетинговая деятельность», процесс «Проектирование и разработка», процесс «Производство».

Высокое качество продукции достигается путем контроля качества на всех этапах изготовления изделия. На стадии разработки проводится техническая экспертиза конструкторской и технологической документации. Закупка материалов и комплектующих осуществляется только с сертификатами качества и соответствия, а также паспортами, формулярами и другими сопроводительными документами подтверждающими качество поступившего материала и комплектующих изделий с дополнительным проведением входного контроля.

Входной контроль качества продукции проводится отделом технического контроля с привлечением действующей в организации аккредитованной лаборатории по ремонту и поверке средств измерений и электрических испытаний на соответствие требованиям СТБ ИСО/МЭК 17025-2007 (контроль электрооборудования), проводится спектральный анализ металлов и сплавов, испытание материалов на механические свойства, линейно-угловые измерения, неразрушающий контроль поковок и сварных соединений ультразвуковым и радиографическим методом для определения однородности металла.

В процессе производства проводится операционный контроль выполнения технологических операций. В организации имеется большой перечень универсальных средств измерений, обладающих высокой точностью и надежностью в работе.

В ОАО «НПО Центр» имеется две лаборатории по метрологическому контролю (поверке) и ремонту средств измерений, укомплектованные поверителями с соответствующими сертификатами компетентности и

обеспеченные необходимыми средствами измерений для выполнения и контроля технологических операций изготовления продукции.

На заключительной стадии изготовления продукции проводятся приемо-сдаточные и периодические испытания.

ОАО «НПО Центр» осуществляет на высоком уровне сервисное обслуживание продукции у потребителя. С потребителем поддерживается постоянная связь, проводится сбор информации о работе изделий (анкеты потребителя) с последующей статистической обработкой данных. ОАО «НПО Центр» действует исходя из взаимовыгодного сотрудничества всех заинтересованных сторон, установления и развития партнерских отношений, укрепления авторитета надежного партнера. Выпуская современную и качественную продукцию, предоставляя гарантийный и послегарантийный сервис, ОАО «НПО Центр» стремится максимально удовлетворить ожидания потребителей. Основными намерениями деятельности ОАО «НПО Центр» на данном этапе являются:

1. Проектирование, производство и реализация исключительно качественной и конкурентоспособной продукции в соответствии с требованиями заинтересованных сторон.

2. Техническое переоснащение и совершенствование методов организации производства.

3. Производство постоянного мониторинга рынка для выявления потребностей потребителей, расширение существующих рынков сбыта продукции.

4. Подбор компетентного персонала, поддержание его профессионального уровня, привлечение персонала к совершенствованию процессов менеджмента качества.

5. Совершенствование системы менеджмента качества.

Внедрение и применение СМК обеспечивает управление деятельностью организации с повышением ответственности в области качества и гарантирует выполнение требований потребителя в полном объеме.

В ОАО «НПО Центр» целенаправленно проводится работа по реализации государственной политики в области охраны труда и профилактики производственного травматизма, обеспечения безопасности жизни и здоровья работающих в процессе их трудовой деятельности. На предприятии разработана, внедрена и функционирует система управления охраной труда, обеспечивающая идентификацию опасностей, оценку профессиональных рисков, ориентированный подход к управлению деятельностью и анализ их результативности, которые находят свое отражение в ежегодно разрабатываемых мероприятиях и планах отдела охраны труда и промышленной безопасности.

РАЗРАБОТКА ЭКОНОМНОЛЕГИРОВАННОЙ СВЕРХТВЁРДОЙ ИЗНОСОСТОЙКОЙ СТАЛИ С ПОВЫШЕННОЙ ВЯЗКОСТЬЮ

Антипов В.И.¹, Виноградов Л.В.¹, Колмаков А.Г.¹, Крутько В.С.²,
Мухина Ю.Э.¹, Баранов Е.Е.¹

1) ФГБУН Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, РФ

2) Открытое акционерное общество «НПО Центр» НАН Беларуси, Минск, РБ

Разработка новых экономнолегированных валковых сталей, обладающих экстремально высоким уровнем твердости и износостойкости при сохранении вязких свойств материала, остается актуальной на протяжении длительного периода. В настоящее время для изготовления валков листопрокатных станов широко используются стали типа «90X», основными показателями качества которых являются высокая твердость и износостойкость. Стали этой группы относятся к низколегированным сталям перлитного класса, содержащим не более 2-4% легирующих элементов, включающих хром, кремний, марганец, вольфрам, молибден и ванадий, а также углерода от 0,8 до 1,4% [1]. Однако стали данного типа обладают недостаточно высокой твердостью (не выше 63 HRC) и износостойкостью, поскольку в их структуре содержатся только вторичные карбиды. Кроме того, из-за большого содержания в структуре этих сталей неметаллических включений (оксидов и сульфидов) изготавливаемые из них изделия обладают повышенной хрупкостью. Задачей данной разработки было добиться повышения твердости материала до значений в 67-69 HRC при одновременном сохранении повышенного уровня вязкости. Указанная цель была достигнута путём увеличения содержания углерода в составе стали до максимально допустимого уровня – 2,15–2,25%, что качественно изменило структуру материала, переведя его в разряд сталей ледебуритного класса [2]. Появление в структуре стали 15-18% высокотвердых первичных карбидов ледебуритной эвтектики существенно (в 1,5 раза) увеличило износостойкость материала по сравнению со сталями типа «90X». Дополнительное включение в состав новой стали алюминия и кальция, резко снизило загрязненность материала неметаллическими включениями (оксидами и сульфидами), повысив тем самым её вязкость. На опытных образцах новой стали после термообработки по режиму: закалка в масле с температур 880⁰C с последующим термоциклированием (-70⁰C) – 0,5 часа и отпуском 130⁰C – 2 часа – 3 раза, была достигнута твердость - 67-69 HRC, что на 4-6 единиц HRC выше, чем у изделий из сталей группа «90X» (63HRC).

1. Геллер Ю.А. Инструментальные стали. М., Металлургия, 1983. – 528 с.

2. Антипов В.И., Виноградов Л.В., Лукина Ю.А., Колмаков А.Г., Доронин Д.И., Баранов Е.Е. Поиск оптимального соотношения углерода и ванадия в составе быстрорежущей стали ЭП-682-III с целью достижения максимальной твердости // Перспективные материалы. – 2017. – №5. – С. 56-61.

ВЛИЯНИЕ КАРБИДОВ ЛЕДЕБУРИТНОЙ ЭВТЕКТИКИ НА ТВЁРДОСТЬ И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ЭКОНОМНОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Антипов В.И.¹, Виноградов Л.В.¹, Колмаков А.Г.¹, Сениуть В.Т.²

- 1) ФГБУН Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук, Москва, Российская Федерация
- 2) Открытое акционерное общество «НПО Центр» НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Для материалов, работающих в условиях больших контактных напряжений и абразивного воздействия, большое значение имеют показатели их твёрдости и износостойкости. Противостоять износу сталей способствуют частицы карбидов, располагающиеся в мартенситной матрице высокопрочных сталей [1, 2]. Так в структуре низколегированных валковых сталей, в большинстве случаев, относящихся к сталям ледебуритного класса, могут присутствовать различные виды карбидов от цементита (Fe_3C) до специальных легированных карбидов, включающих хром, молибден, вольфрам, ванадий. Согласно [2] именно первичные карбиды ледебуритной эвтектики наиболее эффективно повышают износостойкость стальных изделий. Твёрдость этих карбидов составляет от $H_v=15000$ МПа до $H_v=35000$ МПа. Для обеспечения присутствия в структуре стали высокотвёрдых карбидов ледебуритной эвтектики, в её химическом составе должно содержаться более 2% углерода, что будет способствовать увеличению износостойкости изделий, работающих в условиях интенсивного абразивного износа. Такая валковая сталь с экстремально высокой твёрдостью (до 70 HRC) способна успешно конкурировать с дорогими и низкотехнологичными металлокерамическими твёрдыми сплавами. В сталях ледебуритного класса (160X12МФ, 210X12, 90X18 и др.) указанное выше преимущество достигается ещё и за счёт того, что после радиально-сдвиговой прокатки в её поверхностном слое формируется структура дисперсно-упрочненного композиционного материала с мартенситной матрицей. Такая структура позволяет получать высокотвёрдые стали с повышенным значением вязкости, что чрезвычайно важно при изготовлении инструментов ударного действия.

1. Гуляев А.П. Термическая обработка стали. (2-е издание), М.:Машгиз, 1960. – 496 с.
2. Геллер Ю.А. Инструментальные стали. М.:Металлургия, 1983. – 528 с.

ВОЛЬФРАМО-МОЛИБДЕНО-КОБАЛЬТОВЫЕ БЫСТРОРЕЖУЩИЕ СТАЛИ ПОВЫШЕННОЙ ВЯЗКОСТИ С ТВЕРДОСТЬЮ В ИЗДЕЛИЯХ 71 HRC

**Антипов В.И.¹, Виноградов Л.В.¹, Колмаков А.Г.¹, Хейфец М.Л.²,
Мухина Ю.Э.¹, Баранов Е.Е.¹**

- 1) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук, Москва, Российская Федерация
- 2) Открытое акционерное общество «НПО Центр» НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

В настоящее время в различных отраслях обрабатывающей промышленности наибольшим спросом пользуются быстрорежущие стали, которые по сравнению с металлокерамическими твердыми сплавами, керамикой и сверхтвердыми материалами обладают повышенной вязкостью и прочностью на изгиб, превосходящей в 3–10 раз аналогичный показатель у других групп инструментальных материалов. Это позволяет изготавливать из быстрорежущих сталей инструменты с тонкой режущей кромкой, а также инструменты, работающие в условиях ударных нагрузок. Однако основным недостатком быстрорежущих сталей является их относительно низкая твердость. Поэтому создание новой быстрорежущей стали с твердостью в изделиях до 71 HRC является весьма актуальной задачей современного материаловедения. В настоящем докладе представлены основные технические решения, применённые при создании новой высокотвёрдой вольфрам-молибдено-кобальтовой быстрорежущей стали, с сохранённой удовлетворительной вязкостью металла в инструменте. В работе при выборе оптимального химического состава материала и определении режимов термической обработки, в качестве базового аналога использовали сталь марки ЭП-682-III производства завода «Электросталь». Существенным недостатком этой стали является большой разброс значений твердости от 64 до 68,5 HRC. Поскольку твердость карбида ванадия значительно выше твердости карбидов, образованных вольфрамом и хромом, присутствие ванадия в количестве 3,0 – 3,5% обеспечивает главным образом высокую износостойкость режущего инструмента из вольфрам-молибдено-кобальтовых быстрорежущих сталей. При этом следует отметить, что карбиды ванадия крайне устойчивы против растворения при нагреве инструмента под закалку. Однако при необоснованно высоком содержании ванадия в сплаве происходит обеднение твердого раствора аустенита углеродом, что приводит к снижению твердости мартенсита закаленной стали. Поэтому для достижения значений твердости инструмента из вольфрам-молибдено-кобальтовых быстрорежущих сталей соотношение

углерода и ванадия (C/V) должно быть более 0,45. После высокотемпературной закалки быстрорежущих сталей в их структуре образуется значительное количество остаточного аустенита, существенно снижающего твердость материала. Окончательная высокая твердость быстрорежущих сталей формируется в процессе последующего многократного отпуска при температуре отпуска $560 \pm 10^\circ\text{C}$ продолжительностью каждого из них порядка 1 час. Кратность отпуска равна трем редко двум разам. В представленном исследовании был опробован ряд режимов отпуска при температурах от 500°C до 580°C и кратностью от одного до восьми. Наибольший прирост твердости был получен при температуре отпуска 520°C – 1 час, воздух и кратности 6. Весьма существенный прирост твердости от 1,5 до 2,5 единиц HRC был достигнут благодаря снижению температуры отпуска до 520°C , образованию при низкой температуре отпуска частиц вторичных карбидов, а также более полному превращению остаточного аустенита во вторичный мартенсит (мартенсит отпуска). Однако с достижением в изделиях из новой быстрорежущей стали сверхвысокой твердости 71 HRC возникла проблема обеспечения удовлетворительной вязкости для такого материала. Для повышения вязкости металла было предпринято следующее. В целях создания мелкозернистой структуры закалку проводили с температуры $1230 \pm 5^\circ\text{C}$, которая была ниже температуры начала интенсивного роста зерна аустенита (1245°C). Во-вторых, для уменьшения загрязненности металла неметаллическими включениями было осуществлено легирование сплав алюминием в количестве 0,10–0,20% и кальцием 0,15–0,25%. Положительный эффект дало введение в химсостав сплава никеля в количестве 0,40–0,60% и одновременное снижение верхнего предела по марганцу до 0,30%. Для уменьшения карбидной неоднородности заготовки подвергали обработке радиально-сдвиговой прокаткой.

На основании проведенных исследований по оценке влияния основных легирующих элементов на структурное состояние и комплекс физико-механических свойств материала, был предложен следующий состав новой стали: 1,25–1,35% углерода; 2,0–2,5% ванадия; 11,5–12,5% вольфрама; 2,5–3,5% молибдена; 9,5–10,5% кобальта; 0,4–0,6% никеля; не более 0,3% марганца; не более 0,4% кремния; 0,1–0,2% алюминия; 0,15–0,25% кальция, остальное железо.

КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПРИ ПОДГОТОВКЕ МНОГОНОМЕНКЛАТУРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Базров Б.М.¹, Хейфец М.Л.^{2,3}, Попок Н.Н.³

- 1) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Российская Федерация
- 2) ОАО "НПО Центр" НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь
- 3) Полоцкий государственный университет, Новополоцк, Республика Беларусь

Разработка рациональной информационной модели является фундаментом комплексной компьютеризации конструкторской, технологической и метрологической подготовки производства. Проектирование и изготовление, эксплуатация и обслуживание изделий требуют, прежде всего, оценки надежности, адаптивности и эффективности подготовки производства.

Методы автоматизации подготовки производства, широко используемые на практике, подразделяются на три большие группы: типовых деталей и техпроцессов, аппликаций составных частей и структурной параметризации. Недостаточная гибкость метода типовых деталей и техпроцессов, высокая трудоемкость метода аппликаций во многом объясняются одноуровневой организацией описания структур, объектов и процессов автоматизации. Надежность структурно-параметрического метода обеспечивается построением структур с малым числом связей, а универсальность – наличием адаптивных конструктивно-технологических компонент. Трудоемкость метода обусловлена классификацией и унификацией структурных компонент и технологических функций относительно выбранной номенклатуры деталей.

Классификация и последующая унификация по конструктивно-технологическим и эксплуатационно-функциональным признакам позволяют уменьшить число параметров, упростить структурирование рассматриваемых объектов и процессов. Этим создаются условия для снижения трудоемкости остальных этапов и обеспечения эффективной подготовки производства.

В результате классификация с последующей унификацией на основе определения оптимального количества необходимых конфигураций конструктивно-технологических и эксплуатационно-функциональных компонент, оборудования, приспособлений и инструментов для их получения и контроля, а также структур, описывающих технологические и эксплуатационные процессы, является основой современных методов компьютеризации подготовки производства.

Организационная структура подготовки производства при движении потоков информации и материальных ресурсов должна обладать комплексом таких свойств, как надежность и адаптивность, а также обеспечивать высокую эффективность в условиях многономенклатурного производства. Структура должна соединять различные стадии подготовки производства и

соответствующие им подсистемы, т.е. объединять в одно целое как работу с заказчиками, так и с поставщиками.

Требования, предъявляемые к построению технологических комплексов и подготовке многономенклатурного производства, определяют комплексный подход, базирующийся на синергетической концепции и характеризуемый:

- 1) движением информационных и материальных потоков в подсистемах;
- 2) открытостью подсистем, обменивающихся информацией и ресурсами с внешней средой;
- 3) кооперативностью процессов обмена информационными и материальными потоками;
- 4) неравновесной ситуацией в подсистемах, когда ресурсы и информация о них то нарастают, то уменьшаются.

Комплексный синергетический подход к автоматизации технологических комплексов при подготовке многономенклатурного производства анализирует:

1) движение потоков, которое обусловлено противоречивыми свойствами системы (надежностью и адаптивностью), носит сложный нелинейный характер и осуществляется в виде противотока различных информационных сообщений и материальных ресурсов. Так, для материальных потоков конструктор, расширяя номенклатуру продукции, предлагает увеличить количество инструментов и оснастки, технолог, наоборот, – его сократить, а для информационных потоков достигается компромисс между конструктивными соображениями и технологическими требованиями;

2) открытость производственной системы, которая подразумевает обмен информацией между различными подсистемами и постоянное изменение информации от внешних источников. Для материальных потоков, при изменении запросов заказчика изменяется выпускаемая продукция и потоки ресурсов между различными подсистемами – модулями технологических комплексов или подразделениями предприятия;

3) кооперативность процессов, которая проявляется во взаимосвязи и взаимосогласовании встречных материальных и информационных потоков между функциональными модулями, а также конструкторским, технологическим и производственными отделами или различными подразделениями предприятия в процессе работы;

4) неравновесность в системе, которая оценивается энтропией, описывающей количество информации, приходящейся на один элемент сообщения. Любой стихийный процесс в замкнутой системе сопровождается ростом энтропии и характеризуется минимумом упорядоченности. Приток информации в систему может обеспечить выход из этого положения, вместе с тем он может быть недостаточным, чтобы погасить рост энтропии, тогда ее рост только замедлится. Неравновесность – это состояние, при котором приток информации заставляет систему упорядочиваться.

Комплексный синергетический подход показывает, что для удовлетворения требований, предъявляемых к технологической подготовке автоматизированного многономенклатурного производства, они должны

обладать способностью, в зависимости от внешних условий, перестраивать рациональным образом свою структуру и управлять как информационными, так и материальными потоками, т.е. самоорганизовываться.

В результате подготовку производства целесообразно строить таким образом, чтобы при анализе информации обеспечивалась самоорганизация структуры в изменяющихся условиях производства посредством формирования самой информационной системой оптимальных структур баз данных, процедур управления и т. д.

УДК 621.793:669.717

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЯ ИЗ АЛЮМИНИЕВО-КРЕМНИЕВОГО СПЛАВА С БРОНЗОВЫМ ПОДСЛОЕМ НА СТАЛЬНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ ДЕТАЛИ

Белоцерковский М.А., Комаров А.И., Сосновский И.А., Курилёнок А.А., Орда Д.В., Искандарова Д.О.

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь

В работе представлены результаты исследования структуры и триботехнических характеристик покрытия из силумина АК12, полученного центробежной индукционной наплавкой за один технологический прием на стальную основу с формированием подслоя, обеспечивающего высокий уровень адгезионных свойств покрытия и основы. В качестве материала наплавки использовался алюминиево-кремниевый сплав АК12 (ГОСТ 1583-93), который имеет повышенный уровень литейных и механических свойств [1]. Для обеспечения адгезии покрытия со стальной основой было предложено ввести в состав шихты самофлюсующийся порошок на основе меди ПР-БрОл8НСР, который за счет более высокой плотности обеспечивал бы формирование переходного слоя. Количество материала выбиралось из расчета получения переходного слоя толщиной 0,5–1 мм, а покрытия из силумина 5–6 мм.

Формирование покрытия на внутренней поверхности цилиндрической стальной заготовки, изготовленной из стали 20 (ГОСТ 1050-88), проводилось совмещением метода центробежного формования предварительно подготовленной шихты с нагревом токами высокой частоты до температуры 780–800°С, с последующей изотермической выдержкой при данной температуре в течение 6 мин. Частота вращения заготовки составляла 1250 мин⁻¹.

Как показал анализ структуры наплавленного покрытия, при нагреве до 780–800°С происходит расплавление шихтового материала с диффузионным перемешиванием и последующим образованием алюминий-медного сплава, легированного кремнием, никелем и оловом. При этом в зависимости от количества материала подслоя изменяется основа сплава. Так при высоком содержании меди в составе шихты (~55 мас.%), основу сплава составляет θ -

фаза, в которой имеются включения кремния, железосодержащих соединений и олова (рисунок 1, а), размер которых не превышает 30 мкм. Согласно данным микрорентгеноспектрального анализа, включения равномерно распределены по структуре слоя за исключением частиц железосодержащих соединений, плотность которых возрастает у основы, тогда как у поверхности стальной втулки формируется зона столбчатых частиц из железосодержащих соединений (спектр 9-11, рисунок 1, б).

Олово, в этом случае, как и кремний, выделяются в виде частиц неправильной формы с размером до 40 мкм, равномерно распределенных по структуре слоя. Частицы олова, легированные медью (спектр 3-5, рисунок 1б, таблица 1), располагаются по границе зерен θ -фазы, при этом могут включать частицы кремния размером до 10 мкм. Отсутствие алюминий-кремниевой эвтектики связано с более высоким сродством Al с Cu, который в полном объеме используется для образования θ -фазы. Согласно результатам микрорентгеноспектрального анализа, никель легирует зерна θ -фазы, но в условиях ускоренного охлаждения это приводит к неоднородности зерен по составу (спектр 12-14, рисунок 1б).

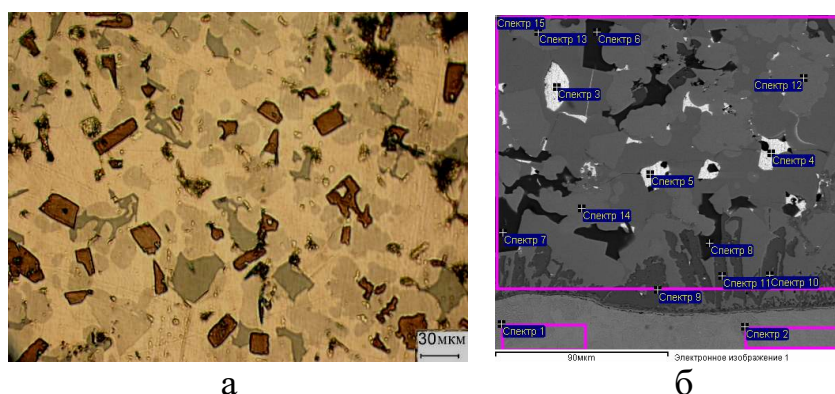


Рисунок 1 – Структура наплавленного покрытия в середине слоя (а) и у границы раздела фаз со стальной втулкой (б)

Таблица 1 – Результаты спектрального анализа границы раздела фаз покрытия и стальной втулки

Спектр	C	O	Al	Si	Mn	Fe	Ni	Cu	Sn
Спектр 1-2	5.25-8.47				0.62-0.76	90.92-93.99			
Спектр 3-5	5.92-13.15	3.95-5.57	0.48-0.57					2.74-3.17	78.05-90.34
Спектр 6-8	25.04-28.81		0.17-0.51	68.71-72.16		0.41-0.76	0.30	0.70-1.14	1.04-1.29
Спектр 9-11	21.93-23.61	3.61-3.80	26.20-27.41	15.28-16.50		28.69-30.66	1.12-1.57	0.96-1.41	
Спектр 12-14	13.43-15.29		29.81-30.90	0.38-0.41		1.99-3.03	6.95-12.58	39.69-45.84	
Спектр 15	6.21		30.43	15.17		6.77	2.67	34.90	3.85

Таким образом, структура образовавшегося сплава представляет собой композиционный материал, состоящий из θ -фазы с включениями Si-, Sn- и Fe-содержащих частиц. Формируемый сплав характеризуется термическим расширением близким к стали, что обеспечивает адгезионные свойства покрытия со стальной основой. Однако, следует отметить отсутствие как такового подслоя из медного сплава, поэтому для создания многослойной втулки с подобными материалами следует применять многостадийный процесс послойной наплавки.

1. Влияние олова в материале подслоя на структуру Al-Si сплава, наплавляемого центробежно индукционным методом / Комаров А.И., Сосновский И.А., Орда Д.В., Куриленок А.А., Искандарова Д.О. // Механика машин, механизмов и материалов, 2019. – №3(48). – С.77–84.

УДК 621.793

ТЕХНОЛОГИЯ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НА ДЕТАЛИ УЗЛОВ ТРЕНИЯ ПУТЕВЫХ МАШИН ЦЕНТРОБЕЖНЫМ ИНДУКЦИОННЫМ МЕТОДОМ

Белявин К.Е.¹, Белоцерковский М.А.², Сосновский И.А.², Курилёнок А.А.²

- 1) Белорусский национальный технический университет
- 2) Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь

На предприятиях железнодорожного транспорта РБ используется широкая номенклатура деталей машин и устройств, которые содержат в своем исполнении узлы трения триботехнического назначения, работающие в режиме интенсивного абразивного изнашивания. К таким узлам трения относятся, например, детали ходовых соприжений рабочих органов путевых машин высшего класса сложности, предназначенных для выправки, подбивки, отделки пути и очистки щебня (втулки подбивочных блоков и гайки подъема электромагнитов машин типа ВПР и ВПО, виброплиты балластировочных машин и др.).

Задачей исследований, проведенных в данной работе, является повышение работоспособности и срока службы антифрикционных изделий ходовых соприжений рабочих органов путевых машин. Решение этой задачи осуществлялось путем разработки новой высокоэффективной технологии индукционной наплавки порошковых покрытий с использованием результатов теоретических исследований процесса проплавления порошковых слоев при индукционном нагреве.

Применение композиционных антифрикционных покрытий из модифицированных медных сплавов для создания двухслойных

антифрикционных изделий позволяет значительно сократить расход цветных сплавов и обеспечить повышение качества и надежности машин в целом. Одним из эффективных способов формирования порошковых покрытий в холодном и горячем состоянии непосредственно во внутренней полости стальной заготовки-матрицы является центробежная индукционная наплавка. Для промышленной реализации этого метода разработаны технологии, оборудование и сопутствующая оснастка.

Известно, что в основе индукционной центробежной наплавки порошковых слоев лежит технологическая схема, позволяющая реализовать следующую последовательность нанесения слоев порошковых покрытий. Сначала, с помощью индукционных токов, происходит разогрев вращающейся стальной цилиндрической заготовки до температур возможного фазового перехода из твердого в жидкое состояние материала частиц порошка. Затем, в результате изотермической выдержки и теплообмена между разогретой внутренней поверхностью стальной цилиндрической заготовки и прижимаемого к ней центробежными силами порошка происходит послойное его расплавление с образованием после кристаллизации и охлаждения порошковых покрытий. Такая последовательность процесса нанесения порошковых слоев позволяет полагать, что технологические режимы индукционной центробежной наплавки определяются такими технологическими параметрами, как длительность процесса, мощность и частота электромагнитного излучения индуктора, а также линейными размерами стальной цилиндрической заготовки, мощностью создаваемого на ее поверхности теплового источника, удельным сопротивлением, плотностью и теплопроводностью стали. Эти технологические параметры индукционной центробежной наплавки определяют температурный режим нанесения слоев порошковых покрытий.

На основании теоретических исследований процесса проплавления порошковых слоев при индукционном нагреве получена модель, устанавливающая связь между технологическими параметрами индукционного нагрева и динамикой перехода из твердого состояния в жидкофазное состояние порошкового слоя на основании модельных допущений Лейбензона и Лыкова.

Проведенные исследования легли в основу разработки технологического процесса и оборудования (рисунок 1) для изготовления двухслойных антифрикционных изделий (биметаллических втулок подбивочных блоков, гаек подъема электромагнитов путевых машин ВПР и ВПО) центробежным индукционным методом с использованием составов антифрикционных композиционных порошковых смесей, содержащих сплав на медной основе, что позволило повысить твердость наплавленных слоев деталей ходовых сопряжений рабочих органов путевых машин, работающих в условиях интенсивного абразивного изнашивания, в 1,3–1,4 раза и относительную износостойкость в сравнении с серийно выпускаемыми деталями в 1,4–1,6 раза при увеличении производительности процесса изготовления на 30–35%.

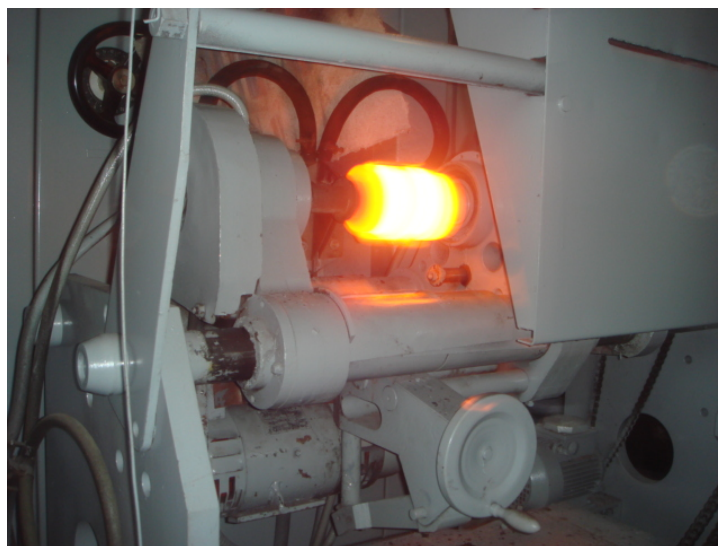


Рисунок 1 – Процесс изготовления двухслойного антифрикционного изделия (биметаллической втулки подбивочного блока выправочно-подбивочно-рихтовочной машины ВПР)

УДК 621.762

ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ МЕТАЛЛОФТОРОПЛАСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ РАБОТЫ В УЗЛАХ ТРЕНИЯ

Белявин К.Е., Минько Д.В., Шелег В.К., Белый А.Н.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Металлофторопластовые материалы широко применяются в подшипниках скольжения и других узлах трения, работающих в условиях отсутствия смазочного материала. Чаще всего металлофторопластовые материалы представляют собой основу из малоуглеродистой стали, на которую через тонкий переходный слой меди методами порошковой металлургии нанесен пористый слой сферических частиц оловянистой бронзы толщиной 0,3-0,4 мм. Внутри сообщающихся пор порошкового слоя находится фторопласт, формирующий при работе тонкий поверхностный слой, покрывающий сферические частицы бронзы [1]. Полученный композиционный материал изготавливается в виде ленты толщиной 1,0-2,5 мм, обладает повышенной механической прочностью, износостойкостью и несущей способностью.

Подшипники скольжения, в виде цилиндрических втулок, свернутых из композиционной металлофторопластовой ленты, обладают высокими антифрикционными свойствами в диапазоне температур от $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+250\text{ }^{\circ}\text{C}$, обеспечивают надежную непрерывную работу в вакууме и в жидких средах, не обладающих смазочными свойствами, позволяют заменить более сложные и дорогие подшипники качения, диаметр которых в два раза, а масса на порядок

больше, при этом исключается использование дорогих легированных сталей [2]. Металлофторопластовые ленты применяются для получения подшипников, эксплуатируемых в самых разнообразных устройствах, в основном, в узлах трения, работающих без смазки, хотя введение смазки, как правило, оказывает благоприятное действие на их работу.

Технологии получения металлофторопластовой ленты известны давно и основаны на заполнении пор и обволакивании поверхности частиц спеченного бронзового слоя изделия водной суспензией дисперсного фторопласта, количество и размер частиц которого определяется размером частиц полимера, величиной пористости и размером пор порошкового бронзового слоя. Так как из-за слабых адгезионных свойств фторопласта существенного сцепления между ним и поверхностью частиц бронзы не происходит, закрепление частиц полимера достигается путем сплавления с пористой структурой при температуре спекания. В результате образуется тонкий плохо закрепленный в порах фторопластовый слой, который при повышении температуры может легко отделяться от бронзового слоя. Отечественные традиционные технологии [2], разработанные в 70-х годах прошлого века, не позволяют получать металлофторопластовые ленты с высокими эксплуатационными характеристиками, поэтому предприятия-потребители предпочитают изделия из материалов импортного производства [3].

Анализ показывает, что высокие эксплуатационные характеристики металлофторопластовой ленты определяются толщиной фторопластовой пленки (сотые доли миллиметра), образующейся на пористой поверхности спеченной бронзы, и прочностью соединения с бронзовым слоем, зависящей от глубины проникновения фторопласта в поры. Основным недостатком традиционных технологий является недостаточная глубина проникновения и прочность соединения фторопласта с пористым бронзовым слоем, причем наиболее существенным препятствием такого соединения наряду с низкой адгезией является высокий коэффициент термического расширения фторопласта, приводящий к увеличению его объема и выталкиванию из пор при нагревании.

Из опыта использования полимеров в узлах трения известно, что необходимым условием работоспособности подшипников скольжения является оптимальное сочетание количества полимера и металла в конструкциях [4], то есть для существенного увеличения эксплуатационных характеристик новых металлополимерных материалов, таких как композиционные металлофторопластовые ленты, необходимо существенно увеличить толщину полимерного рабочего слоя, находящегося в порах порошкового слоя.

Увеличения остаточного объема фторопласта в поровом пространстве бронзового слоя при спекании можно добиться либо за счет снижения его коэффициента термического расширения, что достигается путем введения наполнителей, либо за счет использования внешнего давления на полимер при его термообработке. При нагреве объем находящихся в пористом слое частиц фторопласта значительно увеличивается, а так как внешнее давление не позволяет им выходить из пор на поверхность порошкового слоя бронзы, то

происходит дальнейшее проникновение расплавленного фторопласта в поры и закрепление в них. Отметим также, что использование внешнего давления при термообработке полимерного слоя позволяет закрепить в порах даже чистый фторопласт, чего невозможно достичь при свободном спекании на воздухе.

Таким образом, спекание фторопластового слоя под давлением позволяет достичь более глубокого проникновения полимера в поры порошкового слоя, обеспечить заполнение всего их объема и получать изделия с лучшими эксплуатационными характеристиками по сравнению с термообработкой на воздухе.

1. Альшиц, И.Я. Проектирование деталей из пластмасс. Справочник / И.Я. Альшиц, Б.Н. Благов. – М.: Машиностроение, 1977. – 215 с.
2. Семенов, А.П. Металлофторопластовые подшипники / А.П. Семенов, Ю.Э. Савинский. – М.: Машиностроение, 1976. – 196 с.
3. George Lodge & Sons Ltd [Electronic resource] – Mode of access: <https://www.georgelodgedirect.co.uk/Products/glacier-dub-bushes/> – Date of access: 24.02.2020.
4. Металлополимерные материалы и изделия / В.А. Белый, Н.И. Егоренков, Л.С. Корецкая [и др.]; Под ред. В.А. Белого. – М.: Химия, 1979. – 312 с.

УДК 621.77

РАЗРАБОТКА НОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ЧЕРНОВЫХ ВАГОННЫХ ОСЕЙ

Белявин К.Е.¹, Щукин В.Я.¹, Кожевникова Г.В.^{1,2}

1) Белорусский национальный технический университет

2) Физико-технический институт НАН Беларуси

Минск, Республика Беларусь

Учитывая высокие требования к качеству вагонной оси, к технологии ее производства на стадии получения заготовки – черновой вагонной оси (рисунок 1) кроме традиционных требований, таких как высокая производительность, экономное использование металла и энергии, предъявляется специфическое требование – достижение высокой усталостной прочности (выносливости). По этой причине изготовление заготовки вагонной оси только методом литья недопустимо, так как он не обеспечивает необходимое качество. Традиционно черновые вагонные оси производят ковкой на гидропрессах, радиальной ковкой, поперечно-винтовой прокаткой из металлопроката или литой заготовки, в том числе непрерывно литой. Обработка давлением измельчает структуру металла, что повышает его усталостную прочность. Стандарт на изготовление черновой вагонной оси предусматривает уковку, то есть уменьшение площади поперечного сечения

стальной отливки не менее, чем в 3 раза. Ковка на гидропрессах характеризуется низкой производительностью: на Могилевском металлургическом заводе она составляет 4 оси в час.

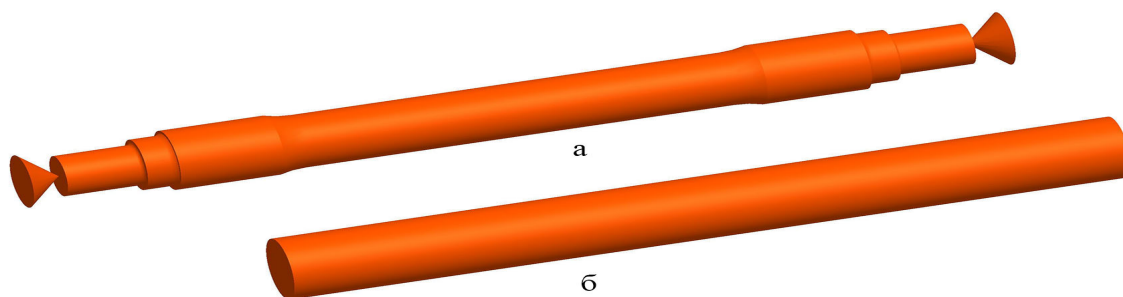


Рисунок 1 – Черновая вагонная ось (а) и исходная заготовка (б)

В Беларуси производство черновых вагонных осей осуществляется на Могилевском металлургическом заводе методом ковки на гидропрессе с ЧПУ (фирма «Danieli», Италия). Анализ очага деформации при ковке свидетельствует о невысоких напряжениях сжатия и накопленных деформациях в области контакта с инструментом, что может не обеспечивать высокое качество металла в этой зоне.

Обоснована [1] целесообразность получения оси методом поперечно-клиновой прокатки (ПКП). Данная технология обеспечивает самую высокую производительность – до 120 осей/час, меньшие припуски и допуски, позволяет исключить напуски на поковку и, в итоге, получить минимальный расход металла, что обеспечивает минимальную трудоемкость токарного точения чистовой вагонной оси. Высокая точность поковки при ПКП [2] позволяет ликвидировать присущие иным технологиям дополнительные операции отрезки концевых отходов и правки оси, которые производятся после пластического формоизменения. Стан ПКП WRL23060 TS-03 (рисунок 2) выполнен с двумя подвижными плитами и плоскими инструментами, что обеспечивает более высокую точность поковки и прямолинейность оси по сравнению с иным оборудованием, в том числе валковым станом ПКП. Станы с плоским инструментом по отношению к валовым также обеспечивают снижение себестоимости осей до 10% [1]. Черновая вагонная ось изготавливается за один рабочий ход стана.

Стойкость плоского инструмента ПКП составляет, включая промежуточные ремонты, не менее 500 000 осей, что снижает долю стоимости инструмента в производственных затратах до 1,7%. Вес стана ПКП составляет 260 тонн, что в 1,7 раза меньше веса радиально-ковочной машины GFM SX-40, следовательно, цена стана ниже, тем более, что стан может устанавливаться на пол цеха без фундамента. Работа стана полностью автоматизирована и допускается его круглосуточная работа. Технология ПКП – экологически чистая: отсутствуют вибрации и загрязнение окружающей среды.

Технология ПКП обеспечивает наиболее высокую усталостную прочность вагонных осей. Это является следствием особенностей напряженно-деформированного состояния при поперечной прокатке [2].

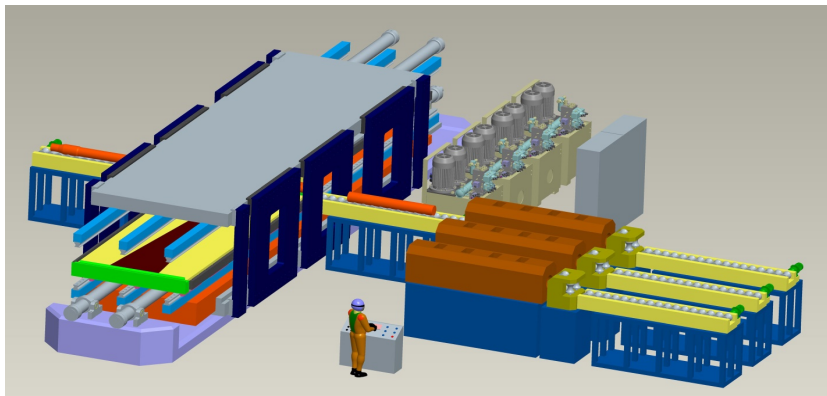


Рисунок 2 – Макет стана ПКП WRL23060 TS-03

1. Кожевникова, Г.В. Прогрессивный метод изготовления черновых вагонных осей // Г.В. Кожевникова, Г.П. Пилипчук, А.О. Рудович, В.Я. Щукин // Техника железных дорог. – 2017. – № 4 (40). – С. 57–63.
2. Кожевникова, Г.В. Повышение усталостной прочности валов посредством поперечно-клиновой прокатки / Г.В. Кожевникова, А.О. Рудович, В.Я. Щукин // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2017. – № 12. – С. 19–31.

УДК 658.512

СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ СИНТЕЗА УНИВЕРСАЛЬНО-СБОРНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ ДЛЯ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ

Беляков Н.В.¹, Махаринский Ю.Е.^{1, 2}, Попок Н.Н.²

- 1) УО «Витебский государственный технологический университет», Витебск,
- 2) УО «Полоцкий государственный университет», Новополоцк,
Республика Беларусь

В общей номенклатуре деталей, применяемых в машиностроении, корпусные детали составляют порядка 15-20%. Причем порядка 60% из них являются деталями средних габаритных размеров. Корпусные детали состоят из различных конструктивных элементов (функциональных модулей) и имеют высокие требования по точности их взаимного расположения. Обеспечение точности взаимного расположения функциональных модулей должно осуществляться уже на стадии проектирования технологии за счет правильного выбора баз, состава установочных и установочно-зажимных элементов приспособлений и их компоновки. В практической работе в большинстве

случаев для каждой новой корпусной детали синтезируется индивидуальный технологический процесс [1], а для операций серийного, крупносерийного и массового производства проектируются соответствующие станочные приспособления. При этом порядка 80% приспособлений на операциях обработки корпусных деталей на фрезерных обрабатывающих центрах являются универсально-сборными (УСП).

Анализ работы машиностроительных предприятий показывает, что в настоящее время компоновка и сборка УСП осуществляется слесарями-сборщиками высокой квалификации по чертежу детали исходя из собственного опыта и интуиции. Как такового проектирования компоновочной схемы приспособления никем не производится. При этом вопросы обеспечения точности взаимного расположения конструктивных элементов обрабатываемой заготовки не рассматриваются вовсе, что часто приводит к неустранимому браку.

Повысить качество проектирования приспособлений и сократить трудоемкость проектных работ в десятки раз позволяет их автоматизация. В настоящее время известны некоторые компании, которые представляют базы данных 3-D элементов УСП. Их стоимость составляет несколько тысяч у.е., однако каких-либо инструментов автоматического формирования компоновок приспособлений с учетом обеспечения требуемых допусков взаимного расположения конструктивных элементов деталей они не предоставляют.

Одной из причин отсутствия работоспособных систем автоматизации проектирования компоновок УСП для корпусных деталей является несовершенство положений теории базирования и, как следствие, отсутствие методик формирования заданий на проектирование приспособлений. Ранее авторами настоящей работы предложен ряд методик, моделей и алгоритмов, позволяющих использовать теорию базирования в качестве инструмента синтеза маршрута обработки заготовок корпусных деталей, позволяющего определять порядок обработки функциональных модулей, выбирать базы на первой и последующих операциях, определять число связей накладываемых базами и генерировать задание на проектирование станочных приспособлений обеспечивающих требуемые допуски взаимного расположения функциональных модулей [1-3].

Предложенные методики, модели и алгоритмы позволили создать систему автоматизированного синтеза компоновок универсально-сборных приспособлений для корпусных деталей средних габаритных размеров при обработке на фрезерных обрабатывающих центрах. Система разработана как приложение графического твердотельного редактора Autodesk Inventor. Пользователь системы средствами графического редактора проектирует трехмерную твердотельную модель детали с кодированием функциональных модулей, допусков взаимного расположения и линейных размеров. В приложении задаются технологические возможности оборудования, векторы доступности для обработки и др. Пользователь может сам указать конструктивные элементы, подлежащие обработке на операции. Далее система предлагает несколько вариантов маршрута обработки заготовки с указанием

приоритетных базовых поверхностей для обеспечения допусков взаимного расположения функциональных модулей, состав установочных, установочно-зажимных и (или) зажимных элементов, рекомендует состав базовых, направляющих и прочих элементов УСП, формирует несколько вариантов трёхмерных компоновок приспособления, монтажные чертежи, а также наглядные схемы сборки-разборки сложных компоновок.

Программное обеспечение проходит апробацию на ОАО «Вистан» (г. Витебск) и в учебном процессе УО «ВГТУ». Разработанная система позволяет: снижать вероятность неустранимого брака за счет научно обоснованного решения вопроса обеспечения допусков взаимного расположения конструктивных элементов детали на этапе проектирования компоновки; снижать временные затраты на подготовку производства; собирать приспособления сборщиком невысокой квалификации; составлять наиболее рациональную номенклатуру пусковых комплектов; включить службу УСП в единую автоматизированную систему технологической подготовки производства.

1. Попок, Н. Н. Методы и модели компьютерного проектирования технологических процессов изготовления корпусных деталей / Н. Н. Попок, Н. В. Беляков // Вестник ПГУ. – 2010. – №3, Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – С. 68-75.
2. Махаринский, Е. И. Теория базирования в проблеме проектирования технологических процессов механической обработки и станочных приспособлений / Е. И. Махаринский, Н. В. Беляков, Ю. Е. Махаринский // Вестник машиностроения. – 2008. – №9. – С. 34-45.
3. Махаринский, Е.И. О теории базирования при механической обработке / Е.И. Махаринский, Ю.Е. Махаринский, Н.В. Беляков // СТИН. – 2005.–№ 4.– С. 29–32.

УДК 621.762.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПОДГОТОВКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПЕРЕД НАПЫЛЕНИЕМ НА ПРОЧНОСТЬ СЦЕПЛЕНИЯ ПОКРЫТИЯ С ОСНОВОЙ

Бохан С.Г.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Для определения прочности сцепления покрытия с основой воспользуемся методикой оценки прочности сцепления путем отрыва части покрытия от подложки. Необходимым условием совпадения результатов эксперимента, их корректности является проведение всей серии опытов в одинаковых условиях. На прочность сцепления влияют и режимы напыления покрытий, поэтому они должны быть постоянными в течение всего эксперимента при определении влияния технологии подготовки поверхностей на прочность сцепления [1].

Наиболее распространенными механическими методами подготовки поверхностей перед напылением являются дробеструйная обработка и нарезка рваной резьбы. Нами был предложен в качестве метода подготовки поверхностей перед напылением метод обкатывания профильным роликом со сложной кинематикой. Сравнение влияния этих трех методов на качество покрытий, напыляемых на поверхности вращения, произведем путем определения прочности сцепления покрытия и основы на отрыв конического штифта от поверхности покрытия.

Поскольку исследуемыми методами обрабатывались поверхности вращения, то с целью наибольшего приближения результатов эксперимента к действительной схеме образования и эксплуатации покрытий использовалось специальное приспособление, позволяющее определить влияние метода подготовки на прочность сцепления покрытия с цилиндрической заготовкой. Схема предложенного устройства приведена на рисунке 1. Устройство состоит из цилиндрической оправки 1, в которую установлены конические пробки 2. Конические пробки закрепляются в оправке при помощи гаек 4. Внутри пробки имеется коническое отверстие, в которое вставляется конический штифт 3, закрепляемый в пробке при помощи заглушки 5. В оправке собирались 8 пробок, расположенных друг напротив друга диаметрально. Для того, чтобы после напыления покрытия пробку можно было извлечь из оправки, на пробке выполняется проточка, тогда покрытие формируется на поверхности пробки и штифта независимо от остальной поверхности оправки.

Приспособление в сборе обрабатывалось на токарном станке, затем поверхность приспособления закрывалась кожухом таким образом, что оставалась незакрытой одна пара пробок, которые подвергались дробеструйной обработке. Кожух снимался, приспособление устанавливалось на токарный станок, и следующая пара пробок подготавливалась методом нарезки рваной резьбы. Остальная поверхность устройства обкатывалась при помощи обкатного устройства с профильным роликом со сложной кинематикой, ось которого пересекалась с его осью симметрии. Затем одновременно на всю поверхность оправки методом газопламенного напыления напылялось покрытие из порошка Бр 08-10-1.

В результате исследований установлено, что наибольшей прочностью сцепления на отрыв обладает покрытие, нанесенное на поверхность, подготовленную методом обкатывания роликом со сложной кинематикой. Этот метод обеспечивает наибольшую абсолютную площадь контакта покрытия и основы за счет многократной разнонаправленной деформации поверхности на различную глубину. Сопоставимость результатов в эксперименте при различных методах подготовки обеспечивалась тем, что напыление осуществлялось одновременно на все образцы, находящиеся в одинаковых условиях.

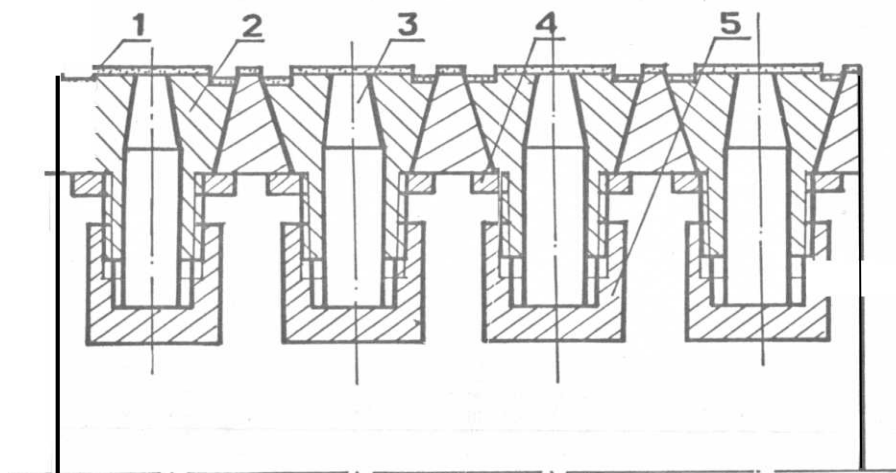


Рисунок 1. Схема устройства для определения прочности сцепления на отрыв:
1—оправка; 2—коническая пробка; 3—конический штифт; 4—гайка; 5—заглушка

При помощи того же приспособления были проведены исследования прочности сцепления покрытия и основы в зависимости от режимов обкатывания (рисунок 2). Скорость вращения заготовки на процесс формирования рельефа поверхности оказывает небольшое влияние, поэтому исследование прочности сцепления проводилось в зависимости от продольной подачи приспособления, которая определяет частоту повторных деформаций каждого участка обрабатываемой поверхности. Обработка производилась роликом с углом между его осью симметрии и осью вращения $\alpha = 6^\circ$ и высотой профиля $h = 0.6$ мм. Прочность сцепления покрытия с подложкой уменьшается с увеличением подачи. При малых подачах $S = 0,05$ мм/об происходит некоторое снижение прочности сцепления. Такое снижение вызвано прежде всего тем, что формирование рельефа происходит при многократном повторении циклов деформаций каждого участка поверхности, в результате чего поверхностный слой разрушается. Образовавшийся на поверхности слой материала оказывается слабо связанным с деталью и при отрыве штифта отделяется от основы. С увеличением подачи этот эффект ослабляется и в дальнейшем исчезает. При подачах около $0,125$ мм/об не происходит разрушение поверхностного слоя, но микрорельеф подготовленной поверхности остается сильно развитым, то есть обеспечивается значительная фактическая площадь контакта без ослабления поверхностного слоя обкатанной детали. Дальнейшее увеличение подачи ведет к снижению прочности сцепления вследствие уменьшения степени развитости подготовленной поверхности и изменения формы неровностей, получаемых наложением друг на друга следов обработки роликом со сложной кинематикой. При подачах более $0,35$ мм/об на поверхности остаются участки, не претерпевшие деформации, в результате чего снижается активность поверхности, не разрушаются образовавшиеся после обтачивания окисные пленки и уменьшается фактическая площадь контакта покрытия и основы. Оптимальными с точки зрения прочности сцепления на отрыв будут подачи $0,125 \dots 0,25$ мм/об.

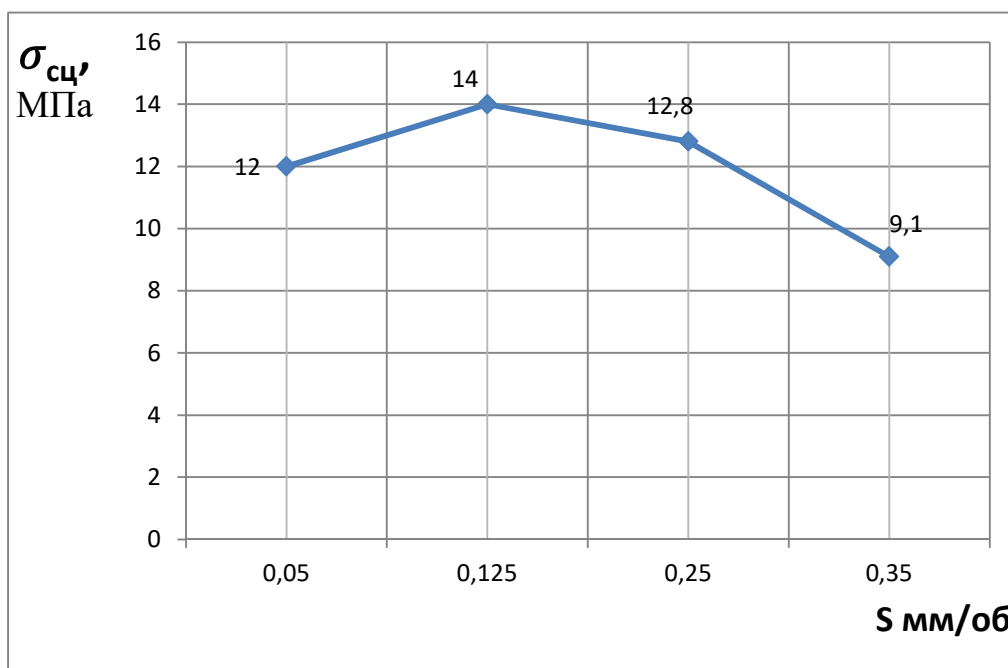


Рисунок 2. Зависимость изменения прочности сцепления на отрыв покрытия Н85Ю15 при подготовке поверхности сталь 45 обкатыванием роликом со сложной кинематикой в зависимости от подачи

1. Бохан С.Г. Экспериментальная проверка теоретических зависимостей прочности сцепления покрытия с основой от времени между подготовкой подложки и напылением покрытия - Тезисы докладов 33-ой международной научно-технической конференции «Машиностроение – 2018. Технология-Оборудование-Инструмент- Качество», г. Минск, 2018 г. – С. 30-34.

УДК 539.3

ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ТОРОВЫХ ОБОЛОЧЕК

Василевич Ю.В.¹, Неумержицкая Е.Ю.²

- 1) Белорусский национальный технический университет
- 2) Академия последиplomного образования, Минск, Республика Беларусь

Приступая к производству торовых оболочек, приходится решать множество задач, включая учет чисто технологических особенностей метода намотки, конструктивных особенностей создаваемого изделия и эксплуатационных характеристик получаемого материала в конструкции. Многоплановость решения этих задач связана не только с необходимостью учета большого числа разнообразных, порой противоречиво проявляющихся факторов, но и с потребностью нахождения компромиссных вариантов.

Совместное влияние большого числа структурно-технологических факторов на механические характеристики материала делает недостаточным дифференцированное изучение зависимости прочности от отдельных параметров структуры, а ставит перед технологом задачу оптимального их соотношения, позволяющего обеспечить максимальные прочностные показатели композиционного материала в готовом изделии. Таким образом, чтобы обеспечить необходимую прочность оболочек, конструктор, принимая в расчет материал с некоторыми конкретными физико-механическими свойствами, должен учитывать, что заданные (расчетные) физико-механические свойства могут изменяться в определенных пределах. Эти изменения определяются технологическими допусками, лимитирующими соответствующие производственные погрешности, которые складываются обычно из погрешностей систематического и случайного характера.

К систематическим погрешностям относятся, например, объемная плотность, коэффициент равномерности натяжения элементарных волокон, угол намотки, относительная толщина текстурных слоев материала, угол между семействами нитей. Поскольку закон систематических погрешностей и их физическая сущность известны, технологу легко определить их количественное значение и знак допустимого отклонения. Следовательно, при определении суммарной величины систематических погрешностей некоторые из них будут компенсировать друг друга. Кроме того, при формовании оболочек действует большое количество случайных факторов, закономерность и влияние которых на прочностные показатели готовых материалов неизвестны. Желая упростить технологические условия выполнения операций производства изделий и снизить трудоемкость их изготовления, идут по пути увеличения области рассеяния действительных размеров относительно заданного допуска.

Прочностные, физические и многие специальные свойства определяются главным образом прочностью исходных волокон или арматуры в целом, природой и свойствами связующего и в очень сильной степени относительным содержанием волокон арматуры и связующего, которое задано конструктором в виде структурного параметра объемной плотности. Если плотность и физическая природа компонента связующего контролируются еще на стадии подготовки ткани и связующего к запуску в производство, то два других фактора обеспечиваются уже непосредственно на стадиях технологического процесса изготовления конструкции. При этом самым ответственным этапом технологии является операция формования изделия, ибо здесь технологически совмещено решение двух задач: формование заданной конструктором структуры оболочки и формование изделия с требуемым качеством и точностью геометрических форм и размеров. Таким образом, установление критериев и параметров, по которым следует настраивать и выдерживать технологический процесс формования изделия, является задачей весьма ответственной и важной. С точки зрения обеспечения величин физико-механических свойств готового материала, прочности и надежности конструкции изделия всегда стоит задача контроля заданных

конструктором следующих структурных параметров: объемной плотности, коэффициента равномерности натяжения элементных волокон, угла намотки, угла между семействами нитей, относительной толщины текстурных слоев материала и их пределы изменения.

Если в сжатой форме представить последовательность действий по созданию конструкции торовой оболочки, удовлетворяющей заданным эксплуатационным требованиям, то в общем виде она может быть представлена следующим образом.

1. Установление основных технологических параметров, обеспечивающих качественную намотку цилиндрической оболочки.
2. Выбор тех технологических параметров, которые изменяются в процессе превращения цилиндрической оболочки в торовую.
3. Корректировка и уточнение количественных размеров этих параметров при намотке цилиндрической оболочки.

Отметим, что поставленная задача сводится не к установлению всех технологических параметров, а только тех, которые должны быть определены и могут влиять на качество при намотке торовых конструкций, точнее, тех параметров, которые изменяются в процессе изгиба оболочки. Корректировка этих параметров в исходном состоянии должна производиться с целью восстановления их оптимального влияния на качественные и количественные стороны режима формования для получения проектной структуры композиционного материала. Рассмотрение всех процессов, происходящих при изгибе оболочки, приводит к выводу, что изменяются в количественном отношении следующие величины: время изготовления изделия в сторону увеличения; натяжение в нитях армирующего материала; давление формирующего материала на оправку; степень наноса связующего на армирующий материал. Все эти параметры в той или иной мере влияют на монолитность материала в состоянии препрега.

АЛЬТЕРНАТИВА ПРОКОЛОТОГО ОТВЕРСТИЯ – ПРОСВЕРЛЕННОМУ, ПРИ СОЕДИНЕНИИ КОНСТРУКЦИОННЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ АРМИРОВАННЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Василевич Ю.В.¹, Неумержицкая Е.Ю.², Скворцов К.Г.³, Федотов Д.А.³

- 1) Белорусский национальный технический университет, Минск,
- 2) Академия последиplomного образования, Минск, Республика Беларусь;
- 3) ОАО «Авангард» Сафоново, Российская Федерация.

Альтернативой просверленным отверстиям является формирование их методом прокалывания в еще неотвержденном полимерно-волокнистом материале конструкции. В процессе формирования отверстия с помощью заостренного стержня индентора происходит раздвигание нитей и нарушение регулярной структуры материала изделия. Однако силовое поле армирующих волокон не прерывается. Стенка отверстия из-за повышенного содержания волокон уплотняется.

В результате прокола нити теряют свое первоначальное прямолинейное положение, изгибаются и растягиваются. Наибольшему деформированию подвергаются нити, соприкасающиеся с поверхностью стержня. При этом образуется так называемая «стрелка раскола слоя», протяженность ее составляет несколько диаметров отверстия (рисунок 1). Осуществляют прокол отверстия на стадии, когда композиционный материал находится в состоянии препрега, т.е. когда полимерное связующее неотверждено и обладает минимальной величиной вязкости. В процессе прокола по мере продвижения конической части стержня увеличивается зона уплотнения материала и повышается внутрислойное давление, которое приводит к перетеканию вязкого связующего через пористую волокнистую арматуру материала. При достаточно медленном процессе прокалывания через некоторое время наступает равновесное состояние измененной структуры материала с внедренным в нее индентором.

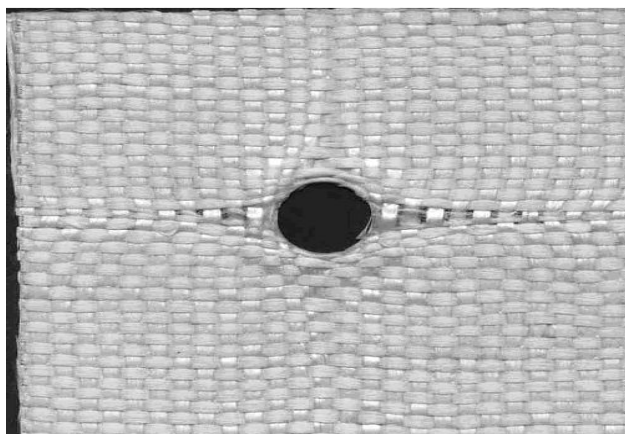


Рисунок 1 – Отверстие диаметром 20 мм, выполненное методом прокола в ткани TP-0,7-80

Несмотря на то, что при получении таких отверстий армирующие волокна остаются целыми, в них создаются растягивающие напряжения, которые могут, при определенных условиях, сохраниться в отвержденном материале в виде остаточных напряжений. В предельном состоянии крайние нити, соприкасающиеся со стержнем, могут даже разрушаться. Существуют технологические приемы снижения этих напряжений. Например, прокалывающий стержень должен иметь переменное сечение, нижняя часть которого имеет диаметр d_c , больше заданного d , а верхняя часть имеет диаметр d . Таким образом, вначале прокалывающий стержень под действием силы P оформляет отверстие диаметром d_c . Под действием этой же силы P стержень продолжает движение и фиксируется в положении, когда верхняя часть стержня диаметром d будет располагаться в отверстии. Образовавшийся зазор ($d_c > d$) вследствие упругих деформаций заполняется неотвержденным материалом, а отверстие уменьшается в размере до диаметра d . В результате напряжения в нитях композиционно-волокнистого материала уменьшаются. В районе отверстия их уровень можно снизить таким способом практически до нуля. При известном диаметре d необходимо знать только размер d_c .

Как видно из рисунка перемещения нитей препрега являются конечными в отличие от материала в твердом состоянии, перемещения точек у которого при нагружении намного меньше. Для препрегов такое отличие становится возможным по многим причинам. Во-первых, структура ткани создается путем переплетения нитей без жесткой связи в узлах переплетения. Во-вторых, гибкость нитей, состоящих из тонких параллельных волокон, движение которых ограничивается только трением между ними при деформировании, обеспечивает тканям свойства, аналогичные свойствам тела с подвижной структурой. В-третьих, для стеклотканей гладкого переплетения зависимость между напряжениями и деформациями описывается соотношениями [1]

$$\varepsilon_{11} = \frac{\sigma_{11}}{E_{11}} + \gamma_{11}, \quad \varepsilon_{22} = \frac{\sigma_{22}}{E_{22}} + \gamma_{22}, \quad \varepsilon_{12} = \frac{\sigma_{12}}{E_{12}} + \gamma_{12}, \quad \varepsilon_{21} = \frac{\sigma_{21}}{E_{21}} + \gamma_{21}\sigma_{11},$$

Где ε_{11} , ε_{22} и ε_{12} , ε_{21} , σ_{11} , σ_{22} и σ_{12} , σ_{21} – соответственно относительные деформации и напряжения семейств нитей утка и основы при растяжении и сжатии; E_{11} , E_{22} и E_{12} , E_{21} – модули упругости при растяжении и сжатии; γ_{11} , γ_{22} и γ_{12} , γ_{21} – неупругие составляющие при растяжении и сжатии. Присутствие в зависимостях неупругих составляющих значительно увеличивает величину относительных деформаций и существенно влияет на перемещения. Поэтому при снятии внешней нагрузки до нуля обратные деформации полностью не восстанавливают первоначальную форму препрегов. Экспериментально установлено, что для ткани Т-10-80 после прокола отверстия диаметром 10 мм после снятия нагрузки диаметр отверстия уменьшается, но не более чем на 1 мм. Установлено, что обратные деформации в этом случае состоят только из упругих перемещений.

1. Василевич Ю.В., Горелый К.А., Сахоненко В.М., Сахоненко С.В., Малютин Е.В. Механика препрегов – расчет изделий из армированных композиционных материалов // Минск: БНТУ, 2016. – 283 с. (Ч.2).

ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ ДВИЖУЩЕЙСЯ ПЛАЗМЕННОЙ ДУГОЙ

Веремейчик А.И., Онысько С.Р., Сазонов М.И., Хвисевич В.М.

Учреждение образования «Брестский государственный технический университет», Брест, Республика Беларусь

Для повышения износостойкости в процессе трения, сопротивляемости пластическому разрушению и предотвращения хрупкого разрушения деталей из различных сталей используется поверхностное плазменное упрочнение [1, 2], наиболее полно обеспечивающее оптимальное сочетание величины вязкости сердцевины с высокой поверхностной твердостью. Такое упрочнение можно реализовать только путем локальной закалки при помощи быстро перемещающегося высококонцентрированного источника тепла. Поверхностное плазменное упрочнение находит широкое применение как в условиях мелкосерийного и единичного (в том числе ремонтного), так и крупносерийного и массового производства [1–3].

В качестве высококонцентрированного источника тепла используется плазменная дуга, для генерации которой разработана установка, состоящая из плазмотрона постоянного тока, силового источника питания дуги, устройства ВЧ-поджига дуги, систем газоснабжения аргоном и азотом и водоохлаждения плазмотрона. В качестве анода выступает деталь. Для перемещения плазмотрона с заданной скоростью создана система устройств. Силовой источник обеспечивает горение плазменной дуги при напряжении 14–35 В и токах до 32 А.

Плазменное упрочнение производилось при токах дуги $I=6-32$ А и использовании в качестве плазмообразующего газа смеси аргона и азота, причем для защиты вольфрамового катода используется аргон с малым расходом, а по периферии дуги при помощи специального керамического сопла подается азот. Установлено, что происходит активное перемешивание аргона с азотом, что обеспечивает азотирование деталей. В плазмотроне применено обжимающее сопло с диаметром отверстия 1,2 мм. Скорость перемещения плазмотрона варьировалась от 4 до 27 мм/с. Установлено, что ширина упрочненной плазменной дугой «дорожки» достигает 4,2 мм, а зона термического воздействия плазменной дуги по глубине детали имеет форму сегмента (рисунок 1).

Исследованы микротвердость поверхностного слоя в зависимости от различных параметров: расхода газов, тока дуги, скорости перемещения плазмотрона, получены соответствующие зависимости. На рисунках 2, 3 представлено типичное распределение микротвердости по глубине упрочняемого слоя и по ширине «дорожки» для стали 14X17H2 при токе дуги $I=26$ А.

По результатам исследований было достигнуто увеличение микротвердости до 500–550 HV_{0,1}, причем толщина упрочненного слоя может изменяться в зависимости от скорости упрочнения от 0,1 до 0,6 мм.

Установлено, что уменьшение скорости движения плазменной дуги приводит к увеличению глубины упрочненного слоя. Проведенные исследования показали увеличение износостойкости упрочненных деталей более чем в 2 раза.

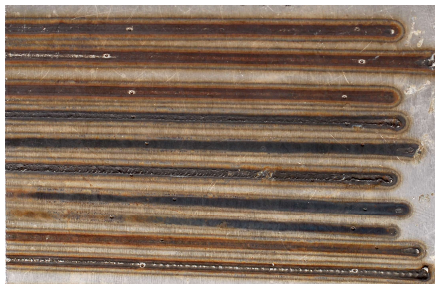


Рисунок 1 – Вид закаленных «дорожек» на поверхности детали при токах $I = 7\text{--}32$ А и скоростях $v = 4\text{--}25$ мм/с

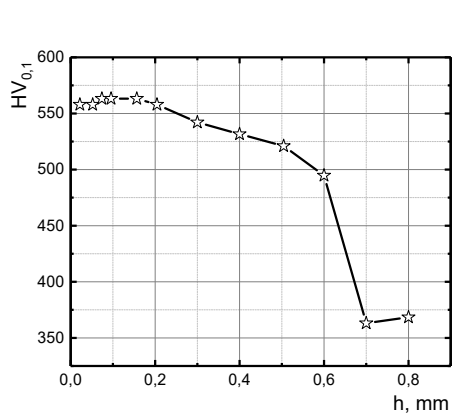


Рисунок 2 – Распределение микротвердости упрочненного слоя по глубине

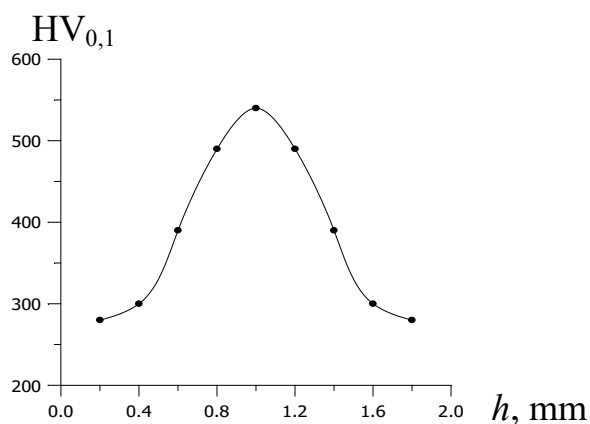


Рисунок 3 – Типичное распределение микротвердости закаленного слоя по ширине «дорожки»

На основании измерений температурных полей на поверхности детали разработан алгоритм расчета температурных полей и термонапряжений в приповерхностном слое.

Данная технология упрочнения может использоваться для закалки режущих кромок инструмента, ножей для гильотинных ножниц, дробильных установок, куттеров и т.д. и позволяет значительно повысить их качество и увеличить стойкость.

1. Райцес, В.Б. Термическая обработка / В.Б. Райцес – М.:Машиностроение, 1980. – 247 с.
2. Степанова, Т. Ю. Технологии поверхностного упрочнения деталей машин: учебное пособие / Т. Ю. Степанова / Иван. гос. хим.-технол. ун-т. – Иваново, 2009. – 64 с.
3. Спиридонов, Н. В. Плазменные и лазерные методы упрочнения деталей машин / Н.В. Спиридонов, О.С. Кобяков, И.Л. Куприянов. – Мн.: Высшая школа, 1988. – 155 с.

ПОВЫШЕНИЕ СЛУЖЕБНЫХ СВОЙСТВ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СТАЛИ ШХ15СГ В ПРОЦЕССЕ РАБОТЫ В ИЗДЕЛИЯХ

Виноградов Л.В.¹, Антипов В.И.¹, Колмаков А.Г.¹, Бородавко В.И.²

1) ФГБУН Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова
Российской академии наук, Москва, Российская Федерация

2) Открытое акционерное общество «НПО Центр» НАН Беларуси, Минск,
Республика Беларусь

Известно, что низколегированные инструментальные стали обладают низкой теплостойкостью [1], что, однако, в ряде случаев может играть положительную роль. Так в изделиях, работающих в тяжелых температурно-силовых условиях, например в просечных матрицах, формирующих шестигранную головку болтов М6, М8, М10, в режущей кромке возникают большие по величине знакопеременные цикловые нагрузки и материал матриц претерпевает существенный разогрев. В проведенном исследовании для изготовления просечных матриц использовали штамповую сталью карбидного класса ДИ-22, износостойкие стали ледебуритного класса 160Х12М и Р18, а также низколегированную сталь перлитного класса ШХ15СГ. На образцах из стали ШХ15СГ проводили измерение температуры, до которой разогревается режущая кромка матриц в процессе работы. Было установлено, что при нагреве материала до $\sim 410^{\circ}\text{C}$ происходит снижение твердости с 59-59,5 НРС до 49-50 НРС. У образцов из теплоустойчивых сталей ДИ-22, 160Х12М и Р18 снижение твердости материала наблюдалось при более высоких температурах - порядка $550-600^{\circ}\text{C}$. Здесь следует указать, что матрицы из перечисленных сталей были термически обработаны по особым режимам, которые были подобраны с целью достижения максимально возможной вязкости металла матриц [2]. Заметное отличие в температурах, при которых наступает снижение твердости материала, обусловлено различным характером износа режущей кромки. Если у матрицы из стали ШХ15СГ в процессе работы наблюдается смятие режущей кромки, то у матриц из сталей ДИ-22, 160Х12М и Р18 происходит ее выкрашивание. Можно предположить, что при выкрашивании режущей кромки усилия в очаге резания возрастают в большей степени по сравнению со смятием, что приводит к повышению уровня нагрева металла матриц. В свою очередь, снижение твердости закаленной стали ШХ15СГ при нагреве (отпуске) сопровождается ростом пластичности и вязкости металла матриц. Данное обстоятельство исключает выкрашивание режущей кромки матриц, способствуя увеличению их работоспособности. Иными словами, значительный рост продолжительности работы просечных матриц из стали ШХ15СГ, связан с процессами, протекающим в материале матриц при их эксплуатации. Обнаруженное явление можно отнести к разряду самоупрочнения материала

изделий при их эксплуатации, по аналогии со сталью Гадфильда (Г13), которая претерпевает интенсивное упрочнение под воздействием ударных нагрузок [3]. Таким образом, наблюдаемое у стали ШХ15СГ в процессе работы некоторое снижение твердости в сочетании с высокой технологической пластичностью материала, даёт основание для использования более дешёвой технологии изготовления просечных матриц посредством замены процесса прошивания первичного отверстия в заготовках с горячего на холодный.

Выводы:

1. Установлено, что в процессе работы просечных матриц из сталей ДИ-22, 160Х12М и Р18, используемых для формирования шестигранных головок болтов, происходит выкрашивание режущей кромки при одновременном ее разогреве до температур 550-600⁰С.
2. В случае изготовления матриц из дешевой, низколегированной стали ШХ15СГ разогрев режущей кромки происходит при температурах ~410⁰С, и сопровождается некоторым снижением твердости при одновременном росте пластичности и вязкости металла. Возникающее сочетание физико-механических свойств материала исключает выкрашивание режущей кромки матрицы, заметно увеличивая продолжительность её работы.
3. Обнаруженное явление можно отнести к разряду самоупрочнения материала инструмента в процессе его эксплуатации.

1. Геллер Ю.А. Инструментальные стали. М., Metallurgy, 1983. – 528с.
2. Гуляев А.П., Малинина К.А., Саверина С.М. Инструментальные стали (справочник) 2-е издание, М., Машиностроение, 1975. – 272с.
3. Гуляев А.П. Metallovedenie (5-е издание) М., Metallurgy, 1977. – 647с.

УДК 669.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КАРБИДОВ ЛЕДЕБУРИТНОЙ ЭВТЕКТИКИ НА СВОЙСТВА БЫСТРОРЕЖУЩИХ СТАЛЕЙ ПОСЛЕ РАДИАЛЬНО-СДВИГОВОЙ ПРОКАТКИ

**Витязь П.А.¹, Колмаков А.Г.², Антипов В.И.², Виноградов Л.В.²,
Мухина Ю.Э.², Баранов Е.Е.²**

1) ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси», Минск,
Республика Беларусь

2) ФГБУН «Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН»,
Москва, Российская Федерация

Исследовано влияние количества, размеров и характера распределения частиц первичных карбидов ледебуритной эвтектики в объеме металла горячекованных и горячекатаных заготовок быстрорежущих сталей на физико-механические свойства режущих инструментов, изготовленных из этих сталей.

Из литературных источников известно, что карбидная неоднородность оказывает существенное влияние на весь комплекс физико-механических свойств режущего инструмента, изготовленного из горячедеформированных заготовок быстрорежущих сталей и зависит от химического состава стали (в первую очередь, от содержания в ней углерода и вольфрама), размеров исходного слитка и особенностей его кристаллизации, способа горячей пластической деформации и степени деформации литого металла [1-5].

В ходе исследований установлено, что применение радиально-сдвиговой прокатки (РСП) позволяет резко снизить карбидную неоднородность в поверхностном слое сортовых заготовок быстрорежущих сталей Р6М5 и 130Р12М3Ф3К10-Ш. Так, на расстоянии 1/5 радиуса от поверхности прутков диаметром до 65 мм карбидная неоднородность не превышала 1 балла по шкале ГОСТ 19265-73. При этом наряду с существенным измельчением карбидов ледебуритной эвтектики, наблюдается их более равномерное распределение в объеме металла по сравнению с продольной прокаткой (ПП). Кроме того, в результате РСП изменяется морфология частиц, которые приобретают округлую форму, без острых углов на поверхности. Причём максимальный размер частиц первичных карбидов в металле после РСП (22 мкм) оказался заметно меньше, чем в случае ПП (51 мкм), а степень их вытянутости (3,7 мкм) значительно ниже по сравнению с металлом, подвергнутому ПП (7,2 мкм). Последнее обстоятельство положительно сказывается на механических свойствах режущего инструмента, поскольку сильно вытянутые частицы первичных карбидов ледебуритной эвтектики в процессе горячей пластической деформации часто дробятся, образуя частицы остроугольной формы. Кроме того, в них возникают незаполненные металлом трещины, что приводит к выкрашиванию режущих кромок инструмента.

Выводы:

1. В отличие от быстрорежущей стали, полученной продольной прокаткой, радиально-сдвиговая прокатка позволяет полностью устранить строчечное расположение частиц первичных карбидов ледебуритной эвтектики.
2. Основная масса карбидных частиц в структуре металла после радиально-сдвиговой прокатки в 2,5 раза меньше по размеру по сравнению с частицами в металле, подвергнутому продольной прокатке.
3. Образование в структуре металла, подвергнутого радиально-сдвиговой прокатке, карбидных частиц овальной формы существенно повышает прочностные свойства сталей марок Р6М5 и 130Р12М3Ф3К10-Ш, поскольку среди них отсутствуют остроугольные частицы, наличие которых негативным образом сказывается на работоспособности режущего инструмента.

1. Геллер Ю.А. Инструментальные стали. – М.: Металлургия, 1961. – 510 с.
2. Гудремон Э. Специальные стали, том 2, М.: Металлургия, 1966. – 1274 с.
3. Дзугутов М.Я. Пластическая деформация высоколегированных сталей и сплавов (2-ое издание), М.: Металлургия, 1977. – 480 с.

4. Доронин В.М. Структура, свойства и термическая обработка литой стали (Справочник «Металловедение и термическая обработка стали» том 3), М.: Металлургия, 1983. – с.6
5. Антипов В.И., Виноградов Л.В., Колмаков А.Г., Мухина Ю.Э., Банных И.О. Новая высокотвердая экономнолегированная износостойкая сталь ледебуритного класса и перспективы ее применения при отрицательных температурах // Деформация и разрушение материалов. – 2019. – №8. С.20–24.

УДК 621.91.04

ТОПОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ С ПРОФИЛЕМ В ВИДЕ ТРЕУГОЛЬНИКА РЕЛО ПРИ ПОЛИГОНАЛЬНОМ ФОРМИРОВАНИИ МЕТОДОМ ОГИБАНИЯ

Данилов А.А.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Полигональное формирование профиля некруглой поверхности в виде треугольника Рело основано на сообщении заготовке 1 (рисунок 1, а) и режущему инструменту 2 с тремя круглыми режущими лезвиями 5 одинаково направленных вращательных движений B_1 и B_2 с равными угловыми скоростями вокруг параллельных осей, соответственно, 3 и 4 [1]. Для формирования поверхности по длине режущему инструменту сообщают также относительно заготовки возвратно-поступательное движение Π_3 со скоростью резания.

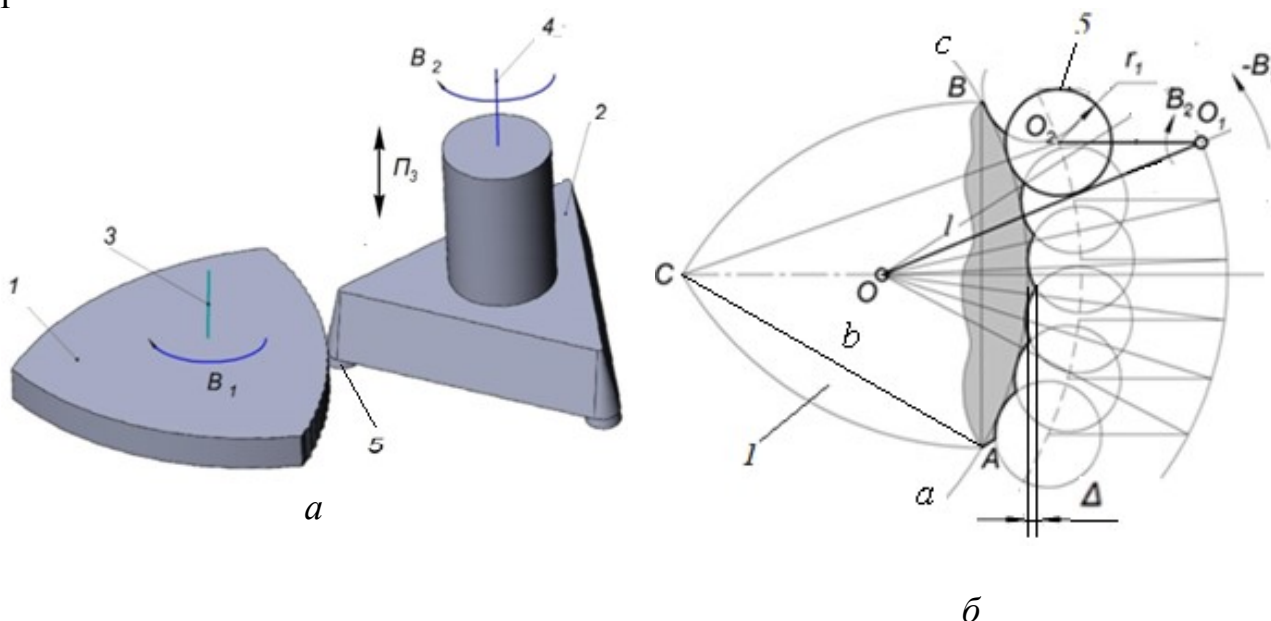


Рисунок 1 – Схемы профилирования треугольника Рело (а) и формирования топологии обработанной поверхности методом огибания (б)

Схема формирования топологии обработанной поверхности круговой режущей кромкой, как результат компьютерного моделирования движения режущих лезвий 5 относительно неподвижной заготовки 1, приведена на рисунке 1, б. Круговые режущие кромки лезвий 5 контактируют с окружностью ac , ограничивающей формируемую сторону AB треугольника Рело ABC , периодически, поэтому на обработанной поверхности образуются погрешности в виде гребешков (не срезанной части припуска), форма и высота которых характеризуют топологию обработанной поверхности. Определение их высоты имеет практическое значение.

Так как радиус окружности ac равен ширине b формируемого треугольника Рело, то высота Δ гребешков по известной зависимости составляет:

$$\Delta = \frac{s^2}{8} \left(\frac{1}{b} + \frac{1}{r_1} \right), \quad (1)$$

где s – расстояние между соседними точками контакта круговой режущей кромки с окружностью ac (контурная подача), b – ширина треугольника Рело; r_1 – радиус круговой режущей кромки.

Чтобы высота гребешков Δ не превышала допускаемое значение $[\Delta]$, указанное расстояние s в соответствии с (1) должно удовлетворять условию

$$s \leq 2 \sqrt{\frac{2[\Delta]}{\left(\frac{1}{b} + \frac{1}{r_1}\right)}} \quad (2)$$

Благодаря круговой форме режущих кромок их главный и вспомогательный углы в плане имеют стабильные значения, благодаря чему обеспечивается постоянная форма гребешков на всей длине формируемой стороны профиля. Это подтверждено экспериментально при реализации рассмотренной схемы обработки образцов 1 (рисунок 2, а) с профилем в виде треугольника Рело на

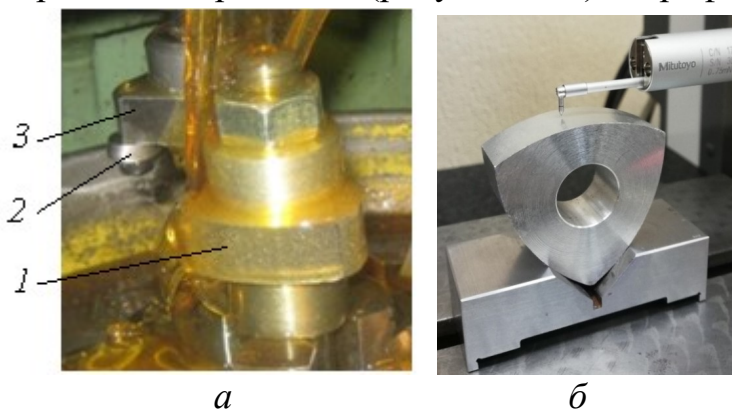


Рисунок 2 – Схемы обработки поверхности (а) и контроля ее топологии (б)

зубодолбежном станке инструментом 2 со сменными круглыми пластинками 3 [2]. Контроль высоты гребешков, выполненный на контурографе-профилометре SV-C4500, подтвердил достоверность результатов компьютерного моделирования процесса формирования топологии поверхности с профилем в

виде треугольника Рело (см. рисунок 1, б) в отношении стабильности отклонений обработанной поверхности от номинальной, а также соответствие расчетных и измеренных значений высоты отклонений.

1. Способ обработки некруглых деталей с треугольным профилем равной ширины : Евразийский патент 031383 / А. А. Данилов, В. А. Данилов. – Оpubл. 28.12.2018.
2. Пантелеенко, Ф.И. Обработка моментопередающих поверхностей с профилем в виде треугольника Рело на зубодолбежном станке / Ф.И. Пантелеенко, А.А. Данилов, И.К. Карась // Горная механика и машиностроение. – 2018. – №4. – С. 59-65.

УДК 621.91.01

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧЕНИЯ СИНУСОИДАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЭКСЦЕНТРИЧНО УСТАНОВЛЕННЫМ ПРИНУДИТЕЛЬНО ВРАЩАЮЩИМСЯ КРУГЛЫМ РЕЗЦОМ

Данилов В. А.¹, Селицкий А. Н.²

- 1) Белорусский национальный технический университет Минск,
- 2) Полоцкий государственный университет Новополоцк,
Республика Беларусь

В работе [1] экспериментально доказана возможность обработки синусоидальных цилиндрических поверхностей с различным числом граней эксцентрично установленным принудительно вращающимся круглым резцом. Для практической реализации этого метода обработки важно установить точность формообразования синусоидального профиля этим методом, влияние элементов режима резания на шероховатость и твердость обработанной поверхности, температуру стружки и передней поверхности резца, характер его износа и стойкость. Теоретическое и практическое значение имеет также исследование особенностей ротационного точения со значением кинематического коэффициента в диапазоне 2-9, т.е. значительно большим, чем в известных исследованиях ротационного точения круглых и плоских поверхностей.

Исследования проведены на шлицефрезерном станке модели HECKERT GFLV-250. Обработывались заготовки из стали 40Х диаметром 25...55 мм круглыми резцами диаметром 50...60 мм из быстрорежущей стали Р6М5, статические углы которых: передний угол – 10°, задний – 20°. Биение режущего лезвия 0,01...0,02 мм. Параметры схемы обработки: количество выступов обработанной поверхности – 3 и 4; кинематический коэффициент – 2...9; эксцентриситет установки резца относительно оси его вращения – 1-1,5

мм; частота вращения резца 56; 71; 90 мин⁻¹; глубина резания – 0,5...4 мм; подача – 0,134...0,67 мм/об.

Экспериментально установлено, что профиль обработанной поверхности является синусоидальным с максимальным отклонением от номинального в пределах 0,03...0,04 мм, которое обусловлено погрешностями настройки параметров схемы обработки и податливостью обрабатываемой системы.

С применением тепловизионного метода определено, что максимальная температура стружки при обработке трехгранных синусоидальных поверхностей составляет 250 С⁰, а четырехгранных поверхностей – 263 С⁰; при этом температура передней поверхности резца – 274 С⁰ и 316 С⁰, соответственно. Более высокая температура при обработке четырехгранных поверхностей обусловлена большим значением кинематического коэффициента, поскольку с его увеличением возрастает скорость скольжения резца относительно заготовки при той же частоте ее вращения.

Периодически изменяющаяся при точении синусоидальной поверхности глубина резания обуславливает неравномерность распределения температуры вдоль режущей кромки. Об этом свидетельствуют различные цвета побежалости по длине стружки (от чуть желтого до коричнево-желтого) и термограмма ротационного резца. При обработке с СОЖ температура резца снижается до 50-55 С⁰.

Шероховатость обработанной поверхности различна в вершине и середине ее профиля, а также в продольном и поперечном направлениях. С увеличением кинематического коэффициента параметр Ra изменяется в диапазоне (1,2-3) мкм и (2,3-5,3) мкм, соответственно, на вершине и в середине некруглого профиля. Увеличение подачи в указанном выше диапазоне приводит к росту шероховатости обработанной поверхности от Ra 1,3-3,14 мкм до Ra 1,75÷6,5 мкм. При этом меньшую шероховатость имеют участки обработанной поверхности в области вершин профиля граней.

Твердость обработанной поверхности вблизи вершин профиля граней при изменении кинематического коэффициента в диапазоне $3 \leq k \leq 6$ на 15...25% выше твердости материала заготовки. В середине же грани твердость изменяется в диапазоне (310-415) HV_{0,2} при твердости материала заготовки 250HV_{0,2} и $k=3,25$. Увеличение подачи приводит к меньшему изменению твердости у вершин обработанного профиля, чем вблизи его середины, что связано с увеличением пластической деформации поверхностного слоя в этой области, вследствие максимального значения переменной глубины резания.

Периодическое изменение глубины резания обуславливает неравномерное изнашивание резца по длине режущей кромки: например, после обработки в течение 110 мин неравномерность износа составила 0,01...0,015 мм при диаметре резца 54 мм. Следует отметить высокую стойкость резца, которая, например, при обработке трехгранного синусоидального профиля средним диаметром 45 мм с кинематическим коэффициентом 3,6, частотой вращения резца 56 мин⁻¹, глубиной резания 3 мм, подачей 0,5 мм/об составила 335 мин при установленном критерии изнашивания.

Таким образом, экспериментально доказана эффективность ротационного точения синусоидальных цилиндрических поверхностей эксцентрично установленным принудительно вращающимся круглым резцом, что позволяет рекомендовать этот метод обработки для обработки валов профильных моментопередающих соединений.

1. Данилов, В.А. Ротационное точение некруглых цилиндрических поверхностей с синусоидальным профилем эксцентрично установленным круглым резцом / В. А. Данилов, А. Н. Селицкий // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки: тезисы докл. 34-ой Междун. науч.-техн. конф. (Минск, 29 марта 2019 г.) / В.К. Шелег (отв. ред.) [и др.]. – Минск: Бизнесофсет, 2019. – С. 52-54.

УДК 621.762

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПРАВЯЩИХ АЛМАЗНЫХ КАРАНДАШЕЙ С МЕХАНОАКТИВИРОВАННОЙ СВЯЗКОЙ

Жорник В.И.^{1,2}, Ковалева С.А.¹, Шелег В.К.²

- 1) Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси;
- 2) Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Работоспособность правящих алмазных карандашей в значительной степени определяется свойствами металлической связки, которая, с одной стороны, должна обеспечивать прочное удержание рабочих алмазных зерен, не допуская их преждевременного выпадания из нее, а с другой – должна изнашиваться с определенной интенсивностью для того, чтобы из нее удалялись затупившиеся алмазные зерна и вскрывались нижележащие «свежие» частицы алмаза. Наряду с этим связка должна обеспечивать низкое тепловыделение в зоне резания и хороший теплоотвод от нее. Сказанное обуславливает необходимость наличия у материала связки определенного комплекса механических, теплофизических и триботехнических свойств, который может быть обеспечен формированием наноструктурированного состояния материала связки, в частности, при использовании предварительного механического активирования металлического порошка и ускоренного (например, электроконтактного) спекания порошковой алмазно-металлической смеси для получения компакта, представляющего собой рабочий элемент карандаша для правки абразивных кругов [1, 2].

Целью данной работы являлась экспериментальная оценка качества алмазных карандашей для правки шлифовальных кругов, изготовленных с применением материала связки из наноструктурированных механокомпозитов на основе меди и железа, по показателю удельной производительности, предусмотренному ГОСТ 607-80.

На испытания были представлены опытные партии (по 5 шт. каждая) алмазных карандашей, изготовленных с применением материалов связки на основе наноструктурированных механокомпозитов систем «медь-олово» и «железо-титан» в сравнении с карандашами, изготовленными с использованием металлических связок того же исходного компонентного состава без механоактивации. По конструкции и содержанию алмаза представленные на испытания правящие карандаши соответствовали карандашу алмазному 3908-0086 ГОСТ 607-80 (тип карандаша 02) с синтетическими поликристаллическими алмазами типа «спеки» АРС (ГОСТ 9206-80) фракции 1250/1000 мкм общей массой 1 карат (200 мг). Алмазно-металлические компакта получали методом электроконтактного спекания на установке ССМ-02 при плотности тока 8–10 кА/см², давлении 10–15 МПа в течение 45–60 с при длительности импульсов и пауз 0,02 с. Плотность материала связки на основе меди с добавкой олова (18 масс.%) составляла $\rho=8,65$ г/см³ при микротвердости в пределах $H_{\mu} = 1,96$ –2,01 ГПа и $H_{\mu} = 1,88$ –1,93 ГПа для наноструктурированного механокомпозита и неактивированной смеси порошков меди и олова соответственно. Плотность материала связки на основе железа с добавкой титана (20 масс.%) соответствовала $\rho=6,86$ г/см³ при микротвердости в пределах $H_{\mu} = 5,36$ –5,43 ГПа и $H_{\mu} = 5,21$ –5,31 ГПа для наноструктурированного механокомпозита и неактивированной смеси порошков железа и титана соответственно. Испытания проводились на круглошлифовальном станке мод. 3А164 при правке шлифовальных кругов типа 1 (ПП) 500x125x305 25А 40 СМ2 К 35 м/с (ГОСТ 2424-83) и типа 1 (ПП) 600x32x305 25А 25Н СТ1 6 К 35 м/с (ГОСТ Р 52781-2007). Режимы и порядок испытаний соответствовали ГОСТ 607-80 для операции круглого шлифования (начальная рабочая скорость круга – 35 м/с; скорость продольной подачи – 0,5 м/мин; поперечная подача – 0,03 мм/ход; охлаждение – эмульсия, расход 20–22 л/мин).

Результаты проведенных испытаний показали, что значения удельной производительности на операции круглого наружного шлифования для правящих карандашей, изготовленных с применением материалов связки из наноструктурированных механокомпозитов на основе меди и железа, находятся в пределах 49,5–54,1 см³/г и 49,7–57,4 см³/г соответственно, что в 1,2–1,4 раза превышает допустимое минимальное значение этого показателя для правящих карандашей типоразмера 3908-0086 (тип 02), предусмотренное ГОСТ 607-80. Для правящих карандашей, изготовленных с применением связок на основе немодифицированных металлических порошков, среднее значение удельной производительности для обоих вариантов связки (41,3–42,1 см³/г) практически совпадало с минимальным уровнем, предусмотренным стандартом (41,0 г/см³).

Более высокий уровень работоспособности правящих карандашей со связками из механоактивированных порошков, по-видимому, обусловлен формированием наноструктурированного состояния, изменением фазового состава с появлением в нем упрочняющих интерметаллидных соединений и,

соответственно, повышенными механическими и триботехническими свойствами [2].

Анализ результатов проведенных испытаний показал целесообразность применения материала связки из наноструктурированного механокомпозита на основе меди для изготовления правящего инструмента, предназначенного для операций правки шлифовальных кругов с твердостью связки СМ1, СМ2 и зернистостью 16–40. Применение материала связки из наноструктурированного механокомпозита на основе железа может быть рекомендовано для изготовления правящего инструмента, предназначенного для операций правки шлифовальных кругов с твердостью связки СТ1, СТ2 и зернистостью 25–40.

1) Модифицирование материалов и покрытий наноразмерными алмазосодержащими добавками / П.А. Витязь [и др.]. – Минск: Беларус. навука, 2011. – 527 с.

2) Витязь П.А., Жорник В.И., Ковалева С.А., Григорьева Т.Ф. Получение композиционных порошков с металлической матрицей методом механохимического синтеза: Порошковая металлургия в Беларуси: вызовы времени: сб. науч. ст. / НАН Беларуси, ГНПО порошковой металлургии; редкол.: А.Ф. Ильющенко (гл. ред.) [и др.]. – Минск: Беларус. навука, 2017. – С. 414–458.

УДК 621.762:621.921.34

АЛМАЗНЫЙ СВЕРХТВЕРДЫЙ МАТЕРИАЛ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ ПОЛУЧЕННЫЙ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЙ И ТЕМПЕРАТУР С ДОБАВКАМИ УДА

Жорник В.И., Сенють В.Т., Парницкий А.М., Валькович И.В.

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси

Минск, Республика Беларусь.

Физико-механические свойства композиционных материалов на основе алмазных порошков существенным образом зависят от фазового состава, дисперсности и особенностей взаимодействия компонентов шихты. Как правило, спекание таких материалов проводят при высоких давлениях в области термодинамической стабильности алмаза. В качестве эффективной связки при спекании алмазных поликристаллов могут выступать карбидообразующие элементы в чистом состоянии или в составе сплава или химического соединения. Наличие в сверхтвердой матрице наноструктурных тугоплавких карбидов, боридов, нитридов и др. позволяет повысить пластичность композита, затормозить процессы рекристаллизации и обратного фазового превращения алмаз – графит [1].

В настоящей работе представлены результаты получения поликристаллического композиционного сверхтвердого материала на основе

модифицированных карбидообразующими элементами микро- и нанопорошков алмаза. В качестве исходных материалов использовались порошок УДА производства НП ЗАО «Синта» (г. Минск) с размером частиц 4–10 нм (ТУ РБ 28619110.001-95), модифицированный бором [2], микропорошок алмазов статического синтеза АСМ 14/10 производства ЗАИ ПО «Кристалл» (г. Гомель) с размером частиц в диапазоне 0,5–20 мкм (ГОСТ 9206-80), модифицированный кремнием.

Процесс получения поликристаллического композиционного сверхтвёрдого материала состоит из двух этапов. На первом этапе проводили модифицирование поверхности алмазных порошков различных типов в герметичном контейнере под плавким затвором в восстановительной атмосфере диссаммиака, содержащей хлориды соответствующих соединений, в температурном интервале 800–950 °С при изотермической выдержке в течение 1–4 ч. На втором этапе проводили термобарическую обработку шихты в аппарате высокого давления (АВД) типа «наковальня с лункой» с целью получения композиционного материала с наноструктурной связкой на основе карбидообразующих элементов. Режим обработки в диапазоне: давление 5,5–7,5 ГПа, температура 1650–1950 °С.

В процессе модифицирования микропорошков алмаза кремнием последний адсорбируется на поверхности алмазных зерен в виде частиц каплевидной формы размерами 100–200 нм, которые в процессе роста объединяются в пленку, частично либо полностью покрывающую алмаз (рисунок 1, а). Исследования образцов композитов, полученных термобарическим спеканием, методами сканирующей электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа показали, что они имеют мелкозернистую структуру, на границах микрозерен алмаза присутствуют частицы УДА(В) (рисунок 1, б), которые располагаются в карбидной сетке.

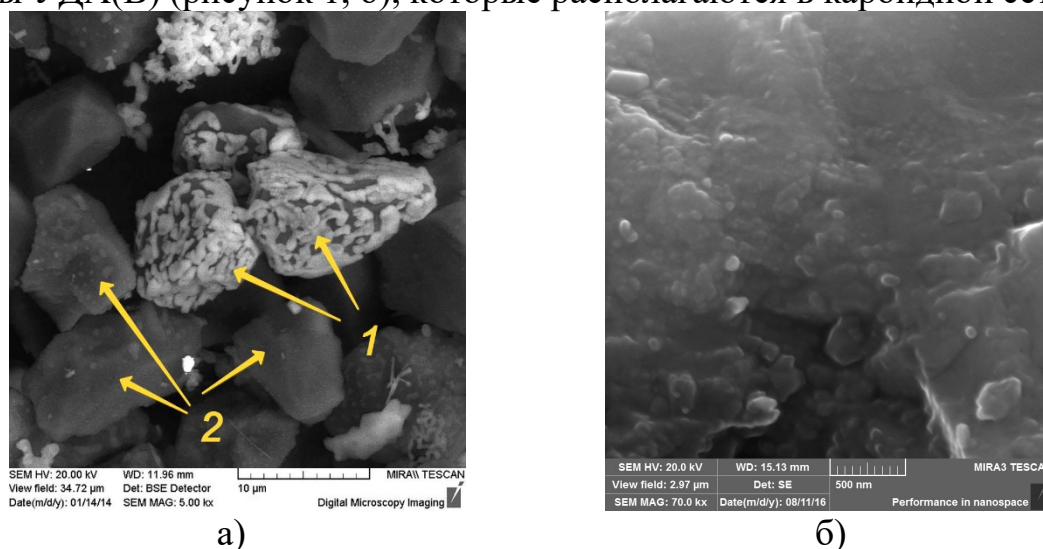


Рисунок 1 – а) внешний вид алмазных зерен АСМ 14/10 после модифицирования кремнием: 1 – зерна, покрытые кремнием; 2 – зерна без кремниевого покрытия; б) морфология поверхности ПКСТМ АСМ 14/10(Si)+УДА(В) после термобарической обработки (режим обработки: $T = 1900^{\circ}\text{C}$, $P = 6,5 \text{ ГПа}$, $t = 20 \text{ с}$)

На основе проведенных экспериментальных исследований и анализа полученных результатов были сделаны следующие выводы:

1. Установлено, что давление выше 6,5 ГПа активирует процесс спекания порошка за счет пластической деформации алмазных микрочастиц, высокая температура увеличивает степень его пластической деформации, а карбидообразующие элементы позволяют снизить параметры Р,Т-обработки. При этом образование прямых межзеренных связей происходит при взаимодействии друг с другом пластически деформированных зерен микропорошка АСМ(Si).

2. Порошок УДА(В) служит активатором спекания алмазного микропорошка, улучшает физико-механические свойства композиционного материала за счет более прочного связывания зерен алмазного микропорошка.

1. Ковалевский, В.Н. Структурообразование карбидокремниевой матрицы в композиции алмаз – карбид кремния / В. Н. Ковалевский, С. К. Гордеев, С. Б. Корчагина, И. В. Фомихина, А. Е. Жук // Огнеупоры и техническая керамика. – 2005. – № 5 – С. 8–14.
2. Наноалмазы детонационного синтеза: получение и применение / П.А. Витязь [и др.] – Минск: Беларус. навука, 2013. – 381 с.

УДК 621.002

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ЗУБОФРЕЗЕРОВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ШЕСТЕРЁН ЧЕРВЯЧНЫМИ ФРЕЗАМИ, ИСХОДЯ ИЗ ИХ ВЛИЯНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ КАЧЕСТВА ШЕСТЕРЁН

Кане М.М., Шелег В.К., Кравчук М.А., Кот П.И.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Как показано в работах [1, 2 и др.] режимы зубофрезерования цилиндрических шестерён червячными фрезами влияют на основные показатели качества шестерён. На всех последующих операциях упрочнения и отделки шестерён имеет место закономерное изменение этих показателей [3]. Таким образом, управляя режимами зубофрезерования шестерён, можно обеспечить качество готовых шестерён. В современных справочных изданиях [4 и др.] отсутствуют данные, позволяющие назначить режимы зубофрезерования с учётом конкретных требований к параметрам качества шестерён. Нами предложена методика решения данной задачи.

Задача комплексной оптимизации режимов резания заключается в определении таких их значений, которые обеспечили бы максимальную эффективность в том или ином смысле процесса резания в заданных

конкретных производственных условиях при выполнении всех требований, предъявляемых к технологическому процессу. Данная задача относится к классу задач параметрической оптимизации при разработке технологических процессов. При ее решении широко используются операционные модели, в которых отражаются требования, предъявляемые к искомому проектному решению, и факторы, которые должны быть учтены при принятии этого решения. При технологическом проектировании операционные модели записывают в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} F(x_1, x_2, \dots, x_n) &\rightarrow \min (\max) \\ g_j(x_1, x_2, \dots, x_n) &\leq b_j, \quad j = \overline{1, m} \\ a_{1i} \leq x_i &\leq a_{2i}; \quad i = \overline{1, n}, \end{aligned} \right\},$$

где x_1, x_2, \dots, x_n – оптимизируемые параметры процесса, которые могут принимать значения из множества $[a_{1i}, a_{2i}]$ действительных чисел; $F(x)$ – целевая функция, которую необходимо оптимизировать (она должна принять минимальное или максимальное значение при соблюдении условий, наложенных на функции $g_j(x_1, x_2, \dots, x_n)$, и значения x_i ; b_j – заданные действительные функции. Очень часто при оптимизации режимов резания в качестве $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ принимается доля себестоимости операции C_p , зависящая от режимов резания $C_p = t_0 E_p + \frac{\Delta_k}{R}$, где t_0 – основное время операции; E_p – себестоимость 1 мин работы станка и рабочего; Δ_k – сумма всех затрат за период стойкости инструмента; R – число заготовок, обработанных за период стойкости. Так как

$$t_0 = \frac{L_{p.x} z}{S_0 n \varepsilon q} \quad \text{и} \quad R = \frac{T S_0 n \varepsilon q}{L_{p.x} z},$$

то

$$C_p = \frac{L_{p.x} z}{S_0 n \varepsilon q} \left(E_p + \frac{\Delta_k}{T} \right),$$

где $L_{p.x}$ – длина рабочего хода фрезы или стола, мм; z – число зубьев нарезаемого зубчатого колеса, S_0 – подача на оборот заготовки; ε – число заходов фрезы; q – количество одновременно обрабатываемых деталей; n – число оборотов фрезы; T – период стойкости инструмента.

Минимизация величины C_p должна достигаться при наложении определенных ограничений на важнейшие в данных условиях параметры качества шестерен (для шестерен автотракторных трансмиссий такими параметрами могут быть $F_{\beta r}$, f_{ir}'' , R_a , H_{μ} , их взаимосвязи с режимами зубофрезерования V S должны быть экспериментально определены при отладке техпроцесса), мощность резания N , крутящий момент $M_{кр}$ от максимальной силы резания, предельные значения n и S_0 для данного станка,

износ h по задней грани фрезы за время T ее работы. Эти параметры могут быть рассчитаны по формулам.

Мощность резания:

$$N = K_p m^{1,7} S_0^{0,9} V / D_{\text{фр}}$$

где m – модуль нарезаемого колеса, мм; $D_{\text{фр}}$ – диаметр фрезы; $K_p = 0,12$ для стали и $0,06$ для чугуна.

Мощность, расходуемая электродвигателем:

$$P_{\text{ст}} = P/\eta,$$

где $\eta=0,4-0,5$ – коэффициент полезного действия зуборезного станка. Мощность $P_{\text{ст}}$ не должна превышать фактическую мощность электродвигателя станка $P_{\text{ст фак}}$.

Крутящий момент от максимальной силы резания на шпинделе фрезы:

$$M_{\text{кр.фр}} = P_z R_{\text{фр}} = K_p m^{x_p} S_0^{y_p} R_{\text{фр}},$$

где значения коэффициентов K_p, x_p, y_p могут быть приняты по [2, табл. 11]; $R_{\text{фр}}$ – радиус фрезы.

Крутящий момент от максимальной силы резания на шпинделе изделия:

$$M_{\text{кр.д}} = P_z R_{\text{д}} = K_p m^{x_p} S_0^{y_p} r,$$

где r – диаметр делительной окружности нарезаемого колеса.

Значения $M_{\text{кр.фр}}$ и $M_{\text{кр.д}}$ не должны превышать соответствующих предельных значений по паспорту зубофрезерного станка.

Износ h по задней грани фрезы за время T ее работы равен

$$h = 1,36 \cdot 10^{-6} \cdot T^{0,79} S_0^{1,34} V^{2,3} m^{0,5} z^{-0,25}.$$

Значение h не должно превышать $h_{\text{доп}}$ для принятого периода стойкости фрезы T . Значение $h_{\text{доп}}$ может быть принято по справочной литературе.

Таким образом операционная модель процесса зубофрезерования цилиндрических шестерён для оптимизации режимов резания S и $V(n)$ может быть записана в следующем виде

$$\left. \begin{aligned} &L_{\text{р.х}} z \left(E_p + \frac{\Xi_k}{T} \right) / S_0 n \varepsilon q \rightarrow \min \\ &a_0 + a_1 V + a_2 S \leq f_i''; \quad b_0 + b_1 V + b_2 S \leq F_\beta; \quad c_0 + c_1 V + c_2 S \leq R_a \\ &H_{\mu \min} \leq d_0 + d_1 V + d_2 S \leq H_{\mu \max} \\ &K_p m^{1,7} S_0^{0,9} V / D_{\text{фр}} \eta < N_{\text{ст}} \\ &K_p' m^{x_p} S_0^{y_p} R_{\text{фр}} < M_{\text{кр.фр.доп}}; \quad K_p'' m^{x_p'} S_0^{y_p'} R_{\text{д}} < M_{\text{кр.д.доп}} \\ &1,36 \cdot 10^{-6} \cdot T^{0,79} S_0^{1,34} V^{2,3} m^{0,5} z^{-0,25} < h_{\text{доп}} \\ &n_{\min} \leq n \leq n_{\max} \\ &S_{\min} \leq S \leq S_{\max} \end{aligned} \right\}$$

Решение данной задачи возможно с помощью методов линейного программирования.

Вывод:

Приведенные зависимости позволяют на этапе отладки процесса зубофрезерования цилиндрической шестерни червячной фрезой определить режимы зубофрезерования, которые обеспечат требуемое качество шестерён в заданных условиях производства

1. Кане, М.М. Анализ взаимосвязей некоторых параметров качества поверхностей зубьев цилиндрических шестерён с режимами зубофрезерования / М.М.Кане, В.К.Шелег, М.А.Кравчук, П.И.Кот // Сб. ст. «Актуальные вопросы машиноведения», ОИМ, Минск, 2019.
2. Медведицков, С.Н. Высокопроизводительное зубонарезание фрезами / С.Н.Медведицков. – М.:Машиностроение, 1981.
3. Кане, М.М. Изменение параметров качества поверхности зубьев цилиндрических зубчатых колес на различных операциях их изготовления / М.М. Кане, А.И. Медведев // Вестник машиностроения. – 1997. – №7.
4. Режимы резания металлов: Справочник/ Ю.В.Барановский, Л.А.Брахман, А.И.Гдалевич и др. Под ред. А.Д.Корчёмкина.-М.: НИИТавтопром, 1995.

УДК 621.9.06

**ОБРАБОТКА НЕЖЕСТКИХ ЗАГОТОВОК НА ДВУХСУППОРТНЫХ
ТОКАРНЫХ СТАНКАХ С ЧПУ**

Каштальян И.А., Шпак А.В., Небышинец А.С.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Резервы эффективного использования двухсуппортных токарных станков с числовым программным управлением (ЧПУ) находятся в рациональном совмещении обработки поверхностей заготовки при общей частоте вращения шпинделя. Причем число вариантов совмещения может существенно возрасти, если на станке будет реализована функция независимого управления суппортами. На двухсуппортном вертикальном патронном полуавтомате мод. 1Ф751Ф3, оснащённом микропроцессорным устройством с ЧПУ, данная задача управления решена путем включения в состав технологического программного обеспечения программного модуля, реализующего алгоритм независимого управления координатными перемещениями. По данному алгоритму согласование начала отработки обеих управляющих программ (для правого и левого суппортов) осуществляется с помощью признака синхронизации Н. В управляющей программе (УП) для правого (левого) суппортов под адресом Н задается номер кадра, с которого начинается отработка УП для левого (правого)

суппорта. Использование этой функции управления позволяет обеспечить оптимальное сочетание рабочих и вспомогательных ходов для правого и левого суппортов при их совместной работе.

Наибольший эффект от совместного точения двумя резцами, установленными на разных суппортах, может быть получен при изготовлении нежестких деталей (кроме увеличения производительности обработки значительно повышается точность формы детали в продольном сечении за счет уравнивания радиальных сил резания). Настройку резцов осуществляют по одной из известных схем: с делением глубины резания; с делением подачи. Указанные схемы точения имеют один общий недостаток, который обусловлен возникновением вибраций вследствие взаимного влияния реализуемых процессов резания друг на друга (при совпадении частот вынужденных колебаний одного и другого процессов резания появляются резонансные явления). Для исключения этого недостатка целесообразно для одного из процессов обеспечить управляемое закономерное изменение уровня вибраций (например, путем включения в один из процессов резания кинематической неустойчивости). Для этого в технологическое программное обеспечение устройства ЧПУ был включен модуль, позволяющий периодически увеличивать подачу от S_{\min} до S_{\max} , а потом снижать ее до первоначального значения. Изменение подачи между ее пиковыми значениями производится приращениями величиной ΔS по мере обработки участков Δl между приращениями: устройство ЧПУ поочередно реализует зависимость $S_{\max} = S_{\min} + n_s \Delta S$ и зависимость $S_{\min} = S_{\max} - n_s \Delta S$, где n_s – число приращений скорости подачи при ее изменении от S_{\min} до S_{\max} . Длина пути разгона (замедления) при этом определяется из выражения $l_1 = n_s \Delta l$: значение ΔS выбирается кратным 0,1 мм/мин; Δl принимается кратной единице дискретности.

Включение в один из процессов резания модулированной подачи (независимо от схемы резания) наряду с повышением производительности и точности обработки приводит к снижению уровня вибраций технологической системы. При точении с делением подачи кроме того наблюдается надежное дробление стружки за счет периодического совпадения поверхностей резания обоих резцов (рисунок 1).

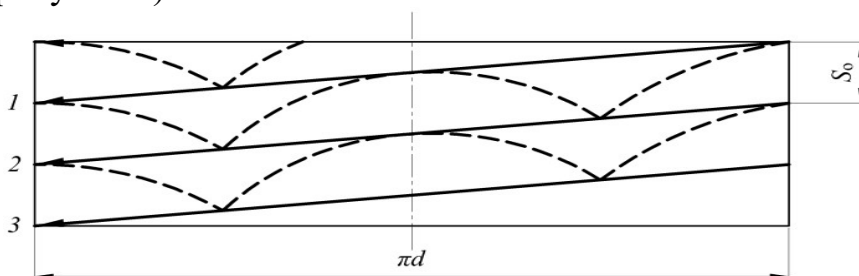


Рисунок 1 – Схема следов вершин резцов на развертке наружной поверхности заготовки при совместном точении двумя резцами с делением подачи: след вершины резца, работающего с постоянной (сплошная линия) и модулированной (пунктирная линия) подачей

Экспериментальные исследования выполнялись с использованием станка мод. 1А751ф3, оснащенного устройством ЧПУ с функцией независимого управления суппортами и функцией модулированного изменения подачи. Обработывалась наружная поверхность втулок из стали 40ХН (длина втулки 145 мм, наружный диаметр 150 мм, внутренний 135 мм) при консольном закреплении в патроне и частоте вращения шпинделя $n_{ш}=255$ об/мин. Была реализована схема точения с делением подачи (оба рабочих хода выполнялись с глубиной резания $t=3$ мм и скоростью резания $v=120,1$ м/мин). Резец, установленный в револьверной головке правого суппорта, перемещался с модулированной подачей, среднее значение которой было равно подаче резца, установленного на левом суппорте.

В результате выполненных экспериментов установлено, что включение в процесс резания одним из резцов модулированной подачи обеспечивает уменьшение шероховатости обработанной поверхности и надежное дробление стружки. Уменьшение шероховатости обусловлено снижением уровня вибраций технологической системы, за счет уменьшения вероятности возникновения резонансных явлений при наложении друг на друга однородных процессов резания. Надежное дробление стружки обеспечивается за счет периодического сближения поверхностей резания обоих резцов.

УДК 658.512

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЖЕСТКОСТИ НАПРАВЛЯЮЩИХ КАЧЕНИЯ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

Колесников Л. А.

Белорусский национальный технический университет,
Минск, Республика Беларусь

Точность современных станков определяется многими факторами, одним из важнейших которых является жесткость направляющих. В настоящее время наиболее распространены направляющие качения. Оценим характер изменения жесткости такой направляющей в зависимости от направления действия силы. В качестве тестовой использовалась направляющая Rexroth серии 1851 типоразмера 45 с роликовыми телами качения и натягом $0.08C$, где C – динамическая грузоподъемность, $C=92300$ Н. В соответствие с данными [1] жесткость направляющей в вертикальном направлении принималась равной 1833 Н/мкм, а в горизонтальном направлении – 1143 Н/мкм.

Была разработана псевдоплоская МКЭ-модель тестовой направляющей качения, включающая опорную рельсу, саму каретку и упругие тела (1...4), моделирующие тела качения (рисунок 1, а). Тело каретки и рельса выполнены из стали ($E=2 \times 10^5$ МПа), а модуль Юнга упругих тел подбирался таким образом, чтобы эквивалентная жесткость модели направляющей в

вертикальном направлении была равна заданной (1833 Н/мкм). Между упругими телами и дорожками тел качения задавалось условие контакта «Frictionless», верхние опорные площадки каретки жестко фиксировались. Предварительный натяг обеспечивался формированием термоупругих напряжений в упругих телах 1...4.

Тестовая сила F прикладывалась к нижней поверхности рельсы. Ее направление менялось на угол от 0° до 90° относительно вертикальной оси. Характерная картина деформации модели направляющей под нагрузкой приведена на рисунке 1, б. График зависимости жесткости направляющей (Н/мкм) как функция от направления приложения силы, град, представлен на рисунке 2.

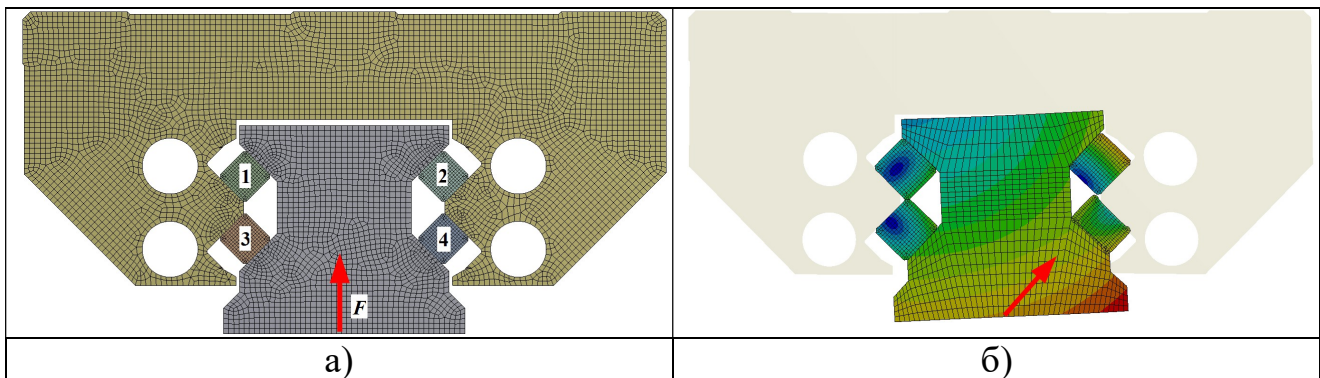


Рисунок 1 – МКЭ-модель направляющей качения

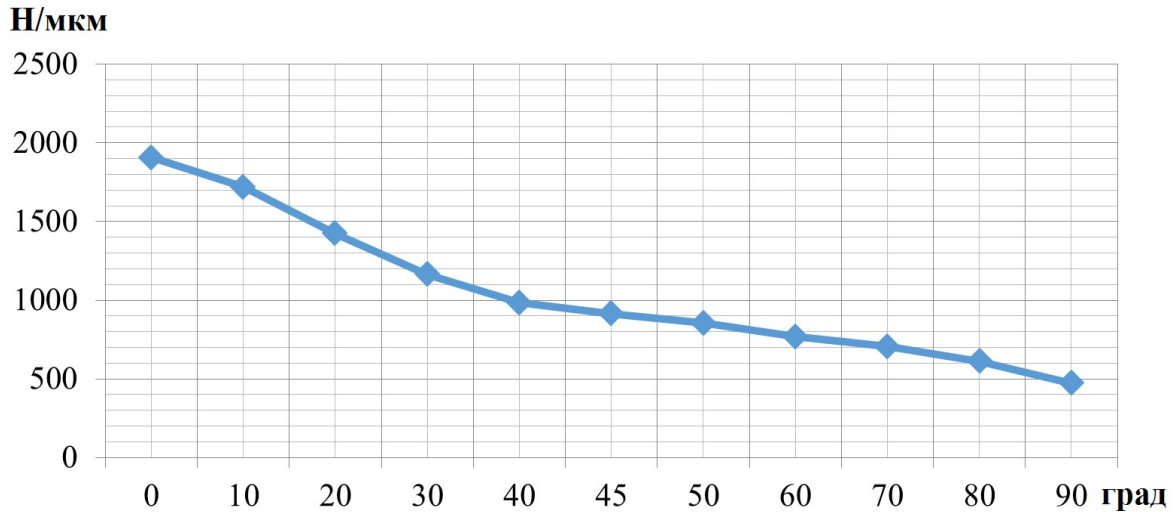


Рисунок 2 – Зависимость жесткости направляющей качения Rexroth от направления действия силы

В частности, по результатам МКЭ-расчета жесткость при горизонтальном приложении силы оказалась в 2.4 раза меньше, чем по данным Rexroth [1]. Для выяснения причин такой кардинальной разницы сравнивались результаты МКЭ-расчетов для случая, когда сила прикладывается к нижней поверхности рельса (рисунок 3, а), и когда сила прикладывается симметрично относительно

дорожек тел качения (красная стрелка на рисунке 3, б). Характер деформации каретки для каждого варианта показан на рисунках 3, в и 3, г.

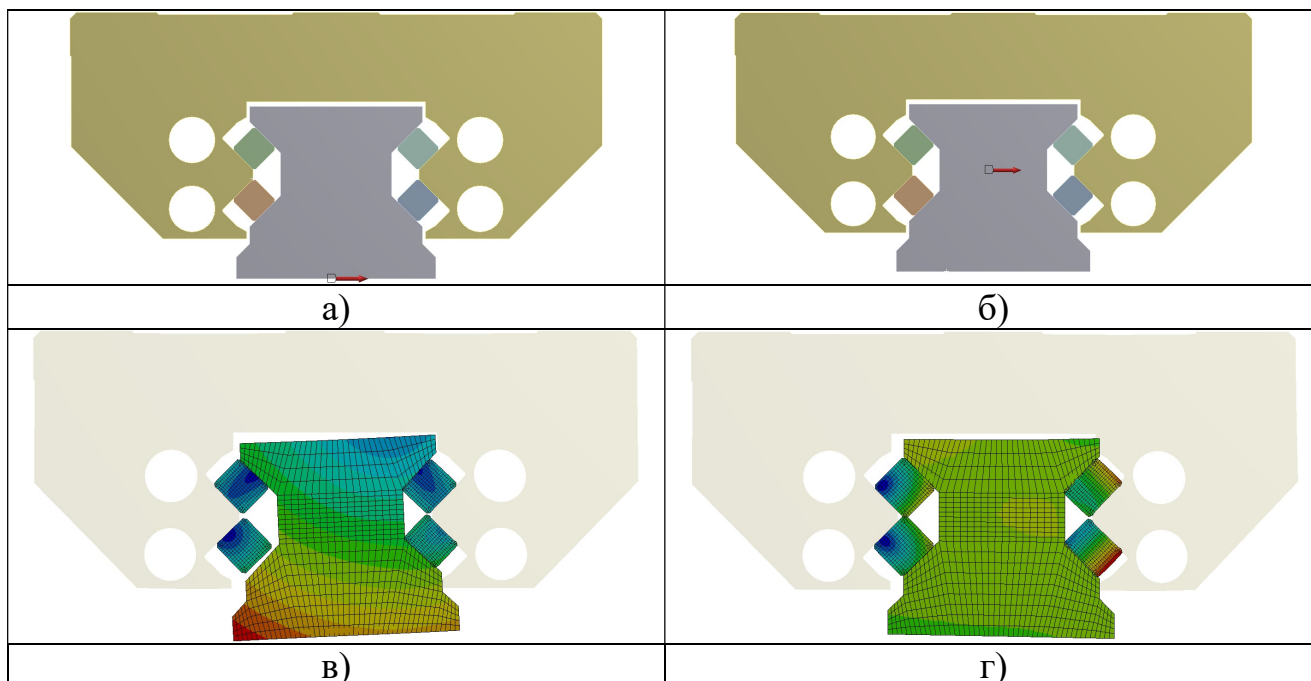


Рисунок 3 – Варианты нагружения направляющей боковой силой

В случае симметричного приложения нагрузки жесткость по результатам МКЭ-расчета практически точно совпадает с данными производителя (погрешность ~5%). К сожалению, обеспечить такой вариант нагружения (без дополнительного момента силы относительно дорожек тел качения) возможно только в редких случаях.

Таким образом, фактическая жесткость направляющих Rexroth в боковом направлении существенно меньше приведенной в технической документации. Вероятно, такой явление имеет место быть не только для направляющих Rexroth, но и для направляющих других производителей, построенных по той же самой конструктивной схеме. При конструировании технологического оборудования следует учитывать эту недокументированную особенность направляющих качения. Например, использовать направляющие с большей грузоподъемностью, чем это вытекает из результатов стандартных расчетов.

1. Bosch Rexroth AG. Roller Rail Systems. R999000354 (2015-10).

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ СВОЙСТВ И РАБОТОСПОСОБНОСТИ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ ЗАЭВТЕКТОИДНЫХ ВАЛКОВЫХ СТАЛЕЙ

Колмаков А.Г.¹, Антипов В.И.¹, Виноградов Л.В.¹, Гайко В.А.²

1) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук, Москва, Российская Федерация

2) Открытое акционерное общество «НПО Центр» НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Динамичное развитие современных отраслей промышленности (энергетики, электроники, приборостроения, авиации, ракетно-космической техники), требует дальнейшее наращивание объёмов производства листов, лент, фольг, а также тонкостенных труб из прецизионных и высоколегированных сталей и сплавов, отличающихся высокими прочностными свойствами. Однако для того, чтобы полуфабрикаты и изделия из этих материалов обладали высоким качеством, материал стали, из которого изготавливаются основные рабочие детали станов для прокатки (рабочие валки, ролики, оправки и т.п.), должен отвечать самым высоким требованиям. В связи с этим возникла насущная проблема в установлении основных факторов, влияющих на твёрдость и работоспособность низколегированных валковых сталей, а также и поиске возможных путей повышения этих характеристик. В процессе работы прокатного инструмента в его поверхностном слое возникают существенные контактные напряжения, приводящие в отдельных областях приповерхностного слоя к усталостному выкрашиванию частиц металла с рабочей поверхности инструмента. Поэтому работоспособность материала валка в значительной степени определяется его твердостью, поскольку с ростом твердости заметно возрастает контактная выносливость валковой стали. Задача повышения твердости при закалке сталей с содержанием углерода более 1% заключается в создании условий, при которых будет происходить превращение высокоуглеродистого аустенита в мартенсит. Для снижения негативного влияния неметаллических включений на работоспособность экономно-легированных инструментальных сталей их подвергают электрошлаковому переплаву, благодаря которому доля таких включений в стали снижается в 2 раза, что способствует полуторакратному повышению контактной прочности металла. Существенный вклад в повышение твёрдости и износостойкости валковых сталей вносят карбиды, твердость которых значительно превышает твердость мартенситной матрицы. Наибольшей износостойкостью обладает сталь, содержащая в своей структуре мелкоигльчатый мартенсит с равномерно распределенными в объеме металла частицами карбидов. Однако присутствие в структуре сталей ледебуритного класса первичных карбидов сопровождается

снижением контактной прочности материала, поскольку крупные частицы остроугольных карбидов играют роль хрупких неметаллических включений [1].

Среди современных способов упрочнения металлов и сплавов (холодный наклеп, легирование, термомеханическая обработка и др.) наиболее эффективной является закалка на мартенсит углеродистых и легированных сталей [2]. По мере увеличения процентного содержания углерода в стали возрастает степень тетрагональности мартенсита закали, благодаря чему твердость закаленной стали повышается. В заэвтектоидных сталях, содержащих в своём составе более 0,8% углерода, в случае полной закали из аустенитной области в структуре стали присутствует большое количество остаточного аустенита, способствующего снижению макротвердости. Однако, по мере увеличения содержания углерода в высокоуглеродистом мартенсите, микротвердость его кристаллов возрастает. В производственных условиях изделия из заэвтектоидных высокоуглеродистых сталей подвергают неполной закалке с температур 760 – 820⁰С. В этом случае количество углерода в аустените перед закалкой практически одинаковое для всех сталей и составляет около 0,9%. В результате твердость закаленных заэвтектоидных углеродистых и низколегированных сталей одинаковая и колеблется в пределах 65 – 66 HRC.

1. Виноград М.И., Громова Г.П. Включения в легированных сталях и сплавах. М., Металлургия, 1971. – 216 с.
2. Новиков В.Н., Белосевич В.К., Гамазков С.М. и др. Валки листовых станов холодной прокатки. М., Металлургия, 1970. – 336 с.

УДК 621.9.06

РАСЧЕТ КОНСОЛЬНО-ФРЕЗЕРНОГО СТАНКА С ЧПУ НА ДИНАМИЧЕСКУЮ ЖЕСТКОСТЬ В ПРОЦЕССЕ ОБРАБОТКИ

**Кравчук А.С.¹, Резник С.В.², Соколов И.О.¹, Авсиевич А.М.¹, Шашко А.Е.¹,
Кругликов А.Е.¹**

- 1) Белорусский национальный технический университет, Минск,
- 2) ОАО «СтанкоГомель», Гомель, Республика Беларусь

Развитие техники ставит новые задачи в области исследования работоспособности машин и их элементов. Повышение их надежности и долговечности является важнейшим фактором, определяющим рост конкурентоспособности изделий, и связано с достоверным определением «опасных» мест конструкции по различным критериям.

Наиболее эффективным широко используемым современным средством достижения поставленной цели является использование метода конечных элементов (МКЭ) [1]. МКЭ позволяет значительно уменьшить затраты при

разработке новых изделий, так как позволяет существенно сократить объемы или даже полностью отказаться от дорогостоящих стендовых испытаний. Кроме того с помощью МКЭ можно в сравнительно короткие сроки оценить характеристики разных вариантов конструкций и выбрать наилучшую.

Данная работа посвящена конечно-элементному моделированию статической жесткости (рисунок 1), напряженно-деформированного состояния (НДС), проведению модального анализа, а также исследованию динамической жесткости (рисунок 2) вновь проектируемого консольно-фрезерного станка с ЧПУ. Для выполнения этих задач использовалась геометрическая 3D-модели станка, предоставленная заказчиком.

Необходимо отметить, что непосредственное использование полученной от заказчика 3D-модели невозможно, т.к. даже на современных суперкомпьютерных вычислительных средствах это приведет к огромному времени решения задачи. С другой стороны, очевидно, что использование очень мелких геометрических фрагментов в целом не оказывает значительного влияния на механику станка. Поэтому одним из главных этапов является подготовка модели к конечно-элементному разбиению, т.е. ее геометрическое упрощение [2]. Этот этап, несмотря на свою кажущуюся логическую простоту, основан на многолетнем инженерном и научно опыте состава НИЛ ДСиММ БНТУ. Именно опыт работников упомянутой лаборатории гарантирует то, что с одной стороны ничего «лишнего» не будет убрано, а с другой ничего «лишнего» не появится в модели. Дальнейшая общая схема решения любых задач с помощью МКЭ обычно состоит из стандартных этапов: разбиения уже созданной геометрических компонентов модели на конечные элементы, создание контактных пар, приложение ограничений и нагрузок и решения поставленных краевых задач.

По результатам моделирования и анализа полученных данных предложены рекомендации по совершенствованию конструкции обрабатывающего центра.

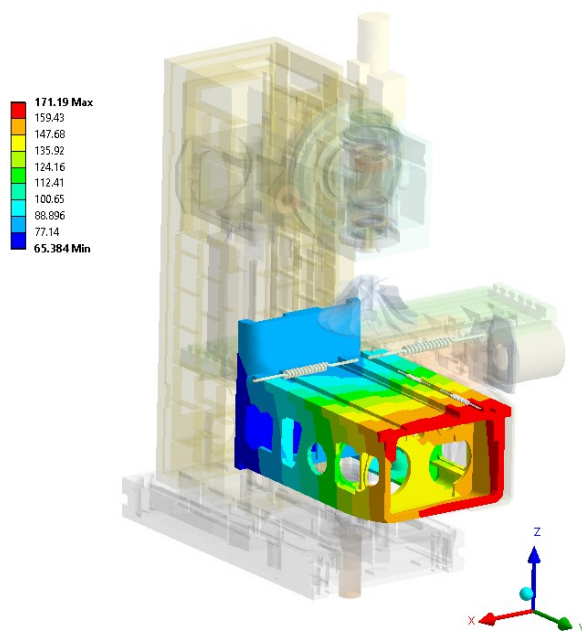


Рисунок 1. Суммарные перемещения консоли при действии нагрузки вдоль оси Y

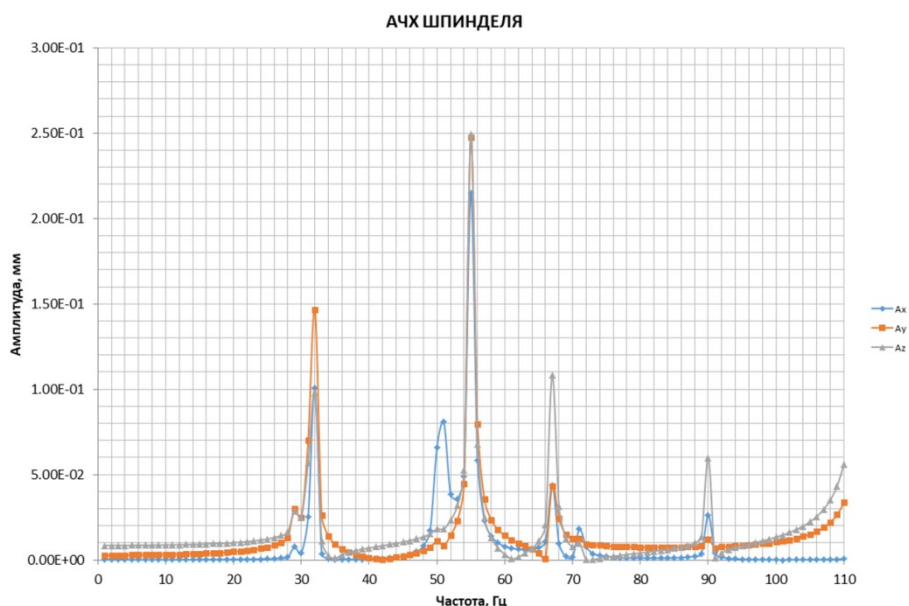


Рисунок 2. Амплитудно-частотные характеристики шпинделя по осям X, Y, Z при приложении гармонически изменяющейся нагрузки вдоль вертикальной оси Z :
 A_x – по оси X , A_y – по оси Y , A_z – по оси Z

1. Инженерный анализ в Ansys Workbench. / В.А. Бруйка [и др.]. – Учебное пособие. – Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 271 с.
2. Металлорежущие станки: учебник / под ред. В.В. Бушуева. Т.1. – М.: Машиностроение, 2011. – 608 с.

УДК 004.057.2

СОВРЕМЕННЫЙ ВЗГЛЯД НА КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА МЕТАЛЛОПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ В АСПЕКТЕ ТРЕБОВАНИЙ МЕЖДУНАРОДНЫХ СТАНДАРТОВ

Кудина А.В., Мысливчик Е.Ю.

Белорусский национальный технический университет,
 Республика Беларусь

В настоящее время интенсивное развитие науки и техники приводит к расширению рынков мировой торговли, причём, одну из важнейших ролей в этом процессе играет стандартизация как важнейший инструмент достижения и обеспечения высокого технического уровня, конкурентоспособности и качества продукции. Практикой доказано, что международные стандарты являются эффективным инструментом для осуществления положительных изменений в качестве и надёжности изделий машиностроения путём установления требований стандартов. Поэтому, в связи с высокими темпами развития науки и техники, требуется, как правило, и постоянная гармонизация требований международной системы стандартизации ко всем изделиям и связанными с их жизненным циклом процессам. Это затрагивает предъявляемые требования к

микроргеометрии поверхностей деталей машин и механизмов, к их оценке и контролю.

Система стандартов Международной Организации по Стандартизации ISO на профильную оценку поверхности включает в себя стандарты, которые образуют логически связанную систему для обеспечения качества металлоповерхности: обозначение шероховатости, текстуру поверхности и её терминологию, правила и процедуры оценки текстуры поверхности и др. Для точной оценки параметров шероховатости сегодня применяются современные средства измерения и оборудование на основе трёхмерного анализа поверхности [1,2]. В Республике Беларусь действует система стандартов на качество и шероховатость поверхности, однако, некоторые из них требуют или приведения в соответствие с нормативами ISO, или разработки новых нормативных документов. Так, например, шесть показателей качества, нормируемые ГОСТ 2789-73 «Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики» уже не в состоянии достаточно полно описать всю микроргеометрию поверхности.

Международные требования регламентируют взаимное признание результатов измерений (испытаний). В соответствии с требованиями ГОСТ 17025–2019 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий», испытательными лабораториями должна проводиться оценка точности измерений (испытаний) и сопровождаться представлением оценки неопределенности. Поэтому при проведении измерений расширенного количества параметров микроргеометрии металлоповерхностей на современном оборудовании соответственно необходимо применять методики расчета неопределенности. Выражение неопределенности в соответствии с международными требованиями является обязательным условием признания результатов измерений международными организациями, а также условием выполнения требований ГОСТ 17025. Неопределенность является в настоящее время единственной признанной на международном уровне оценкой точности результатов измерений и ее определение является важной практической задачей. Испытательные лаборатории, проводящие контроль параметров микроргеометрии деталей в машиностроении, должны работать по современному принципу: международные требования – современное оборудование – трёхмерная оценка шероховатости поверхности – новые методики измерений с оценкой неопределенности.

Международные стандарты являются эффективным средством для распространения и внедрения передовых технологий и надлежащих практик, а также создания единых рынков и гармонизации требований к продукции в мировом масштабе. Поэтому необходимо более эффективно осваивать международный опыт нормирования поверхности и формирования современного представления о шероховатости поверхности, в том числе на профильную оценку поверхности, а так же стандарты на 3D–оценку поверхностей. Необходимо привлекать квалифицированных специалистов-метрологов в области проведения контроля и испытаний. Специалисты

осуществляющие контроль и измерения параметров шероховатости должны обладать определенными знаниями о показателях точности (правильности и прецизионности) и неопределенности измерений, а так же практическими навыками их оценивания. С целью подготовки квалифицированных специалистов машиностроительных специальностей в области метрологии и стандартизации для студентов желательно расширить дисциплину «Нормирование точности и технические измерения» более глубоким изучением метрологии поверхности и методов её оценки, а так же дополнить курс современной методологией.

1. Табенкин, А.Н. Шероховатость, волнистость, профиль. Международный опыт / А.Н. Табенкин, С.Б.Тарасов, С.Н. Степанов; под ред. канд. техн. наук Н.А. Табачниковой. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – 136 с.
2. ISO/TC 213 – Технические требования в отношении размерностей и геометрических размеров продукции и их проверки. Каталог стандартов. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.iso.org/iso/ru/home/store/catalogue_tc/catalogue_tc_browse.htm?co mmid= 54924 -12.02.2020

УДК 621.941.025-182.26

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОНЦЕВЫХ ФРЕЗ НА ИХ ВИБРОУСТОЙЧИВОСТЬ

Михайлов М.И., Кузьмич В. И., Хихлуха А.В.

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», г. Гомель, Республика Беларусь

Концевое фрезерование в современном машиностроении имеет достаточно большое значение. Подтверждением этого может служить большое количество разнообразных конструкций концевых фрез [1,2]. Однако во многих случаях приходится ограничивать режимы резания при таком способе обработки, вследствие низкой виброустойчивости [3]. Повышенные вибрации инструмента могут привести к ухудшению показателей качества обработанной поверхности, ускоренному износу фрезы или даже вызвать поломку инструмента. Поэтому проблема борьбы с вибрациями при концевом фрезеровании является весьма актуальной.

Для исследования была выбрана концевая фреза с 4 зубьями, диаметром 18 мм и углом винтовой канавки 30° (рисунок 1). Далее была построена 3D модель данной фрезы, и проведен расчет модели на собственные частоты методом конечных элементов.

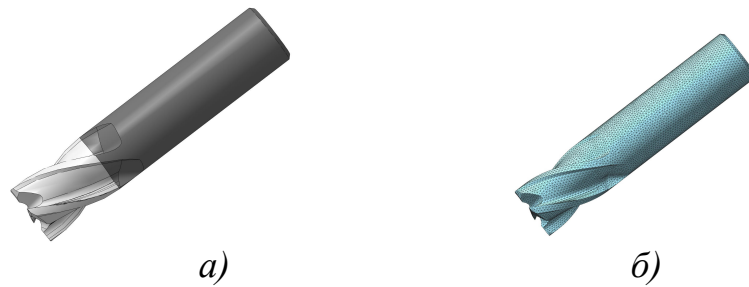


Рисунок 1 – 3D–модель фрезы (а) и конечно-элементная сетка (б)

Для исследования различных параметров, были внесены изменения в конструкцию исходной фрезы и построены еще три модели фрез (рисунок 2)

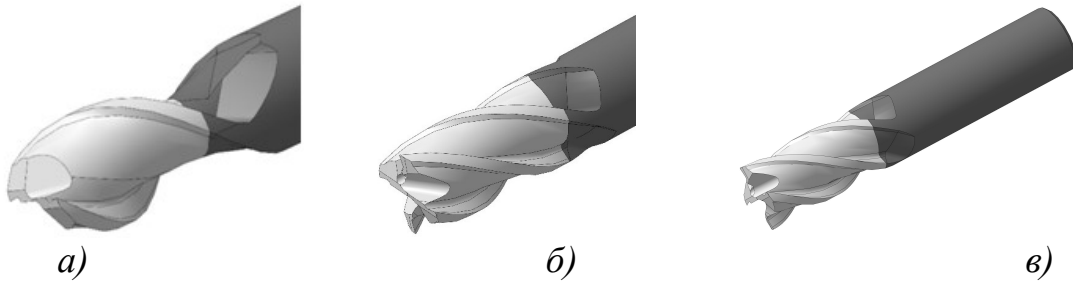


Рисунок 2 – 3D–модели фрез: с двумя режущими зубьями (а); с увеличенным диаметром (б); с углом винтовой канавки равной 38°

Для данных моделей так же был выполнен расчет на собственные частоты, формы которых представлены на рисунке 3.

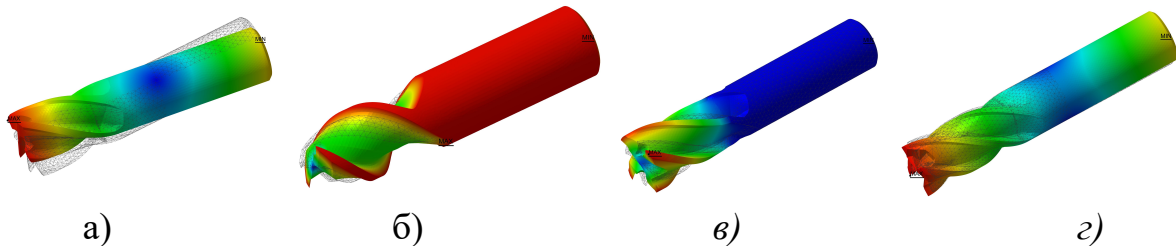


Рисунок 3 – Формы собственных частот различных вариантов конструкций фрез

Относительные амплитуды колебаний представлены на рисунке 4. Полученные результаты позволяют оптимизировать конструкцию фрезы.

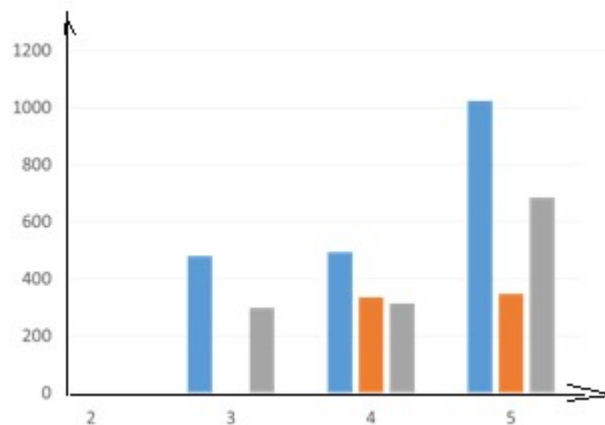


Рисунок 4 – Собственные частоты различных вариантов конструкций фрез

1. Справочник конструктора-инструментальщика / Под общ. ред. В.А. Гречишникова и С.В. Кирсанова. – М.: Машиностроение, 2006. – 542 с.
2. Сложные поверхности : Математическое описание и технологическое обеспечение. Справочник / И.А. Дружинский. – Л.: Машиностроение. – 1985. – 263 с.
3. Справочник технолога–машиностроителя / Ю.А. Абрамов и др., под общ. ред. А.Г. Косилова, Р.К. Мещеряков – 4-е изд., перераб. и доп. 2т. – М.: Машиностроение, 1986. – 496 с.

УДК 621.923

ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ РЕЖИМОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ПОЛИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЛЕГКООКИСЛЯЕМЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

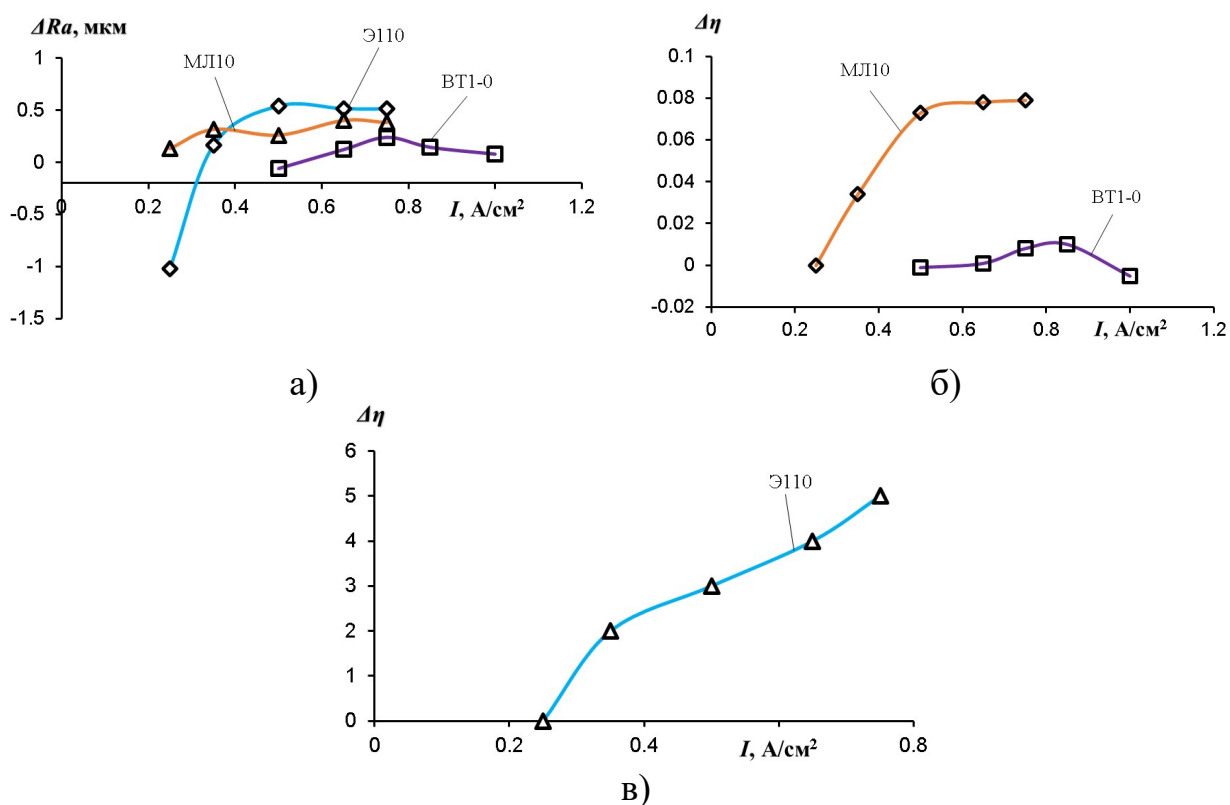
Нисс В.С., Алексеев Ю.Г., Королёв А.Ю., Будницкий А.С.
Белорусский национальный технический университет,
Минск, Республика Беларусь

Применение импульсов микросекундной длительности (от 10 до 100 мкс) при электрохимическом полировании легкоокисляемых металлов и сплавов на их основе позволило существенно повысить качество обработки поверхностей по сравнению с результатами, полученными на постоянном токе с применением традиционных кислотных электролитов, в том числе токсичных, используемых обычно для труднообрабатываемых материалов. Микросекундные импульсы прямой и обратной полярности позволили создать активные участки растворения за счет релаксации электролита в паузе между рабочими импульсами, а также за счет возможности поддержания на аноде значения положительной составляющей поляризующего тока, где сохраняется активированное состояние поверхности, при этом не успевают развиваться диффузионные ограничения [1].

В работе приводятся результаты исследований влияния характеристик импульсов на качество поверхности в процессе импульсного электрохимического полирования легкоокисляемых металлов и сплавов на их основе. Исследование влияния амплитуды, частоты и длительности импульсов, оказывающих основное влияние на скорость анодного растворения и пассивации поверхности в процессе импульсного электрохимического полирования, проводилось при частичном погружении в электролит плоских образцов из титана ВТ1-0 с размерами 40x10x1 мм, из магниевых сплавов МЛ10 с размерами 50x10x3 мм и цилиндрических образцов из циркониевого сплава Э110 с размерами $\varnothing 10 \times 10$ мм. Площадь погружаемой части образцов составляла – 4 см².

На рисунке 1 представлены зависимости изменения шероховатости и коэффициента отражения поверхности образцов от амплитуды анодного

импульса для трёх исследуемых материалов. Для титана ВТ1-0 существенное повышение качества поверхности достигается при плотности тока 1 A/cm^2 . Для магниевого сплава МЛ10 повышение плотности тока от $0,25$ до $0,75 \text{ A/cm}^2$ приводит к уменьшению изменения шероховатости поверхности более чем в два раза, однако при плотности тока $0,5 \text{ A/cm}^2$ отмечается заметное повышение коэффициента отражения поверхности. Для циркониевого сплава Э110 при повышении плотности тока с $0,25$ до $0,75 \text{ A/cm}^2$ заметна положительная тенденция к повышению коэффициента отражения поверхности. При этом максимальное снижение шероховатости обеспечивается при значениях плотности тока от $0,5$ до $0,75 \text{ A/cm}^2$.



- а – изменение шероховатости Ra для ВТ1-0 и МЛ10,
 б – изменение коэффициента отражения для ВТ1-0 и МЛ10,
 в – изменение коэффициента отражения для Э110

Рисунок 1 – Зависимости изменения шероховатости и коэффициента отражения от амплитуды анодного импульса (плотности тока)

Увеличение частоты следования импульсов для титана ВТ1-0 приводит к повышению как изменения шероховатости, так и коэффициента отражения поверхности. Для магниевого сплава МЛ10 существенное повышение изменения шероховатости поверхности отмечается только при увеличении частоты следования импульсов в диапазоне от $0,05$ до $0,5 \text{ кГц}$. При этом также улучшается коэффициент отражения поверхности. Для сплава Э110 также отмечается повышение качества поверхности при увеличении частоты следования импульсов до $0,5 \text{ кГц}$, однако при дальнейшем увеличении частоты

изменение шероховатости поверхности уменьшается почти на 50%, а коэффициент отражения поверхности более чем на 70%.

1. Применение биполярных микросекундных импульсов для электрохимического полирования легкоокисляемых металлов и сплавов / А.Э. Паршутто, А.Ю. Королёв, А.С. Будницкий // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: мат. Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 25–26 апреля 2019 г. – Могилев: БРУ, 2019 – С. 59–60.

УДК 621.9.047.7:621.923

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ПОЛИРОВАНИЯ СТАЛЕЙ С ПОВЫШЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ УГЛЕРОДА

Нисс В.С., Паршутто А.Э., Сенченко Г.М., Королёв А.Ю., Янович В.А.
Белорусский национальный технический университет,
Минск, Республика Беларусь

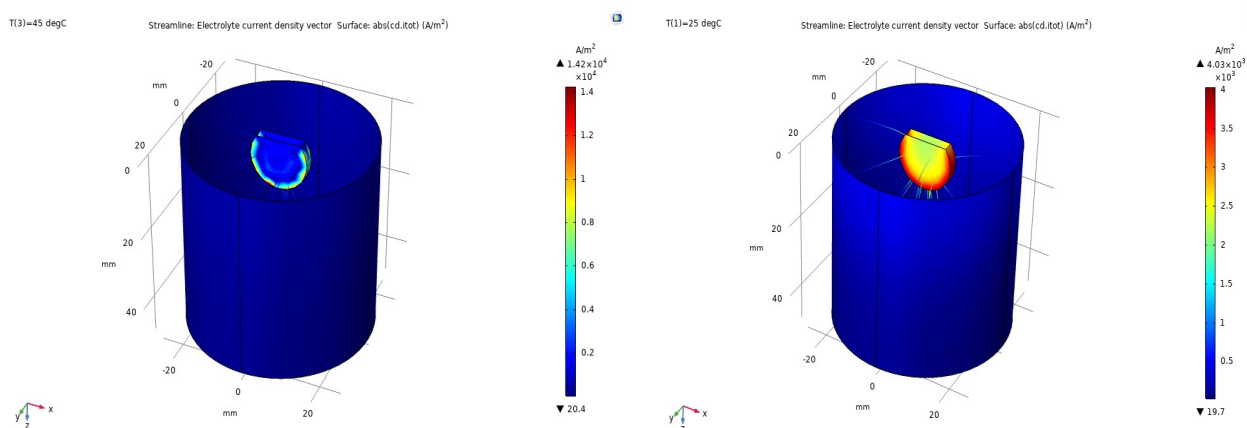
Для решения проблемы качественного электрохимического полирования сталей с повышенным содержанием углерода нами разработан способ, который заключается в применении импульсного технологического тока и использовании в качестве электролитов безводных или маловодных растворов на основе органических растворителей. Электропроводность таких электролитов обычно на 1–2 порядка ниже электропроводности водных растворов [1]. По результатам исследований разработанного способа установлены электролиты и режимы электрохимического полирования сталей машиностроительного назначения с повышенным содержанием углерода таких как 45, 65Г и У10А, обеспечивающие высокие показатели качества поверхности (низкое значение шероховатости обработанной поверхности и высокая отражательная способность).

В работе приводятся результаты моделирования распределения плотности тока при электрохимическом полировании сталей с повышенным содержанием углерода в электролите на основе органических растворителей. В данном исследовании моделируются первичное и вторичное распределение плотности тока в электрохимической ячейке, разработанной для исследования влияния геометрических особенностей анода и характеристик применяемых электролитов на распределение плотности тока. Для создания модели использована программа Comsol 5.4.

Кинетика анода определяется с помощью экспериментальных данных поляризации, зависящие как от потенциала электрода, так и от температуры. Средняя плотность тока 3000 А/м^2 используется для анода. Предполагается, что

кинетика катода (выделение водорода) очень быстрая, так что можно использовать условия первичного тока. Потенциал катода установлен на 0 В.

Задача решается с помощью стационарного исследования с вспомогательной разверткой, используемой для температур 25 °С, 35 °С и 45 °С. Для моделирования принимались образцы из стали У10А в виде дисков диаметром 16 мм и толщиной 3 мм. Образцы погружались в электролит частично. Площадь погружаемой части образцов составляла 5 см². Для поддержания плотности тока 3000 А/м² рабочее напряжение регулировалось в пределах 0–15 В. На основании определенной конфигурации строится расчетная сетка конечных элементов для всех частей модели. Полученные результаты моделирования для первичного распределения плотности тока представлены на рисунке 1.



а) первичное распределение

б) вторичное распределение

Рисунок 1 – Результаты моделирования для первичного и вторичного распределения плотности тока

По результатам выполненного моделирования установлено, что при обработке в электролите состоящем из 20% (масс.) раствора хлорной кислоты в растворителе на основе ледяной уксусной кислоты при температуре 25–45 °С и описанном расположении анода и катода, возникает неравномерное распределение плотности тока в электролите у поверхности анода и существенная ее зависимость от температуры электролита. Разница плотности тока между кромкой образца и его средней частью составляет до 0,2 А/см². При более высокой температуре электролита происходит преимущественное увеличение плотности тока на кромке погруженной части анода до 0,44 А/см² при 45 °С по сравнению с 0,40 А/см² при 25 °С. При 25 °С также наблюдается более равномерное распределение плотности тока по поверхности детали. Сравнение результатов моделирования первичного и вторичного распределения плотности тока показывают, что рассчитанная первичная плотность тока 0,145 А/см² не соответствует экспериментальным данным.

1. Применение электролитов на основе органических растворителей для электрохимического полирования сталей с повышенным содержанием углерода / В.С. Нисс, Ю.Г. Алексеев, В.А. Янович // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 25-26 апреля 2019 г. / редкол.: М.Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев: БРУ, 2019. – С. 144–145.
2. Разработка процессов электрохимического полирования, глянцеваания и удаления заусенцев на сталях машиностроительного назначения с высокой концентрацией углерода в многокомпонентных электролитах на основе органических растворителей / В. С. Нисс и др. // Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы, сварка: сб. докл. 11-го междунар. симп., Минск, 10-12 апреля 2019 г. / НАН Беларуси [и др.] редкол.: А. Ф. Ильющенко (гл. ред.) [и др.]. - Минск: Беларуская навука, 2019. – С. 63–66.

УДК 621.833.15

ИНФОРМАТИВНЫЕ ЧАСТОТНЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ ПРИ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ ЛОКАЛЬНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ЗУБЬЕВ ЭВОЛЬВЕНТНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПРЯМОЗУБЫХ КОЛЕС В СОСТАВЕ МНОГОВАЛЬНОГО ПРИВОДА

Парфиевич А.Н., Драган А.В., Нерода М.В., Сокол В.А.

Брестский государственный технический университет, Республика Беларусь

Введение. В процессе диагностирования многовальных приводов на основе зубчатых колес специалист-диагност сталкивается с проблемой чрезмерной насыщенности частотными составляющими в спектре виброакустического сигнала. Уменьшение степени его разрешенности может привести к утрате значимой диагностической информации. В силу этого необходимо выделить перечень информативных частотных составляющих, несущих в себе важную диагностическую информацию, что позволит сократить объем анализируемой информации с сохранением объективности процедуры диагностирования.

Основная часть. Вне зависимости от состояния зубчатого колеса в составе многовального привода будут возбуждаться колебания. Природа их возникновения может быть описана факторами двух групп [1]:

- динамические явления непосредственно в зубчатом зацеплении (ударные нагрузки, сопровождающие каждый вход зубьев в зацепление; переменные нагрузки, связанные с изменением числа зубьев, принимающих участие в передаче крутящего момента; трение контактируемых поверхностей зубьев)

- погрешности изготовления и монтажа зубчатых колес.

Возникновение в зоне зубозацепления локального повреждения одного из колес приводит к появлению ударного взаимодействия зубьев значительной величины и малой продолжительности [1], сила которого превышает остальные и он становится источником колебаний диагностируемого зубчатого механизма. Это связано с изменением жесткости зубьев и является причиной возникновения в спектре колебаний зубчатой передачи составляющей на зубцовой частоте и ее гармониках [2, 3]:

$$f_z = z_1 \cdot f_{1вр} = z_2 \cdot f_{2вр}$$

где z_1, z_2 – числа зубьев;

$f_{1вр}, f_{2вр}$ – частоты вращения сопряженных колес.

Проявление локального повреждения в зоне зубозацепления происходит не только на частотах пересопряжения зубьев зубчатой передачи f_{1z} и ее гармониках $k \cdot f_{1z}$ ($k = 1, 2, 3, \dots$), но и на комбинированных частотах $m \cdot f_z \pm n \cdot f_{1вр}$ и $m \cdot f_z \pm n \cdot f_{2вр}$ ($m, n = 1, 2, 3, \dots$), симметрично расположенных вокруг соответствующих f_{1z} и $k \cdot f_{1z}$ и отстоящих друг от друга на величину $f_{вр}$ [2, 3]. Данный факт может быть использован в качестве диагностического признака.

Заключение. Таким образом, используя ограниченный набор данных спектра виброакустического сигнала, состоящего из зубцовых f_{1z} и комбинированных $m \cdot f_z \pm n \cdot f_{1вр}$ частотных составляющих, можно выявить в составе многовального привода зубчатое колесо с локальным повреждением зуба. А в силу того, что математическая основа приведенных выше компонент достаточно хорошо изучена, то появляется возможность автоматизировать процесс их вычисления. Это позволит сократить время постановки диагноза исследуемого многовального зубчатого привода, а совместное использование предлагаемых зубцовых f_{1z} и комбинированных $m \cdot f_z \pm n \cdot f_{1вр}$ частотных составляющих с мощными современными математическими аппаратами даст возможность снизить нагрузку на специалиста-диагноста при анализе поступающей информации и повысит объективность виброакустической диагностики.

1. Генкин, М.Д. Вопросы акустической диагностики / М.Д. Генкин [и др.]: Методы виброизоляции машин и присоединенных конструкций // Наука. – 1975. – С. 67-91.
2. Неразрушающий контроль: Справочник: в 7 т.; под общ. ред. В.В. Клюева. Т.7: ч 2 кн. Кн. 1: В.И. Иванов, И.Э. Власов. Метод акустической эмиссии / Кн. 2: Ф.Я. Балицкий, А.В. Барков, Н.А. Баркова и др. Вибродиагностика // Машиностроение. – 2005. – С. 829.
3. Руссов, В.А. Диагностика дефектов вращающегося оборудования по вибрационным сигналам / В.А. Руссов // Вибро-центр. – 2012. – С. 252.

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ МЕТОДА ЭДПГИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ХРОМОВЫХ ПОКРЫТИЙ

Пилипчук Е.В.

Белорусский национальный технический университет Минск,
Республика Беларусь

Введение. В последнее время всё более широкое применение приобретает метод электро-деформационного плакирования гибким инструментом (ЭДПГИ). Данный метод позволяет формировать покрытия из различных полимеров, мягких металлов (медь, олово, алюминий и их композиций с легирующими добавками). В настоящее время ведутся исследования возможности формирования твёрдых тугоплавких металлов, таких как хром, вольфрам и т.д. [1]. На данный момент получены положительные результаты по формированию хромовых композиционных покрытий данным методом, однако не изучены зависимости влияния технологических параметров на толщину и шероховатость формируемых покрытий.

Целью данной работы являлось установление эмпирических зависимостей влияния технологических параметров метода ЭДПГИ на толщину и шероховатость формируемых хромовых покрытий с использованием метода планирования эксперимента.

Методика исследований. Для достижения поставленной цели использовали статистические методы, позволяющие значительно минимизировать количество проводимых опытов [2]. На основе априорной информации известно, что исследуемый процесс можно описать полиномом второго порядка. В качестве варьируемых технологических параметров процесса ЭДПГИ были приняты: I - сила тока, протекающего в контакте между донором и щёткой (А); $V_{щ}$ - скорость вращения щётки (м/с); n – количество проходов щётки относительно детали, при варьировании значений параметров в диапазонах 100-160 А; 25-35 м/с; 4-8 проходов соответственно. В качестве материала донора использовался компактированный брусок, полученный методом порошковой металлургии из смеси порошков хрома и УДАГ (0,6 масс%). В качестве гибкого инструмента использовалась щётка из нержавеющей стали диаметром 200 мм с диаметром ворса 0,2 мм и плотностью набивки ворса 0,3.

Результаты исследований. В результате проведенных исследований были получены эмпирические зависимости влияния технологических параметров процесса плакирования на толщину (уравнение 1) и шероховатость (уравнение 2) формируемого слоя покрытия. Полученные зависимости (1) и (2) позволяют выбирать технологические режимы процесса ЭДПГИ так, чтобы получить композиционное хромовое покрытие с заданными толщиной и шероховатостью.

$$h = -400,837 + 3,792I + 4,75V_{щ} + 30,265n - 0,058In - 0,725V_{щ}n - 0,01274I^2. \quad (1)$$

$$R_a = 17,2126 - 0,0632I - 0,5432V_{щ} - 1,724n + 0,000258I^2 + 0,00984V_{щ}^2 + 0,13675n^2. \quad (2)$$

Поиск оптимальных параметров процесса ЭДПГИ для получения слоя хромового покрытия с максимальной толщиной и минимальной шероховатостью, а также покрытий с заданной толщиной и шероховатостью, осуществлялся с помощью надстройки MS Office Excel «Поиск решения» методом «Эволюционного поиска решения». Анализ зависимостей с помощью MS Excel позволил определить оптимальное соотношение технологических параметров для достижения максимальной толщины и минимальной шероховатости покрытия.

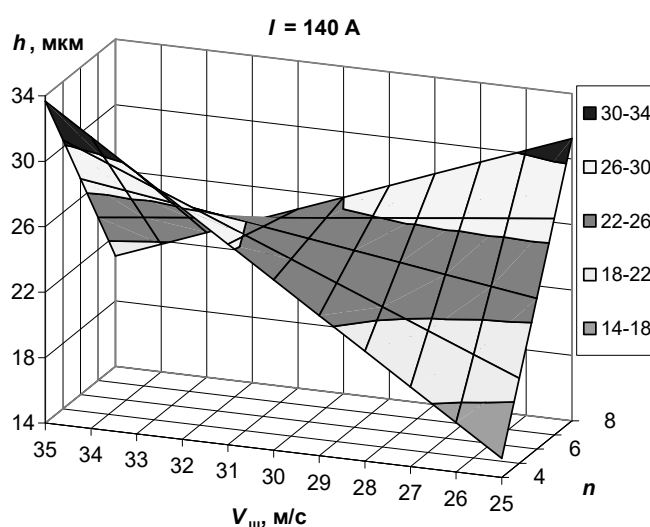


Рисунок 1 – Зависимость толщины покрытия h от скорости вращения щетки $V_{щ}$ и числа проходов n при $I = 140$ А

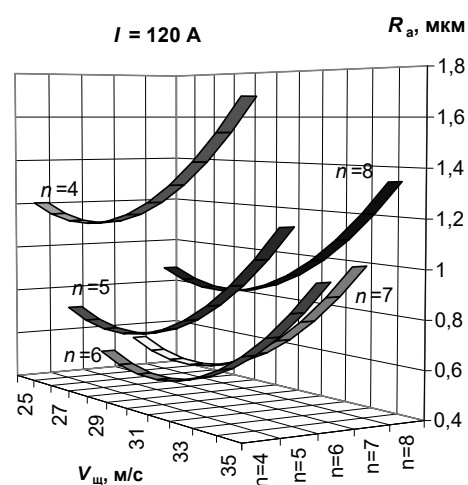


Рисунок 2 – Зависимость шероховатости R_a покрытия от скорости вращения щетки $V_{щ}$ и числа проходов n при $I = 120$ А

Выводы. Определены области значений технологических параметров процесса ЭДПГИ, обеспечивающие формирование покрытий максимальной толщины и минимальной шероховатости. Установлено, что формирование покрытий максимальной толщины происходит либо при максимальной скорости вращения щётки и минимальном числе проходов, либо при минимальной скорости вращения щётки и максимальном числе проходов в диапазоне варьируемых параметров. Покрытие максимальной толщины (33,7 мкм) формируется при следующих параметрах: $I=140$ А, $V_{щ}=35$ м/с, $n=4$, при этом шероховатость сформированного покрытия составляет R_a 1,76 мкм. Минимальная шероховатость покрытия достигается при $I=120$ А, $V_{щ}=28$ м/с, $n=6$ и составляет R_a 0,428 мкм.

1. Леванцевич М.А. Особенности контактного взаимодействия щетки с материалом покрытия при деформационном плакировании с электрическим

полям // Актуальные вопросы машиноведения: сб. научн. трудов / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. 2017. Вып. 6. С. 176–179.

2. Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.

УДК 621

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ – НАПРАВЛЕНИЕ СНИЖЕНИЯ ЗАТРАТ НА ПРИЗВОДСТВО

Подгорный Г.В.¹, Ермаченок А.Г.²

- 1) Открытое акционерное общество «НПО Центр» НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь
- 2) Международный университет «МИТСО» Минск, Республика Беларусь

Аддитивное производство (АТ) как процесс отделяет себя от традиционных методов (ковка, литье и др.) в том, что он добавляет повышенную гибкость дизайна при выборе формы и геометрии желаемой детали. Кроме того, аддитивные возможности на основе сплавления материалов с различной микроструктурой слой за слоем, позволяют применять любые особенности АП. Это позволяет создавать пользовательские функционально классифицированные материалы через аддитивные технологии (АТ), и предоставляет возможность получить материалы с индивидуальными микроструктурами с заданными параметрами и производительностью.

При описании АП важно применять целостный подход к процессу проектирования в той части, которая использует АТ, и включает в себя как процесс проектирования детали, так и метод ее изготовления. С этой точки зрения можно выделить следующие направления для исследования как в части дизайна, так и в части процессов для АП, а также их взаимосвязь для производства различных компонентов и деталей:

- производительность и операции постобработки (оценка и проверка деталей),
- современные инструменты дизайна, доступные для АП,
- экономические соображения при оценке АП как производственного процесса.

При выборе АП в качестве метода производства существует несколько типов процессов, которые могут быть использованы для производства металлических деталей. Из этих процессов есть два наиболее распространенных – это системы порошкового слоя и системы осаждения направленной энергии. Оба метода в настоящее время используются для производства деталей АТ в некоторых отраслях, при этом наблюдается тенденция увеличения доли с каждым годом.

Существует тесная связь между процессом и дизайном при оценке АП как метода производства. Свобода дизайна, выделенная из различных процессов, которые существуют в настоящее время для производства деталей АТ,

обеспечивают новую гибкость при выборе геометрического дизайна детали. По этой причине трудно разработать деталь, которая полностью использует возможности АП, не понимая гибкость и ограничения, которые обеспечивает процесс. Одним из основных фокусов АТ дизайна является способность процесса создавать геометрию и особенности, которые не могут быть произведены легко или экономично с использованием обычных технологий изготовления. Процесс АП поддается очень естественно к типу «свободной формы» дизайна, в котором сложные геометрии и особенности могут быть изготовлены без дополнительных затрат на процесс, помимо стандартных, связанных с процессом АП металла. По этой причине многие из частей деталей АП как правило, имеют очень сложную геометрию и формы, связанные с эксплуатационными характеристиками детали, требованиями к производительности и оптимизации для уменьшения общего веса детали. И производительность, и стоимость являются ключевыми параметрами при принятии решения о том, подходит ли АП для изготовления деталей и крупносерийного производства конкретной детали. Стоимость должна обсуждаться с точки зрения дизайна, а также факторов, которые непосредственно влияют на стоимость изготовления металлической детали АП: общий объем и вес детали, система АП, выбранная для процесса печати, требуемые вторичные операции, необходимые для перехода «напечатанной» части к завершенной, форма, которая соответствует геометрическим, поверхностным и эксплуатационным характеристикам. Все эти параметры следует учитывать при принятии решения о разработке детали с использованием АТ, ориентируясь на первые упомянутые параметры конструкции, вес и объем детали.

Основным преимуществом АП является способность процесса изменять существующие компоненты в измелчительных комплексах, что приведет к новой, оперативно сопоставимой части АП с некоторым снижением веса по сравнению с предшественником. Поскольку вес всегда является достаточно критическим фактором для деталей, то снижение веса является обычной практикой, когда дело доходит до методологии проектирования АП.

Тем не менее, просто уменьшение веса детали за счет сокращения материала и ожидания сопоставимых производительность не простой процесс. При перепроектировании существующей части или проектировании новой детали, которая будет изготовлена с использованием АП, использование некоторых форма топологической оптимизации обычно применяется в качестве руководства при проектировании процесса.

Топологическая оптимизация – это процесс, который фокусируется на модификации структуры детали и ее варьирующихся параметров или поверхности конструкции путем изменения этой поверхности с помощью предварительно определенной цели, наряду с применяемыми проектными ограничениями, как правило, с металлическим дизайном детали АП. Целью топологической оптимизации является уменьшение веса (объема) детали с помощью ограничения на то, что деталь не поддается или выходит из строя в

соответствии с предписанной эксплуатационной частью требования. При выполнении топологической оптимизации детали, есть различные программные инструменты, которые могут быть использованы для помощи в процессе проектирования. Топологическая оптимизация посредством моделирования обычно проводится в сотрудничестве с программным пакетом конечных элементов, в котором алгоритм оптимизации использует выходные данные модели конечных элементов, такие как напряжение, деформация, сила контакта и смещение. Посредством итеративного процесса алгоритм оптимизации изменяет топологию детали, пока желаемая цель не будет достигнута в рамках ограничений.

Консолидация деталей. Консолидация деталей в рамках АП - это процесс, применяемый специально для нескольких частей сборок и конструкций. Это метод использования компетенций в процессе изготовления оборудования АП, чтобы уменьшить сборку из нескольких частей, состоящих из многих компонентов в переработанную часть, которая имеет те же функциональные возможности, но разработана, чтобы включать меньше общих компонентов. Преимуществом консолидации деталей в АП является упрощение, потенциальное улучшение производительности и сокращение необходимых инструментов и времени изготовления. С точки зрения производителя, уменьшение компонентов может быть существенным фактором, способствующим снижению накладных расходов, связанных с трудом, инструментами и запасами, необходимыми для этой сборки. С точки зрения оператора или пользователя это обычно означает более простое использование и обслуживание продукта. По этим причинам консолидация и упрощение частей напрямую соотносятся со снижением затрат как для поставщиков, так и для клиентов. Метод консолидации деталей в АП прост в том, что существующая деталь или конструкция, состоящая из нескольких компонентов, переработана для минимизации в количество компонентов, необходимых для функциональной работы детали.

Интеграция и ремонт деталей. Концепция интеграции деталей не нова для изготовления конструкций, но в контексте АП, она включает в себя процесс объединения компонентов или узлов вместе с использованием АП материала в качестве носителя. Преимущества интеграции деталей зависит от оборудования, но общее преимущество заключается в использовании этого процесса для интеграции отдельных деталей, используя АП, чтобы уменьшить проблемы сборки или трудозатраты. Еще одним преимуществом процесса является его применение в обслуживании и ремонте. Операции, при которых конструкция или деталь ремонтируется с использованием АП после какого-то повреждения одного из его компонентов, который нелегко отремонтировать и заменить с использованием традиционных методов. Вместо того, чтобы сломать всю часть или структуру, АТ материал может быть добавлен к месту повреждения в качестве замены материала присоединения нового компонента к структуре, а затем выполнения любых необходимых вторичных операций, необходимых для возврата всей детали или конструкции к работе.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ

Польский Е.А., Звягинцев Ф.Д., Песиков М.С., Нагоркина Е.М.
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»,
г. Брянск, Российская Федерация

Шнек экструдера представляет собой сборную конструкцию, состоящую из секторов, установленных на шлицевый вал. Сектор (рисунок 1) имеет несколько функциональных поверхностей, в том числе сложнопрофильные «перья», обеспечивающие транспортировку твердых частиц проталкиванием вдоль вращающейся поверхности внутри трубы за счет установленного винтового профиля.

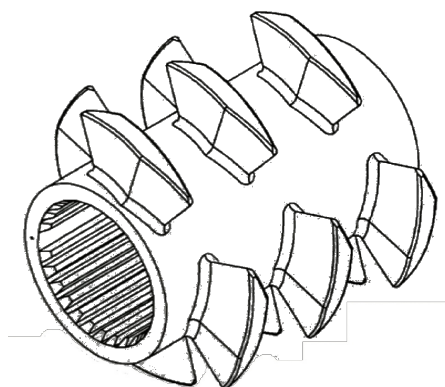


Рисунок 1 – Сектор шнека экструдера

Технологический процесс получения секторов включает в качестве основной операции профильное фрезерование несколькими фрезами, имеющими различный профиль режущей части для достижения геометрических показателей профиля конструктивных элементов и параметров качества поверхностей (рисунок 2). После заключительного этапа механической обработки – чистового фрезерования, производится химико-термическая обработка шнека в виде борирования, что ещё более ужесточает требования к качеству поверхности изделия, т.к. при данном способе обработки должны быть исключены задиры, перепады высот между ребрами и прочие погрешности.



Рисунок 2 – Применяемые фрезы компании «Искар»

Обработка производится на многоцелевом фрезерном станке с возможностью реализации пятикоординатной обработки. Заготовка устанавливается в специальное приспособление, спроектированное для повышения жесткости технологической системы (рисунок 3).

Так как геометрические параметры зоны резания при объемном фрезеровании сферическим инструментом не постоянны, то и величина силы резания не постоянна, особенно при врезании инструмента в ранее необработанную зону. Следовательно, параметры формируемой погрешности на различных участках одной обрабатываемой поверхности не постоянны, а параметры качества поверхностного слоя не соответствуют единым, требуемым на всём участке функциональной поверхности [2].



Рисунок 3 – Заготовка в приспособлении на столе станка

Анализ работ по повышению точности и производительности на фрезерных станках с ЧПУ показал, что понижение режимов обработки и увеличение числа чистовых проходов снижают точность и производительность механической обработки [1, 2]. В этих работах авторы, с целью обеспечения высокой производительности и точности предложили производить обработку по измененной траектории движения с покадровым управлением режимами резания. Но результаты данных работ подходят для «ручного» программирования станков с ЧПУ, без использования САМ систем. Кроме того, обработка вогнутых поверхностей сложной формы с наличием переменного припуска на различных участках обрабатываемой поверхности не рассматривалась.

1. Суслов, А.Г. Научно-техническая технология повышения качества сборочных единиц машин на этапах жизненного цикла / А.Г. Суслов, О.Н. Федонин, Е.А.

Польский // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2016. – №5(59). С.34–42.

2. Сорокин, С.В. Концепция автоматизации обеспечения эксплуатационных характеристик деталей пар трения с применением интегрированных САПР / Материалы международной научно-технической конференции «Обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической техники», 19-20 февраля 2020г. – Брянск: БГТУ, 2020. – 424 с. С.178-181.

УДК 621.75

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ОСНАСТКИ ПРЕСС-ФОРМ

Польский Е.А., Симкин А.З., Воронина И.Д., Скибо А.А.
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»,
г. Брянск, Российская Федерация

При производстве корпусных изделий из неметаллических материалов широко применяется технология формообразования из расплавленного полимерного материала на термопластавтоматах. Требуемые параметры по точности и качеству изделий обеспечиваются за счет формообразующей оснастки пресс-форм [1]. Для производства соединителей электрических разъемов применяется оснастка, состоящая из нескольких рядов отдельных формообразующих элементов небольшого сечения установленной формы (рисунок 1).

Основными причинами выхода из строя пресс-формы являются термическая усталость, износ и изменение формы и размеров формообразующих элементов. Износ поверхностей формообразующих деталей происходит в результате трения о них обрабатываемого материала, их коррозии от высокой температуры и взаимодействия с химически активными элементами, содержащимися в обрабатываемом материале. В результате этого износа ухудшается качество поверхности изделия, увеличивается его шероховатость, изменяются размеры. На основе анализа применения формообразующей оснастки пресс-форм многоштырьковых электрических разъемов получены данные о преобладании дефекта выкрашивания отдельных элементов за счет формирования сетки разгара, которая появляется как результат термической усталости в виде сетки заливов.

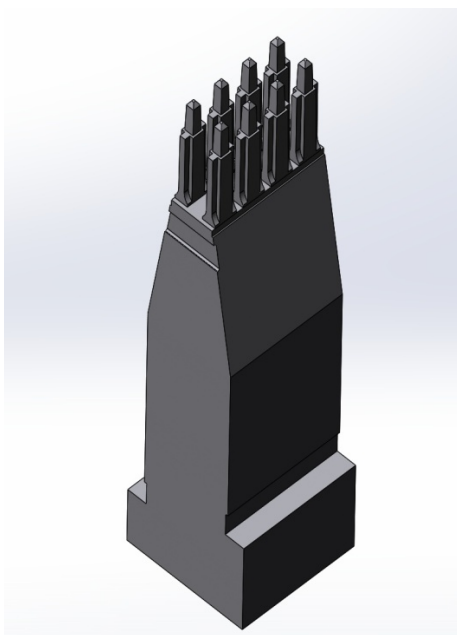


Рисунок 1 – Формообразующий элемент пресс-формы

С учетом высокой стоимости изготовления сложных изделий в виде пресс-форм и штампов, а также интенсивного развития многих отраслей техники, для изготовления которой в установленной производственной программой количестве требуется оснастка с требуемой наработкой на отказ, конструкторско-технологическая подготовка производства и ремонт должны быть организованы на высоком технологическом уровне.

В настоящее время все большее применение находят сборные конструкции формообразующих элементов пресс-формы (рисунок 2). Основным выходным параметром при изготовлении цельной гребенки или сборки многоэлементной конструкции является размер между формообразующими элементами. При этом, необходимо учитывать все параметры, оказывающие влияние на этот размер: элементарные составляющие погрешности обработки, погрешность установки элемента в корпус пресс-формы, контактные деформации при сборке многоэлементной конструкции, а также изменение размера при эксплуатации [2].

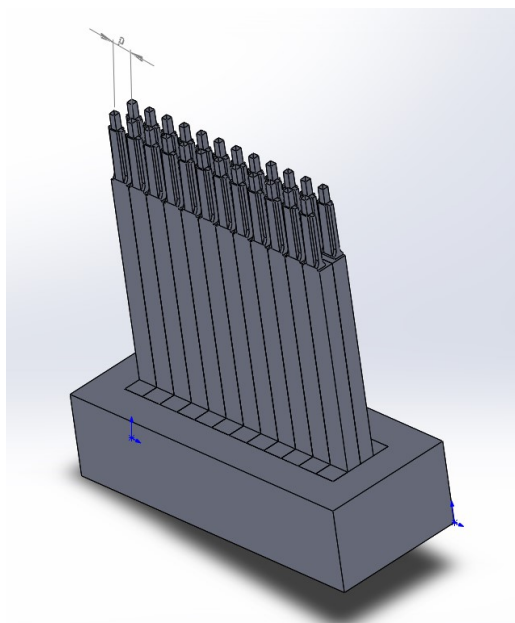


Рисунок 2 – Сборная конструкция формообразующих элементов пресс-формы

1. Польский, Е.А. Технологическое обеспечение точности и качества поверхностей деталей машин при проектировании маршрутно-операционного технологического процесса методом синтеза на основе анализа размерных связей / Е.А. Польский // Научные технологии в машиностроении. – 2016. – №10 (64). С 39 – 48.

УДК 621.75

НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАРАБОТКИ НА ОТКАЗ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭЛЕМЕНТОВ ОСНАСТКИ ПРЕСС-ФОРМ

Польский Е.А., Швыряев М.В., Абрамов Р.В., Михневич Д.Н.
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»,
г. Брянск, Российская Федерация

Для обеспечения требуемой долговечности формообразующих элементов пресс-форм назначают допустимые предельные отклонения от номинальных сопрягаемых размеров знаков. Заданная точность обработки должна быть обеспечена на этапах технологического процесса различными методами обработки.

При сборке формообразующих деталей в цельный элемент – гребенка, возникают усилия, которые формируют контактную деформацию каждого знака (рисунок 1). Контактная деформация знака функционально формируется параметрами качества поверхностного слоя.

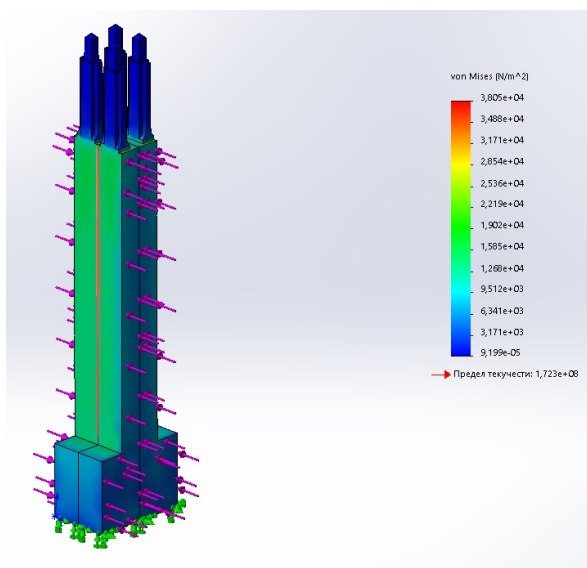


Рисунок 1 – Модель формирования контактной деформации при сборке элементов формообразующей оснастки

В ряде случаев выходной параметр удается представить в виде трех независимых составляющих:

$$z_j(t) = \xi_0 f_1[g_1(t), g_2(t), \dots, g_i(t)] + h(t) + \zeta(t)$$

где: ξ_0 – случайная величина, оценивающая начальное качество; f_1 – неслучайная функция возмущений; $h(t)$ и $\zeta(t)$ – случайные функции, оценивающие соответственно влияние медленно протекающих процессов и внезапных случайных флуктуаций параметра.

В ряде случаев, когда отказ в форме выхода параметра состояния за определенную границу (выброс) не приводит к значительным отрицательным последствиями, регламентироваться может параметр потока отказов μ . При известной плотности совместного распределения параметра состояния $z(t)$ и скорости его изменения во времени $v(t)$ усредненный параметр потока отказов, определяющий число выбросов за границы в единицу времени:

$$\bar{\mu} = \frac{1}{T} \int_0^T \left[\int_0^{\infty} \phi(R_2, v/t) v dv + \int_{-\infty}^0 \phi(R_1, v/t) v dv \right] dt$$

В общем случае работоспособность объекта, качество его функционирования определяется не одним, а совокупностью s выходных параметров состояния z_1, z_2, \dots, z_i , которые можно считать компонентами некоторого вектора Z . Тогда пространство состояний некоторой граничной поверхностью ω можно разделить на две области: область Ω работоспособных состояний и область отказов. Безотказность в этом случае определяется как вероятность того, что за время функционирования системы T параметры состояния z_i не выходят за соответствующие границы R_{i1} и R_{i2} :

$$P(T) = P\{Z \in \Omega / t \leq T\} = P\{R_{11} < z_1 < R_{12}, R_{21} < z_2 < R_{22}, \dots, R_{s1} < z_s < R_{s2} / t \leq T\}$$

Наиболее общий случай, когда исходное качество всех объектов неоднородно, условия эксплуатации переменны, средняя скорость процесса зависит от времени функционирования. Неоднородность качества может быть вызвана рассеянием начальных размеров, а так же различием физических свойств у контактирующих поверхностей, приводящих к варьированию средней скорости процесса каждой реализации [1]. Тогда модель скорости процесса принимает вид:

$$k(t) = m_k(t) + k^0(t) = m_k(t) + a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos \omega_n t + b_n \sin \omega t)$$

где a_0 – центрированная случайная величина, учитывающая исходное качество объекта.

Таким образом, решение задачи оптимального распределения величины допуска на эксплуатационные звенья сборочной размерной цепи узла и назначение обоснованных требований по качеству поверхности для обеспечения требуемой надежности возможно при условии определения весовых коэффициентов, устанавливающих значимость влияния того или другого эксплуатационного свойства в элементарном прототипе. Назначение весовых коэффициентов при условии максимальной вероятности безотказной работы контактирующей пары является необходимым условием для разработки автоматизированной подсистемы технологического обеспечения надежности машины на этапах анализа размерных связей при конструкторско-технологической подготовке производства.

1. Суслов, А.Г. Научно-технологическая технология повышения качества сборочных единиц машин на этапах жизненного цикла / А.Г. Суслов, О.Н. Федонин, Е.А. Польский // Научно-технологические технологии в машиностроении. – 2016. - №5 (59). С 34 – 42.

УДК 621.91.02

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ТОЧНОСТИ И ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ БЛОЧНО-МОДУЛЬНОГО РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА, ПОЛУЧЕННЫХ 3D ПЕЧАТЬЮ

Попок Н.Н., Портянко С.А., В.С. Анисимов, Л.Н. Косяк
Полоцкий государственный университет, Республика Беларусь

При изготовлении деталей с использованием 3D-технологий возникают вопросы, связанные с соответствием получаемых размеров и шероховатости поверхностей заданным на чертеже. Естественно, предположить, что точность и шероховатость поверхностей деталей будет зависеть от особенностей трехмерной технологии и свойств используемых материалов.

На рисунке 1 представлены эскиз и макеты экспериментальных образцов блочно-модульных режущих инструментов (БМРИ), изготовленных с использованием трехмерной печати. Технические характеристики 3D принтеров и используемых материалов: Stratasys Mojo, материал печати – ABSplus-P430 (минимальная толщина стенок – 1 мм, коэффициент удлинения – 6%, толщина слоя – 0,178 мм); Mass Portal Pharaoh XD 30 – толщина слоя от 20 мкм, материал печати – PLA (минимальная толщина стенок – 1 мм, коэффициент удлинения – 30%, толщина слоя – 0,313 мм).

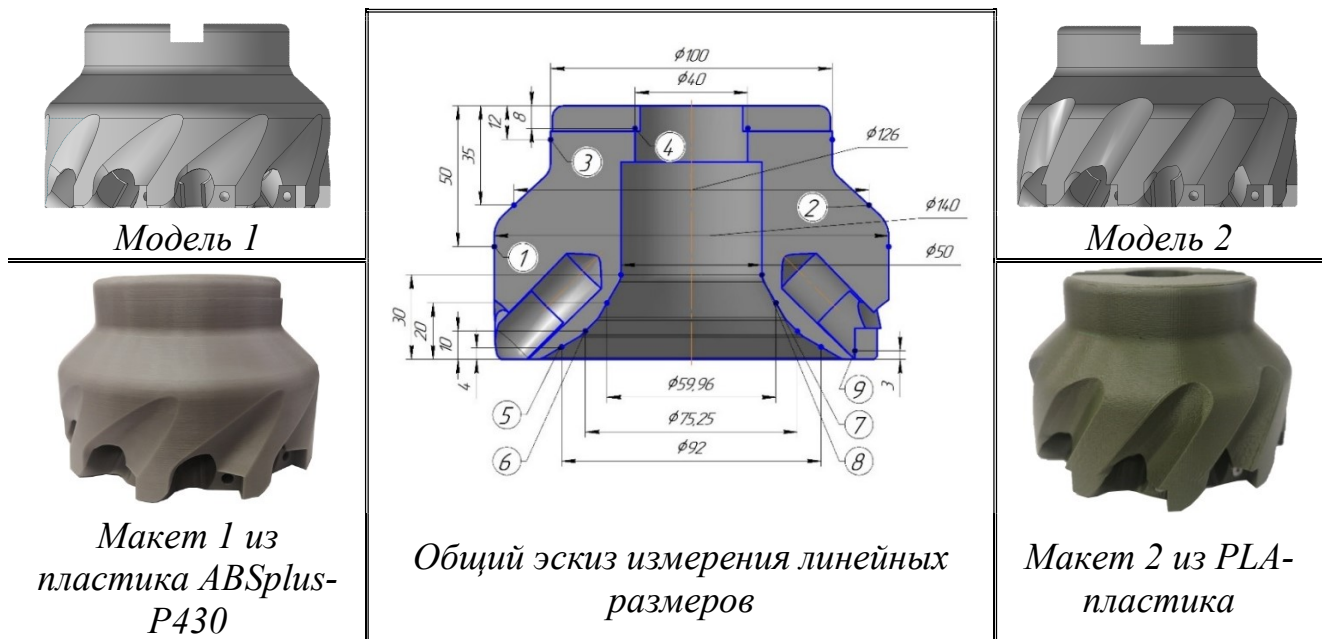


Рисунок 1 – Эскиз и макеты БМРИ

На общем эскизе (см. рисунок 1) указанные позиции 1-9 отображают последовательность измерения линейных размеров с периодичностью в 10 точек с вычислением среднего значения размера в каждой из них. На видеоизмерительном микроскопе модели NVM-4030D фирмы NORGAU (рисунок 2) измеряли не только линейные размеры конструктивных элементов, но и изучали структуру полученных поверхностей (рисунок 3). Технические характеристики микроскопа следующие: погрешность $E(x, y)$, мкм $\leq (3+L/200)$, датчик: цветная камера ПЗС 1/2", увеличение: оптическая система – 0,7-4,5 х; WD 92 мм.

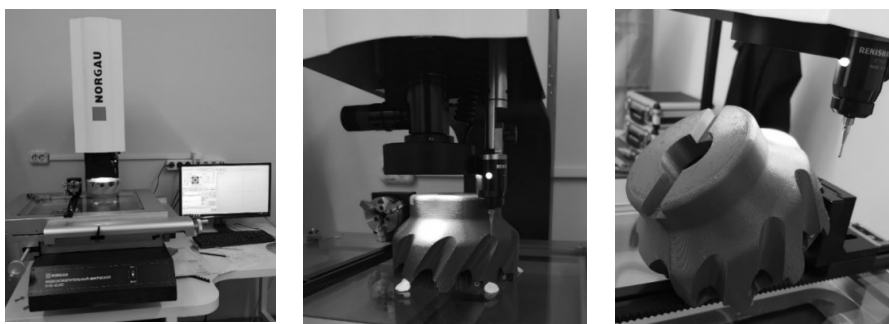


Рисунок 2 – Измерение линейных размеров и изучение структуры наружной поверхности

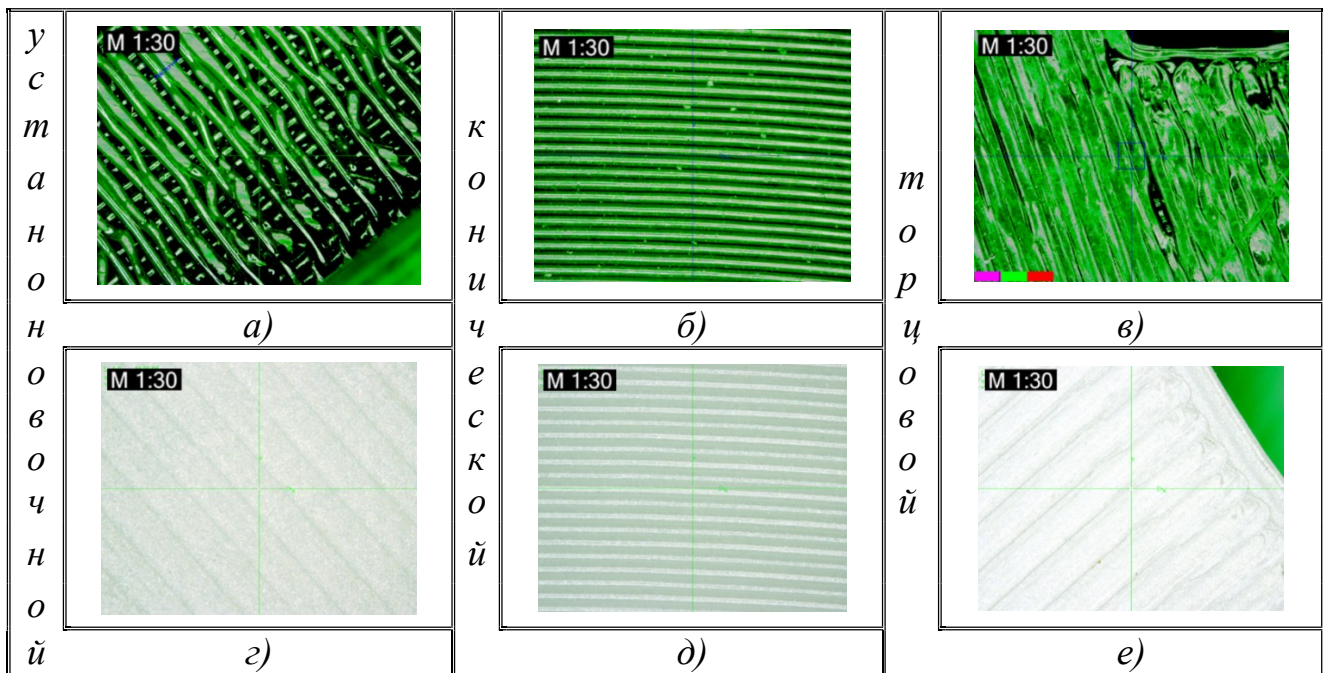


Рисунок 3 – Структура наружной поверхности БМРИ, напечатанных: а, б, в – из пластика ABSplus-P430; г, д, е – из PLA-пластика

В результате измерений установлено, что величина отклонений диаметральных размеров и круглости поверхности в пределах: для 3D печати на принтере Stratasys Mojo – ~ 0,32 мм и ~ 0,09 мм соответственно, для 3D печати на принтере Mass Portal Pharaoh XD 30 – ~ 0,38 мм и ~ 0,06 мм соответственно.

Шероховатость поверхностей детали оценивалась на профилограф-профилометре модели «Абрис-ПМ7», предел допускаемой основной погрешности которого соответствует значению, определяемому по формуле: $\Delta Ra = 0.02 Ra_{в.п.} + 0.04 Ra$ (мкм). Структура и шероховатость поверхностных слоев деталей различны и зависят от способов наложения слоев материала и их пересечения.

Анализ результатов оценки параметров точности и шероховатости поверхностей деталей показывает, что для свободных размеров или нерабочих поверхностей и конструктивных элементов степень точности, обеспечиваемая 3D принтерами достаточна, а для сопрягаемых поверхностей пазов торцевой шпонки, отверстий для установки блоков резцовых и других требуется дополнительный подбор материала, учитывающий толщину и свойства нити, обработки технологии 3D печати.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ В БАЛКАХ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Реут Л.Е., Шабунько А.А., Шороп А.А.

Белорусский национальный технический университет, Республика Беларусь.

Идеальной формой элемента, работающего на изгиб, является балка равного сопротивления, в которой во всех сечениях возникают одинаковые напряжения, равные допускаемым. Для достижения равнопрочности по длине такая балка должна иметь переменную продольную жесткость и ее форма должна изменяться по строго математически рассчитанному закону, обеспечивающему равенство напряжений во всех сечениях. Балки равного сопротивления обладают целым рядом преимуществ по сравнению с элементами, имеющими постоянную жесткость: они экономичны, имеют меньший вес и обладают высокой деформируемостью, что является важным качеством для деталей, к которым предъявляются повышенные требования гибкости и податливости. Теоретический расчет конфигурации такой балки не представляет большой сложности, однако основная проблема состоит в практическом ее изготовлении, требующем соответствующего оборудования и оснастки. Поэтому на практике при разработке балки равного сопротивления чаще всего прибегают к ее приближенной форме в виде ступенчатого стержня, обладающего близкими свойствами – меньшим весом и большой деформируемостью, но при этом более простого и технологичного в изготовлении. Кроме того, существует большое количество стержневых конструкций, работающих на изгиб, имеющих также ступенчатую форму, которая получается вследствие соединения элементов с различной конфигурацией сечений [1].

Исследование прочности в ступенчатых балках производится на основании классической теории изгиба, однако с учетом конструктивных и технологических особенностей, связанных с искривлением сечений, нарушением линейности распределения напряжений по высоте профиля, с наличием концентрации напряжений и т.д. Определение деформаций в ступенчатых стержнях также связано с целым рядом особенностей, в которых изменяющаяся по длине жесткость требует несколько иного подхода при вычислении прогибов и углов поворота. Как и для балок постоянной жесткости, здесь также возможно использование метода начальных параметров, основанного на интегрировании уравнения изогнутой оси балки, однако методика составления уравнений прогибов и углов поворота требует определенной корректировки [2].

В работе рассматривается возможность применения метода начальных параметров для ступенчатых балок путем их преобразования и приведения по деформациям к виду, эквивалентному балке постоянного сечения. Для этого балка (рисунок 1, а), имеющая участки различной жесткости с моментами инерции $I_{x(1)}, I_{x(2)}, I_{x(3)} \dots I_{x(n)}$, мысленно разрезается на участки

постоянного сечения (рисунок 1, б) с приложением в граничных сечениях поперечных сил и изгибающих моментов. Далее сечения всех участков приводятся к одному размеру, например, размеру первого участка и его жесткость принимается за базовую величину. Тогда дифференциальные уравнения изогнутой оси балки для участков соответствующей жесткости принимают вид:

$$\frac{d^2 y}{dz^2} = \frac{M_{z_1}}{EI_{x(1)}} \cdot \frac{I_{x(1)}}{I_{x(1)}} = \frac{k_1 M_{z_1}}{EI_{x(1)}};$$

$$\frac{d^2 y}{dz^2} = \frac{M_{z_2}}{EI_{x(2)}} \cdot \frac{I_{x(1)}}{I_{x(1)}} = \frac{k_2 M_{z_2}}{EI_{x(1)}};$$

$$\frac{d^2 y}{dz^2} = \frac{M_{z_3}}{EI_{x(3)}} \cdot \frac{I_{x(1)}}{I_{x(1)}} = \frac{k_3 M_{z_3}}{EI_{x(1)}};$$

$$\dots\dots\dots$$

$$\frac{d^2 y}{dz^2} = \frac{M_{z_n}}{EI_{x(n)}} \cdot \frac{I_{x(1)}}{I_{x(1)}} = \frac{k_n M_{z_n}}{EI_{x(1)}};$$

где $k_1 = \frac{I_{x(1)}}{I_{x(1)}} = 1$; $k_2 = \frac{I_{x(1)}}{I_{x(2)}}$... $k_n = \frac{I_{x(1)}}{I_{x(n)}}$ –

коэффициент приведения участка.

Затем, умножив поперечную силу и изгибающий момент каждой части балки (рисунок 1, в), а также все внешние нагрузки (рисунок 1, г), которые находятся в линейной зависимости с внутренними силами, на коэффициент приведения каждого участка, и заменив его жесткость на жесткость базового участка, получают эквивалентную по деформациям конструкцию: форма изогнутой оси каждого приведенного к одинаковому сечению участка будет полностью соответствовать виду и форме изогнутой оси того же участка исходной ступенчатой балки

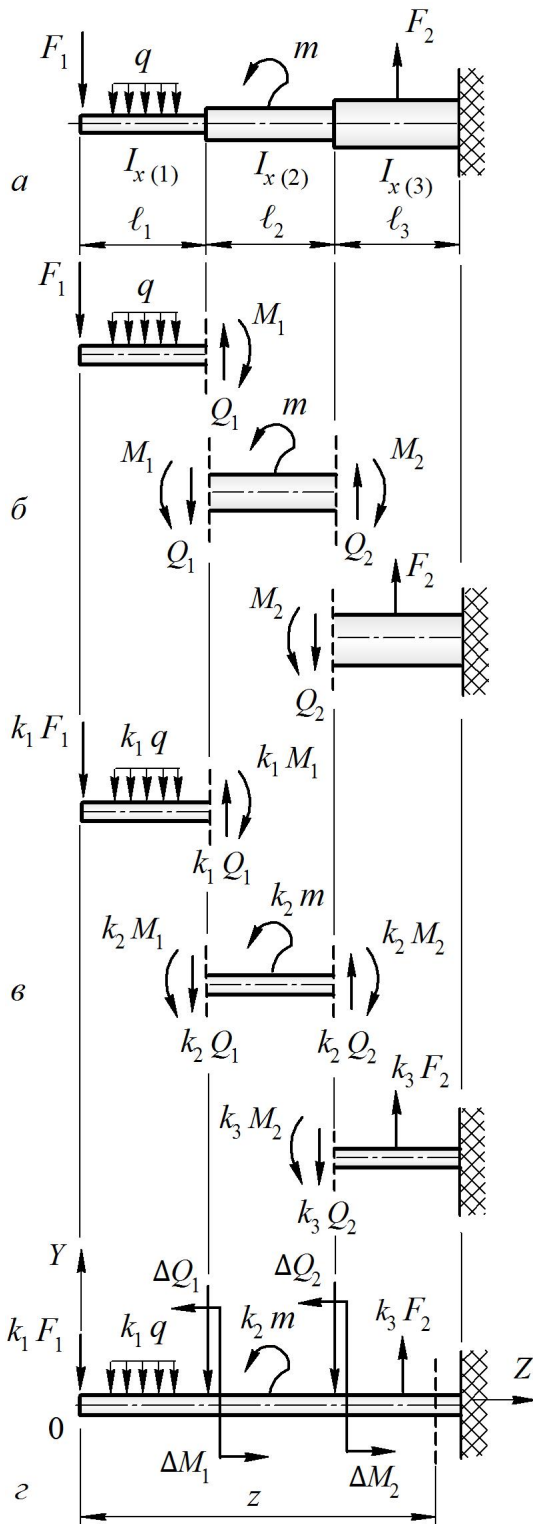


Рис. 1

1. Подскребко М.Д. Сопротивление материалов. – Минск: Высшая школа, 2007. – 797 с.
2. Реут Л.Е. Плоский поперечный изгиб. Пособие по учебной дисциплине «Механика материалов». – Минск: БНТУ, 2016. – 263 с.

ОСОБЕННОСТИ ИЗГИБА ТОНКОСТЕННЫХ БАЛОК ОТКРЫТОГО ПРОФИЛЯ

Реут Л.Е., Шабунько А.А., Шороп А.А.

Белорусский национальный технический университет, Республика Беларусь.

Тонкостенные прокатные профили, используемые в конструкциях, имеют особую конфигурацию сечения, которая характеризуется наличием вертикальных и горизонтальных участков очень малой толщины и большой протяженности, в результате чего в сечении имеет место резкий перепад его размеров по ширине. Такая форма создает целый ряд особенностей поведения элемента при изгибе и эта особенность связана с возникающими на участках сечения касательными напряжениями. Наличие касательных напряжений, перпендикулярных и параллельных нейтральной оси, принципиально изменяет условия работы балки и требует особого подхода при оценке ее прочности. Действующие на горизонтальных и вертикальных участках касательные напряжения создают «поток касательных напряжений», параллельный к контурным линиям каждого участка сечения. В сечениях, симметричных относительно плоскости нагружения, поток касательных напряжений уравновешен и его равнодействующая, направленная вдоль оси симметрии, проходит через центр тяжести сечения. Если сечение несимметрично относительно силовой плоскости, поток касательных напряжений создает момент относительно центра тяжести и оси балки, который вызывает ее закручивание и искривление (депланацию) сечения. Такое явление возникает в балках швеллерового профиля, зетовых сечениях, в таврах, равнобоких и неравнобоких уголках и др., нагруженных в главной плоскости инерции, которая не является в сечении плоскостью симметрии. Закручивание существенно изменяет условия работы балки и особенно неблагоприятным является для тонкостенных сечений незамкнутого профиля, так как при кручении их поведение принципиально отличается от поведения элементов сплошного сечения и даже поведения закрытых тонкостенных сечений [1].

Как известно, тонкостенные сечения открытого типа имеют низкую крутильную жесткость, поэтому при закручивании такого элемента в отдельных точках сечения возникают продольные упругие перемещения, приводящие к искривлению сечения. В случае свободного, нестесненного кручения депланация сечения не приводит к появлению нормальных напряжений, так как происходит одинаковое искривление всех сечений, а значит, в целом удлинение волокон равно нулю. В этом случае возникают только касательные напряжения, вызванные кручением, которые для такого профиля могут быть вычислены по известным правилам сопротивления материалов как для сечения, состоящего из совокупности узких прямоугольников. Если же возникает стесненное кручение, как, например, в

случае закрепления конца балки в заделке, когда свободная деформация поперечных сечений невозможна, то кроме касательных напряжений, вызванных кручением, в сечении возникают и нормальные напряжения. Эти напряжения весьма значительны по величине и в совокупности с касательными напряжениями создают иной вид напряженного состояния, который может представлять опасность для прочности балки. Поэтому в балках прокатного незамкнутого профиля необходимо создавать условия нагружения, устраняющие кручение [2].

Для создания плоского изгиба без закручивания равнодействующая внешних сил должна проходить через центр изгиба сечения, а плоскость действия этих сил – по линии жесткости балки параллельно стенке сечения. Изгиб с кручением с точки зрения прочности является наиболее неблагоприятной комбинацией деформаций, поэтому для указанных сечений определение положения центра изгиба является важным и необходимым расчетом. В общем случае центр изгиба не совпадает с центром тяжести сечения и его положение требует определения. В некоторых сечениях положение центра изгиба можно установить без вычислений. Подобно центру тяжести, центр изгиба всегда лежит на оси симметрии и если сечение имеет две оси симметрии, он находится на их пересечении. В этом случае центр изгиба совпадает с центром тяжести сечения, а также и с центром кручения, что имеет место в полых прямоугольных, квадратных и круглых замкнутых профилях, в зетовом сечении. В круглом незамкнутом профиле центр изгиба лежит за пределами сечения, а для сечений в виде тавра, уголка или других пучкообразных сечений центр изгиба расположен в центре пучка, т. е. на пересечении средних линий прямоугольных участков, из которых состоит сечение. Определение положения центра изгиба в более сложных сечениях требует более сложных методов расчета [3].

В работе рассматривается определение положения центра изгиба для ряда тонкостенных сечений открытого профиля с использованием теории изгибно-крутильных деформаций тонкостенных стержней.

В заключение следует сказать, что стремление к закручиванию является следствием наличия поперечной силы и касательных напряжений на участках сечения. При чистом изгибе опасности закручивания нет даже для несимметричных сечений, поскольку в этом случае касательные напряжения в точках сечения равны нулю, а нормальные напряжения имеют тот же закон изменения, что и в симметричных сечениях.

1. Подскребко, М.Д. Сопротивление материалов: Учебник. – Минск: Высшая школа, 2007. – 797 с.
2. Дарков, А.В, Шпиро, Г.С. Сопротивление материалов. – М.: Высшая школа, 1969. – 720 с.
3. Реут Л.Е. Плоский поперечный изгиб. Пособие по учебной дисциплине «Механика материалов». – Минск: БНТУ, 2016. – 263 с.

ПОВЕРХНОСТНАЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

Сакович Н.А.

Белорусский национальный технический университет, Республика Беларусь.

Микронапряжения или остаточные напряжения второго находятся в непосредственной связи с динамической и статической прочностью материалов. Поэтому определение величины и характера распределения напряжений в металлопокрытиях, упрочненных поверхностной высокотемпературной термомеханической обработкой (ПВ ТМО) с различными режимами деформирования представляет интерес в связи с тем, что уровень остаточных напряжений в металлопокрытиях влияет на технологические и эксплуатационные свойства материалов. Сущность ПВ ТМО заключается в пластическом деформировании поверхностных слоев при температуре аустенизации в процессе индукционного нагрева и немедленной закалки. С учетом дислокационно-энергетической теории прочности металлов и сплавов, основным критерием оптимизации технологических параметров ПВ ТМО является тонкая кристаллическая структура [1].

В качестве объекта исследования была выбрана сталь 40Х, наплавленная проволокой НП-65 под слоем легированного флюса (С 0,51%, Сг 2%, Мп 0,91%, Si 0,46%). Выбор способа наплавки и наплавочных материалов обусловлен их массовым применением в ремонтном производстве. Наплавку производили на заготовку цилиндрической формы, применяя стандартное оборудование.

ПВ ТМО проводилась по схеме: нагрев до температуры 1210...1230°C, поверхностная пластическая деформация путем обкатки роликом и немедленная закалка с последующим низкотемпературным отпуском. Для нагрева заготовок использовалась высокочастотная установка Л32-67. ПВ ТМО осуществляли путем обкатки роликом с оптимальным усилием обкатки 3000 Н. Технологические параметры были следующие: диаметр ролика – 100 мм, радиус деформирующей части ролика – 10 мм, частота вращения заготовки – 320 мм⁻¹, продольная подача – 0,95 мм/об. Для получения сравнительных результатов часть образцов упрочняли закалкой с нагревом токами высокой частоты по тому же температурному режиму, но без деформирования.

Изучение тонкой кристаллической структуры металлопокрытий, подвергнутых закалке и ПВ ТМО производилось путем рентгеноструктурного анализа методом аппроксимации на установке «Дрон 0,5». Известно, что в результате пластической деформации или закалки интерференционные линии на рентгенограммах получают поперечное размытие, которое может быть вызвано напряжениями второго рода и уменьшением размеров областей когерентного рассеивания рентгеновских лучей [2]. Величина блоков мозаики

(областей когерентного рассеивания рентгеновских лучей) и напряжений второго рода оказывает существенное влияние на прочностные и эксплуатационные характеристики металла. Для сталей и сплавов с высокой прочностью характерно наличие больших искажений кристаллической решетки и дисперсность блоков.

Образцы для исследования вырезались абразивным кругом из образцов, подвергнутых ПВ ТМО и закалке. С наружной поверхности образцов был предварительно сошлифован слой металлопокрытия толщиной 0,5 мм. Затем образцы подвергались травлению в растворе (0,25HNO₃ и 0,75HCl), чтобы устранить влияние шлифования на тонкую кристаллическую структуру поверхностного слоя. Результаты исследований приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Определение остаточных напряжений и образцов, закаленных и упрочненных ПВ ТМО.

Способ упрочнения	Расстояние от поверхности (мм)	$\frac{\beta_1}{\beta_2}$	$\frac{n_2}{b_2}$	n2	$\frac{\Delta d}{d} * 10^{-3}$ (рад)	σ МПа
Наплавка+закалка	0,5	1,8	0,051	0,370	0,298	98
Наплавка+ПВ ТМО	0,5	2,6	0,440	4,015	0,353	652

Как видно из таблицы 1, остаточные напряжения второго рода у образцов, упрочненных ПВ ТМО, значительно выше, чем у закаленных, что в итоге сказывается на повышении эксплуатационных характеристик металлопокрытий, в частности, на сопротивлении изнашиванию [3].

1. Тоньшева О.А., Вознесенская М.М., Шалькевич А.Б., Петраков А.Ф. Исследование влияния высокотемпературной термомеханической обработки на структуру, технологические, механические и коррозионные свойства высокопрочной коррозионной стали с переходным содержанием азота. // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – №3. – С. 31-36.
2. Горелик С. С. Расторгуев Л. Н. Сканов Ю. А. Рентгенографический и электроннографический анализ металлов.- М.: МИСИС, 1994 – С. 256.
3. Беляев Г.Я., Сакович Н.А. Триботехнические свойства металлопокрытий, уточненных поверхностной термомеханической обработкой // Машиностроение. — Мн., 2000. — Вып.16. – С. 149-153.

СИНТЕЗ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО НАНОСТРУКТУРНОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ КНБ ИЗ ГЕКСАГОНАЛЬНОГО BN ПОСЛЕ КОМПЛЕКСНОГО МЕХАНО-ХИМИЧЕСКОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ

**Сенють В.Т.¹, Витязь П.А.¹, Хейфец М.Л.²,
Валькович И.В.¹, Колмаков А.Г.³**

- 1) ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси»,
- 2) ГНПО «Центр» НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь;
- 3) ФГБУН «Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН», Москва, Российская Федерация

Сверхтвердые поликристаллические материалы (ПСТМ) на основе кубического нитрида бора (КНБ, cBN) в настоящее время широко используются в лезвийном инструменте для предварительной и окончательной обработки чугунов, получистой и чистовой обработки закаленных сталей, твердых и труднообрабатываемых сплавов взамен традиционных твердосплавных и минералокерамических инструментов [1]. В то же время, чистота и точность обрабатываемых деталей зависит от размеров применяемых в инструменте зерен алмаза и кубического нитрида бора. Чем меньше абразивное зерно, тем выше чистота обрабатываемой поверхности. Получение инструмента, обеспечивающего чистоту поверхности после обработки резанием выше 9 класса, является чрезвычайно актуальной задачей.

Реализация перечисленных тенденций возможна за счет применения инструмента из поликристаллических сверхтвердых наноматериалов, т.к. переход от микронного диапазона размера частиц или кристаллитов к субмикронному и нанометровому предполагает значительное повышение физико-механических свойств синтезируемых материалов [2].

Практика использования инструментов показывает, что наноструктурные сверхтвердые материалы (СТМ) в виде компактов, содержащие частицы СТМ в матрице, либо в виде поликристаллических блоков позволяют повысить эффективность процесса механической обработки деталей машин. В этой связи особую актуальность приобретает разработка технологических основ синтеза наноструктурных СТМ и их последующего компактирования со связующим и без него для производства лезвийного и абразивного инструмента [3].

В настоящей работе для получения наноструктурного PSTM на основе cBN в качестве исходного материала использовали микропорошок графитоподобного BN (hBN) производства ПАО ЗАИ (Украина), который подвергался механоактивации (МА) в планетарной шаровой мельнице (ПШМ). Как показали ранее проведенные исследования, в результате МА hBN на его основе формируется порошковый материал, представляющий собой агрегаты размерами 0,5–2 мкм, состоящие из отдельных частиц полиэдрической формы с размерами 50–200 нм [4].

Последующая химическое травление порошка после МА в расплаве NaOH с дополнительной обработкой в соляной кислоте HCl практически полностью позволяет удалить графитоподобный BN, при этом масса остатка желтоватого цвета, характерного для cBN, составляет от 5 до 20 мас. % в зависимости от параметров МА и условий (температура, время) травления. При этом удельная поверхность порошка BN существенно возрастает от 16–18 м²/г после МА до 100–120 м²/г после травления.

Рентгенофазовый анализ очищенного порошка показал, что интенсивность рефлекса (002) hBN значительно ниже, чем у неочищенного порошка BN после МА. Рентгенографически регистрируется гало в области 43°21', соответствующее рефлексу (111) cBN. Рефлексы (220), (311), (331) cBN, находятся на уровне фона, что связано с образованием cBN с дефектной аморфно-нанокристаллической структурой. Морфология частиц порошка BN после МА в ПШМ и очистки представляет собой плотные конгломераты округлой формы размером 0,5–1 мкм, собранные в рыхлые агрегаты до 3 мкм.

Спекание порошков BN после МА и химической очистки осуществляли в аппарате высокого давления наковальня с лункой при давлениях в диапазоне 5,0–6,0 ГПа и температурах 1400–1900 °С. Перед спеканием осуществляли химико-термическое модифицирование порошков алюминием [5]. В качестве связующего использовали также добавки нанопорошка вюрцитного BN в количестве 10–50 об. %.

В результате спекания под давлением синтезирован материал, в основном состоящий из кубической модификации BN с размером кристаллитов порядка 50 нм. Превышение температуры спекания сверх оптимальной приводит к рекристаллизации cBN и появлению зерен cBN с размером 1–10 мкм.

1. Инструменты из сверхтвердых материалов / Под. ред. Н.В. Новикова и С.А. Клименко. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2014. – 608 с.
2. Витязь, П.А. Синтез и применение наноструктурных сверхтвердых материалов инструментального назначения / П.А. Витязь, В.Т. Сенюць // Известия НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. 2015, № 3. – С. 60–76.
3. Витязь, П.А. Производство инструментов из наноструктурных сверхтвердых материалов для лезвийной и абразивной обработки / П.А. Витязь, В.Т. Сенюць, М.Л. Хейфец // Инструментальний світ. – 2012. – № 3–4. – С. 9–13.
4. Сенюць, В. Т. Исследование структурных особенностей нитрида бора после механоактивации в атриторе и планетарной мельнице с последующим спеканием в условиях высоких давлений и температур / В.Т. Сенюць, С.А. Ковалева, Т.В. Гамзелева, Т.Ф. Григорьева // Химия в интересах устойчивого развития. – 2016. – Т. 24, № 2. – С. 169–175.
5. Витязь, П. А. Получение алюмоматричного композиционного материала, модифицированного наноструктурным кубическим нитридом бора [Текст] / П.А. Витязь, В.Т. Сенюць, М.Л. Хейфец, А.Г. Колмаков // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2018. – Т. 63. – № 3. – С. 271–279.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫХ И ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

Синькевич Ю.В.

Белорусский национальный технический университет, Республика Беларусь.

Электроимпульсное полирование широко используется для подготовки поверхности металлических изделий перед нанесением гальванических и тонкопленочных вакуумно-плазменных покрытий, для которых прочность сцепления с подложкой (адгезионная прочность) является одной из основных характеристик их качества. Предлагаемая методика применялась для определения адгезионной прочности гальванического блестящего хромового покрытия (твердый хром) толщиной $10 \pm 0,5$ мкм и вакуумно-плазменного TiN покрытия толщиной 3 мкм, нанесенных на электроимпульсно полированные в течение от 1 до 20 мин подложки соответственно из углеродистой конструкционной стали 10 и коррозионностойкой стали 12X18H10T.

Адгезионная прочность покрытий определялась на приборе LSRH (Leybold Heraeus, Германия) по методике царапания покрытия индентором в виде алмазного конуса Роквелла с радиусом округления вершины 0,2 мм. Сущность методики заключается в том, что нагруженный индентор проводится по плоской поверхности с покрытием, а действующая на индентор сила после каждого прохода индентора дискретно увеличивается до начала отслаивания покрытия от подложки. Контакт индентора с покрытием приводит к деформации исследуемого покрытия и вызывает напряжения в покрытии и металле подложки. Область, расположенная непосредственно под острием алмаза, находится в сжатом состоянии, в то время как область покрытия, прилегающая к боковым сторонам индентора, находится в напряженном состоянии с максимальным напряжением на поверхности контакта индентора с покрытием. Критическая нагрузка, приводящая к отслоению покрытия, достигается тогда, когда напряжение на поверхности контакта достигает величины прочности сцепления покрытия с поверхностью подложки [1, 2].

Для определения критической нагрузки на поверхности образцов с покрытиями наносилась сетка параллельных царапин длиной 5–7 мм. Скорость движения образцов относительно индентора составляла 10 мм/мин.

При исследовании адгезионной прочности вакуумно-плазменного TiN покрытия нагрузка на индентор составляла от 10 Н до 80 Н. Для каждой последующей царапины нагрузка увеличивалась на 5 Н. Нагружение индентора производилось путем размещения грузов на уравновешенном рычаге. После испытания поверхность образцов изучалась под микроскопом МКИ-2М-1 (Планар, Беларусь) при увеличении 125 крат. В качестве критической нагрузки принималась нагрузка, при которой происходило полное или частичное отслаивание TiN покрытия от подложки.

Адгезионная прочность тонкопленочного вакуумно-плазменного TiN покрытия рассчитывалась по формуле [3]:

$$\sigma_A = k \frac{1}{\sqrt{\pi R}} \sqrt{W_c \cdot H},$$

где σ_A – адгезионная прочность покрытия, МПа;

k – коэффициент Вивера (принят равным 1 согласно рекомендациям [3]);

R – радиус округления вершины индентора, мм;

W_c – критическая нагрузка, Н;

H – твердость покрытия, МПа.

При исследовании адгезионной прочности более пластичного гальванического хромового покрытия нагрузка на индентор составляла от 15 Н до 25 Н. Для каждой последующей царапины нагрузка увеличивалась на 1 Н. Исследование морфологии царапин на поверхности покрытия проводилось на электронном сканирующем микроскопе Mira (Tescan, Чехия) с разрешением 30 Å, оснащенный рентгеновским энергодисперсионным спектрометром Inca 350 (Oxford Instruments, Великобритания). Морфология изучалась в режиме отраженных электронов при ускоряющем напряжении 20 кВ и увеличениях от 1000 до 10000 крат. Спектрометр Inca 350 позволяет регистрировать рентгеновское излучение химических элементов, начиная с В (бор), и производить их количественный анализ с погрешностью, не превышающей 3–5%. Использование микрорентгеноспектрального анализа позволяет корректно определить критическую нагрузку, при которой происходит разрушение всего хромового покрытия, а не только его верхнего слоя.

Адгезионная прочность гальванического хромового покрытия рассчитывалась по формуле [2]:

$$\sigma_A = \frac{W_c}{0,5 \cdot S_{\text{бок}}} = \frac{2 \cdot W_c}{\pi b^2},$$

где $S_{\text{бок}}$ – площадь боковой поверхности индентора, контактирующей с покрытием, мм²;

b – половина ширины следа индентора на поверхности покрытия при критической нагрузке на индентор W_c , мм.

1. Steinmann, P. Adhesion testing by the scratch test method: the influence of intrinsic parameters on the critical load / P. Steinmann, Y. Tardy and H. Hintermann // Thin Solid Films. – 1987. – N 154. – P. 333–349.

2. Ichimura, H. Effect of indenter radius on the critical load in scratch testing / H. Ichimura, Y. Ishii // Surf. Coat. Technol. – 2003. – N 165. – P. 1–7.

3. Benjamin, P. Measurement of adhesion of thin films / P. Benjamin, C. Weaver // Proc. Royal Society. – 1960. – N 254. – P. 163–176.

МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ОБЪЁМА ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПОРИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ОТКРЫТЫМИ ПОРАМИ

Соколовский С.С.

Белорусский национальный технический университет,
Минск, Республика Беларусь

Необходимость решения такой измерительной задачи возникла в ходе разработки методики контроля плотности пористых композиционных материалов с открытыми порами. Специфическая особенность выделенных объектов контроля состоит в том, что их наиболее важные прочностные характеристики напрямую связаны с объёмной плотностью материала и этот параметр является основным при контроле их качества. С учётом этого обстоятельства для таких материалов устанавливаются весьма жёсткие допуски на их объёмную плотность, что приводит к соответствующему ужесточению и требований к точности измерения этого параметра. Особенности пористой структуры материалов делают невозможным использование классических методов измерения их объёмной плотности (метода гидростатического взвешивания, метода жидкостной пикнометрии, метода суспензии (флотационного метода), метода газовой пикнометрии и пр.). В этой ситуации как наиболее приемлемый вариант было принято решение использовать метод определения искомой плотности косвенным путём по результатам прямых измерениях геометрических параметров заданного образца (выполненного в виде втулки), позволяющих рассчитать соответствующий объём материала, и его массы. Так как инструментальное обеспечение высокоточных измерений массы и геометрических параметров объектов в настоящее время не представляет большой сложности, то на первый план была выдвинута задача минимизации методической погрешности измерения объёма материала образца, возникающей из-за некорректной идеализации объекта измерения (неадекватности принятой модели реальному объекту измерения). В результате проведенного исследования для наиболее эффективного решения поставленной задачи было предложено моделировать образец путём аппроксимации его реальных поверхностей соответствующими «средними» поверхностями идеальной формы $F_{mi}(x,y,z)=0$, воспроизводимыми с использованием метода наименьших квадратов по результатам координатных измерений множества контрольных точек на базе предложенного специального многомерного средства измерений, принципиальная схема которого приведена на рисунке 1. Графическая интерпретация такого моделирования объекта измерений, имеющего форму втулки, приведена на рисунке 2.

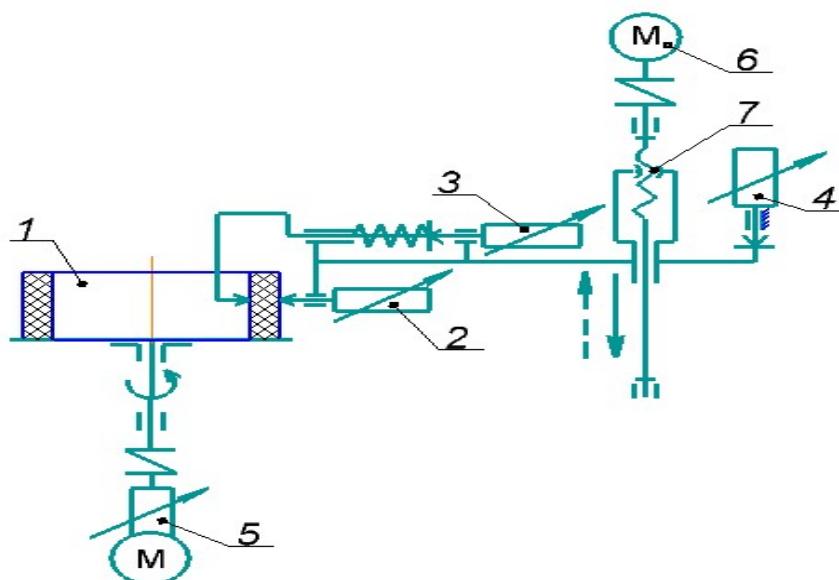


Рисунок 1 – Принципиальная схема специального многомерного координатного средства измерений, где: 1 – объект измерения; 2, 3, 4 – линейные измерительные преобразователи электрического принципа действия; 5 – шаговый двигатель; 6 – двигатель постоянного тока; 7 – передача «винт-гайка».

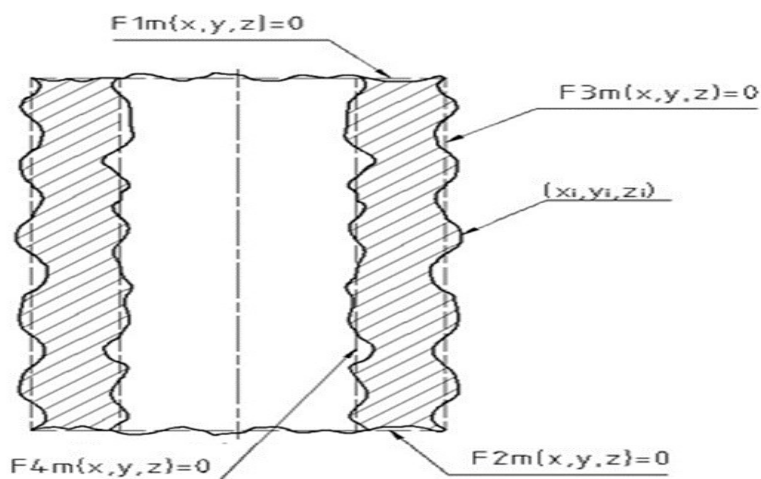


Рисунок 2 – Графическая интерпретация метрологического моделирования объекта измерений.

Важнейшим достоинством предложенного подхода является то, что при такой аппроксимации объём «отсекаемого» материала образца уравнивается объёмом охватываемых пустот, что в конечном итоге позволяет довести методическую погрешность измерения объёма материала образца до пренебрежимо малого значения.

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПТИМИЗИРОВАННЫХ МЕТОДИК ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЕТАЛЕЙ

Соколовский С.С., Янчиленко А.С.

Белорусский национальный технический университет,
Минск, Республика Беларусь

Проектирование методик выполнения измерений (МВИ) как одну из ключевых задач предполагает выбор лучшего варианта проектного решения из некоторой совокупности конкурирующих вариантов. В основу такого выбора предлагается положить квалиметрическое сопоставление всех выделенных возможных вариантов МВИ по целому ряду свойств, определяющих их качество, с последующим выделением превалирующего варианта по интегральному показателю качества измерений. Планируемый порядок решение данной задачи позволяет определить общую структуру системы информационной поддержки процесса автоматизированного проектирования МВИ, и выделить следующие основные модули, которые должны входить в эту структуру с существующими функциональными взаимосвязями между ними: **[Модуль 1]** – модуль классификации и кодирования контролируемых геометрических параметров деталей; **[Модуль 2]** – модуль классификации и кодирования типовых измерительных задач; **[Модуль 3]** – модуль типовых проектных решений МВИ; **[Модуль 4]** – модуль квалиметрического оценивания проектных решений конкурирующих вариантов МВИ. Обобщённая структурная схема предлагаемой системы представлена на рисунке 1. Согласно приведенной структурной схеме общий порядок функционирования такой системы следующий.

В первый модуль должна поступать исходная информация об измерительной задаче, подлежащей решению, на основании которой ей должен быть присвоен определённый код. Этот код, отражающий принципиальные особенности измерительной задачи, должен поступать на вход второго модуля, где на основании присвоенного рассматриваемой измерительной задаче кода должны строиться нормативная и аналитическая модель измеряемого параметра, выступающие в качестве основы для проектирования МВИ. Эта информация должна поступать на вход третьего модуля, задачей функционирования которого является формирование набора конкурирующих вариантов схемных решений измерительной задачи и соответствующих методик выполнения измерений, а также аналитическое оценивание составляющих погрешностей измерения. Четвёртый модуль системы, так называемый квалиметрический модуль, является завершающим и он предназначен для проведения квалиметрического оценивания конкурирующих

вариантов МВИ, сформированных в третьем модуле, по выделяемым проектировщиком основным свойствам, определяющим качество измерений.

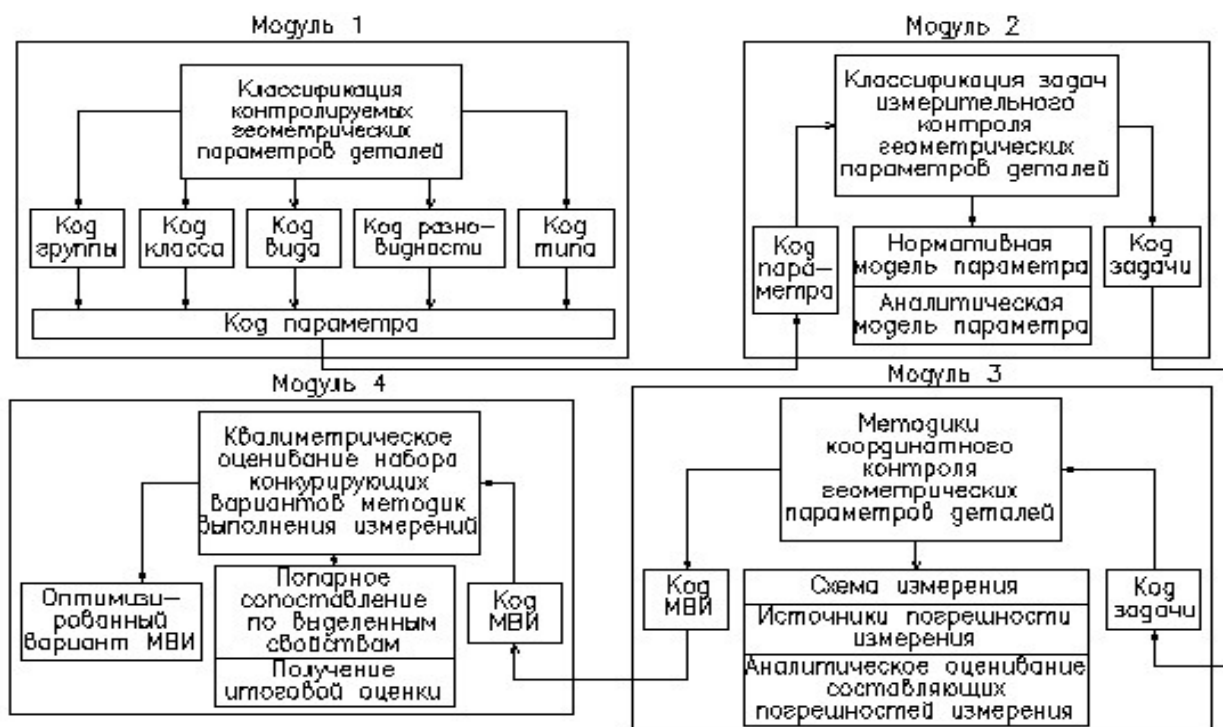


Рисунок 1 – Структура системы автоматизированного проектирования оптимизированных МВИ

Итогом этой работы должно быть определение наиболее эффективного или оптимизированного варианта МВИ. Критерием оптимизации при этом должно быть получение максимального значения комплексной обобщенной квалиметрической оценки, объединяющей в себе частные оценки ряда свойств, определяющих качество МВИ.

При работе в Системе проектировщик должен последовательно выполнить следующие действия или операции: 1) сформировать набор из предложенных в базе данных конкурирующих вариантов решения поставленной измерительной задачи; 2) выделить главные свойства, определяющие качество будущих измерений; 3) произвести попарное сопоставление всех рассматриваемых вариантов МВИ по всем выделенным главным свойствам и рассчитать по предлагаемой специальной методике для каждого варианта проекта соответствующий ему индекс превалирования его по данному свойству над всеми остальными вариантами проекта; 4) произвести попарное сопоставление всех выделенных главных свойств по их важности или значимости в отношении качества МВИ в целом и рассчитать соответствующие им коэффициенты весомости; 5) произвести комплексирование полученных количественных оценок сопоставляемых вариантов МВИ по всем выделенным главным свойствам с учётом их коэффициентов весомости и рассчитать для каждого варианта комплексный показатель его превалирования над всеми остальными вариантами.

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ РАЗМЕРА НАНОЧАСТИЦ

Соломахо В.Л.¹, Багдюн А.А.²

1. Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь;
2. Белорусский государственный институт метрологии
Минск, Республика Беларусь

В настоящее время в машиностроении широко используются наночастицы. Их широко применяют, в частности, при напылении материалов на различные поверхности с целью увеличения износостойкости, придания каких-либо особых физико-химических свойств, например, создания гидрофобных покрытия и др. Это обусловлено тем, что при достижении определенного размера в наночастицах начинают проявляться их уникальные размерно-зависимые физико-химические свойства, которые существенно влияют на функциональные характеристики конечных продуктов и устройств. Так как размер наночастиц является базовым параметром, определяющим физико-химические свойства конечного продукта, важно оперативно и точно контролировать их размерные параметры, что невозможно без обеспечения метрологической прослеживаемости измерений геометрических размеров наночастиц.

Однако, прежде чем осуществлять контроль и обеспечивать прослеживаемость, важно разобраться что собой представляет размер наночастиц. Термин наночастица опирается на два ключевых понятия: нанодиапазон и нанообъект. Нанодиапазоном принято считать интервал линейных размеров от 1 до 100 мкм. Нанообъект – дискретная часть материала, линейные размеры которой по одному, двум или трем измерениям находятся в нанодиапазоне. Существуют три основных вида нанообъекта: наночастица, нановолокно и нанопластина. Наночастица – это нанообъект, линейные размеры которого по всем трем измерениям находятся в нанодиапазоне, а соотношение размеров длин в направлении самой короткой и самой длинной из осей, как правило, не более чем один к трем. Нановолокно – это нанообъект, линейные размеры которого по двум измерениям находятся в нанодиапазоне, а по третьему измерению значительно больше (наибольший размер может находиться вне нанодиапазона). Нанопластина – это нанообъект, линейные размеры которого по одному измерению находятся в нанодиапазоне, размеры по двум другим измерениям значительно больше.

Ввиду того, что наночастицы имеют разнообразную форму, от сферы до многоугольного элемента, для их анализа принята модель в виде сферы, а для определения размера вводится понятие эквивалентного диаметра сферического

объекта. Эквивалентный диаметр присущ сферическому объекту, имеющему такие же физические свойства, что и измеряемая частица. К физическим свойствам частиц, например, относят скорость осаждения частиц или размеры частиц (объем и площадь поверхности), определенные по проекциям частиц.

При анализе наночастицы, например, под микроскопом, визуализируется ее плоская проекция, и в этом случае охарактеризовать частицу можно посредством ряда различных размерных параметров. Это могут быть максимальный и минимальный диаметр (линейный размер), каждый из которых дает значение «размера» частицы. Важно понимать, что каждый метод основан на измерении различных физических характеристик частиц, и, как следствие, размеры, полученные разными методами, будут различаться. В таблице 1 приведены различные варианты определения размеров частиц. При этом ошибочных вариантов нет – каждый пример субъективно корректен – он отражает физически измеряемую характеристику.

На практике корректно сравнивать только результаты тех измерений, в которых один и тот же материал анализировался одним и тем же методом. Ввиду того, что размеры наночастиц являются случайными величинами, принято отображать информацию о них в виде распределения.

Проведенный анализ показывает, что для обеспечения метрологической прослеживаемости измерений размеров наночастиц к единицам международной системы СИ, необходимо использовать стандартные образцы сферической формы с нормальным распределением частиц по размерам.

Таблица 1 – Варианты размеров частиц

Обозначение диаметра	Наименование диаметра	Зависимость от природы вещества	
		Зависит	Не зависит
d_{\max}	Диаметр сферы равен максимальной длине		+
d_{\min}	Диаметр сферы равен минимальной длине		+
d_w	Сфера эквивалентного объема	+	
d_v	Сфера эквивалентной массы	+	
d_s	Сфера с эквивалентной площадью поверхности	+	
d_{sieve}	Сфера, проходящая в такую же апертуру сита		+
d_{sed}	Сфера, имеющая такую же скорость седиментации	+	

РЕТРОСПЕКТИВА КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ МАКРОГЕОМЕТРИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Соломахо В.Л.¹, Цитович Б.В.²

- 1) Белорусский национальный технический университет;
- 2) Белорусский Государственный институт повышения квалификации и переподготовки кадров по стандартизации, метрологии и управлению качеством, Минск, Республика Беларусь

Сегодня к макрогеометрии в машиностроении относят размеры, форму и расположение поверхностей. Есть стандарты, регламентирующие допуски параметров макрогеометрии, разработаны специальные средства измерений, позволяющие рационально измерять параметры, которые затруднительно или невозможно измерять универсальными приборами.

Разделение параметров макрогеометрии на две группы: размеры с одной стороны, форму и расположение поверхностей с другой стороны, является условным. Такие параметры расположения, как межосевые расстояния пары отверстий с номинально параллельными осями или расстояние между боковыми поверхностями призматической шпонки есть размеры, определяющие расположение поверхностей. Отклонение от параллельности противоположных образующих номинально цилиндрической поверхности и отклонения их от прямолинейности можно оценивать как характеристики размеров детали или формы и расположения её элементов. Фактически точность любых геометрических параметров можно установить нормированием точности размеров. Выделение для специального нормирования точности параметров формы и расположения поверхностей имеет двойные причины:

- при повышенных требованиях к качеству сопряжений нормирование точности параметров формы и расположения поверхностей позволяет своевременно ставить и успешно решать задачи изготовления и контроля деталей для последующей сборки сложного изделия;
- в некоторых случаях отдельное нормирование точности размеров и параметров формы и расположения поверхностей рационально с чисто экономических позиций.

Первый стандарт, обеспечивающий возможность отдельного подхода к нормированию параметров макрогеометрии, был утверждён в 1963 году (это давно не действующий ГОСТ 10356–63 «Отклонения формы и расположения поверхностей. Основные определения. Предельные отклонения»). Этот стандарт не устанавливал допуски, не регламентировал поля допусков, он ограничивал предельные (максимально допустимые) отклонения от номинальной формы поверхностей и/или номинального расположения их элементов. Стандарт установил степени точности и стандартные числовые значения, что позволяло назначать соответствующие нормы по аналогии.

Возможность выделения из макрогеометрии параметров формы и расположения поверхностей оказалась достаточно удачным решением, которое успешно прошло апробирование в ходе длительного применения.

В настоящее время в СНГ нормирование требований к форме и расположению поверхностей обеспечивают два Межгосударственных стандарта: ГОСТ 24642–81 «Основные нормы взаимозаменяемости. Допуски формы и расположения поверхностей. Основные термины и определения» и ГОСТ 24643–81 «Основные нормы взаимозаменяемости. Допуски формы и расположения поверхностей. Числовые значения». Кроме того, в Республике Беларусь сегодня действует также Национальный стандарт СТБ ISO 1101–2009 «Геометрические характеристики изделий. Установление геометрических допусков. Допуски на форму, ориентацию, расположение и биение», являющийся идентичным стандарту ISO 1101:2004 «Geometrical Products Specification (GPS) – Geometrical tolerancing – Tolerances of form, orientation, location and run-out».

Возможности разделения параметров макрогеометрии при их нормировании привели к разработке специальных средств измерений, позволяющих более рационально осуществлять измерительный контроль. Появились специальные плоскомеры, кругломеры, разрабатывались калибры для комплексного контроля формы и расположения элементов сложных деталей. Специальные средства измерений или измерительного контроля обеспечивали определённые преимущества, но часто были нерентабельными для индивидуального и мелкосерийного производства.

Революцией в разработке средств измерений для геометрических параметров можно считать появление трёхкоординатных измерительных приборов. Эти средства измерений позволяют контролировать практически любые виды параметров макрогеометрии, включая такие как «конусность продольного сечения» резьбовых поверхностей отверстий, форму кулачка или форму профиля зуба зубчатого колеса.

Принципиальная возможность отказа от специальных средств измерений, разработанных для измерительного контроля отклонений формы и расположения поверхностей, вызвала у некоторых специалистов не только желание отказаться от разработки и применения специальных средств измерений, но и идею отказа от нормирования допусков формы и расположения поверхностей.

Оба предложенных направления являются тупиковыми. Отказ от возможности нормирования допусков формы и расположения поверхностей явно не соответствует требованиям современного производства. Что касается конкуренции между «сверх универсальными» и специальными средствами измерений, то разумный подход не отрицает ни одно из возможных решений, рациональность которого определяют конкретные ситуации.

ТЕХНИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ В МАШИНОСТРОЕНИИ. ХАРАКТЕРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ

Соломахо В.Л.¹, Цитович Б.В.²

- 1) Белорусский национальный технический университет;
- 2) Белорусский Государственный институт повышения квалификации и переподготовки кадров по стандартизации, метрологии и управлению качеством, Минск, Республика Беларусь

Наибольший объём контроля в машиностроительном производстве связан с контролем деталей. Поскольку большинство нормированных параметров детали – это геометрические параметры, контроль которых осуществляется по результатам измерений, у производителей часто складываются неправильные стереотипы: «измерения осуществляются для контроля» или «измерения и контроль – один и тот же процесс». В действительности измерения и контроль представляют собой два самостоятельных информационных процесса, у которых могут быть общие элементы.

Измерению подвергается некоторое конкретное свойство объекта. Цель измерений – получение адекватной оценки исследуемого свойства. Полученную информацию («первичную информацию») можно использовать для сопоставления с нормами, если они установлены для данного свойства объекта. Выяснение соответствия или несоответствия исследуемого свойства установленным нормам (получение «вторичной информации») – обязательная составная часть контроля. Получение первичной информации при контроле может осуществляться без измерений, например, визуальное выявление дефектов на поверхности детали (черновины, сколы...) осуществляется экспертным методом без измерений.

Основные определения контроля представлены в стандарте ГОСТ 16504 «Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения». Приведём некоторые из определений, отражающие основные признаки контроля.

Контроль качества продукции – контроль количественных и (или) качественных характеристик свойств продукции.

Технический контроль – проверка соответствия объекта установленным техническим требованиям.

Измерительный контроль – контроль, осуществляемый с применением средств измерений.

Органолептический контроль – контроль, при котором первичная информация воспринимается органами чувств.

Из определений понятно, что контроль всегда является контролем качества. Контролировать можно только нормированные свойства объектов, поскольку в противном случае теряется суть контроля – выяснение

соответствия или несоответствия контролируемого объекта «установленным техническим требованиям».

В некоторых случаях контроль изделия, как и измерения или экспертное оценивание его свойств, непосредственно связан с проведением испытаний. Подтвердить это положение можно определением испытаний из того же стандарта. *Испытания – экспериментальное определение количественных и (или) качественных характеристик свойств объекта испытаний как результата воздействия на него, при его функционировании, при моделировании объекта и (или) воздействий. Примечание. Определение включает оценивание и (или) контроль.* Объективные данные при испытаниях получают именно путём измерений воздействий на объект испытаний и изменений объекта в результате этих воздействий.

Нормальная производственная деятельность включает контроль её осуществления и контроль полученных результатов. Использование для контроля таких специфических информационных процессов как измерения или испытания не превращает их друг в друга. Следует чётко идентифицировать каждый из этих процессов для того, чтобы не только различать их, но и применять любой из них строго по назначению.

В приведенной ниже таблице 1 представлены основные характерные признаки каждого из этих процессов. Следует обратить внимание на то, что измерение всегда относится к конкретному свойству произвольного производственного объекта (процесса, изделия). Контроль может относиться как к единичному свойству объекта, так и к объекту в целом. Что касается испытаний, то испытаниям подлежат только изделия (процессы не испытывают), причём при испытаниях на объекты могут оказываться как единичные, так и комплексные воздействия.

Таблица 1 – Основные признаки процессов измерений, контроля и испытаний

Вид процесса	Характерные признаки процессов		
	Воздействие на объект	Изменения объекта	Итоговая информация
Измерение параметра объекта	Слабое	Отсутствуют	Оценка измеряемого параметра
Контроль свойств объекта	От слабого до разрушающего	От незначительных до разрушения	Оценка соответствия объекта нормам
Испытания объекта			Оценка воздействий на объект

АВТОМАТИЗАЦИЯ КАЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Сорокин С.В., Кузнецов В.А., Петреску Ю.С.

ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»
г. Брянск, Российская Федерация

Разработка нового изделия – сложная задача, при решении которой конструктор должен не только обеспечить высокий технический уровень и эксплуатационные свойства этого изделия, но и в полной мере учесть требования производства, то есть обеспечить его технологичность [1]. Таким образом, отработка конструкций изделий на технологичность должна производиться совместно разработчиками конструкторской и технологической документации, предприятиями-изготовителями изделия и представителями заказчика. Ответственными же исполнителями отработки конструкций изделий на технологичность являются разработчики именно конструкторской документации.

Если требования производства в процессе проектирования отдельных конструктивных элементов детали учитываются в недостаточной мере, то при изготовлении и восстановлении деталей возникают затруднения, которые удлиняют сроки подготовки производства и могут вызвать дополнительную потребность в технологической оснастке и привести к увеличению трудоемкости, что в конечном итоге приведет к увеличению себестоимости продукции. Правила обеспечения технологичности взаимосвязанных деталей определяют технологическую рациональность конструкторских решений. Одним из инструментов определения рациональности являются анализ и синтез конструктивных элементов. Качество машиностроительной продукции в огромной степени обуславливается точностью машин, во-первых, заложенной на этапе проектирования изделия и, во-вторых, обеспечиваемой во время его изготовления. Одним из направлений сокращения сроков освоения и улучшения качества выпускаемых машин является широкое применение в практике конструирования формализованных принципов определения качественных показателей технологичности изделия [2]. Эти показатели в значительной мере зависят от правильного выбора характера сопряжения, допусков размеров, формы и расположения поверхностей или элементов деталей.

В ходе проведенной работы были спроектированы 4 модуля оценки технологичности деталей типа валы, валы-шестерни, втулки и корпуса. Разработанные программы легки в применении – необходимые параметры детали выбираются из падающих списков, а недостающие данные и качественно-размерные характеристики вводятся с клавиатуры. Это существенно облегчает труд и сокращает время на составление отчёта.

Для примера работы системы на рисунке 1 представлены рабочие формы модуля оценки технологичности деталей типа втулка. Пользователь должен ввести требуемые данные с клавиатуры, отметить флажки в необходимых местах, выбрать данные из выпадающих списков, заполнив все обязательные поля. Далее система просит указать качество точности и шероховатость основных и вспомогательных поверхностей. Так же пользователь может отметить присутствуют ли в детали особенности базового отверстия и основной наружной поверхности. Кроме этого в системе допускается указание расположения резьбы, шпоночного паза, а так же дополнительных отверстий и лысок, указать их количество и углов, под которым они расположены относительно друг друга. При нажатии на кнопку «Отчет» все данные о втулке будут выведены в текстовый редактор.

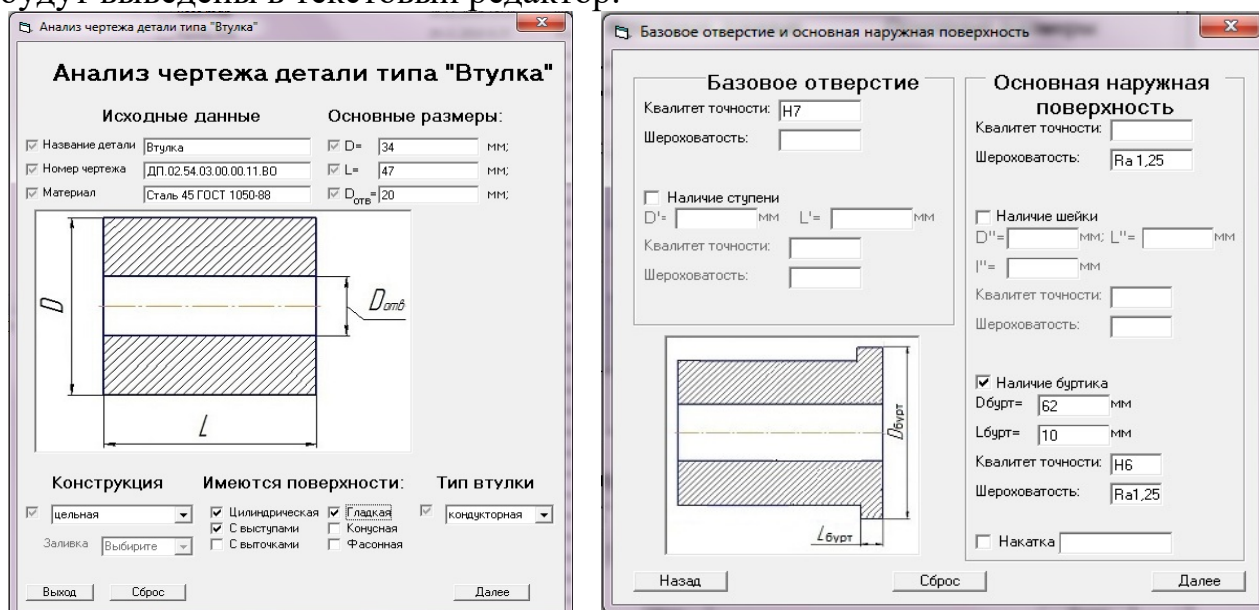


Рисунок 1 – Рабочие окна модуля оценки технологичности детали типа «Втулка»

Спроектированные модули автоматизированной системы решают важную задачу по установлению отличия анализируемых конструктивных элементов детали с аналогами, взятыми по рекомендации справочной литературы как наиболее рациональные с точки зрения сокращения затрат на всех этапах жизненного цикла изделия.

1. Польский, Е.А. Обеспечение надежности высокотехнологичных сборочных узлов / Е.А. Польский // Научно-технический журнал «Научно-технические проблемы машиностроения». Ежемесячный научно-технический и производственный журнал, Брянск. Отпечатано в типографии ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет». №11. 2019. - 48 с.
2. Сорокин, С.В. Концепция автоматизации обеспечения эксплуатационных характеристик деталей пар трения с применением интегрированных САПР / С.В. Сорокин // Матер. междунар. науч.-тех. конф. «Обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической техники», 19-20 февраля 2020г. – Брянск: БГТУ, 2020. – 424 с. С.178-181

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ПОДСИСТЕМЫ РАСЧЕТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СЕБЕСТОИМОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОПЕРАЦИИ

Сорокин С.В., Якушев С.М., Полищук Д.Н.

ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»
г. Брянск, Российская Федерация

В связи с сокращением периода смены номенклатуры выпускаемых изделий, всё острее становится проблема повышения эффективности и качества проектирования технологии изготовления и сборки изделий, и, как следствие, актуальной остается задача сокращения сроков проектирования технологических процессов с применением современных интегрированных САПР [1, 2]. Техничко-экономический анализ нескольких вариантов технологического процесса механической обработки детали позволяет оценить обоснованность принятых при проектировании технических и технологических решений. При проведении экономических расчетов проектировщик выполняет повторяющиеся циклические вычисления. Кроме этого, необходимо анализировать нормативные данные по коэффициентам нормативной загрузки, величине амортизационных отчислений и др., а также проводить оптимизацию числа единиц оборудования и численности работающих по критерию нормативной загрузки. Проведение этих действий, особенно при анализе нескольких вариантов технологического процесса, приводит к необоснованно высоким потерям времени и значительно увеличивает срок подготовки производства. Поэтому задача автоматизации проведения технико-экономического сравнения вариантов ТП является достаточно актуальной.

Основной задачей спроектированной подсистемы САПР расчета технико-экономических показателей участка цеха механической обработки детали является снижение трудоемкости и временных затрат при проектировании, повышение производительности труда и выбор оптимального варианта технологического процесса. Для расчета технико-экономических показателей проектируемого участка в системе осуществляется последовательное выполнение ряда процедур. Разработанная система позволяет решать как прямую задачу, так и обратную. Прямая задача состоит в определении технико-экономических показателей проектируемого участка на основе входных данных и последовательного выполнения всех процедур программы. Обратная задача состоит в определении допустимых затрат с целью их окупаемости в заданные сроки. Необходимая информация хранится в таблицах базы данных и при необходимости может быть скорректирована в используемой СУБД. При разработке автоматизированной системы были использованы математические выражения и зависимости, на основе которых осуществляется работа всех процедур программы.

Методика расчета технологической себестоимости состоит из нескольких основных этапов. Сначала необходимо ввести общие данные (рисунок 1): название, номер, материал и масса детали, годовая программа выпуска, технологический процесс обработки и штучное время выполнения операций. Для дальнейшего расчёта основной и дополнительной ЗП, необходимо выбрать соответствующие коэффициенты. Для подтверждения введенных данных и продолжения выполнения программы необходимо нажать кнопку «Расчёт основной и дополнительной ЗП». Затем, нажатием кнопки «Расчёт часовых затрат по эксплуатации рабочего места», для расчета удельных капитальных вложений, необходимо выбрать соответствующие коэффициенты. Для расчета «Площади, занимаемые станками» вводятся геометрические характеристики оборудования. Далее рассчитываются «Удельные капитальные вложения в здание» и, собственно, «Технологическая себестоимость». Система даст возможность производить оценку эффективности и обосновывать предлагаемые технологические процессы в более короткие сроки, что позволит ей занять место в общем цикле подготовки производства.

Годовая программа выпуска: 150

Показатели фонда времени работы оборудования

Ввод ТП

Наименование операции	Модель оборудования	Трудоёмкость операции	Разряд работ
Токарно-винторезная	16К20	0,7	6
Токарно-винторезная	16К20	0,43	6
Токарно-винторезная	16К20	0,67	6
Шлищфрезерная	5350А	1,1	6

Оптимизация ТП

Наименование операции	Модель обо	Принято ч	Трудоёмкос	Трудоёмкость годово	Возможная	Коэф. загрузки оборуд
Токарно-винторезная	16К20	1	1,96	294	1108,5	0,172
Шлищфрезерная	5350А	1	1,99	298,5	1104	0,175
Вертикально-фрезерная	6Н1ЗП	1	1,8	270	1132,5	0,158

Коефициенты для расчета ЗП

Расчёт основной и дополнительной заработной платы

Расчёт часовых затрат по эксплуатации рабочего места

Модель оборуд	Сп	Отпускная цен	Удельные ка
16К20	1	537195	3939,4
5350А	1	672600	4932
6Н1ЗП	1	1525750	11188,8
2М55	1	831900	6100
Верстак	1	15342	112,5
3А161	1	796500	584
ИТОГО			32114,7

Площадь, занимаемая станком Пс

Удельные капитальные вложения в здание

Модель оборуд	Сп	Площадь	Удельные кап
16К20	1	3,4	2,38
5350А	1	4,02	2,81
6Н1ЗП	1	4,8	3,36
2М55	1	2,7	1,89

Технологическая себестоимость

Модель оборуд	Трудоёмкость опе	Основная и доп.ЗП	Часовые
16К20	1,96	493	493
5350А	1,99	493	493
6Н1ЗП	1,8	493	493
2М55	0,05	493	493
Верстак	0,15	272	272

Приведенные затраты

$Z = C + E_n(K_c + K) = 3727$

Коефициент затрат на транспортировку и монтаж

Удельные капитальные вложения

Отчет Выход

Рисунок 1 – Итоговое окно системы

1. Польский, Е.А. Технологическое обеспечение наработки на отказ формообразующей оснастки пресс-форм на основных этапах жизненного цикла / Матер. междунар. науч.-тех. конф. «Обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической техники», 19-20 февраля 2020 г. – Брянск: БГТУ, 2020. – С.165-168.
2. Сорокин, С.В. Автоматизация синтеза технологических процессов обработки деталей на современном оборудовании с программным управлением / С.В. Сорокин // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2016. - №2 (53). – С. 119-127.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ШАРИКО-СТЕРЖНЕВЫМ УПРОЧНИТЕЛЕМ**Тамаркин М.А, Тищенко Э.Э., Новокрещенов С.А., Морозов С.А.**

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Важную роль в формировании качества поверхности занимают финишные методы обработки, использование которых позволяет повысить эксплуатационные свойства деталей машин, такие как контактная жесткость, износостойкость, усталостная прочность и долговечность, решив, таким образом, задачи увеличения жизненного цикла изделий. Финишные методы позволяют выполнять обработку как всей детали, так и её локальных участков, на которых расположены концентраторы напряжений, что, зачастую, более выгодно. Среди финишных методов обработки важное место занимают методы обработки поверхностным пластическим деформированием (ППД), в том числе и локальные. Они позволяют значительно снизить шероховатость поверхности обрабатываемой детали, повысить физико-механические свойства поверхностного слоя. Кроме того, методы ППД позволяют формировать благоприятные остаточные напряжения, которые оказывают значительное влияние на их эксплуатационные свойства. Известно, что растягивающие остаточные напряжения могут значительно снизить усталостные характеристики детали, и наоборот, сжимающие – улучшить их.

Для осуществления процесса местной обработки ППД деталей простой и сложной конфигурации, имеющих небольшой перепад профиля по высоте, на кафедре «Технология машиностроения» ДГТУ под руководством профессора Бабичева А.П. изобретено специальное устройство – шарико-стержневой упрочнитель (ШСУ). ШСУ представляет собой многоконтактный виброударный инструмент, обработка которым построена на основе поверхностно-пластического деформирования. Обработка осуществляется пакетом цилиндрических стержней, расположенных в специальном цанговом зажиме, которым сообщается энергия удара бойка пневмомолотка через несколько слоев стальных шариков. При исследовании технологических возможностей обработки ШСУ установлено, что наибольшее влияние на качество поверхностного слоя обработанных деталей оказывает энергия удара привода, диаметр заточки стержней, число стержней в пакете, натяг при обработке, подача устройства вдоль обрабатываемой поверхности [1,2].

Проведены исследования процесса обработки ШСУ. Определена шероховатость поверхности после обработки детали:

$$Rz = 0,03 \sqrt{\frac{E_y \cdot \eta}{D \cdot N \cdot HB^{1,12}}} \quad (1)$$

где E_y – энергия удара бойка; N – число стержней в пакете; HB – твердость обрабатываемого материала по Бринеллю; η – коэффициент полезного действия устройства, зависящий ряда факторов (натяг при обработке, количество слоев шариков и т.п.), D – диаметр сферической заточки стержня (индентора).

Установлены зависимости для определения степени деформации и глубины упрочненного слоя:

$$\varepsilon = 1,134 \sqrt[4]{\frac{E_y \cdot \eta}{D^3 \cdot N \cdot HB^{1,12}}} \quad (2)$$

$$h_n = \sqrt[8]{\frac{\left(\frac{E_y \cdot \eta}{D \cdot N \cdot HB^{1,12}}\right)^3}{D}} \quad (3)$$

На основании методики, представленной в работе [3], предложена зависимость для определения остаточных напряжений при ШСУ:

$$\sigma_0 = k_u k_\sigma \left(\frac{E_y}{\left(\frac{D d}{2(D+d)}\right)^3} \right)^{\frac{1}{5}} \cdot \left(\frac{1 - \nu_d^2}{E_d} + \frac{1 - \nu_u^2}{E_u} \right)^{\left(-\frac{4}{5}\right)} \quad (4)$$

где k_u – коэффициент, учитывающий особенности формирования остаточных напряжений при обработке ШСУ, k_σ – коэффициент, учитывающий способность материала к упрочнению; E_y – энергия удара бойка; D и d – диаметры, соответственно, заточки стержня и отпечатка на детали; ν_d и ν_u – коэффициенты Пуассона для детали и стержня; E_d и E_u – модули упругости первого рода для детали и стержня.

Авторами проведены экспериментальные исследования процесса обработки ШСУ, подтверждающие адекватность полученных теоретических моделей. Разработана методика проектирования технологических процессов обработки ШСУ с обеспечением формирования сжимающих остаточных напряжений, которая прошла промышленную апробацию и используется в условиях ПАО «Роствертол».

1. Исаев А.Г. Обеспечение акустической безопасности при шарико-стержневом упрочнении с учетом достижения заданных параметров качества поверхностного слоя (на примере плоских деталей). Дис. ... канд.техн.наук, Ростов н/Д, 2017. – 129 с.
2. Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Shvedova A.S. Optimization of Dynamic Surface Plastic Deformation in Machining Russian Engineering Research, 2018, Vol. 38, No. 9, pp. 726–727.
3. Копылов Ю. Р. Динамика процессов виброударного упрочнения: монография / Ю. Р. Копылов. – Воронеж : ИПЦ «Научная книга». – 568 с.

ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ НА СТАЛЬНОЙ НЕМАГНИТНОЙ ОСНОВЕ

Фролов И.С.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

В последние годы для повышения износостойкости деталей машин и технологической оснастки широко применяются покрытия, получаемые путем вакуумно-плазменного осаждения из паровой фазы, в частности, методом КИБ (конденсации покрытий из плазменной фазы с ионной бомбардировкой поверхности). Однако сведения о триботехнических характеристиках даже таких широко распространенных вакуумно-плазменных покрытий, как TiN, в литературе практически отсутствуют. Еще в большей степени это касается покрытий иного химического состава, для обоснованного применения которых такая информация является особенно важной. Поэтому проведение комплексных износных испытаний образцов, упрочненных вакуумно-плазменными электродуговыми покрытиями, представляется актуальным.

Было проведено исследование триботехнических характеристик (износостойкости, момента и коэффициента трения) образцов с различными покрытиями: монослойными TiN и УАПП (углеродная алмазоподобная пленка) и мультислойным полосчатым $(\text{Cu-TiN})_x$ при трении со смазочным материалом (вакуумное масло ВМ-1). Исследование проводилось с использованием модернизированной машины трения МФТ-1 по схеме торцевого трения кольцо-плоскость, исключаяющей процесс резания, который может наблюдаться в случае трения пальчиковых образцов по плоскости. В качестве образцов использовались диски диаметром 50 мм, изготовленные из стали 12Х18Н10Т. Осаждение покрытий осуществлялось с использованием установки УРМ3.279.048, оснащенной дополнительно импульсным генератором углеродной плазмы, на оптимальных режимах.

Режимы испытаний на износостойкость были следующими: скорость относительного скольжения 1,5 м/с, давление 1,2 МПа. Контртелом служил разрезной образец из закаленной стали ШХ15 (60...62 HRC) или материала образца с покрытием. Применение разрезного образца обеспечивало доступ смазочного материала в зону трения.

Момент трения фиксировался на ленте самописца Н-302, подключенного к индуктивному измерительному преобразователю машины трения. Коэффициент трения определялся по формуле:

$$f = \frac{M_{\text{тр}}}{P \cdot R},$$

где $M_{тр}$ – момент трения, Н·м; P – нагрузка на образец, Н; R – средний радиус поверхности трения, м.

Износ образцов определялся через 3, 10, 30, 60 минут и далее через каждый час после начала испытаний вплоть до полного разрушения покрытия (катастрофического износа). Критерием окончания эксперимента служило резкое изменение момента трения, фиксируемого на ленте самописца. Для определения величины износа образца каждая канавка трения трижды профилографировалась в направлении, перпендикулярном ее продольной оси, что позволяло определить среднюю глубину канавки трения. Далее, принимая сечение канавки за круговой сегмент, рассчитывали линейный износ поверхности трения. Характер износа поверхности анализировался также с помощью металлографического микроскопа.

Анализ результатов экспериментов показывает, что наименьшую величину износа имеют образцы с УАПП, а наибольшую – с покрытием TiN (в 3 раза больше по сравнению с УАПП). Полосчатое покрытие $(Cu-TiN)_x$ занимает промежуточное положение. Следует отметить, что интенсивность изнашивания покрытия $(Cu-TiN)_x$ достаточно близка к УАПП и поэтому при реализации режима избирательного переноса данное покрытие может служить полноценной заменой алмазоподобной пленке, которая характеризуется повышенной хрупкостью и, как следствие, низкой работоспособностью при малой жесткости материала основы образцов. Кроме того несколько больший износ полос меди в процессе работы пары трения приводит к образованию масляных карманов, удерживающих смазку в зоне трения и повышающих тем самым износостойкость покрытия $(Cu-TiN)_x$.

Определение фрикционных характеристик покрытий при принятых режимах испытаний показало, что коэффициенты трения исследуемых пар находятся в пределах 0,03...0,10 (таблица 1), что соответствует классу антифрикционных материалов.

Таблица 1 – Коэффициенты трения исследуемых пар образцов

Пара трения	Коэффициент трения f
12X18H10T+ TiN — 12X18H10T + TiN	0,05...0,09
12X18H10T + TiN — ШХ15	0,07...0,10
12X18H10T + УАПП — ШХ15	0,03...0,04
12X18H10T + $(Cu-TiN)_x$ — ШХ15	0,03...0,04

Коэффициент, трения покрытия $(Cu-TiN)_x$ в паре с закаленной сталью оказался равен коэффициенту трения аналогичной пары с УАПП и в 2...2,5 раза ниже, чем у покрытия TiN при трении по закаленной стали и аналогичному покрытию. Это подтверждается и результатами определения коэффициента трения при небольших давлениях и скоростях скольжения, приведенными в таблице 2.

Таблица 2 – Величины коэффициента трения в зависимости от режимов испытаний

Коэффициент трения f для пары трения	Режимы испытаний (удельное давление P /скорость V)		
	$P=0,2$ МПа, $V=0,08$ м/с	$P=0,4$ МПа $V=0,08$ м/с	$P=0,4$ МПа $V=0,16$ м/с
12X18H10T +TiN — ШХ15	0,12	0,14	0,076
12X18H10T+TiN — 12X18H10T+TiN	0,108	0,123	0,057
12X18H10T + (Cu-TiN) _x — ШХ15	0,043	0,044	0,028

Как видно из таблицы, покрытие (Cu-TiN)_x при данных режимах испытаний эффективнее покрытия TiN соответственно в 2,7...3,2 раза при трении по закаленной стали и в 2...2,8 раза при трении по аналогичному покрытию. Кроме того, отмечено, что для всех пар трения коэффициент трения возрастает с увеличением нагрузки и уменьшается с увеличением скорости скольжения образцов. Таким образом, мультислойное полосчатое покрытие (Cu-TiN)_x эффективнее монослойных покрытий за счет образования масляных карманов и возможности реализации режима избирательного переноса.

УДК621.793.1

ФОРМИРОВАНИЕ МУЛЬТИСЛОЙНЫХ ПОЛОСЧАТЫХ ПОКРЫТИЙ В ВАКУУМЕ

Фролов И.С., Иващенко С.А., Фролов Ю.И.

Белорусский национальный технический университет, Минск,
Республика Беларусь

Вакуумно-плазменное осаждение покрытий, как процесс поверхностного упрочнения деталей, отличается многообразием и широкими возможностями комплексного использования при создании экономичных, высокоэффективных композиционных материалов, способных работать в жестких условиях эксплуатации механизмов и машин [1]. Одним из перспективных направлений развития данного способа является получение износостойких композиций путем создания мультислойных систем-покрытий, состоящих из большого количества слоев, толщина которых составляет несколько периодов кристаллической решетки. Наряду с мультислойными покрытиями постоянного химического состава из нитрида титана, были предложены покрытия переменного состава, в частности, полосчатые покрытия, представляющие собой чередование мультислойных полос (участков) из износостойкого и антифрикционного материалов и сочетающие в себе преимущества мультислойных покрытий постоянного состава и обычных полосчатых покрытий [2]. В качестве антифрикционного материала покрытия может использоваться медь, бронза и некоторые другие пластичные металлы.

Расположение полос из антифрикционного материала зависит от формы детали, типа движения в паре трения (возвратно-поступательное или вращательное) и направления вектора скорости относительного скольжения. Для плоских деталей при возвратно-поступательном движении полосы располагают параллельно друг другу в направлении, перпендикулярном вектору скорости относительного скольжения. Для деталей больших габаритов, длина и ширина которых соизмеримы, может использоваться шахматная схема расположения антифрикционных полос. В случае вращательного движения плоской поверхности полосы целесообразно располагать радиально относительно оси вращения детали. Для деталей типа тел вращения при возвратно-поступательном движении в паре трения полосы наносятся в виде колец, а при вращательном движении – в виде полос, перпендикулярных вектору скорости относительного скольжения.

Полосчатые покрытия обеспечивают снижение внутренних напряжений и, как следствие, уменьшение деформации нежестких деталей за счет разделения температурных потоков в покрытии. При этом относительно пластичные полосы из антифрикционного материала выполняют роль температурных барьеров и одновременно являются демпферами, компенсирующими увеличение или уменьшение линейных размеров покрытия при его остывании под влиянием разных коэффициентов термического расширения покрытия и основы, а также изменение объема конденсата вследствие происходящих в нем субструктурных изменений. К преимуществам полосчатых покрытий можно отнести и повышение износостойкости за счет поступления твердой смазки в зону трения.

Формирование полос покрытия осуществляется с помощью накладных масок (экранов специальных устройств) с прорезями соответствующих размеров. Наряду с функцией формообразования, маски выполняют роль холодильных элементов, обеспечивая дополнительный отвод теплоты от поверхности детали и снижая тем самым интегральную температуру поверхности.

Для формирования мультислойных полосчатых покрытий была разработана технология поочередно-последовательного их нанесения в вакууме [3]. Данная технология заключается в том, что участки из различных материалов получают путем многократного поочередного нанесения слоев материалов при периодическом движении детали между катодами – испарителями из наносимых материалов, работающими в импульсном режиме. Периодическое движение детали между катодами-испарителями из наносимых материалов, согласованное с импульсным режимом их работы строгой математической зависимостью, позволяет обеспечить необходимую точность процесса нанесения покрытия с участками из различных материалов по предлагаемой технологии при любых схемах движения детали между катодами, а также избежать перегрева и нежелательных структурных превращений материала основы; уменьшить внутренние напряжения в покрытии.

Толщина слоя покрытия, наносимого за один цикл, должна лежать в строго определенных пределах. При этом нижний предел определяется толщиной нескольких атомарных слоев (2-3 и более), позволяющих обеспечить

сплошность покрытия. Верхний предел толщины слоя для металлов IV–VI групп таблицы Менделеева и их карбидов, нитридов и карбонитридов равен $50-60a$, где a – период кристаллической решетки. При превышении этой толщины происходит формирование нежелательной для износостойких покрытий столбчатой структуры. Для реализации разработанной технологии были сконструированы специальные устройства, обеспечивающие оптимальную кинематику движения деталей в процессе нанесения покрытий.

1. Емельянов В.А., Иванов И.А., Мрочек Ж.А. Вакуумно-плазменные способы формирования защитных и упрочняющих покрытий. – Мн.: Издательство НПО «Интеграл», 1998. – 285 с.
2. Фролов И.С., Мрочек Ж.А., Иващенко С.А. Повышение триботехнических характеристик деталей из немагнитных материалов нанесением композиционных вакуумно-плазменных покрытий // Материалы международной 53-й науч.-техн. конф. проф., препод., научн. работн. и аспирантов Белорус. госуд. политехн. академии: В 4-х ч. – Мн., 1999. – Ч. 1 – С. 179.
3. Фролов И.С. Формирование вакуумно-плазменных мультислойных композиций для особых условий эксплуатации // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки: Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф., Минск, 8-9 апреля 2015 г. – Минск: Бизнесофсет, 2015. – С. 178-180.

УДК 621.9

УПРАВЛЕНИЕ НАСЛЕДОВАНИЕМ СВОЙСТВ И ОБЕСПЕЧЕНИЕМ КАЧЕСТВА МАТЕРИАЛОВ И ПОВЕРХНОСТЕЙ ИЗДЕЛИЙ В РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЯХ

**Чижик С.А.¹, Кузнецова Т.А.¹, Бородавко В.И.², Хейфец М.Л.²,
Грецкий Н.Л.², Батаев А.А.³, Панин А.В.⁴, Колмаков А.Г.⁴, Кречетов А.А.⁵,
Блюменштейн В.Ю.⁵**

- 1) Институт тепло- и массообмена имени А.В.Лыкова НАН Беларуси,
- 2) ОАО «НПО Центр» НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь;
- 3) Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Российская Федерация
- 4) Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН, г. Томск, Российская Федерация
- 5) Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф.Горбачева, г. Кемерово, Российская Федерация

Проблемы в разработке ресурсосберегающих технологий производства изделий всегда комплексные. Невозможно рационально обеспечить качество материалов и поверхностей для надежной эксплуатации изделий, только на

отдельных операциях технологического процесса производства или стадиях при их использовании, а надо рассматривать производственно-технологические и обслуживающе-эксплуатационные этапы жизненного цикла изделий в целом. Сбережение на одной операции или стадии, может привести к потере материальных ресурсов и дополнительным затратам труда на других.

В этой связи необходимо анализировать передачу эксплуатационных свойств от операции к операции, то есть исследовать технологическую наследственность и управлять передачей свойств для обеспечения качества в жизненном цикле изделий. При этом следует рассматривать всю совокупность технологических воздействий на операциях обработки и эксплуатационных факторов на стадиях эксплуатации, а также учитывать их взаимовлияние, приводящие к самоорганизации процессов формирования свойств изделий.

В современных условиях требуется с единых позиций самоорганизации физических явлений и наследования параметров качества функциональных элементов, рассматривать проектные и производственные этапы, эксплуатацию и обслуживание в **жизненном цикле изделий**, поэтому:

1. На основе синергетической концепции предложено при проектировании методов обработки изделий из различных конструкционных материалов учитывать доминирование свойств отношений технологических решений, описывающих обеспечение контролируемых параметров технической системы. С этих позиций, рассмотрено **проектирование** механических и термических операций технологических процессов, использующих различные воздействия, в том числе и концентрированными потоками энергии для поверхностной упрочняющей и размерной обработки конструкционных материалов.

2. Применена синергетическая концепция, позволившая сформировать комплексную математическую модель технологического наследования эксплуатационных показателей качества, описывающую различные режимы операций обработки, стадий эксплуатации и их устойчивость при производстве и применении изделий. Использование математической модели при компьютерном проектировании предоставило возможности по оптимизации режимов для сокращения затрат при **изготовлении и восстановлении** ответственных деталей машин.

3. Рассмотрены различные модели утраты работоспособности узлов трения машин и исчерпания ресурсных показателей материалов и поверхностей сопряженных деталей, на базе комплексной математической модели наследования показателей качества в жизненном цикле изделия, описывающей различные режимы поведения при производстве и применении конструктивно-сложных технических систем. Это позволило сформировать методики и разработать средства **контроля качества** определяющих параметров в жизненном цикле изделий.

4. Технологическое наследование взаимозависимых параметров качества изделия представлено совокупностью физических явлений переноса. Рассмотрение технологической цепочки «режим обработки – состояние

поверхностного слоя - эксплуатационные свойства», определило описание сложных взаимосвязей процессов формирования поверхностных слоев деталей в виде функционалов. Разработанные модели технологического наследования на основе системы функционалов, дают возможности предлагать способы и режимы **управления** формированием параметров качества в жизненном цикле изделий.

5. Проведено мультимасштабное изучение технологической цепочки процессов многоуровневого **обеспечения** параметров качества в жизненном цикле изделий: от наноструктур тонких пленок и слоев методами атомно-силовой микроскопии, через микро- и мезо-, физико-механические и геометрические параметры качества материалов и поверхностей деталей, к макрохарактеристикам и свойствам изделий специального назначения. Полученное описание позволило не только проследить закономерности технологического наследования, но и применить их, как для пооперационного контроля с использованием физических методов, так и для проектирования технологий, обеспечивающих высокую долговечность деталей и безотказность машин.

В результате для машиностроительных предприятий разработаны ресурсосберегающие технологии, использующие концентрированные потоки энергии для изготовления и восстановления деталей машин, а также оборудование, средства оснащения и контроля эксплуатационных параметров качества в технологических процессах. Теоретические результаты нашли широкое применение при проектировании, производстве и применении техники различного назначения и активно используются в учебном процессе при подготовке инженерных и научных кадров.

УДК 621.923

ВЛИЯНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ПЛАЗМЕННЫХ КАРБИДНЫХ ПОКРЫТИЙ

Шаройкина А.В., Ярмак Ю.Ю.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Одной из причин, снижающих надежность и долговечность деталей машин, и вызывающих преждевременный выход из строя является износ рабочих поверхностей. Данная задача может решаться путём повышения твердости и микротвёрдости поверхностей, особенно у деталей, работающих в условиях абразивного износа. Реальным способом обеспечения необходимых физико-механических свойств поверхностей и повышения их надежности и долговечности, в том числе и износостойкости, является нанесение защитных покрытий из твердых самофлюсующихся сплавов, карбидов, боридов и других тугоплавких материалов.

В данной работе были проведены исследования износостойкости плазменных карбидных покрытий из плакированного карбида титана никель-молибден-фосфорной оболочкой (TiC-Ni-Mo-P) с содержанием TiC 65% и 35% Ni-Mo-P без термической обработки, а также с последующей термической обработкой лазерным и электронным лучами. Покрытие, полученное из плакированного порошка, характеризовалось относительно низкой пористостью (до 15%), высокой прочностью сцепления с подложкой (до 38 МПа), наличием относительно мягкой матрицы (HV_{50} до 17000 МПа), не свойственной покрытиям из никеля, с закрепленными в ней твердыми включениями карбида титана (HV_{50} до 30000 МПа) [1].

Термическая обработка покрытий осуществлялась лазером ($P = 0,8$ кВт) и электронным лучом ($P = 5$ кВт). В результате варьирования параметров лазерной обработки было достигнуто проплавление покрытия с частичным оплавлением подложки. Это приводило к значительному снижению пористости покрытий, повышению прочности сцепления, изменению структурных составляющих покрытия за счет частичного перемешивания покрытия с подложкой и снижению микротвердости покрытия в зоне оплавления. Оплавление осуществлялось в виде «сетки» с чередованием оплавленных и неоплавленных участков с шагом 2 мм. Более широкие технологические возможности электронного луча позволили обеспечить сплошное оплавление покрытия. При оплавлении покрытий электронным лучом наблюдалось значительное сужение интервала разброса микротвердости покрытий [2].

Сравнительные исследования износостойкости покрытий проводились в условиях сухого трения с использованием пары трения штифт-шайба ($v=1,0$ м/с; $P=0,5 - 2,0$ МПа). В качестве контртела использовалась закаленная шайба из стали 45. Результаты исследований представлены на рисунке 1.

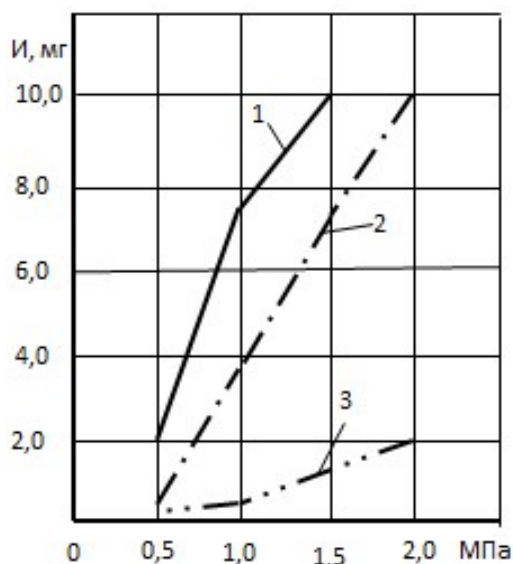


Рисунок 1 – Зависимость износа покрытия от удельного давления:
 1 – без последующей термической обработки; 2 – оплавленное лазером; 3 – оплавленное электронным лучом

Лучшую износостойкость в процессе исследований показали покрытия прошедшие последующую термическую обработку лазером и электронным лучом. Это объясняется существенным изменением физико-механических свойств покрытий в результате оплавления. Состояние поверхностей трения образцов после испытаний на износ представлено на рисунке 2. В процессе исследований было также отмечено значительное снижение коэффициента трения у этих покрытий по сравнению с покрытием без термической обработки.

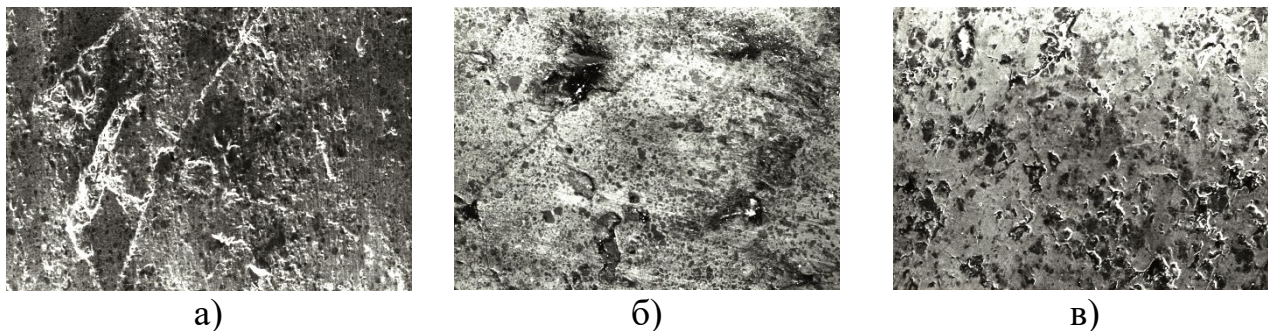


Рисунок 2 – Состояние поверхности трения образцов после испытаний на износ, РЭМ изображение (x 200): а – без последующей термической обработки; б – оплавленное лазером; в - оплавленное электронным лучом

Более высокая износостойкость покрытий после термической обработки электронным лучом объясняется тем, что данный метод позволял оплавливать поверхность и создавать более прочный и твёрдый слой, в то время как лазерная обработка приводила к частичному перемешиванию покрытия с подложкой и снижала твёрдость покрытия. Наличие в металлической матрице легирующих элементов, а именно, фосфора, молибдена и никеля, также положительно влияет на физико-механические свойства плазменных покрытий.

1. Ярмак Ю.Ю. К вопросу термической обработки твёрдосплавных карбидных покрытий. Тезисы докладов 33-ей Международной научно-технической конференции «Технология–Оборудование–Инструмент–Качество», Минск, БНТУ. – 2018, с. 179–181.
2. Ярмак Ю.Ю. Модификация твёрдосплавных карбидных покрытий электронным лучом. Тезисы докладов 33-ей Международной научно-технической конференции «Технология–Оборудование–Инструмент–Качество», Минск, БНТУ. – 2018, с. 182–184.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСА РЕЖУЩЕГО ТВЕРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА, УПРОЧНЕННОГО АЭРОДИНАМИЧЕСКИМ ЗВУКОВЫМ МЕТОДОМ, ОТ СКОРОСТИ РЕЗАНИЯ

Шелег В.К.¹, Жигалов А.Н.², Кравчук М.А.¹

1) Белорусский национальный технический университет, Минск,

2) Барановичский государственный университет, Барановичи,
Республика Беларусь.

Созданный новый метод аэродинамического звукового упрочнения (АДУ), основанный на нагреве упрочняемого твердосплавного режущего элемента до температуры 10...30% температуры спекания и воздействии на него акустических волн от резонансной амплитуды вынужденных колебаний на звуковых частотах, образованных от колебания двух параллельно расположенных поверхностей резонатора под действием воздушного потока, обеспечивает наряду с сохранением исходной высокой твердости повышение ударной вязкости на 19...23% [1].

Выполнены исследования влияния износа твердых сплавов Т15К6, Т5К10 и ВК8, упрочненных АДУ, при обработке материалов из стали 45 и чугуна СЧ20 на режимах резания: для сплава ВК8 – глубина резания $t=3,0$ мм, подача на зуб $s_z=0,21$ мм/зуб; для сплавов Т5К10, Т15К6 – глубина резания $t=1,0$ мм, подача на зуб $s_z=0,13$ мм/зуб; при скоростях резания, указанных на рисунках 1 и 2.

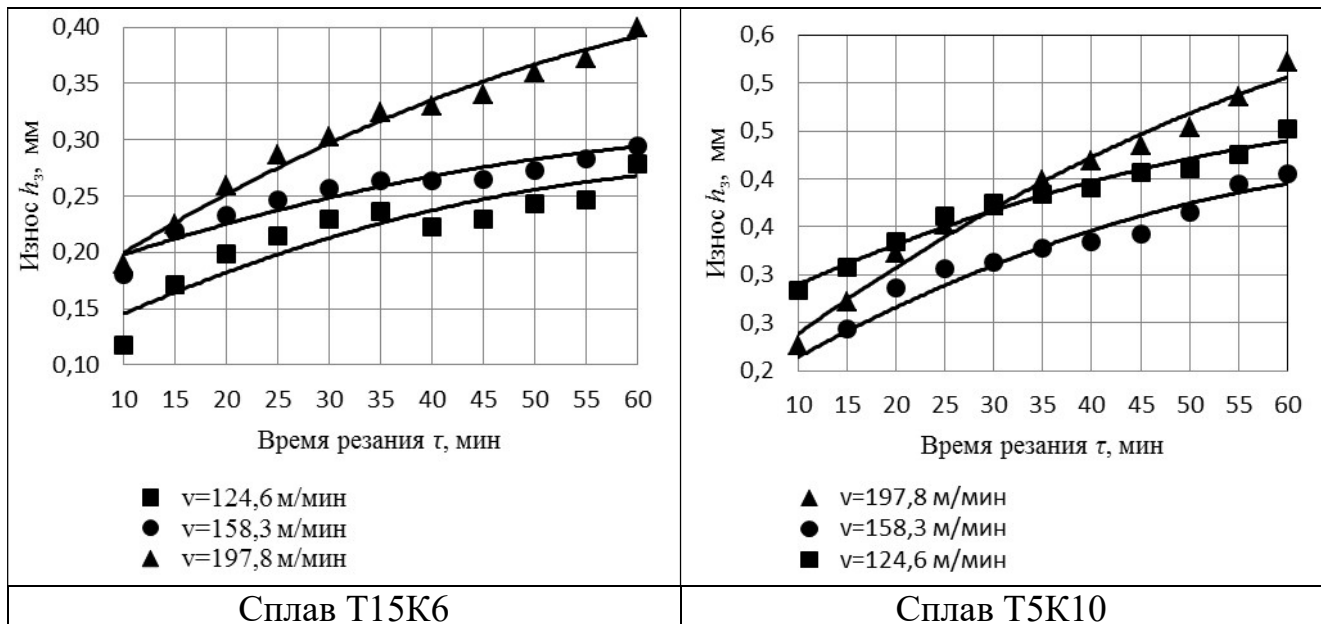


Рисунок 1 – Зависимость износа по задней поверхности h_3 твердых сплавов, упрочненных АДУ, при фрезеровании стали 45 от времени и скорости резания

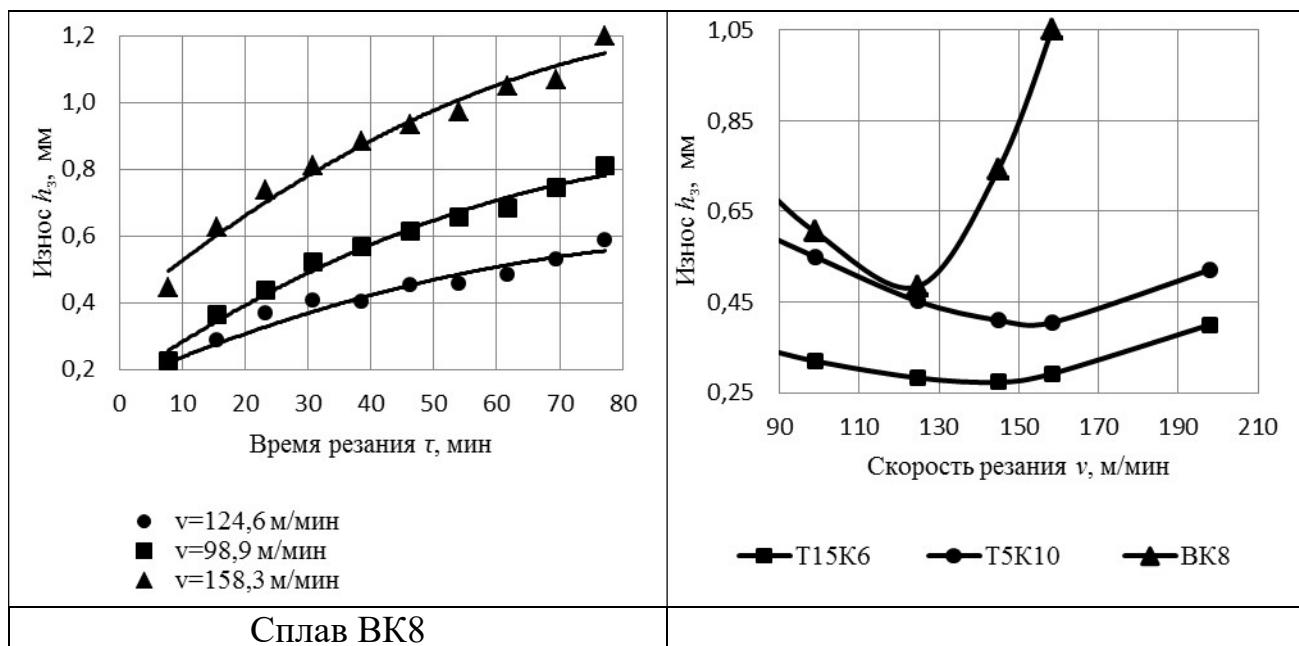


Рисунок 2 – Зависимости износа по задней поверхности h_3 при фрезеровании пластинами из сплавов BK8, T15K6 и T5K10, упрочненных АДУ, от скорости резания

Из анализа графиков (рисунки 1-2) следует, что износ по задней поверхности h_3 от времени резания в зоне устоявшего резания при разных скоростях и сплавах имеет монотонно увеличивающийся характер. Для всех сплав износ от скорости резания носит явно экстремальный, причем для всех исследуемых сплавов, вогнутый характер. Существуют такие оптимальные скорости резания, при которых обеспечивается минимальная величина износа твердосплавного инструмента, упрочненного АДУ: для сплава BK8 при скорости резания $v = 105...125$ м/мин, для T5K10 при $v = 150...160$ м/мин, для T15K6 при $v = 140...150$ м/мин.

Результаты экспериментальных сравнительных исследований комплексного влияния режимов резания на износ твердосплавного инструмента, упрочненного АДУ, показали, что на оптимальных технологических режимах резания обеспечивается повышение ресурса режущего твердосплавного инструмента, упрочненного методом АДУ, при работе в условиях прерывистого резания в 2,1...4,2 раза – для пластин T5K10, H30, MC131, в 2,0...6,7 раза – для пластин T15K6, H10, MC111, в 1,6...3,5 раза – для пластин BK8, B35.

Метод АДУ наиболее эффективен для упрочнения твердосплавного инструмента, работающего при процессах прерывистого резания на оптимальных технологических режимах обработки.

1. Жигалов А.Н. Теоретические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания : монография / А.Н. Жигалов, В. К. Шелег. – Могилев: МГУП, 2019. – 213 с.

ЭВОЛЮЦИЯ МИКРОТВЕРДОСТИ ПОКРЫТИЯ ИЗ БРОНЗЫ В ПРОЦЕССЕ ЕГО НАНЕСЕНИЯ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ

Шелег В.К., Кардаполова М.А., Луцко Н.И., Лапковский А.С., Пилецкая Л.И.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Лазерная наплавка является весьма перспективным методом нанесения покрытий и интересным объектом для исследователей. В силу своей специфики лазерная наплавка предъявляет особые требования к качеству покрытий, которое характеризуется различными параметрами, такими как микроструктура, распределение микротвердости, диффузия и т.д. [1].

В данной работе исследовалось распределение микротвердости в покрытии из бронзы ПГ-19М-01 на различных этапах его формирования методом лазерной наплавки, от единичных валиков до двухслойной структуры. Для нанесения покрытий применялся лазерный технологический комплекс, включавший газовый CO_2 лазер непрерывного действия «Комета 2» и координатную систему, обеспечивавшую необходимые перемещения наплавочной головки относительно образцов. Наплавка выполнялась на образцы из стали 45, мощность лазерного излучения составляла 1000 Вт, грануляция порошка – 20-80 мкм, расход порошка – 12 г/мин. Исследования микротвердости проводились на поперечных шлифах покрытий по глубине слоя. Для измерения микротвердости использовался микротвердомер ПМТ-3, нагрузка на индентор составляла 100 г.

Типичные результаты исследования микротвердости единичных валиков, одно- и двухслойных структур показаны на рисунках 1-3. Анализируя полученные результаты для единичных валиков (рисунок 1) и однослойного покрытия (рисунок 2), можно отметить, что микротвердость по глубине валика и по глубине однослойного покрытия распределены достаточно равномерно, что свидетельствует о равномерном перемешивании материала покрытия в ванне расплава и равномерном распределении фаз. Максимальная микротвердость для единичных валиков достигает 4700 МПа, а для однослойного покрытия – 3600 МПа. С увеличением шага наплавки микротвердость однослойного покрытия из бронзы увеличивается.

Для двухслойного покрытия (рисунок 3) можно выделить две зоны микротвердости по глубине покрытия. Зону со средней микротвердостью 2300 МПа, расположенную ближе к основе, которая, вероятно, связана с первым слоем покрытия. И зону со средней микротвердостью 2000 МПа, расположенную дальше от основы, которая, вероятно, связана со вторым слоем покрытия. В пределах каждой из этих зон микротвердость распределена равномерно, без резких колебаний. Величина микротвердости между этими зонами меняется плавно. В обеих зонах микротвердость увеличивается при росте шага наплавки.

Как можно заметить, в процессе формирования покрытия из бронзы от единичных валиков до двухслойной структуры, микротвердость покрытия уменьшается на каждой последующей стадии нанесения. Особенно хорошо это заметно на графиках зависимости средней микротвердости покрытия из бронзы от скорости наплавки на всех этапах нанесения (рисунок 4).

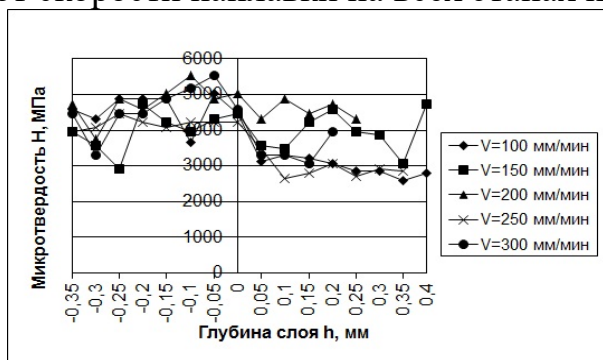


Рисунок 1 – Распределение микротвердости по глубине единичного валика

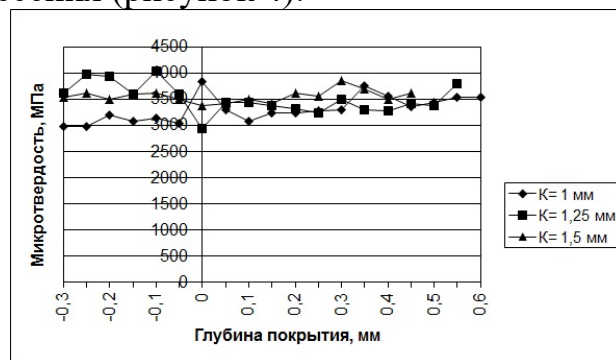


Рисунок 2 – Распределение микротвердости по глубине однослойного покрытия

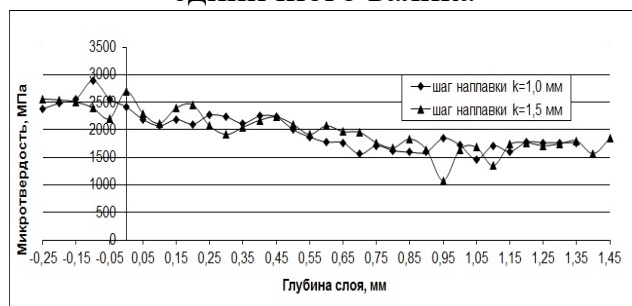


Рисунок 3 – Распределение микротвердости по глубине двухслойного покрытия

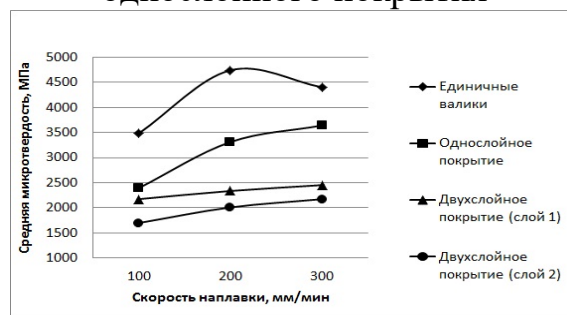


Рисунок 4 – Зависимости микротвердости от скорости наплавки

На начальной стадии образования покрытия, наплавке единичных валиков, покрытие из бронзы имеет высокую микротвердость, что связано с быстрым охлаждением валика и фиксацией в нем высокотемпературных фаз, а также с диффузией в валик железа из основы. Микротвердость однослойного покрытия из бронзы уже значительно ниже. Этому способствуют повторные нагревы при наплавке соседних валиков, вызывающие укрупнение структуры и образование менее высокотемпературных фаз. Повторяющиеся нагревы при наплавке второго слоя покрытия приводят к еще большему укрупнению структуры первого слоя покрытия и к большему содержанию в нем низкотемпературных фаз. Микротвердость первого слоя двухслойного покрытия получается меньше микротвердости однослойного покрытия из бронзы. Второй слой двухслойного покрытия имеет еще более низкую микротвердость, так он формируется из практически чистой бронзы, вследствие почти полного отсутствия диффузии в него железа из основы.

1. Vilar, R. Laser cladding/ R. Vilar// Journal of laser applications. – 1999. – V. 11. – I. 2. – P. 64-79.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛА МЕТОДОМ ПОПЕРЕЧНОЙ ПРОКАТКИ

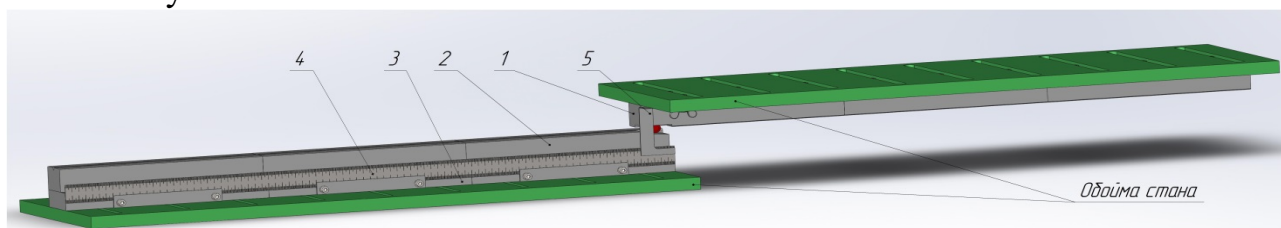
Щукин В.Я.¹, Дубенец С.С.²

- 1) Белорусский национальный технический университет;
2) Физико-технический институт НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь

Определение пластических свойств методом поперечной прокатки заключается деформировании цилиндрического образца плоскопараллельным инструментом [1]. Этот метод позволяет локально (то есть строго по оси заготовки) определить пластических свойств металла. Точность данного метода, как показали исследования [1], превосходит точность широко применяемого метода растяжения цилиндрического образца.

При поперечной прокатке плоскими плитами цилиндрического образца с отношением длины к диаметру более 2 в его центральном поперечном сечении реализуется плоско-деформированное состояние (задача 2D). В материальной точке на оси образца возникают растягивающие напряжения, величина которых определяется степенью обжатия [2]. Деформации на оси накапливаются пропорционально угловому повороту образца. Таким образом, при постоянной степени обжатия, т.е. при постоянном расстоянии между плоскими инструментами, напряжения на оси не изменяются от начала деформации до момента разрушения, а деформации на оси накапливаются пропорционально перемещению образца вдоль инструмента. При достижении деформацией предельной величины происходит вскрытие осевой полости.

При прокатке дискообразного образца с отношением длины к диаметру менее 2 задачу необходимо рассматривать как объемную. Параметры напряжений и деформаций в этом случае определяют методом конечных элементов с применением вычислительной техники [3], поскольку задачи 3D аналитически решать не удастся. Для определения пластических свойств металлов и сплавов был сконструирован инструмент МШЕЛ 5.903.00.000, представленный на рисунке 1. Инструмент состоит из набора верхних и нижних деформирующих инструментов, подкладных плиток, линейки с миллиметровой шкалой и указателя.



- 1 – верхний инструмент, 2 – нижний инструмент,
3 – подкладные плитки, 4 – линейка, 5 – указатель

Рисунок 1 – Инструмент определения пластических свойств

Прокатываемый образец представляет собой тело вращения типа «Диск», диаметром 15 мм и толщиной 3,8 мм, который показан на рисунке 2, а. Образец помещается в заходной участок инструмента и фиксируется за счёт скоса кромки нижнего адаптера (рисунок 2, б). Указатель устанавливается в нулевое положение по шкале линейки. При прокатке в образце при определённом количестве оборотов возникает осевая трещина. Пройденный путь от начала деформации до появления осевой трещины оценивается визуально по шкале линейки. Прокатка осуществляется с различной степенью обжатия. Регулировка степени обжатия производится путём уменьшения закрытой высоты прокатного стана и установкой подкладных плиток различного исполнения.

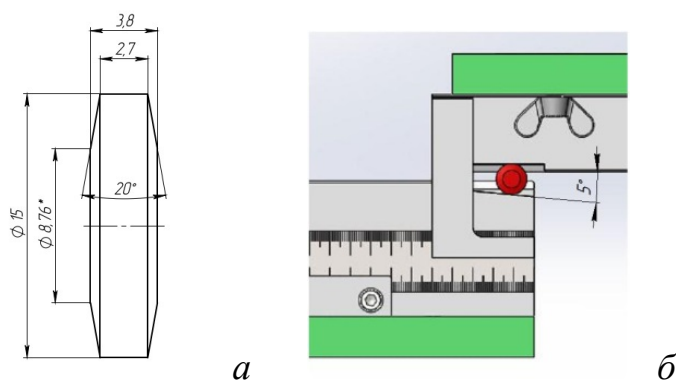


Рисунок 2 – Дискобразный образец (а), заходной участок инструмента (б)

Данный метод и конструкция инструмента позволяет также определить ресурс пластичности изделий, полученных методом поперечно-клиновой прокатки, когда стоит задача установить остаточный ресурс пластичности прокатанных заготовок. В этом случае из поковок в исследуемых местах вырезаются дискообразные образцы, и результаты их прокатки в холодном состоянии сравниваются с аналогичными результатами прокатки дискообразных образцов из исходного металла. Сопоставляя количество циклов до вскрытия полости, определяемое визуально в одном и другом случае, легко и точно определяют ресурс пластичности, то есть величину остаточной пластичности готового изделия.

1. Красневский, С.М. Разрушение металлов при пластическом деформировании / С.М. Красневский, Е.М. Макушок, В.Я. Щукин. – Минск: Наука и техника, 1983. – 173 с.
2. Цилиндрический образец для определения пластических свойств материала при прокатке: а.с. 538272 СССР, МКИ G 01 N 1/28 / Л.В. Гузевичус, А.С. Дубень, С.М. Красневский, Е.М. Макушок, Л.И. Стенько, В.Я. Щукин. – № 2137996, заявл. 27.05.1975; опубл. 05.12.1976 // Открытия. Изобрет. – 1976. – № 45. – С. 159.
3. Кожевникова, Г.В. Пластические свойства металлов и сплавов: феноменологическая деформационная теория разрушения при пластическом течении / Г.В. Кожевникова, В.Я. Щукин. – Минск: Беларус. навука, 2021. – 277 с.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ ТОЧНЫХ ЗАГОТОВОК ЛОПАТКИ АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Щукин В.Я.¹, Кожевникова Г.В.^{1,2}, Кожевников Д.А.¹

1) Белорусский национальный технический университет;

2) Физико-технический институт НАН Беларуси

Минск, Республика Беларусь

Основные требования, предъявляемые к авиационным сплавам: высокая прочность, низкий удельный вес и жаропрочность материалов для деталей двигателей. Наибольшее применение среди жаропрочных сплавов получили сплавы на основе никеля. Они подразделяются на деформируемые, литые и порошковые. Литые сплавы обладают более высокой жаропрочностью, но низкой обрабатываемостью резаньем. Деформируемые сплавы обладают меньшей жаропрочностью, но более высокими механическими свойствами, обрабатываемостью резаньем, и главное высокой надежностью и относительно низкой себестоимостью. По этой причине деформируемые сплавы получили наибольшее применение при производстве лопаток и дисков авиационных двигателей. Их рабочая температура находится в диапазоне 760–980°C, длительная прочность 700 МПа при 1000 часах работы.

Надежность и ресурс лопаток (рисунок 1) определяют надежность и ресурс всего двигателя. Качество лопаток зависит не только от материала и конструкции, но и во многом от технологии изготовления. Обрыв лопатки при работе двигателя недопустим, так как он приводит к авиационным катастрофам.

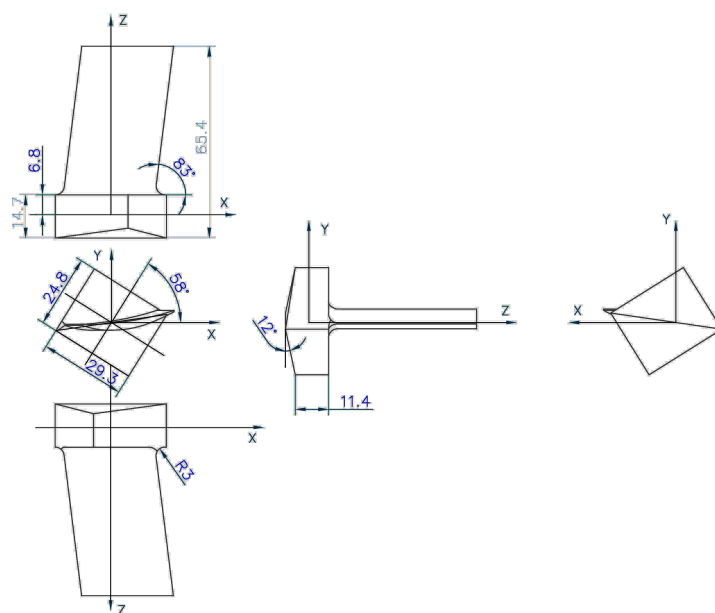


Рисунок 1 – Чертеж лопатки авиационного двигателя из жаропрочного деформируемого сплава на основе никеля

Технология производства лопаток авиационных двигателей включает:

- предварительную термообработку для повышения пластических свойств сплава;
- нанесение защитной обмазки на заготовку;
- нагрев заготовки;
- штамповка одним или сочетанием методов: в условиях сверхпластичности и/или методом изотермической штамповки;
- механическая обработка;
- термическая обработка с целью повышения жаропрочности.

Нанесение покрытий на заготовку осуществляется с целью предотвращения ее окисления и также в качестве смазки при штамповке. Предварительная термообработка может осуществляться методом контролируемой динамической рекристаллизации, совмещенной с определенными режимами предварительной горячей деформации, способствующие значительному измельчению зерна. В итоге мелкодисперсная структура сплава позволяет осуществить штамповку лопатки в режиме сверхпластичности. Сверхпластичность – это явление аномального повышения пластических свойств сплава за счет атомарной диффузии и проскальзывания зерен относительно друг друга. Процесс протекает при строгом соблюдении диапазона температур и скоростей деформаций. При выходе из этого диапазона эффект сверхпластичности исчезает.

Изотермическая штамповка осуществляется с подогревом штампа до температуры штампуемого сплава (до 1200°C). Подогрев штампа, как правило, осуществляют токами высокой частоты. Скорость деформации при изотермической штамповке ниже, чем в традиционных горячих процессах обработки металлов давлением. Подогрев штампа в этом случае предотвращает остывание заготовки и, как следствие, предотвращает рост усилия штамповки и снижение пластических свойств сплава. Оба способа – изотермическая штамповка и штамповка в условиях сверхпластичности могут реализовываться в одном процессе. Заключительная термообработка осуществляется для придания сплаву более высоких жаропрочных свойств.

Недостаток существующей технологии штамповки лопаток авиационных двигателей заключается в перерасходе металла из-за отсутствия предварительного его перераспределения. Мировой опыт показывает, что наиболее прогрессивным способом перераспределения металла в заготовке перед ее штамповкой при крупносерийном и массовом производстве является метод поперечной прокатки. Он позволяет получать высокоточную заготовку без снижения температуры ее нагрева. Способ поперечной прокатки производительный и отличается высокой стойкостью инструмента – до 1 млн заготовок. Основное его преимущество при прокатке жаропрочных никелевых сплавов локальный контакт инструмента с заготовкой, что предотвращает потерю тепла заготовкой. Увеличивая скорость прокатки можно добиваться увеличения температуры заготовки за счет превращения работы деформации в тепло и, тем самым, переводить процесс в условие сверхпластичности.

ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРЫ ФЕРРОАБРАЗИВНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОРОШКОВ НА МОРФОЛОГИЮ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОГО СПЛАВА ТК-15 ПРИ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ

Якубовская С.В.¹, Лебедев В.Я.², Бабич В.Е.²

- 1) Белорусский национальный технический университет Минск, Республика Беларусь;
- 2) Физико-технический университет, Минск, Республика Беларусь;

Исследование морфологии поверхности ферроабразивных композиционных порошков применяемых при магнитно-абразивной обработке (МАО) показало, что единичными режущими инструментами в композиционном на основе феррита меди и плакированном Ферабраз 310 порошках являются вершины и ребра зерен карбида кремния, а режущими инструментами в ферроабразивном порошке Ферабраз 310 – округлые вершины частиц и выступы на их поверхности.

МАО пластины из твердого сплава ТК-15 плакированным порошком Ферабраз 310 приводит к ее износу и формированию на поверхности характерного микрорельефа. Микрорельеф на поверхности пластины представляет собой совокупность гребней со сглаженными вершинами и впадин между гребнями, которые ориентированы в направлении обработки. На фоне гребней и впадин расположены углубления, образованные выкрашивающимися кристаллами карбида титана (рисунок 1, а).

Применение в качестве ферроабразивного материала композиционного порошка на основе феррита меди с равномерным расположением зерен карбида кремния, так же, как и при использовании плакированных карбидом кремния частиц порошка Ферабраз 310 приводит к износу пластины твердого сплава и формированию на ее поверхности микрорельефа. Морфология поверхности пластины представляет собой, как и в случае ее обработки плакированным порошком, совокупность гребней со сглаженными вершинами и пологими впадинами между ними, ориентированными в направлении обработки (рисунок 1, б). Однако, в отличие от пластины обработанной плакированным порошком, на поверхности пластины, обработанной композиционным порошком отсутствуют углубления от выкрошившихся кристаллов карбида титана.

Обработка пластин твердого сплава ТК-15 ферроабразивным порошком Ферабраз 310 приводит к износу пластины и формированию на ее поверхности характерного микрорельефа. Морфология поверхности пластины представляет собой совокупность округлых выступов и впадин между ними (рисунок 1, в). Из полученных данных следует, что обработка пластин твердого сплава ТК-15 ферроабразивными порошками с различной структурой приводит к формированию на поверхности пластин микрорельефов различной морфологии. Анализ морфологии поверхности пластин твердого сплава после

обработки рассмотренными выше ферроабразивными порошками показал, что наиболее интенсивное воздействие на поверхность твердого сплава оказывает плакированный частицами карбида кремния порошок Ферабраз 310. Это воздействие проявляется в различной степени разрушения кристаллов карбида титана.

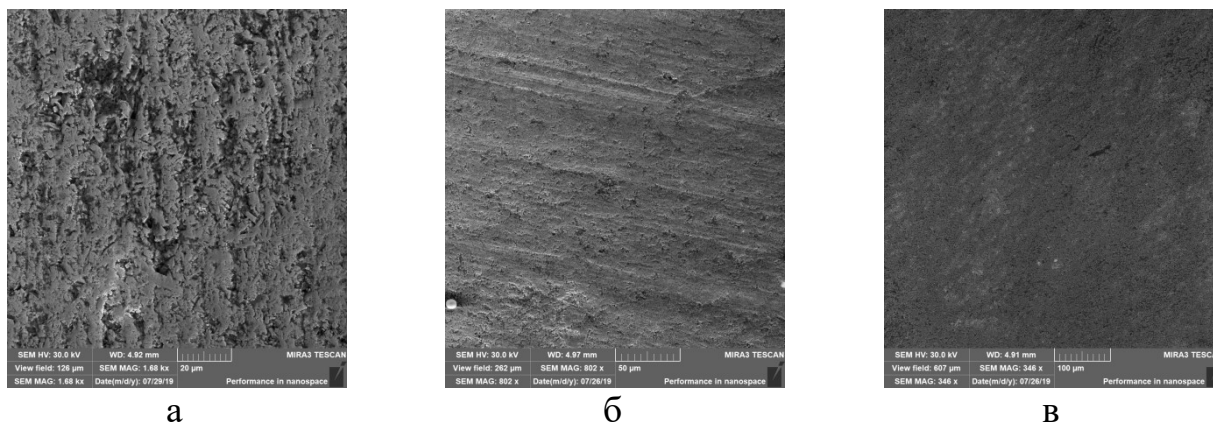


Рисунок 1 – Морфология поверхности пластины твердого сплава ТК-15 после МАО с длительностью обработки 15 мин:

- а - плакированным порошком Ферабраз 310;
- б - ферроабразивным композиционным порошком на основе феррита меди;
- в - порошком Ферабраз 310.

В плакированном ферроабразивном порошке на поверхности частицы находится значительно больше зерен карбида кремния, чем в композиционном порошке на основе феррита меди, а вершины зерен карбида кремния выступают на большую высоту над матричным (магнитным) материалом. Острые вершины и грани зерен карбида кремния, твердость которого больше твердости карбида титана, внедряются в твердый сплав, формируя борозды и его поверхность.

После обработки пластин плакированным Ферабраз 310 и композиционным на основе феррита меди ферроабразивными порошками зерна карбида титана частично разрушаются, а прослойка кобальтового сплава между ними изнашивается и зерна карбида титана выступают над поверхностью твердого сплава.

В ферроабразивном порошке Ферабраз 310 отсутствуют острые кромки и выступы на поверхности, а твердость сплава и частиц интерметаллидов в нем меньше, чем твердость зерен карбида кремния. Вследствие этого обработка поверхности пластин твердого сплава ТК-15 не приводит к разрушению зерен карбида титана и износу прослоек кобальтового сплава; вершины зерен карбида титана овализованы и не выступают над поверхностью.

Таким образом, изменение структуры ферроабразивных композиционных порошков изменяет интенсивность воздействия обработки на поверхность твердого сплава ТК-15 и приводит к формированию различных микрорельефов на поверхности пластин.

СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В КЕРАМИЧЕСКИХ ПОРОШКАХ ДЛЯ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ТЕРМОДИФФУЗИОННОЙ МОДИФИКАЦИИ

Яцкевич О.К., Девойно О.Г., Кардаполова М.А.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Применение защитных плазменных керамических покрытий на деталях машин перспективно и экономически оправдано как при эксплуатации в условиях действия агрессивных сред, высоких температур, так и в тех случаях, когда определяющим ресурс работы детали является только один фактор – величина износа.

С этой точки зрения высокая износостойкость может быть достигнута при использовании в качестве базового материала, несущего основные эксплуатационные нагрузки – **оксида алюминия**. Выбор объясняется его широким применением в области теплостойких, защитных и износостойких покрытий, а также низкой стоимостью и доступностью исходного сырья [1]. Однако применение покрытий из оксида алюминия в чистом виде не всегда возможно из-за низкой прочности сцепления с материалом основы, высокой хрупкости и остаточных напряжений, способствующих преждевременному растрескиванию и отслаиванию покрытия в процессе эксплуатации.

Наиболее эффективным способом повышения эксплуатационных характеристик плазменных покрытий является применение композиционных порошков для напыления [2], в качестве метода получения которых в данной работе предложен метод термодиффузионной модификации. В качестве модифицирующих элементов выбраны **нитриды** (TiN, TaN AlN, Si₃N₄ и др), что открывает новые области применения композиционных покрытий за счет реализации уникальных свойств, присущих данным соединениям. Они являются тугоплавкими, устойчивы при высоких температурах, придают изделиям твёрдость, коррозионную стойкость. Для проведения термодиффузионной обработки использовали лабораторную установку на основе печи СНОЛ. Модифицирование керамического порошка проводили во вращающемся в печи герметичном контейнере при условии обеспечения максимального перемешивания смеси и ее неспекаемости, а также равномерности процесса насыщения при температурах 600–1000°C и выдержках 2–6 ч [3]. С целью активации процесса модифицирования в состав насыщающей смеси вводили активатор – хлористый аммоний NH₄Cl, склонный к распаду при нагреве.

В ходе проведенных экспериментов установили, что при термодиффузионной обработке на выбранных режимах происходит изменение морфологии и свойств порошков. Исследование структуры композиционных

порошков на сканирующем электронном микроскопе показало различие в форме до и после термодиффузионной обработки порошков оксида алюминия с добавками нитридов AlN, VN, TaN (рисунки 1-3).

Частицы исходного порошка оксида алюминия имеют неправильную форму, определяемую способом получения глинозема в ходе механического измельчения. Размер частиц основной фракции составляет 60–80 мкм. В свою очередь, частицы модифицированных порошков представляют собой спеченные конгломераты размером 80-100 мкм с развитой поверхностью. Основную часть составляет оксид алюминия, а на его поверхности равномерно распределены мелкодисперсные (5-10 мкм) частицы нитридов (рисунки 1-3).

При термодиффузионной обработке порошка оксида алюминия в присутствии нитридов AlN, VN, TaN в результате непрерывного перемешивания порошковой смеси во вращающемся контейнере происходит многократная локальная пластическая деформация поверхностных слоев. Наличие деформационных процессов способствует закреплению частиц модифицирующих элементов на дефектах и неровностях активированных частиц оксида алюминия, при этом происходит формирование конгломерированной частицы без дополнительного использования связующих веществ.

Химического взаимодействия нитридов AlN, VN, TaN и оксида алюминия с образованием новых промежуточных шпинельных фаз или фаз с металлической связью не выявлено, что подтверждается данными рентгенофазового анализа.

Различие морфологии частиц модифицированных порошков и исходных частиц оксида алюминия может быть объяснено наличием конкурирующих процессов: разрушения частиц при нагреве; объемной усадки при фазовом переходе $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$; конгломерирования при перемешивании порошковой смеси во вращающемся контейнере; спекания при изотермической выдержке.

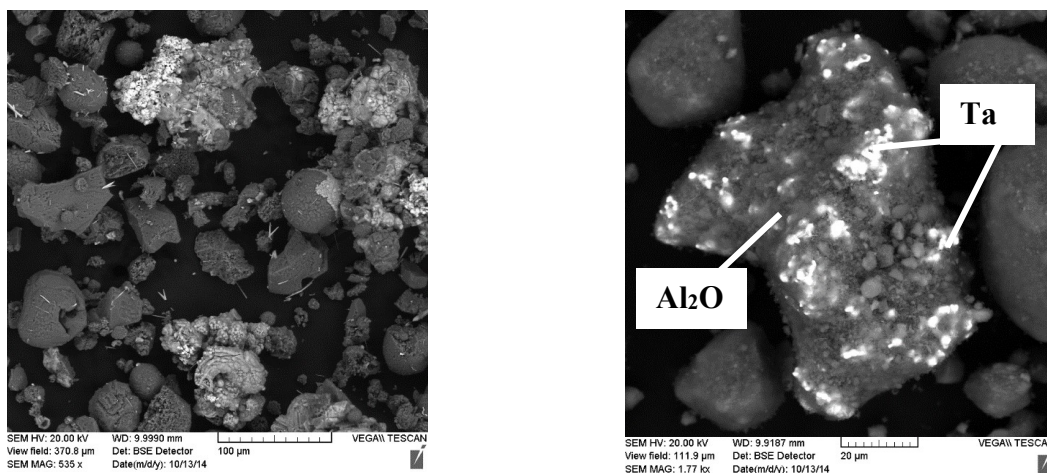


Рисунок 1 – Порошок оксида алюминия, модифицированный термодиффузионной обработкой в присутствии нитрида тантала $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TaN}$

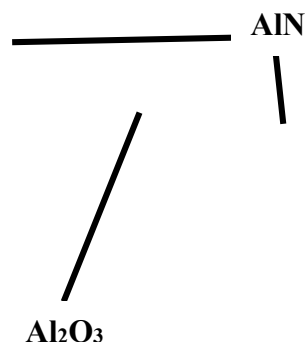


Рисунок 2 – Порошок оксида алюминия, модифицированный термодиффузионной обработкой в присутствии нитрида алюминия $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-AlN}$

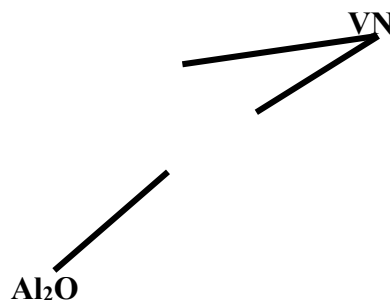


Рисунок 3 – Порошок оксида алюминия, модифицированный термодиффузионной обработкой в присутствии нитрида ванадия $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-VN}$

Разрушение частиц оксида алюминия может происходить в следующих случаях: в ходе термического разложения при повышении температуры, свойственного частицам гидроксида и оксида алюминия [4]; в результате действия внешних напряжений при локальном пластическом деформировании в подвижной порошковой среде, что согласуется с данными работы [5]; в результате действия внутренних напряжений, возникающих при перестроении кристаллической решетки в ходе фазовых переходов $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ [6, 7]. Разрушение частиц оксида алюминия, предположительно, происходит по слабым участкам, которыми являются октаэдрические (корунд) или тетраэдрические (глинозем) пустоты между двумя плотноупакованными слоями атомов кислорода, две трети октаэдрических пустот которой заполнены катионами Al^{3+} [8]. Таким образом, образующиеся на поверхности частицы дефектные области имеют кислородное окончание, что, как показано в работе

[9], может в значительной степени влиять на химическую реактивность поверхности и механизмы связи с модифицирующими элементами.

При этом нагрев порошковой смеси в контейнере сопровождается активными фазовыми переходами в частицах от метастабильной низкотемпературной фазы $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ через множество промежуточных (β , ε , δ , Θ и т.д.) к высокотемпературной $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ путем постепенной перестройки кристаллической решетки, которые начинаются с температур 900–1000 °С, что согласуется с известными данными [6, 7]. Установлено, что изотермическая выдержка порошковых композиций $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TaN}$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-AlN}$ и $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-VN}$ приводит к изменению соотношения фаз в сторону увеличения содержания высокотемпературной фазы ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) в разном отношении: с порядка 30 % в исходном порошке до порядка 50 % в модифицированном порошке $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-AlN}$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TaN}$ и 70 % в порошке $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-VN}$ по отношению к низкотемпературной фазе ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$).

Плазменные покрытия в значительной мере наследуют фазовый состав и структуру порошков на основе оксида алюминия, поэтому повышение содержание фазы $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ считается положительным эффектом.

Кроме того, установлено, что изменение температуры изотермической выдержки при термодиффузионной обработке оказывает влияние не только на фазовый состав, но и на размер частиц модифицированных порошков $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TaN}$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-AlN}$ и $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-VN}$, изменяющийся в результате указанных ранее процессов: перестроения кристаллической решетки и уменьшения ее объема при фазовом переходе $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$; в результате термического разложения при нагреве более 800 °С, свойственного частицам гидроксида и оксида алюминия; под действием напряжений, возникающих при локальном пластическом деформировании в подвижной порошковой среде.

Таким образом, установлено, что термодиффузионная обработка в присутствии нитридов AlN , VN , TaN способствует изменению размеров и формы частиц и, как следствие, уменьшению удельной поверхности и улучшению текучести порошка, что оказывает значительное влияние на процесс плазменного напыления и эксплуатационные характеристики формируемых покрытий.

1. Газотермическое напыление композиционных порошков / А.Я. Кулик, Ю.С. Борисов, А.С. Мнухин, М.Д. Никитин. – Л. : Машиностроение, 1985. – 199 с.
2. Повышение качества плазменных металлокерамических покрытий / Ф.Г. Ловшенко [и др.] // Вестник Белорусско–Российского университета. – 2011. – № 3. – С. 71–81.
3. Порошковый материал для напыления защитного керамического покрытия и способ его получения: пат. ВУ 21612 / О.Г. Девойно, М.А. Кардаполова, О.К. Яцкевич, В.Г. Щербаков. – Опубл. 28.02.2018.
4. Чукин, Г.Д. Строение оксида алюминия и катализаторов гидрообессеривания. Механизмы реакций / Г.Д. Чукин. – М. : Типография Паладин, ООО «Принта», 2010. – 288 с.

5. Штемпель, О.П. Исследование интенсификации диффузионного легирования микрообъектов / О.П. Штемпель, Н.В. Соколова // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения: сб. научн. тр. – Минск : УП «Технопринт», 2001. – С.155–158.
6. Газотермическая обработка керамических оксидов / М. Н. Бодяко, Ф. Б. Вурзель, Е.В. Кремко [и др.]; под ред. О.В. Романа. – Минск: Наука и техника, 1988. – 233 с.
7. Косенко, Н.Ф. Полиморфизм оксида алюминия / Н.Ф. Косенко // Изв. вузов. Химия и химическая технология. – 2011. – Т. 54. – Вып. 5. – С. 3–16.
8. Юшкова, Б.О. Влияние механоактивации на габитус кристаллической решетки глинозема / Б.О. Юшкова, В.И. Аникина, А.А. Ковалева // Журнал Сибирского федерального университета. Сер. Техника и технологии. – 2013. – Т. 6, № 6. – С. 665–673.
9. Еремеев, С.В. Влияние кислородных вакансий на адгезию на границах раздела Nb/Al₂O₃ и Ni/ZrO₂ / С.В. Еремеев, Л.Ю. Немирович-Данченко, С.Е. Кулькова // Физика твердого тела. – 2008. – Т. 50. – № 3. – С. 523–532.

UDC 621.9.011:517.962.1

FEA-ANALYSIS OF THE COUPLED PORTAL STRUCTURE IN THE LARGE HORIZONTAL MILLING MACHINE

Stanislau Dounar¹, Alexandre Iakimovitch¹, Andrzej Jakubowski²

1) Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

2) Maritime University of Szczecin, Szczecin, Poland

This work relates with renovation project touching group of «Travelling column» machine tools. Comparison between two configurations of machine tool – «Monocolumn» (fig. 1, a) and «Portal» (fig. 1, b) – is provided. Just situative coupled portal is mean. It may be created for the necessary time by two monocolumns moving close together and interlocking. Other time every column may move alone, according to its own CNC programs (fig. 2).

A column with the ram Rm1 is depicted at fig. 1, a. This column touches its paired column with ram Rm2 at fig. 1, b. Monocolumn (fig.1, a) provides cutting by double spindle unit (at the left end of ram Rm1). Boring spindle 1b may advance axially (along Z) up to 2.6 m. That range is provided partly by ram axial advance. Ram side surfaces 2 are slipping in the hydrostatic guides inside stock 3. Corner areas of stock are marked 3a, 3b, 3c, 3d. Stock possess a vertical freedom degree (along Y) due to hydrostatic guides (5a – 5b) on column 5. The stock has moving range 4.25 m. The column is fixed to sledge 7, slipping along X by hydrostatic guides 7a – 7b. Spindles are driven by motor 8.

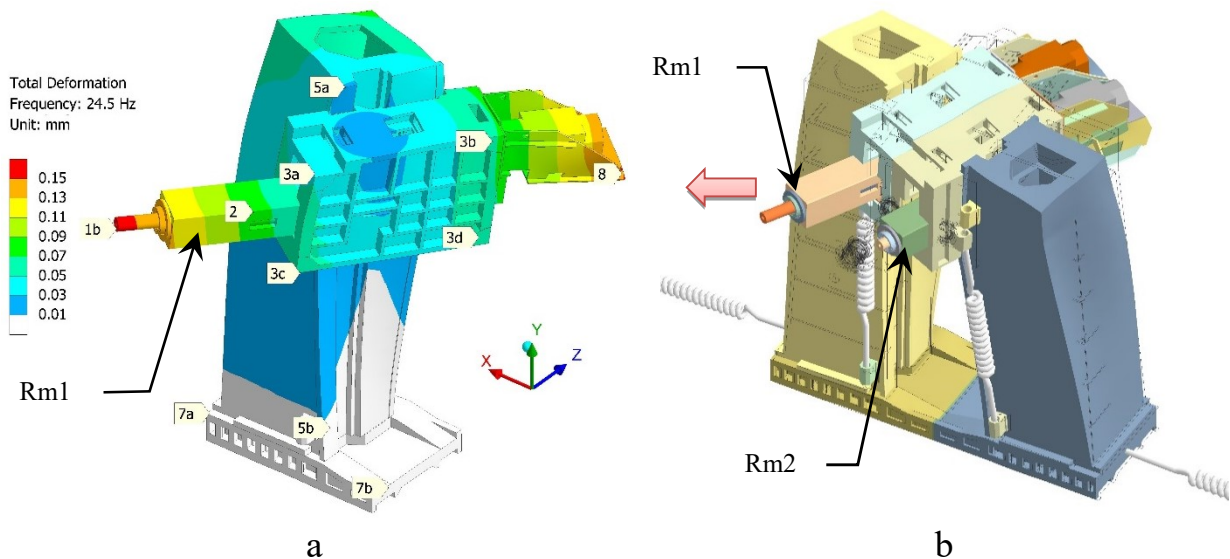


Figure 1 – Torsional resonance $M3$ of «Travelling column» machine tools for configurations: «Monocolumn» (a; 24.5 Hz) and «Portal» (b; 24.04 Hz)

The main problem of monocolumn is a low dynamic rigidity at spindle in the direction X. It is caused mainly by torsional resonance. Axis of torsion is vertical (parallel to Y). It migrates inside triangle 3a – 3b – 5a. Even small angle of torsion turns into big linear displacements at the ends of «1b – 8» line. Stock is placed on the right from column. Renovated machine group poses columns as of right design so of the left one.

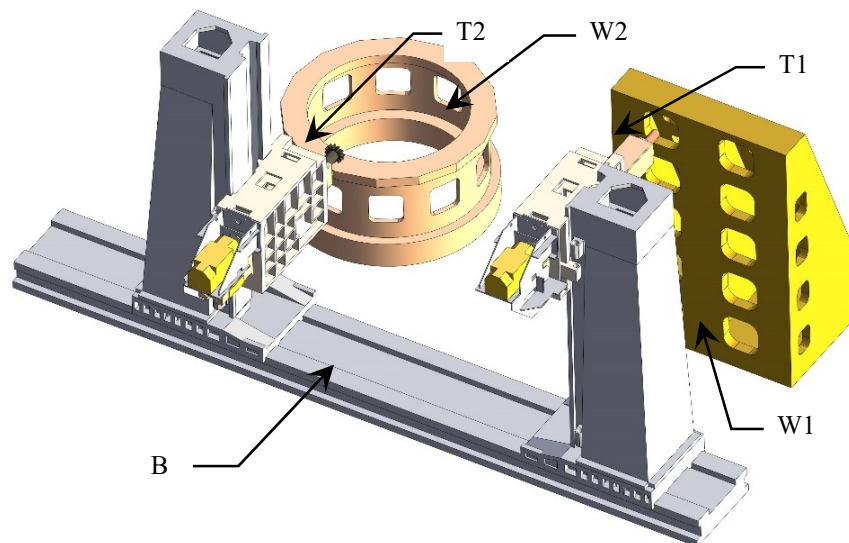


Figure 2 – Parallel machining of workpieces W1, W2 by tools T1, T2, placed at left and right monocolumns L, R (B – common bed)

During the renovation, it was proposed to install two monocolumn L and R (fig. 2) upon the bed with common guides. Columns may provide machining independently. Two diverse workpieces W1 and W2 (fig. 2) undergo separately boring and milling by tools T1 and T2. Feature of the presented configuration – one column has a right-side design (R) and second column – left-sided (L) one. Columns

with stocks mirror each other. The configuration is convenient to provide collision-free two-ram machining of the large workpiece.

Main benefit from the presence of the mirroring columns would reveal in a critical case of rising high spindle (RHS) machining. Monocolumns of left and right design may be joined in the new load-bearing system – «Portal». Columns are to touch each other by stock sides and lock up. Double structure («Portal») poses additional static and dynamic rigidity when RHS cutting is provided.

The situative portal is represented as no monolithic contour. It poses inner slipping borders on hydrostatic guides.

Static testing force $F_{x,y,z}^{st} = 1kN$ was applied to the milling spindle end along coordinates X, Y, Z when the machine tool was in the RHS position. Simulated spindle displacements enable to calculate rigidity (tab.1). It is sufficient because is a higher then threshold level $[J_{x,y,z}^{thres}] = 20 N/\mu m$ as for monocolumn so for portal structures.

Table 1. Static rigidity for «Monocolumn» and «Portal» along axes

Rigidity by axes, N/ μm	Monocolumn	Portal	Rigidities ratio:
X	61.6	118.3	191%
Y	90.4	135.5	149%
Z	123.7	173.0	139%

Monocolumn spindle is most flexible in the X direction. It is due to stock-ram torsional movement about axis Y. Portal statically is a more rigid structure. Maximal difference (1.91 times) is revealed in the longitudinal direction X. In other directions portal is in one and half time stiffer than monocolumn.

Monocolumn poses different rigidities in the X, Y, Z directions (e.g. rigidity along Z in double exceeds one along X (tab. 1)). Portal demonstrates more stable behaviour. Directional rigidities differ no more, then 1.46 times.

Modal analysis disclosed a similarity of eigenmodes patterns for «Monocolumn» and «Portal» configurations. Main resonance M1 and second one M2 proved to be «one-fourth wave» column oscillations in the X and Z directions respectively. Eigenmode M1 include sledge reciprocation along X. However, column bending is here the dominant movement.

Eigenmode M3 depicted above. Mode M4 excitement leads mainly to ram-stock pecking. Pecking is the main pattern for mode M5 and is presented in mode M6 as well. Stock pecking eigenmodes (M4 – M6) harms diameter precision of the machining. That's modes should be damped or omitted. Ram pecking is caused by stock and Y-guides collective skewing. Eigenmodes M1 – M6 excitation embrace all machine tool (whole-machine resonances). Modes M1 – M4 pertain to low-frequency interval and M5 – M6 to middle-frequency one. Modes M7 – M8 relates to local and high-frequency resonances.

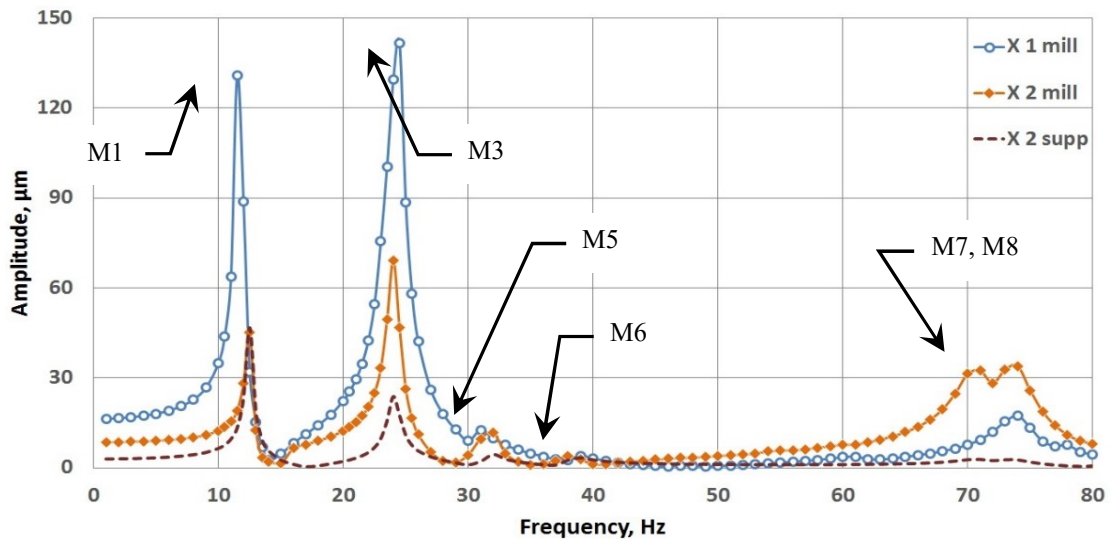


Figure 5 – Milling spindle longitudinal FRF (spindle force F_x^d along X – spindle face displacement along X) for monocolumn (X 1 mill) and portal (X 2 mill)

Pair of milling spindle FRF's are represented on fig.5 for the case of longitudinal (X) excitation. Curve «X 1 mill» relates to monocolumn structure and curve «X 2 mill» – to the portal one. Curve «X 2 supp» presents a supporting face (at stock) amplitude. Leverage effect of long ram is absent her. So curve «X 2 supp» describes column movements and is the lowest on the picture.

FRF on the fig. 5 demonstrates whole-machine resonance peaks (M1 – M6). On the left from M1 pre-resonance (static) interval is placed (≤ 10 Hz). On the right from the weak peak M6 post-resonance interval is stretched. It is interrupted by local-character resonances M7-M8. Range from ~ 35 to ~ 65 Hz seems to be very calm and appropriate for intermittent cutting.

The main conclusion from FRF at fig.5 – monocolumn-to-portal transition effectively reduces resonance peaks, thus only for whole-machine resonances. Spindle amplitude is lowering in 2.9 times for bending eigenmode M1 and in 2.04 times – for torsional mode M3.

Conclusions.

Monocolumns coupling into portal have enhanced spindle static rigidity in 1.91 – 1.49 – 1.39 times relatively along X, Y, Z axes. Rigidity level at least $118 \text{ N}/\mu\text{m}$ is provided for most flexible direction X (with fully advanced ram).

Monocolumns-to-portal joining influences the eigenmode pattern a little concerning as frequencies so resonance shapes.

Portal structure creation significantly damps resonance peaks M1, M2, M3, M4 (range 12-38 Hz) in 1.7 – 2.9 times. Dynamic rigidity doubles (204%) for most dangerous, torsional resonance M3 (24.04 Hz). The portal structure may be ineffective for higher frequency resonances.

Due to main FRF's peak lowering, the portal structure allows resonance overriding for all whole-machine resonances. It means admissibility to machine workpieces just at resonance frequencies in range from 0 to 89 Hz.

Monocolumns-to-portal transition reduces the crossing of oscillation between X and Y direction. It is important to secure the diametrical accuracy.

Coupling monocolumns into the portal is recommended to decrease machine tool vibrations if technological force frequencies are below 40 Hz. If cutting is more speedy, there is no need in additional reinforcement of monocolumn.

UDC 621.9.011:517.962.1

FEA-AUDIT AND REDESIGN OF PRACTICE-PROVED CENTRIFUGE MACHINE

Stanislau Dounar¹, Alexandre Iakimovitch¹, Pavel Shirvel¹, Anastasiya Penkina¹, Tanishq John Mathew²

1) Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

2) CHRIST (Deemed to be) University, India

Given work touches the compact, high-speed biological centrifugal machine, designed before FEA epoch, but permanently produced and exploited till now. So some kind of FEA-audit of old, intuitive design is provided here. Proportions of centrifuge load-bearing system (LBS) are optimized and proved by long-term practice. Collapses and partial cracking are not reported for all centrifuge examples.

The centrifuge works in the quasi-static mode with long time loading by constant centrifugal forces caused by stable rotation at the speed 4000 min^{-1} . Quantity of loading cycles (due to speeding up and running out) is not large for all service life. So static strength and, possibly, ratcheting (during low-cycle fatigue) are the main issues.

Some specific terms are proposed for explanations here below:

Critical point of surviving (CPS) – severe stress concentrator possesses next features simultaneously: a) almost inevitable in the design sense; b) haven't got a reservation if cracked; c) shortage of effective parameters to control the level of stress in it. It is obvious that CPS tied to different inner corners and fillets.

Fillet radius management (FRM) – need to vary fillet radius for CPS smoothing, causing no indirect damages and harmful consequences for nearby design.

Controllable contact spot control (CSC) – design approach aiming to reduce nominal contact interface to dimensions of expected virtual contact spot.

Fig. 1, a gives an outer view of the centrifuge's LBS. Fig.1, b depicts 1/6 portion of the full model. The section view on the rotating structural parts is given in fig.2. The set of parts consists of the aluminum rotor 1 ($\varnothing 205 \text{ mm}$; six spokes 1S protruded radially from the hub 1H) and six aluminum cups 2 (height 162 mm), containing processed liquids in the flexible envelopes. Envelopes are replaced by weights 3. There is lug 1L at the end of each spoke. Lug holds steel pin 4.

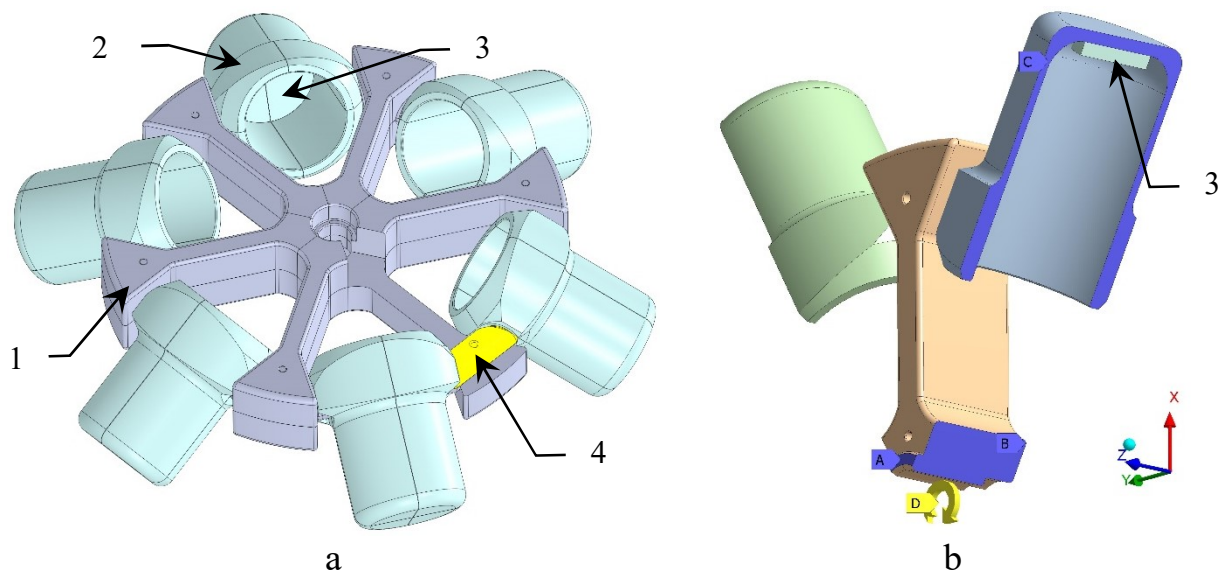


Figure 1 – Rotated load-bearing system (LBS) of the centrifuge (a) and symmetrical 1/6-part of the FEA-model (b): 1 – rotor; 2- cup; 3 – weight; 4 - pin

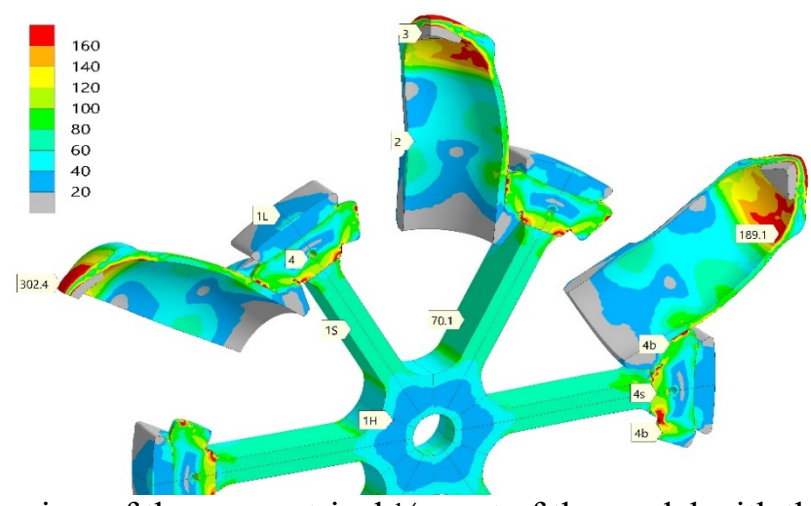


Figure 2 – Section view of the symmetrical 1/2 -part of the model with the distribution of the equivalent stresses σ_e (MPa); angular velocity $\omega = 420 \text{ rad/s}$. Marks 1L, 1S, 1H relate to the rotor 1; marks 4b, 4s – to the pin 4

Two neighboring pins 4 hold the cup 2 between spokes with the possibility of local rocking. Every pin possesses three cylindrical steps (fig.3). The central step of $\varnothing 32 \text{ mm}$ (2) is inserted into the spoke lug and fixed. End steps (bosses – 1; $\varnothing 30 \text{ mm}$) stay in frictional contact with cups. Fillets with different radiuses (e.g. R2, R8) were investigated. The initial design states the radius of 1 mm (R1).

The strongest stress concentration is revealed on the pin fillet. Elastic solution EL for frictional contacts FC (fig. 4, a) shows equivalent stress (mark 1222) exceeding one and half times yield stress. Two-axial tension governs on the fillet surface ($\sigma_1 = 1351 \text{ MPa}$, $\sigma_2 = 343 \text{ MPa}$, $\sigma_3 = 0$). Elastic-plastic solution PL (fig.4, b) reveals significant plastic deformation on the fillet (mark 0.24%). It is an unsafe situation due to preliminary steel hardening. It may lead to the brittle fracture of the pin.

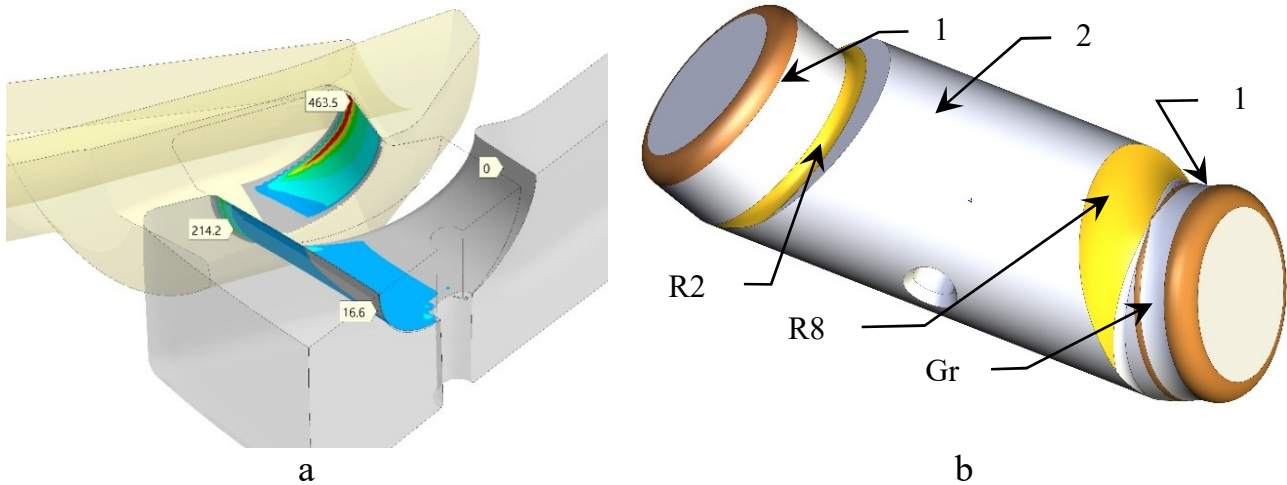


Figure 3 – Compressing stresses (a; R1) in the contacts «pin (shown separately on b) – cup slot» (up to 463.5 MPa) and «pin stem – spoke lug» (up to 214.2 MPa)

The fillet should be taken as a specific object – critical points of surviving – CPS. One could see strong imminent stress concentration, on the one hand. On the other hand, the long service life of the centrifugal machine gives evidence of material surviving into the fillet region. It is possible, qualitative steel possesses durability resources even in the hardened state. The feasible issue may be an autofrettage effect. Anyway, stress relieving is desirable for pin fillet CPS.

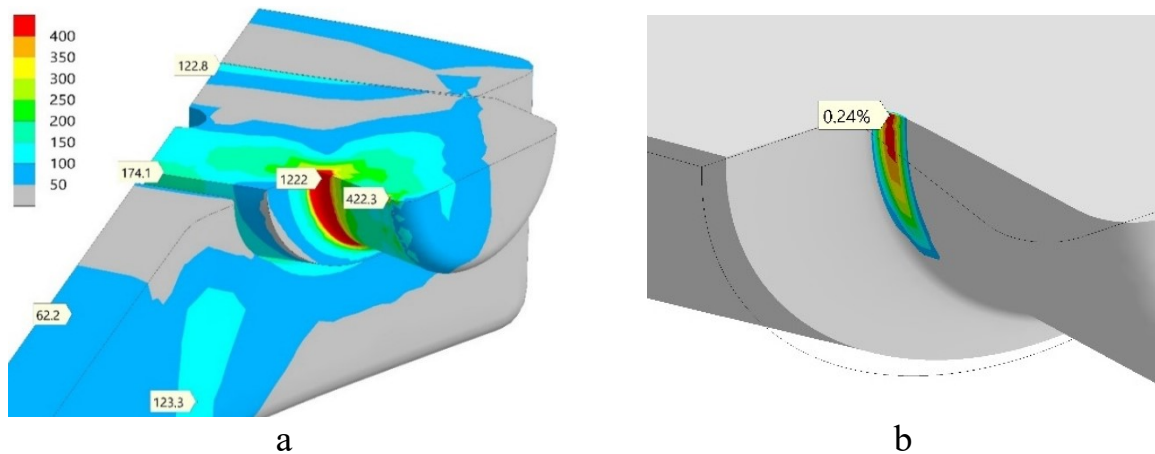


Figure 4 – Distribution of the equivalent stresses σ_e (MPa) in the pin (R1) and rotor lug (a – EL, FC) and plastic deformation focus on the pin fillet surface (b – PL, FC).

Pin fillet CSP attracts priority attention during centrifuge LBS optimization. That CSP needs to be smoothed out. Full CPS excluding is hardly possible. The evident measure is to fill in some way step between stem and boss for the pin.

Fillet radius management (FRM) is tied with the increasing of fillet radius. Initial radius value (R1) was changed to the 2, 4, 8 mm (design variants Des2, Des4, Des8 respectively). It is necessary to find the room for Des4, Des8 solution. Technics CSC could do it by contact interface decreasing (fig. 3, b – right end).

Double increasing of fillet radius preserves stress picture though lowers peak tension stress. Stress σ_1 decreases from 1351 MPa (R1) to 883 MPa (R2). Only small plastic deformations are revealed on fillet in the last case.

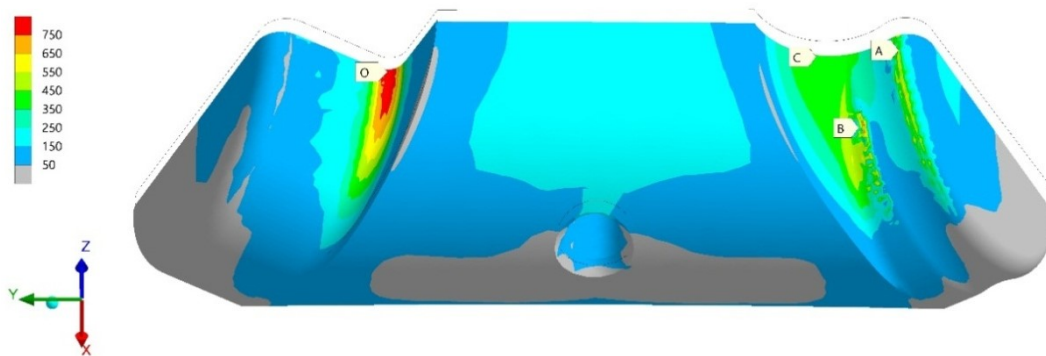


Figure 5 – Design variants R2 (left) and R8 (right) for the pin – picture of equivalent stress σ_e , MPa.

CSC technics proposes (fig. 5, right end) to increase fillet radius up to limit and exclude the pin step completely. The step would be overridden by complex surface C-A-B. Radius 8 mm is achieved in point C. Such overriding leads to the significant weakening of tension. Mark 470.99 points out moderate σ_1 stress. It is two times lower as for R2 (left pin end on fig. 5 – mark O). CSP is smoothed out.

Centrifuge simulations were provided for the range of pin fillet radiuses. The results are shown in fig. 6. Here designation SQE relates with fully elastic FEM-solution (EL). Designation S1E discloses peak value of maximal principal stress σ_1 . Designation SQP refers to equivalent stress σ_e after the elastic-plastic (PL) solution. Stress σ_e is limited from above by yield stress of steel. Such limitation is accompanied by plastic deformation E5 (scaled in 10^5 times) accumulation on the fillet surfaces.

Designation Sh describes hydrostatic stress. Large Sh value points out volume tension state. It is dangerous for brittle fracture initiation. Structural stresses (by curves SQE, SQP, S1E, Sh on fig. 6) relatively rapidly go down as fillet radius increases from 0.5 to 4 mm. Stress decreasing decelerates after level R2 passes by. Plastic deformations (E5) are revealed at the fillet only for R2 and lower.

Contact pressure (Pres) begins to increase for R4 and higher. Implementation of the R8 variant needs to improve cup slot durability due to high contact stresses. Laser treatment may be fulfilled.

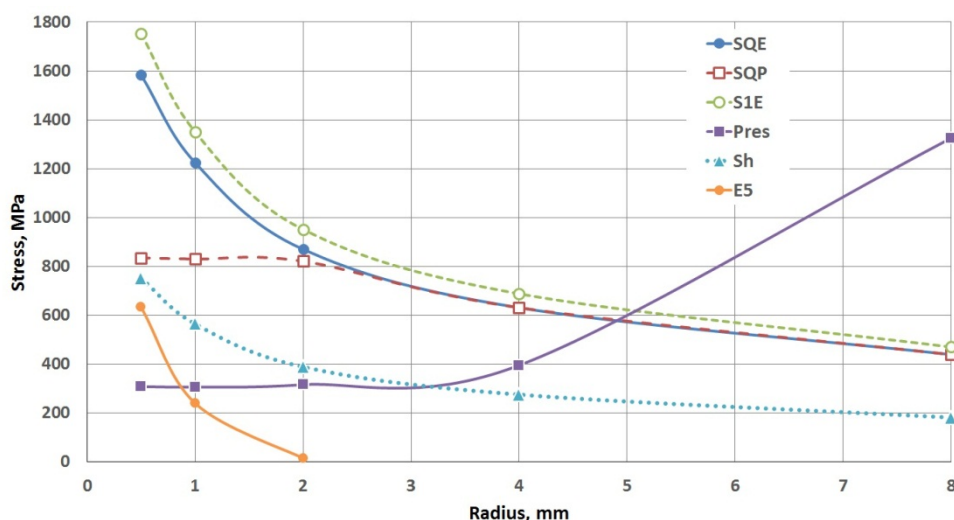


Figure 6 – Stress parameters and accumulated plastic deformation E5 on the pin fillet depending on the radius

Conclusions:

1. The set of critical surviving points (CSP) is revealed in the centrifuge load-bearing system (LBS). They are placed at the pin fillets.
2. Hardened steel undergoes localized plastic deformation in the CSP on the pin fillets. However, pins preserve strength as long-year exploit practice proves. Such kind of surviving needs special investigation. It may be due to the autofrettage effect.
3. It is proposed to smooth out pin CSP by fillet radius increasing. Stress concentrator smoothing is possible. Hence, in the limited design room, it brings the contact pressure growing caused by contact spot shrinkage.
4. Pin fillet radius 4 mm is the optimal one. Equivalent stress is lowered in 1.94 times in comparison with 1 mm with no significant contact pressure increasing (29% only). Simultaneously, hydrostatic pressure is declined in 2.05 times. It improves pin fillet protection from the brittle fracture.

УДК 621.793: 620.1

СНИЖЕНИЕ ШУМА ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ ПЛАКИРОВАНИЕМ РАБОЧЕГО ПРОФИЛЯ ЗУБЬЕВ

Ма Минь, Шелег В.К., Леванцевич М.А.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Введение. Одним из путей решения задачи снижения шума зубчатых передач является обеспечение рациональной топографии рабочих поверхностей зубьев, которая может формироваться различными методами, в том числе и методом деформационного плакирования гибким инструментом (ДПИ) [1, 2]. При реализации метода ДПИ в качестве гибкого инструмента используется вращающаяся металлическая щетка с проволочным ворсом, а слой покрытия на

поверхности обрабатываемой детали формируется за счет переноса ворсинками щетки, активирующей обрабатываемую поверхность непосредственно перед нанесением покрытия, микрочастиц из компактированного материала (донора) в процессе фрикционного взаимодействия щетки одновременно с донором и деталью. Значительный интерес при этом представляют возможности использования в качестве донора композиционных материалов из компонентов, в обычной практике «несмешиваемых», в том числе ультрадисперсных и наноразмерного уровня. Однако эффект, достигаемый при использовании изделий с подобными покрытиями в условиях эксплуатации, пока недостаточно изучен, что обуславливает необходимость проведения дополнительных исследований.

Цель исследований заключалась в экспериментальной оценке влияния покрытий на рабочем профиле зубьев спаренных зубчатых колес на уровень генерируемого ими шума при работе в зацеплении.

Методика исследований. В качестве объекта исследований была выбрана пара конических зубчатых колес с круговым зубом привода шпинделя металлорежущего станка с ЧПУ мод. 1А734Ф3 (сталь 25ХГТ ГОСТ 4543-71, подвергнутых нитроцементации и термообработке ТВЧ до твердости 57 min HRC₃). Плакирование рабочего профиля зубьев этой пары осуществляли щеткой, установленной на углошлифовальной машинке, оснащенной механизмом подачи донора. Щетка имела ворс из гофрированной стальной проволоки (ст. 65Г). Диаметр и ширина щетки составляли соответственно 125 мм и 10 мм. Диаметр и вылет ворса соответственно 0,25 мм и 20 мм. Относительная скорость скольжения ворса щетки относительно поверхности обрабатываемой детали составляла 40 м/с. Количество проходов щетки по обрабатываемой поверхности – 4...6. Толщина слоя сформированных покрытий не превышала 5–10 мкм.

Измерения шума, генерируемого зубчатыми передачами без покрытия и с покрытием, производились на шумообкатном станке модели 5Б725 Саратовского завода зубострогальных станков методом сравнительных испытаний.

В качестве материалов-доноров для формирования однослойных покрытий использовали медь, латунь, спеченную бронзу Бр05С20Гр0,5ДМ0,5, легированную графитом и дисульфидом молибдена, литейную оловянную бронзу БрО10С10 и алюминиевый композит (материал, полученный путем спекания порошковой смеси из алюминия и графита). Двухслойные покрытия формировали двух видов. В первом случае последовательно наносили слой меди, затем слой антифрикционного сплава (композита) из компонентов меди, олова, свинца и цинка. Во втором – последовательно наносили слой алюминиевого композита с легирующей добавкой графита, затем слой полимера на основе фторопласта Ф-4.

Измерение шума (общий уровень с частотной коррекцией по характеристике А и треть-октавный спектр), а также его анализ проводились с помощью шумомера фирмы «Брюль и Кьер» мод. 2238 «Медиатор» и программного обеспечения «Noise Explorer 7815». При спектральном анализе фиксировались максимальный L_{max} , минимальный L_{min} и эквивалентный L_{eqv} уровень шума в

полосе измерения. Уровень шумового фона был на 12—15 дБА ниже минимального уровня шума, излучаемого испытываемыми зубчатыми парами.

Результаты испытаний и их обсуждение. Анализ спектров уровня шума зубчатых передач с различными видами покрытий на рабочих поверхностях зубьев показал, что эффективность применения технологии ДПГИ для снижения шума конических зубчатых передач в приводах металлорежущих станков во многом определяется рациональным выбором состава материала-донора для формирования покрытия. Сформированные на рабочем профиле зубьев колес покрытия из различных материалов в ряде случаев значительно меняют общий характер распределения звуковой энергии по частотам, снижая уровень шума на одних частотах и оставляя его неизменным или, в отдельных случаях, даже несколько повышая, на других. Эффективность ДПГИ как средства управления виброакустическими свойствами зубчатых передач зависит от многих факторов. В целом диапазон варьирования уровня снижения звукового давления при испытаниях составил 2–6 дБ. Существенное влияние плакированных покрытий на снижение уровня шума определялось не только составом композиционного материала покрытия, но и толщиной и комбинацией наносимых слоев покрытия.

Наибольший эффект улучшения шумовых характеристик зубчатых колес с покрытием по сравнению с колесами без покрытия практически во всем спектре частот был достигнут при использовании в качестве донора композита на основе бронзографита Бр05С20Гр0,5ДМ0,5. При его использовании практически на всех частотах спектра наблюдалось снижение шума, создаваемого испытываемой конической парой. Максимальное снижение звукового давления было зафиксировано в третьоктавных полосах частот 31,5 Гц, 40 Гц и 630 Гц, где оно составило 8–9 дБ. В среднем величина снижения шума составила от 2 до 4 дБ. Это показывает перспективность использования композита на основе материала Бр05С20Гр0,5ДМ0,5 в качестве донора для формирования покрытий на зубьях колес приводов шпинделей металлорежущих станков.

Выводы. Результаты выполненных исследований свидетельствуют о том, что технологию деформационного плакирования гибким инструментом можно успешно использовать при решении задач по снижению шума зубчатых передач. При этом выбор технологических параметров процесса плакирования, состава материала донора, вида и концентрации легирующих добавок, количества и толщин наносимых слоев покрытия зависит от конкретных условий их эксплуатации

1. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.1/ Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К.Мещерякова. – 4-е изд. – М.: Машиностроение, 1986. – 656 с.
2. Improvement of triboengineering properties and noise reduction of tooth gears by cladding functional coatings on working surfaces of interfaced teeth / U.L. Basiniuk, M.A. Levantsevich, N.N. Maksimchenko, A.I. Mardasevich // Journal of Friction and Wear. – 2013. – Vol. 34, № 6. – Pp. 438–443.

СТРУКТУРА, МОДЕЛЬ И МЕТОД РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ СБОРНЫХ ТОРЦОВЫХ ФРЕЗ

Ажар А.В.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика
Беларусь

Современные торцовые фрезы имеют блочно-модульную конструкцию с режущей частью в виде сменных неперетачиваемых пластин (СНП). Торцовую фрезу можно представить, как многоэлементную систему с различной степенью функциональной зависимости элементов, имеющую структуру надежности параллельно-последовательного типа с резервированием [1-4]. Модель и метод расчета показателей надежности торцовых фрез во многом зависят от критерия отказа инструмента (поломка, предельный износ, потеря точности детали), от оцениваемого показателя надежности (безотказность работы инструмента, общий ресурс с учетом или без учета параметров восстановления работоспособности).

Фрезам при непрерывной эксплуатации характерно структурное постоянное резервирование, вызванное конструктивной избыточностью инструмента в связи с возрастающими требованиями к росту производительности при обработке. Одним из условий функционирования этих инструментов является нагрузочная способность зуба, определяемая «ломающей» подачей при черновой обработке. При постоянном резервировании не требуются специальные устройства, вводящие в действие резервный элемент, а также отсутствует перерыв в работе.

С точки зрения режима работы резервные элементы нагружены. Облегченный и тем более ненагруженный резерв в конструкциях фрез практически не реализуется, за исключением инструментов с регулируемой геометрией и при применении ступенчатых конструкций.

При эксплуатации сборных фрезы широко применяется резервирование замещением, при котором группа режущих пластин резервируется дополнительными, такими же пластинами, каждая из которых может заменить любую отказавшую основную пластину. Такую замену возможно осуществить только после остановки цикла обработки изделия в плановом режиме или по причине отказа. Планирование замен значительно увеличивает фактическую долговечность инструмента и улучшает показатели ремонтпригодности в связи с уменьшением расходов на обнаружение отказа и сам процесс восстановления инструмента. При этом возможна выборочная замена отказавших элементов. На практике выборочная замена применяется чаще для промежуточных элементов конструкции, а не для режущих пластин из-за значительной выработки последних к моменту отказа инструмента.

Применение метода расчета показателей надежности торцевой фрезы (классического, логико-вероятностного, с использованием графа переходов) зависит от особенностей принятой структурной модели надежности инструмента (с независимыми или функционально зависимыми элементами, без резервирования, с нагруженным, частично нагруженным или ненагруженным резервом), оцениваемых показателей надежности (безотказности, долговечности). Определение долговечности фрезы с учетом параметров восстановления работоспособности при принятой модели надежности, учитывающей функциональную зависимость элементов (СНП) с нагруженным или частично-нагруженным резервом позволит наиболее объективно оценить надежность фрезы, но является наиболее сложным с точки зрения постановки задачи и применяемого математического аппарата. Поэтому для проектной оценки надежности можно использовать логико-вероятностный метод расчета безотказности фрезы, состоящей из независимых элементов (СНП) с нагруженным резервом [2, 3].

Рассчитаем вероятность безотказной работы сборной торцевой фрезы с числом зубьев $z=6$, с пластинами из Т15К6, при обработке стали 45, глубина фрезерования $t=3,5$ мм, подача на зуб $S_z=0,1$ мм/зуб. Критерий работоспособности фрезы – «ломающая» обратная подача $S_p=1,4$ мм/об (или подача на зуб $S_{zp}=0,23$ мм/зуб), приводящая к поломке зуба. Условие отказа фрезы – выход из строя не менее двух последовательно идущих друг за другом зубьев, при этом на третий зуб придёт подача $S_z=0,3$ мм/зуб $> S_{zp}$. Вероятность безотказной работы каждого зуба фрезы $P_i=0,9$.

Безотказную работу режущей части инструмента можно описать логико-вероятностным методом (рисунок 1). Логическая функция рабочего состояния фрезы состоит из 18 дизъюнкций («или»), каждая из которых состоит из конъюнкции («и») состояний зубьев, соответствующих работоспособному состоянию фрезы. Полученная логическая функция арифмитизируется, события заменяются их вероятностями. Тогда вероятность безотказной работы фрезы:

$$P = P_i^6 + 6 \left((1 - P_i) \cdot P_i^5 \right) + 9 \left((1 - P_i)^2 \cdot P_i^4 \right) + 2 \left((1 - P_i)^3 \cdot P_i^3 \right) = 0.946.$$

Анализ предложенной модели показывает, что в качестве критерия отказа торцевой фрезы недопустимо принимать предельный износ или поломку одного зуба инструмента, а при определении стойкости – среднюю стойкость лимитирующего зуба. При таком подходе к определению надежности ресурс инструмента не будет использован полностью.

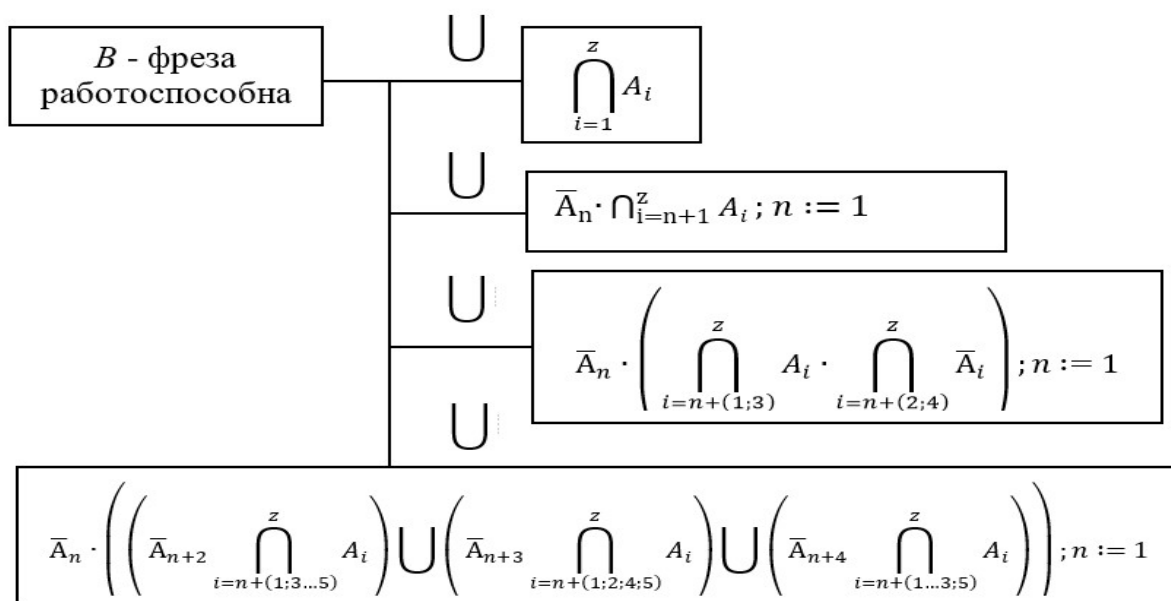


Рисунок 1 – Логическая схема надежности торцевой фрезы:
 $i=1 \dots z$ – номер зуба; A_i – зуб целый; n – номер отказавшего зуба; \bar{A}_n – зуб сломан

1. Острейковский, В.А. Теория надежности: Учеб. для вузов / В.А. Острейковский. – М.: Высш. шк., 2003. – 463 с.
2. Кочергин, А.И. Основы надежности металлорежущих станков: Учеб. пособие для вузов по спец. 0501 «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты» – 2-е изд., перераб. и доп. – Мн.: Выш. школа, 1982. – 175 с.
3. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. Практикум. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 560 с.
4. Благодарный, В.М. Надежность и диагностика технологических систем. - Барановичи: РИО БарГУ, 2009. – 192 с.