

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

МАШИНОСТРОЕНИЕ

РЕСПУБЛИКАНСКИЙ МЕЖВЕДОМСТВЕННЫЙ
СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

Выпуск 23

Минск 2007

621.7
УДК 621.002(082)
ББК 34.4
М 38

Сборник основан в 1976 году

Редакционная коллегия:

Б. М. Хрусталеv (председатель), В. Л. Соломахо (зам. председателя),
Ф. А. Романюк (зам. председателя), П. П. Анципорович, И. М. Бабуk, И. Л. Баршай,
А. И. Бачанцев (отв. секретарь), Г. Я. Беляев, Ю. В. Василевич, В. А. Данилов,
О. Г. Девойно, Э. М. Дечко, С. А. Иващенко, М. М. Кане, В. М. Колешко,
А. И. Кочергин, М. И. Михайлов, Ж. А. Мрочек, М. Ф. Пашкевич,
В. И. Похабов, А. Ф. Присевок, В. А. Сидоренко, А. Т. Скойбеда,
Н. В. Спиридонов, В. И. Туромша, И. П. Филонов, И. С. Фролов,
А. В. Чигарев, В. И. Шагун, В. К. Шелег, А. М. Якимович

Под ред. Б. М. Хрусталева

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор Н. Н. Попок,
доктор технических наук, профессор В. С. Ивашко

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

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ	9
<i>Баршай И.Л., Алифанов А.В., Фельдштейн Е.Э., Гончаров С.П.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИГЛОФРЕЗЕРОВАНИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ НАКЛЕПА.....	9
<i>Баршай И.Л., Бирич А.В., Гончаров С.П., Фельдштейн Е.Э.</i> ФОРМИРОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ИГЛОФРЕЗЕРОВАНИИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЧУГУНА	12
<i>Войтович И.И., Баршай И.Л.</i> ПЕРСПЕКТИВЫ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ И ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ.....	15
<i>Исаевич Л.А., Малекиан М.М.</i> АНАЛИЗ И СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ УСТРОЙСТВ И СПОСОБОВ ПРОКАТКИ ПОЛОС ПЕРЕМЕННОЙ ПО ДЛИНЕ ТОЛЩИНЫ	19
<i>Шукин В.Я., Исаевич Л.А., Кожевникова Г.В.</i> СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА И ДЕФОРМАЦИИ В ПЛАСТИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ ПРИ ПОПЕРЕЧНОЙ ПРОКАТКЕ.....	24
<i>Кане М.М.</i> НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ И МЕТОДЫ ЕЁ ОЦЕНКИ.....	29
<i>Кане М.М., Медведев А.И., Ковальков А.Т.</i> РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛЕГИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ НА ОПЕРАЦИЯХ ЗУБОПЕВИНГОВАНИЯ И ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ (ХТО) ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ШЕСТЕРЕН	34
<i>Фельдштейн Е.Э.</i> ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ СТАЛЬНЫХ ПЛИТ	38
<i>Кривко Г.П., Саковец А.В., Черей Д.А.</i> АНАЛИЗ СИЛ КРУТЯЩИХ МОМЕНТОВ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ЗЕРЕН ПРИ ОБРАБОТКЕ СФЕРЫ ТОРЦЕМ ЧАШЕЧНОГО КРУГА.....	42
<i>Кривко Г.П.</i> ОСНОВЫ СТРУКТУРИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ПОДШИПНИКОВ.....	43
<i>Кривко Г.П., Черей Д.А.</i> ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУИРОВАНИЯ ПРИВОДНЫХ ВАЛКОВ ДЛЯ ГРУПОВОГО СУПЕРФИНИШИРОВАНИЯ БОЧКООБРАЗНЫХ РОЛИКОВ.....	48
<i>Ловшенко Ф.Г., Ловшенко Г.Ф., Хабибуллин А.И.</i> ОСОБЕННОСТИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ГОРЯЧЕЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКОЙ ЗАГОТОВОК ИЗ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННОЙ МЕДИ.....	49
<i>Дудяк А.И., Сахнович Т.А.</i> ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ И АКТИВАЦИЯ ПОРОШКА СИСТЕМЫ $Al_2O_3 - Al_2TiO_5$ С ЦЕЛЬЮ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕСС	53
ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ	56
<i>Девойно О.Г., Кардаполова М.А., Яцкевич О.К.</i> ФОРМИРОВАНИЕ САМОФЛЮСУЮЩИХСЯ ПОКРЫТИЙ, ОПЛАВЛЕННЫХ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ..	56
<i>Девойно О.Г., Кардаполова М.А., Яцкевич О.К.</i> РЕНТГЕНОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ ПОКРЫТИЙ ИЗ САМОФЛЮСУЮЩИХСЯ СПЛАВОВ, ОПЛАВЛЕННЫХ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ	60
<i>Иващенко С.А., Койда С.Г.</i> ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ИЗ НИТРИДА ТИТАНА НА ИЗДЕЛИЯХ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ	66
<i>Ивишко В.В., Вегера И.И., Синцов С.И.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ ДИСКОВ СО СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ	71

Хейфец М.Л., Чемисов Б.П., Грецкий Н.Л., Толстиков, С.К. ФОРМИРОВАНИЕ ФЕРРОПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ В ПУЛЬСИРУЮЩЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ...	74
Кардаполова М. А., Дьяченко О. В. УСТАНОВЛЕНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ МЕЖДУ ИНТЕНСИВНОСТЬЮ ИЗНАШИВАНИЯ, ФАЗОВЫМ СОСТАВОМ И МИКРОТВЕРДОСТЬЮ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ.	79
Савчик В.А., Дьяченко О.В., Василенко А.Г. ИССЛЕДОВАНИЕ АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ПОРОШКОВ НА ЖЕЛЕЗНОЙ ОСНОВЕ.....	86
Шматов А. А. УПРОЧНЯЮЩАЯ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКАЯ ТЕРМООБРАБОТКА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ИЗ БЫСТРОРЕЖУЩИХ СТАЛЕЙ.....	91
Коробейников В.В., Соколов И.О., Володько А.С. ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ОПЛАВЛЕННЫХ И НЕОПЛАВЛЕННЫХ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ САМОФЛЮСУЮЩИХСЯ МАТЕРИАЛОВ.....	95
Киселева Н.А., Синькевич Ю.В, Моисеенко С.И. РАЗРАБОТКА ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ МЕТАЛЛООБРАБОТКИ– ВКЛАД В ИННОВАЦИОННОЕ РАЗВИТИЕ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ	100
Беляева Г.И., Беляев Г.Я., Крушевский А.Е., Присевков А.Ф. РАСЧЕТ ФОРМЫ ПИТАТЕЛЯ ПЛАЗМОТРОНА.....	104
Шматов А. А., Федотов Ф.О. МНОГОКОМПОНЕНТНЫЕ ДИФфуЗИОННЫЕ КАРБИДНЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ЧУГУНАХ	108
Шматов А. А., Девойно О.Г. НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЕ УПРОЧНЕНИЕ ИНСТРУМЕНТА.....	112
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ	117
Щукин В.Я., Исаевич Л.А., Кожевникова Г.В. СОВРЕМЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ПОПЕРЕЧНО-КЛИНОВОЙ ПРОКАТКИ	117
Свирский Д.Н. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИОАНАЛОГИЙ В ПРОЕКТИРОВАНИИ КОМПАКТНЫХ СИСТЕМ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА	122
Романюк С.И., Якимович А.М. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ СРЕДСТВАМИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ	125
Литвинов Е.А., Карпович С.Е., Агранович А.А. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПЛАТФОРМЫ МАНИПУЛЯЦИОННОГО МЕХАНИЗМА С ШЕСТЬЮ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ СРЕДСТВАМИ MATLAB/SIMULINK.....	129
Карпович С.Е., Поляковский В., Жарский В.В., Агранович А.А. АНАЛИЗ И ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ КОЛЛИЗИЙ ПЛАНАРНЫХ ПОЗИЦИОНЕРОВ В СИСТЕМЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ТРИПЛАНАР	132
Дайняк И.В., Жарский В.В., Озер В.П. ПЛАНАРНЫЙ ПРИВОД С МЕХАНИЗМОМ ОГРАНИЧЕНИЯ РАЗВОРОТА.....	138
Колесников Л.А. ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ РАЗМЕРОВ РАБОЧЕГО ПРОСТРАНСТВА ГЕКСАПОДА	142
Романюк Г.Э., Романюк С.И., Криволапов Д.В. СОЗДАНИЕ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ СРЕДСТВАМИ СУБД ACCESS	146
Бжезинский А.А., Колесников Л.А. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА РАДИАЛЬНОЙ ЖЕСТКОСТИ МОТОР-ШПИНДЕЛЯ.....	152
Аверченков В.И., Беспалов В.А. РАЗРАБОТКА СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ САПР ГИДРОЦИЛИНДРОВ.....	154

<i>Бурдо Е.Н.</i> СОВРЕМЕННЫЕ САД-СИСТЕМЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ	158
<i>Лихтарович Е.С., Присевко А.Ф.</i> СИСТЕМА БЕНЗОВОДОРОДНОГО ПИТАНИЯ ДВС С ИСКРОВОМ ЗАЖИГАНИЕМ И ПУТИ ЕЕ МОДЕРНИЗАЦИИ	164
<i>Горюшкин А.А.</i> ПРОГРАММНЫЙ МЕТОД ВЫБОРА МИНИМАЛЬНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ЦИКЛА ОБСЛУЖИВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫМ РОБОТОМ	167
ПРОЦЕССЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ И РЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ	170
<i>Данилов В.А., Киселев Р.А.</i> КОЛЕБАНИЯ В ОБРАБАТЫВАЮЩЕЙ СИСТЕМЕ ПРИ ОБРАБОТКЕ ТОРЦОВЫХ ЗУБЧАТЫХ КОНТУРОВ	170
<i>Данилов В. А., Селицкий А. Н.</i> АНАЛИЗ И РЕАЛИЗАЦИЯ СХЕМ ОБРАБОТКИ НЕКРУГЛЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ	173
<i>Лебедев В.Я., Сидоренко В.А.</i> АНАЛИЗ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ РОТАЦИОННОГО ТОКАРНОГО РЕЗЦА	178
<i>Лебедев В.Я., Сидоренко В.А.</i> ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ И НАПРАВЛЕНИЯ КАСАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ПРИ РОТАЦИОННОМ ТОЧЕНИИ НА КАЧЕСТВО ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ	180
<i>Ивашин А.В., Лебедев В.Я., Туромша В.И.</i> РАБОТОСПОСОБНОСТЬ АЛМАЗНЫХ КРУГОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ СТЕКЛА	185
<i>Дудяк А.И., Сахнович Т.А.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖУЩИХ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ЭЛЬБОРА С ЦЕЛЬЮ ОПТИМИЗАЦИИ ЕГО ФАЗОВОГО СОСТАВА	191
<i>Шагун В.И.</i> ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОНСТРУКЦИИ МЕТЧИКА НА ОТКЛОНЕНИЯ ПОЛОВИНЫ УГЛА ПРОФИЛЯ РЕЗЬБЫ В ЧУГУНЕ	193
<i>Чарторийский А. В., Шагун В. И.</i> ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОНСТРУКЦИИ МЕТЧИКА НА ОТКЛОНЕНИЯ ПОЛОВИНЫ УГЛА ПРОФИЛЯ РЕЗЬБЫ В СТАЛИ	196
<i>Чарторийский А. В.</i> КОНСТРУКЦИЯ МЕТЧИКА ДЛЯ СКВОЗНЫХ ОТВЕРСТИЙ	199
<i>Барановский В.В., Якимович А.М.</i> РЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ БЕЗОТХОДНОГО ПОЛУЧЕНИЯ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЕПЛООБМЕНА РЕЗАНИЕМ	201
<i>Ажар А.В.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ СБОРНЫХ ТОРЦОВЫХ ФРЕЗ	204
<i>Ловишенко Ф.Г., Ловишенко Г.Ф., Хабибуллин А.И.</i> ГЛУБОКОЕ СВЕРЛЕНИЕ ОТВЕРСТИЙ В ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫХ МЕДНЫХ СПЛАВАХ	208
<i>Раповец В.В., Бурносов Н.В.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ПИЛОПРОДУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЩЕПЫ НА ФРЕЗЕРНО-БРУСУЮЩИХ СТАНКАХ	212
<i>Фельдштейн Е.Э.</i> РАЗНОВИДНОСТИ И ВОЗМОЖНОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ	217
<i>Бачанцев А.И., Туромша В.И.</i> НАЗНАЧЕННАЯ СТОЙКОСТЬ ИНСТРУМЕНТА И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ПРИ ВЫБОРЕ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ НА ТОКАРНЫХ СТАНКАХ	221
ДИНАМИКА И ПРОЧНОСТЬ МАШИН	226
<i>Мойсейчик Е.А.</i> ПРОЧНОСТЬ РАСТЯНУТЫХ БОЛТОВ СОЕДИНЕНИЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ	226
<i>Дубовик Д.А.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ КРИВОЛИНЕЙНОГО ДВИЖЕНИЯ КОЛЕСНЫХ МАШИН	233

Лустенков М.Е. РАЗРАБОТКА ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПЛАНЕТАРНОЙ ШАРИКОВОЙ ПЕРЕДАЧИ НА ОСНОВЕ СТРУКТУРНО-МАТРИЧНОГО МЕТОДА	237
Бурейко В.В. ИЗМЕНЕНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ТИТАНА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ДЕФОРМАЦИИ.....	241
Спиридонов Н.В., Соколов И.О., Коробейников В.В., Пилецкая Л.И. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОЙ УДЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ В ПАРЕ «ОПОРНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ ВАЛА – ВТУЛКА ПОДШИПНИКА»	243
Богданович А.В., Андрияшин В.А., Тюрин С.А., Воробьев В.В., Еловой О.М., Замятнин В.О., Комиссаров В.В. НОВЫЕ МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ МОДЕЛЕЙ СИЛОВЫХ СИСТЕМ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ.....	255
Журавков М.А., Щербаков С.С. СОПРЯЖЕННОЕ НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ СИЛОВОЙ СИСТЕМЫ РОЛИК/КОЛЬЦО В УСЛОВИЯХ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ИЗГИБА	260
Щербаков С. С. ОПАСНЫЕ ОБЪЕМЫ КАК МЕРЫ ПОВРЕЖДЕННОСТИ	265
Еловой О. М. ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК ИЗНОСОУСТАЛОСТНОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ В ЛОКАЛЬНЫХ ЗОНАХ ИСПЫТУЕМОЙ МОДЕЛИ СИЛОВОЙ СИСТЕМЫ	270
Сосновский Л. А., Матвеев В. И., Кебиков А. А. КРИТЕРИЙ МЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛИ И ЕГО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ КРИТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РЕЛЬСОВ.....	275
Сосновский Л. А., Щербаков С. С. АНАЛИЗ ТРЕНИЯ В СИЛОВОЙ СИСТЕМЕ	281
Костюченко А.А., Бордовский А.М., Воробьев В.В. ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ТРУБ НЕФТЕПРОВОДОВ.....	286
Махутов Н. А., Сосновский Л. А. ДИНАМИКА, ПРОЧНОСТЬ И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ.....	289
Авсиевич А.М., Девойно О.Г., Николаев В.А., Адаменко Д.В. О ФАКТОРАХ ИЗНОСА ВРАЩАТЕЛЬНЫХ ПАР РЫЧАЖНЫХ МЕХАНИЗМОВ	295
Пахарева Д.В., Соломевич П.А., Кравчук А.С., Карпыза С.А. ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ ЭКСКАВАТОРА-ПОГРУЗЧИКА НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ.....	298
Николаев В.А., Дворянчиков Д.А. ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ДИНАМИЧЕСКОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРИВОДА МАШИННОГО АГРЕГАТА	301
Пирч А.И., Саболевский А.К., Астахов Э.И. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОДВЕСА МАХОВИКА ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АВТОМОБИЛЯ С МАХОВИЧНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ	304
Гарах В.А., Астахов Э.И. ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НАГРУЖЕННОСТИ ПОДШИПНИКОВ РЫЧАЖНОГО МЕХАНИЗМА СТЕНДА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ГУСЕНИЦ307	
Красноружский И.В., Мрочек Ж.А., Макеев В.В. КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ ДЛЯ УЗЛОВ ТРЕНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДРЕВЕСИНЫ ТОРЦОВО-ПРЕССОВОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ	311
Зубко С.А. ХАРАКТЕР РАЗВИТИЯ ТРЕЩИНЫ ПРИ ИСПЫТАНИИ СТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА НА УСТАЛОСТЬ	314
МЕХАНИКА СТРУКТУР И МАТЕРИАЛОВ	317
Василевич Ю.В., Остриков О.М. СПОСОБ РАСЧЕТА ПОЛЕЙ СМЕЩЕНИЙ У КЛИНОВИДНОГО ДВОЙНИКА.....	317
Остриков О.М., Василевич Ю.В. АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ У ВЕРШИНЫ КЛИНОВИДНОГО МЕХАНИЧЕСКОГО ДВОЙНИКА	320

<i>Колешко В.М., Дейнак Д.А.</i> НАНОУГЛЕРОД: СТРУКТУРА, СВОЙСТВА.....	324
<i>Колешко В.М., Гулай А.В., Гулай В.А.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОКОПЕРЕНОСА В ТУННЕЛЬНЫХ СЕНСОРНЫХ МДМ-НАНОСТРУКТУРАХ	332
<i>Петюшик Е.Е., Романенков В.Е., Азаров С.М., Дробыш А.А.</i> ДОЛЯ СИЛИКАТА НАТРИЯ В ПОРЦИИ ШИХТЫ НА ОСНОВЕ КВАРЦЕВОГО ПЕСКА.....	337
<i>Жданович Г.М., Бобруйко Ю.П., Якацук Ф.Ф.</i> ДЕФОРМАЦИОННЫЙ МЕХАНИЗМ УПЛОТНЕНИЯ ПОРОШКОВОГО ТЕЛА.	341
<i>Аваков С.М.</i> ОБНАРУЖЕНИЕ ИЗОЛИРОВАННЫХ ДЕФЕКТОВ ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОМ КОНТРОЛЕ ОРИГИНАЛОВ ТОПОЛОГИИ НА ФОТОШАБЛОНАХ.....	344
<i>Трушко А.В., Чижик С.А., Кузнецова Т.А., Шкадаревич А.П., Курганович А.М., Городкин Г.Р., Глеб Л.К.</i> КОНТРОЛЬ ШЕРОХОВАТОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ	349
<i>Мойсейчик Е.А.</i> МАКРОСТРУКТУРА АРМАТУРНЫХ СТЕРЖНЕЙ	353
<i>Неумержицкая Е.Ю.</i> МЕТОД РАСЧЕТА ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ОХЛАЖДЕНИЯ ОДНОРОДНЫХ ПЛАСТИН.....	358
<i>Стеликов Н.Е.</i> КИНЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ ПРИ КРУЧЕНИИ	363
<i>Макушок Е.М., Петюшик Е.Е., Реут О.П.</i> О ВОЗНИКНОВЕНИИ ДЕФОРМАЦИОННОЙ АНОМАЛИИ ПРИ РАДИАЛЬНОМ ОБЖАТИИ НАМОТАННЫХ ПРОВОЛОЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ	367
ЭКОНОМИКА, ОРГАНИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ.....	371
<i>Козун С.В., Сачко Н.С.</i> ПОНЯТИЕ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ И ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ЕГО ФАКТОРЫ	371
<i>Похабов В.И., Кличевская В.Е.</i> ПЛАНИРОВАНИЕ ЛОГИСТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫМ ПРЕДПРИЯТИЕМ.....	374
<i>Торская И.В., Хованская Н.М.</i> АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭКСПОРТНОГО ПОТЕНЦИАЛА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫМИ ПРЕДПРИЯТИЯМИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ.....	378
<i>Бурейко В.В., Торская И.В.</i> АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ РЕСУРСОВ В МАШИНОСТРОЕНИИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ.....	383
<i>Старченко Е.В., Торская И.В.</i> АНАЛИЗ ИНВЕСТИЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ И ПРИВЛЕКАТЕЛЬНОСТИ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ.....	388
<i>Стельмах Е.В., Торская И.В.</i> РОЛЬ СТРАТЕГИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ В ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ	393
<i>Торская И.В., Мацыха Е.В.</i> ОПТИМИЗАЦИЯ ТОВАРНОГО ПОРТФЕЛЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ КАК ФАКТОР РОСТА ЕГО КОНКУРЕНТНЫХ ПРЕИМУЩЕСТВ	398
<i>Волченков А.А., Лавренова О.А.</i> АНАЛИЗ ИНСТРУМЕНТОВ WEB-САЙТА ДЛЯ РАБОТЫ С ИНТЕРНЕТ-АУДИТОРИЕЙ	403
<i>Червяк Е.А., Лавренова О.А.</i> ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МОДЕЛЕЙ РАСЧЕТА СТОИМОСТИ ИНТЕРНЕТ-РЕКЛАМЫ	407
<i>Грицук Г.В., Лавренова О.А.</i> ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ WEB-ПРЕДСТАВИТЕЛЬСТВА.....	411
<i>Повжик М.И., Лавренова О.А.</i> АНАЛИЗ И ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ИНТЕРНЕТ-БРЭНДОВ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОЙ КОНКУРЕНЦИИ	416

Калинкин Г.А. СОЦИАЛЬНО - ЭКОНОМИЧЕСКАЯ КОНЦЕПЦИЯ РАЦИОНАЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ОСНОВНЫХ ПРОЦЕССОВ ПОТОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ	420
Ефименко А.Г. СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К УПРАВЛЕНИЮ ПРОИЗВОДСТВОМ	425
ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ.....	430
Анципорович П.П., Акулич В.К., Дворянчикова А.Б., Дубовская Е.М. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ МАШИННОГО АГРЕГАТА В ЛАБОРАТОРНОМ ПРАКТИКУМЕ ПО ТЕОРИИ МЕХАНИЗМОВ И МАШИН	430
Анципорович П.П., Алейникова О.И., Булгак Т.И., Луцко Н.Я. КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ В ДИСЦИПЛИНЕ «ИНФОРМАТИКА».....	434
Клименко В.А. ФИЛОСОФСКО-ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ГУМАНИЗАЦИИ И ГУМАНИТАРИЗАЦИИ ОБРАЗОВАНИЯ В ВЫСШЕЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ ШКОЛЕ	436
Баранова А.С. РОЛЬ ИНТЕРАКТИВНЫХ МЕТОДОВ ОБУЧЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ПОДГОТОВКИ ПЕДАГОГОВ.	439
РЕФЕРАТЫ	443

УДК 621.914.1

Баршай И.Л., Алифанов А.В., Фельдштейн Е.Э., Гончаров С.П.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИГЛОФРЕЗЕРОВАНИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ НАКЛЕПА

*Белорусский национальный технический университет
Физико-технический институт НАНБ
РУП «Минский тракторный завод»
Зеленогурский университет
Минск, Республика Беларусь
Зелена Гура, Польша*

Качество поверхности в значительной степени определяет эксплуатационные показатели деталей машин. Как показали исследования [1], доля влияния поверхностной твердости H_μ и глубины наклепа h_n , поверхностного слоя на износ в период приработки составляет 50...55 %. Авторы работ [2, 3] указывают на то, что процесс трения и изнашивания должен протекать в пределах так называемого «третьего» тела или должно иметь место внешнее трение. Одним из наиболее важных условий реализации внешнего трения является правило положительного градиента механических свойств по глубине поверхностного слоя материала детали. Оно означает, что прочность при сдвиге в поверхностном слое должна возрастать от поверхности внутрь тела до определенного предела, т.е. должно соблюдаться условие $dt/dz > 0$. Если это условие не соблюдается, то внешнее трение сменяется внутренним и процесс изнашивания детали интенсифицируется [4].

Иглофрезерование является высокопроизводительным, ресурсо- и энергосберегающим экологически чистым процессом обработки. Однако этот метод обработки до настоящего времени не получил применения для упрочнения поверхности деталей. Это обусловлено недостаточным количеством сведений о влиянии процесса обработки на формирование физико-механических свойств обработанной поверхности, в частности, наклепа. В научно-технической литературе отсутствуют данные о возможности оптимизации и управления формированием наклепа в процессе иглофрезерования.

Обрабатываемые материалы – конструкционные стали: 20ХНЗА и 25ХГМ (ГОСТ 4345-71). Обработка плоских поверхностей образцов иглофрезерованием выполняли на горизонтально-фрезерном станке 6Н82Г. Обработку осуществляли иглофрезой диаметром $D = 125$ мм, шириной $B = 20$ мм и плотностью набивки проволочных элементов 75...85%. Диаметр единичного проволочного элемента $d = 0,3$ мм, вылет $L = 20$ мм. Результаты ранее выполненных исследований [5] позволили выбрать следующие значения параметров режима иглофрезерования, принятые за основной уровень в данном эксперименте: скорость резания (v) – 338 м/мин; минутная подача (S) – 660 мм/мин и натяг в системе «иглофреза-обрабатываемая поверхность» (i) – 0,45 мм.

Для определения влияния параметров режима иглофрезерования на изменение топографии поверхности применяли математическое планирование эксперимента. При планировании применили метод ЛП_т – последовательностей [6]. В этом случае точки реализации опытов плана располагаются в многомерном пространстве так, что их проекции на оси X_1 - X_2 , X_2 - X_3 , ..., X_{i-1} - X_i находятся на равном расстоянии друг от друга. Координаты точек рассчитывали из условия $X_{min} = 0$ и $X_{max} = 1$.

При решении технологических задач для моделирования исследуемого процесса широко используются уравнения множественной регрессии

$$y = C \prod x_i^{m_i} \text{ и } y = \exp(b_0 + S b_i x_i).$$

Их можно привести к линейному виду путем логарифмирования с последующим использованием метода наименьших квадратов. В случае применения ПЭВМ была использована методика Д. Полларда [7].

Реализованные сочетания параметров режима иглофрезерования в соответствии с матрицей планирования представлены в табл. 1.

Таблица 1. Условия проведения опытов

Опыт	X_1 - скорость резания v , м/мин	X_2 - подача S , мм/мин	X_3 - натяг i , мм
1	169	330	0,22
2	84	530	0,11
3	253	170	0,34
4	295	400	0,06
5	127	85	0,28
6	211	270	0,17
7	42	690	0,39

Измерения микротвердости проводили на приборе ПМТ-3 при нагрузке 100 г на поверхности шлифа. Результаты определения микротвердости поверхности образцов из исследуемых сталей представлены в виде гистограмм на рис 1.

После обработки экспериментальных данных были разработаны математические модели влияния параметров режима иглофрезерования на изменения величины наклепа на поверхности образцов в виде уравнений регрессии (1) – (4):

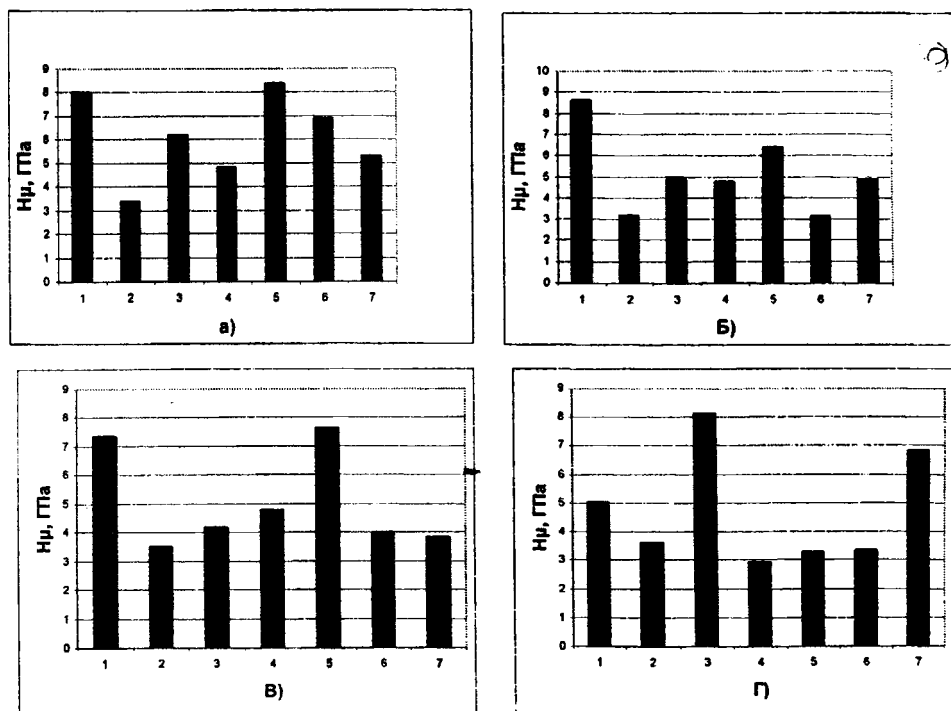


Рис. 1. Сравнение микротвердости поверхности образцов из исследуемых сталей после иглофрезерования (по оси абсцисс номера опытов в соответствии с табл. 1)

20ХН3А

$$H_{\mu} = 5,36 v^{0,113} S^{-0,041} i^{0,092}; \quad (1)$$

20ХНР

$$H_{\mu} = 8,94 v^{0,134} S^{-0,183} i^{0,088}; \quad (2)$$

25ХГМ

$$H_{\mu} = 8,94v^{0,134}S^{-0,183}i^{0,088}; \quad (3)$$

20ХГМ

$$H_{\mu} = 4,29v^{0,042}S^{-0,107}i^{0,032}. \quad (4)$$

На основании уравнений (1) – (4) построены одномерные сечения функции отклика (рис. 2), характеризующие влияние параметров режима иглофрезерования на формирование наклепа на поверхности образцов. Анализ разработанных моделей свидетельствует о следующем.

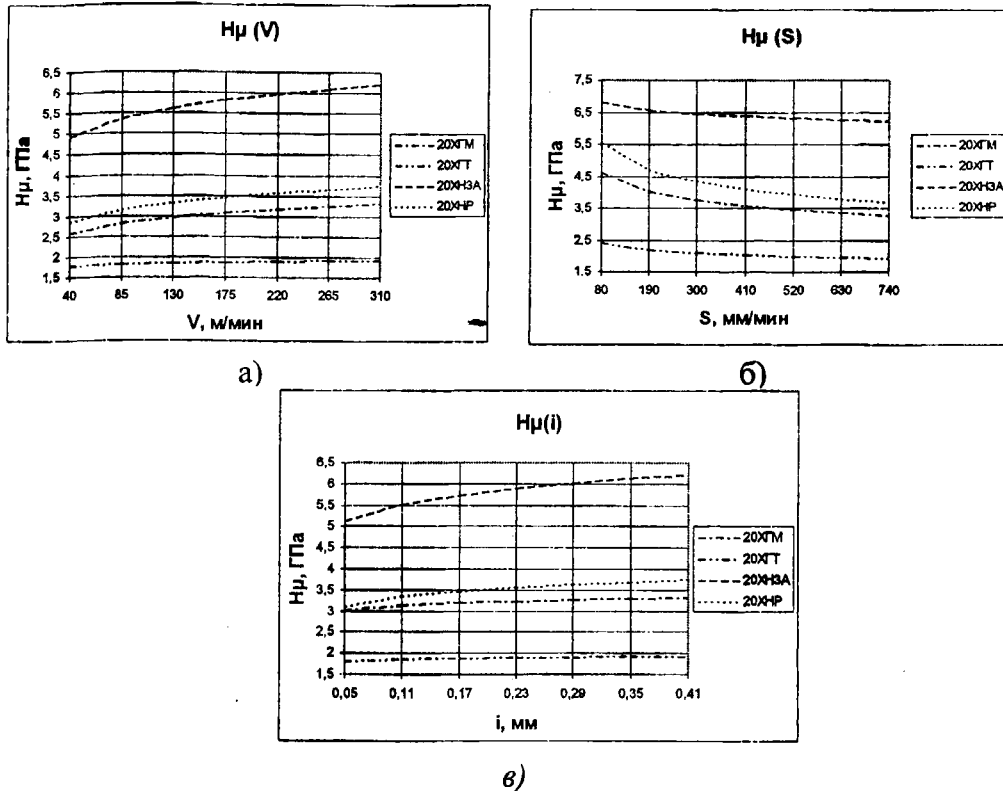


Рисунок 2 - Влияние параметров режима иглофрезерования на формирование наклепа поверхностного слоя: а - скорость резания; б – продольная минутная подача; в – натяг

Характер зависимости изменения микротвердости поверхности от скорости резания (см. рис. 2,а) объясняется тем, что рост этого параметра режима обработки способствует увеличению силового воздействию на обрабатываемую поверхность и превалированию над температурным процессом.

Снижение наклепа с ростом продольной подачи связано с сокращением времени силового воздействия на обрабатываемые участки поверхности (см. рис. 2,б)

Повышение наклепа с увеличением натяга в системе «иглофреза-обрабатываемая поверхность» (см. рис. 2,в) вызвано ростом объема пластической деформации материала поверхностного слоя.

Разработанные модели позволяют оптимизировать параметры режима иглофрезерования и управлять формированием наклепа поверхности деталей из исследованных марок сталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев П.П. Формирование шероховатости поверхности при обработке поверхностей пластической деформацией. Технология машиностроения. – Тула, 1977. – С. 13-17.
2. Костецкий Б.И. Трение, износ и смазка в машинах. – Киев, Техника. 1970. – 395 с.
3. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчета на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 327 с.: ил.
4. Крагельский И.В. Трение и износ. – М.: Машиностроение, 1969. – 418 с.
5. Ящерицын П.И., Махаринский Е.И. Планирование эксперимента в ма-

пиностроении. – Мн.: Высшая школа, 1985. – 286 с. 6. Баршай И.Л. Обеспечение качества поверхности и эксплуатационных характеристик деталей при обработке в условиях дискретного контакта с инструментом. – Мн., УП «Технопринт», 2003. – с. 246. 7. Поллард Д. Справочник по вычислительным методам статистики/ Пер. с англ. В.С.Занадворова. М.: Финансы и статистика, 1982. - 344 с.

УДК 621.7

Баршай И.Л., Бирич А.В., Гончаров С.П., Фельдштейн Е.Э.

ФОРМИРОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ИГЛОФРЕЗЕРОВАНИИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЧУГУНА

*Белорусский национальный технический университет,
РУП «Минский тракторный завод»
Зеленогурский технический университет
г. Минск, Республика Беларусь,
г. Зелена Гура, Польша*

Качество поверхности в значительной степени определяет эксплуатационные характеристики деталей машин. Установлено, что 70...80% вариаций показателей износостойкости связаны с параметрами шероховатости поверхности деталей машин [1]. Коррозионная стойкость деталей машин также связана с шероховатостью поверхности деталей. Известно [2], что 12% вариации коррозии объясняется изменением характеристик шероховатостью поверхности. Одним из перспективных методов обработки для формирования качества поверхности и эксплуатационных показателей деталей машин является иглофрезерование. Расширение области применения иглофрезерования ограничивается недостаточностью данных влияния параметров режима на формировании топографии обработанной поверхности. Это обуславливает актуальность выполнения данных исследований.

Исследования выполняли на образцах из чугунов марок: ВЧ50, СЧ15 и СЧ25. Иглофрезерование образцов осуществляли на горизонтально-фрезерном станке 6Н82Г. Использовали иглофрезу диаметром $D = 150$ мм, шириной $B = 20$ мм и плотностью набивки 75...85%. Диаметр единичного проволочного элемента $d = 0,3$ мм, вылет $L = 20$ мм. При проведении эксперимента определяли формирование высотных характеристик шероховатости поверхности: R_{max} , R_a и R_z . Измерение характеристик шероховатости до и после обработки выполняли на мобильном приборе для контроля шероховатости поверхности класса точности 1 «Hommel tester» T500 фирмы «Hommelwerke GmbH». Для исследования топографии поверхности был использован комплекс для микро- и макроанализа поверхности на базе микроскопа МКИ-2М-1 (НПО «Планар») с увеличением до 1200 крат и преобразователя изображения с помощью цифровой камеры «Никон» с разрешением 4,5 миллиона пиксель и последующей передачей изображения на ПЭВМ (рис. 1). Определение влияния параметров режима иглофрезерования на изменение характеристик шероховатости поверхности осуществляли на основе математического планирование эксперимента, в частности, метода ЛП₁ – последовательностей [3].

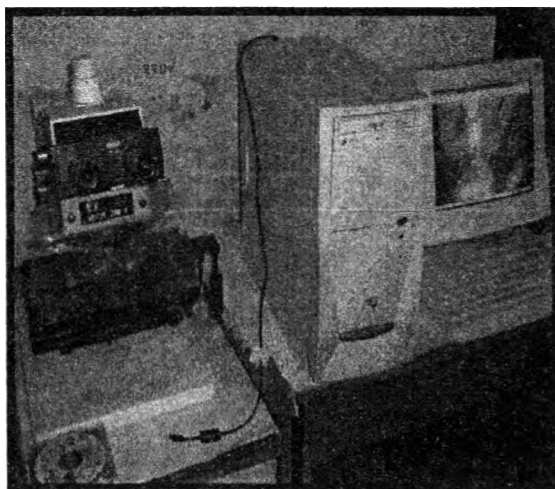


Рисунок 1 - Комплекс для микро- и макроанализа топографии поверхности

Результаты ранее выполненных исследований [4] позволили выбрать следующие значения параметров режима иглофрезерования, принятые за основной уровень в данном эксперименте: скорость $v = 280$ м/мин; минутную подачу $S = 420$ мм/мин и натяг в системе «иглофреза-обрабатываемая поверхность» $i = 0,30$ мм. Реализованные сочетания параметров режима иглофрезерования в соответствии с матрицей планирования приведены в табл. 1.

Таблица 1 Условия проведения опытов

Номер опыта	X_1 - скорость резания V , м/мин	X_2 - минутная подача $S_{\text{мин}}$, мм/мин	X_3 - натяг i , мм
1	140	210	0,15
2	70	135	0,08
3	210	170	0,22
4	255	530	0,04
5	10	35	0,19
6	175	210	0,11
7	35	85	0,26

Результаты влияния сочетания параметров режима иглофрезерования на шероховатость поверхности образцов из исследуемых марок чугунов представлены на рис. 2.

На этом рисунке по оси абсцисс указаны номера опытов в соответствии с табл. 1, а номером 0 - шероховатость до обработки.

Минимальные значения исследуемых характеристик шероховатости получены при обработке образцов из высокопрочного чугуна ВЧ50 в 4 - м опыте, а для образцов из СЧ15 и СЧ25 - в 5 - м.

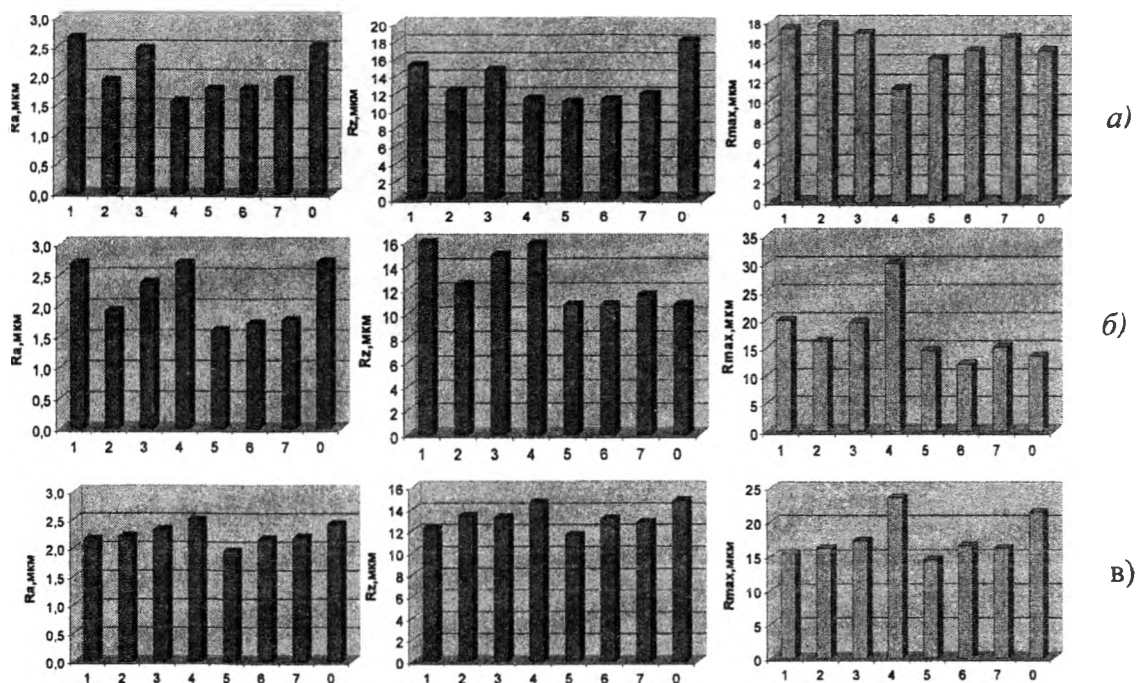


Рисунок 2 - Влияние сочетания параметров режима иглофрезерования на изменение характеристик шероховатости образцов: а – чугун ВЧ 50, б – чугун СЧ15, в – чугун СЧ25

Полученные результаты объясняются тем, что при обработке хрупких материалов, какими являются чугуны, наряду со срезом отдельных частиц металла происходит их сдвиг и беспорядочное хрупкое скалывание от основной массы металла, увеличивающее шероховатость поверхности. Повышение скорости резания уменьшает откалывание частиц материала и обрабатываемая поверхность становится более гладкой. Хрупкость чугуна марки ВЧ50 превышает хрупкость чугунов марок СЧ, поэтому иглофрезерование с высокой скоростью резания и подачей (см. табл. 1, опыт 4) обеспечило минимальную шероховатость поверхности образцов из чугуна марку ВЧ50.

На рис. 3 представлены фотографии топографии поверхности образцов до и после иглофрезерования.

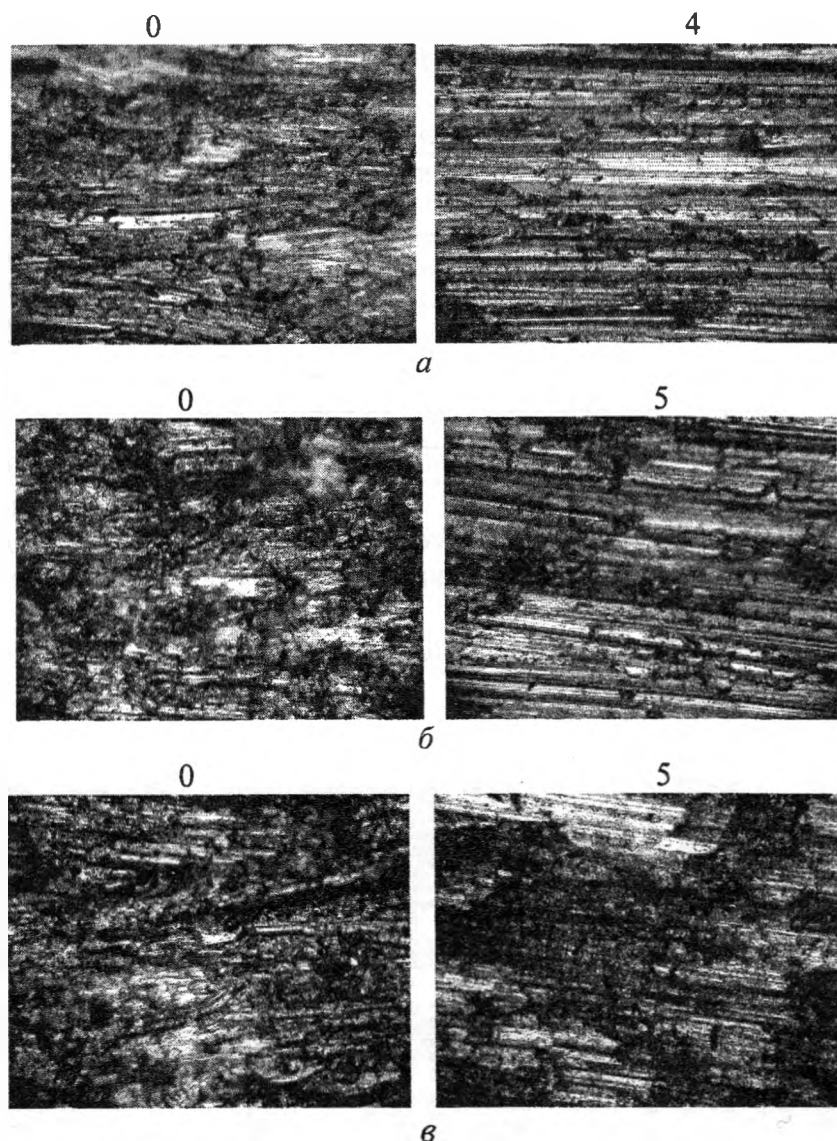


Рисунок 3 - Топография поверхности образцов до (0) и после иглофрезерования ($\times 250$): а – ВЧ50, б – СЧ15, в – СЧ25

Изучение топографии обработанной поверхности образцов позволяет сделать вывод о том, что после иглофрезерования следы от проволочных элементов на поверхности произвольно изменяют свое направление. На поверхности формируются расположенные случайным образом выступы и впадины, риски. Поверхность образцов из исследованных чугунов после иглофрезерования стала более гладкой, без резких впадин и выступов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технологические основы обеспечения качества машин / К.С. Колесников, Г.Б. Баландин, А.М. Дальский и др. // Под общ. ред. К.С. Колесникова. – М.: Машиностроение, 1990. – 256 с.
2. Кулаков Ю.М, Хрульков В.А. Отделочно-зачистная обработка деталей. – М.: Машиностроение, 1979. – 216 с.
3. Ящерицын П.И., Махаринский Е.И. Планирование эксперимента в машиностроении. – Мн.: Высшая школа, 1985. – 286 с.
4. Баршай И.Л. Обеспечение качества поверхности и эксплуатационных характеристик деталей при обработке в условиях дискретного контакта с инструментом. – Мн., УП «Технопринт», 2003. – 246 с.
5. Поллард Д. Справочник по вычислительным методам статистики/ Пер. с англ. В.С.Занадворова. М.: Финансы и статистика, 1982. - 344 с.

ПЕРСПЕКТИВЫ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ И ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Методы лазерной термообработки аналогичны обычным методам термической обработки сплавов. Для осуществления лазерной закалки (термоупрочнения) локальный участок поверхности массивной детали нагревают с помощью излучения до сверхкритических температур, а после прекращения действия излучения этот участок охлаждается за счёт отвода теплоты во внутренние слои металла. Высокая скорость охлаждения приводит к образованию закалочных структур в сплавах и к высокой твёрдости поверхности.

Оплавление поверхности как технологическая операция начала развиваться с появлением лазерного излучения и другими методами практически не выполняется. При оплавлении для улучшения качества поверхности (уменьшения пористости или шероховатости) режимы обработки подбирают исходя из требований получения наилучшей микрогеометрии поверхности, а скорость охлаждения в этом случае, как правило, не регламентируется. При аморфизации скорость охлаждения должна быть максимальной для получения аморфного состояния, поэтому глубина оплавления не превышает 50 мкм

Методы получения поверхностных покрытий - легирование и наплавка - отличаются тем, что участок поверхности нагревается выше температуры плавления, в зону оплавления вводят легирующие компоненты, и в результате образуется поверхностный слой с химическим составом, отличным от основного металла. Вакуумно-лазерное напыление заключается в испарении материала участка поверхности под воздействием лазерного излучения в вакууме и конденсировании испарившихся продуктов на подложке.

Особенности фазовых переходов при лазерном нагреве железоуглеродистых сплавов:

Формирование структуры при лазерной термообработке является важным вопросом, поскольку разные сплавы и стали после одинаковых термических циклов имеют противоположные свойства, а именно: упрочняться и разупрочняться, имеют разную величину и знак остаточных напряжений и деформаций.

В результате лазерного нагрева в сталях формируется структура, особенности которой обусловлены степенью завершенности процесса аустенизации при нагреве. Завершенность процесса аустенизации определяется скоростью и температурой нагрева, временем взаимодействия исходной структуры.

При лазерной обработке различные слои нагреваются до разных температур, зоны лазерного воздействия имеют слоистое строение. По результатам измерения микротвёрдости и исследования микроструктуры по глубине зоны лазерного воздействия сталей можно видеть в общем случае три принципиально различных по природе фазовых превращений слоя:

первый слой - зона оплавления (ЗО), полученная при закалке из расплавленного состояния. В большинстве случаев первый слой имеет столбчатое строение, причём кристаллы вытянуты в направлении теплоотвода. Основная структурная составляющая - мартенсит. Карбиды при этом обычно растворяются. После лазерной закалки сталей в интервале реально применяемых на практике режимов в зоне обработки отсутствуют такие факторы, как кратеры, шлаковые включения, обезуглероженные зоны. При лазерной закалке без оплавления первый слой зоны обработки отсутствует.

второй слой - зона закалки из твёрдой фазы, получен при закалке из твёрдого состояния. Нижняя граница его определяется нагревом до точки АС₁, т.е. в этом слое имеет место как полная, так и неполная закалка. Этот слой отличается большой неоднородностью по глубине: ближе к поверхности имеется мартенсит и остаточный аустенит, полученные при охлаждении из области гомогенного аустенита, а ниже – из области негомогенного аустенита при охлаждении. Поэтому здесь рядом с мартенситом имеются элементы исходной структуры: феррит в доэвтектоидной и цементит в заэвтектоидной стали.

третий слой - переходная зона, образуется при нагреве металла ниже точки АС₁. При лазерной обработке предварительно закаленной или отпущенной стали в этом слое имеет место понижение микротвёрдости связанное с образованием структур отпуска - тростита или сорбита. Третий слой в этом случае называется зоной отпуска.

Второй и третий слой образуют зону термического влияния.

Принципиального различия в строении и в микроструктуре различных слоёв после лазерной обработки импульсными и непрерывными лазерами нет, имеются лишь отдельные особенности, обусловленные разным временем воздействия.

Свойства сплавов после лазерной закалки:

Основная цель лазерной закалки - повышение износостойкости деталей. Уменьшение износа деталей после лазерной закалки обусловлено рядом факторов: высокой твёрдостью поверхности, высокой дисперсностью структуры; увеличение несущих свойств поверхности; уменьшением коэффициента трения и др.

Заметно увеличивается и износостойкость чугунов в условиях трения со скольжением после обработки непрерывным лазером. Повышение износостойкости чугунов после лазерной обработки обусловлено кроме вышеупомянутых факторов улучшением условий трения из-за сохранившегося в зоне лазерного воздействия графита. Повышается также и износостойкость сталей и некоторых других сплавов при трении в щелочной и кислотной средах.

Напряжённое состояние поверхностных слоёв после лазерной закалки. Формирование напряжений при охлаждении поверхности можно представить таким образом. После прекращения лазерного воздействия наиболее быстро охладится внутренний слой металла, лежащий возле непрогретого исходного слоя. Приповерхностный слой охлаждается и сжимается в последнюю очередь. Это приводит к большой неравномерности в распределении остаточных напряжений. Величина же и интервалы изменения напряжений при обработке зависит от режимов обработки, и прежде всего от мощности излучения.

Остаточные деформации, как правило увеличиваются при увеличении степени перекрытия пятен или полос упрочнения. Кроме того, размер деформации зависит от коэффициента перекрытия и координатной последовательности обработки. Оптимальные режимы с этой точки зрения - равномерное и симметричное заполнение поверхности пятнами или полосами упрочнения.

Лазерная термообработка материалов уже успешно применяется на предприятиях. Ниже будут приведены результаты исследования влияния лазерной закалки на изменение микротвёрдости поверхности на примере чугуна марки СЧ 35.

Металлографические исследования зон лазерного нагрева в чугуне СЧ35 показали высокую эффективность лазерного воздействия. Так, при скорости луча $v=0,6$ м/мин, диаметре $D=5$ мм и мощности $P=1$ кВт достигалась глубина закалки 0,5–0,6 мм при твердости 9000–9500 МПа. При увеличении скорости луча до 0,8 м/мин глубина закалки уменьшается до 0,3 мм, а твердость повышается на 5 %.

Лазерная обработка чугуна с оплавлением приводит к растворению графита и по этой причине в зоне оплавления формируется структура отбеленного чугуна с очень мелкими дендритами или ячейками аустенита. Пространство между ячейками аустенита представляет двухфазную составляющую — ледебурит, полностью состоящую из цементита, что и определяет высокую твердость этой зоны.

Установлено, что лазерное упрочнение позволяет повысить исходную твердость (2000–2400 МПа) до 8000–9500 МПа (рис.1).

Аналогичные исследования были проведены в условиях оплавления поверхности. Зона оплавления характеризуется практически дендритной структурой, полным растворением свободного графита карбидов. Ориентация дендритов показывает направление теплоотвода. Тепловое поле в зоне существенно отличается от поля в однородной и изотропной среде. Причина заключается в наличии графитных пластин, теплофизические свойства которых резко отличаются от свойств других структурных компонентов чугуна. В оплавленном слое наблюдаются поры-флокены, обусловленные выделением в процессе обработки адсорбированных графитом газов. Микротвердость материала в зоне оплавления составляет 6000–7000 МПа. Ниже зоны оплавления

лежит зона упрочнения. Она характерна более низким содержанием графита, графитные пластины утончены, имеют размытые границы. Здесь происходит интенсивное растворение графита и образование мартенсита. В результате рекристаллизации появляется мартенсит, имеющий игольчатую структуру, микротвердость которого достигает 8500–9500 МПа. С увеличением глубины нагрева содержание мартенсита падает, а дисперсность его растет. Это связано с тем, что нижние слои разогреваются до более низких температур и охлаждаются с большей скоростью. Получение мелкодисперсного мартенсита на достаточной глубине и является основной задачей лазерного упрочнения. Глубина упрочнения серого чугуна может достигать 0,7–0,9 мм без оплавления поверхности при использовании лазера мощностью 1 кВт.

Дальнейшие перспективы совершенствования технологий лазерного поверхностного упрочнения связаны прежде всего с разработкой новых путей дальнейшего улучшения эффективности использования лазерной закалки для повышения служебных свойств сталей и сплавов. Одним из таких путей является применение комбинированных методов обработки сочетающих в себе лазерное термоупрочнение и другие способы обработки поверхностей. Разработаны и опробованы в промышленных условиях следующие технологические процессы:

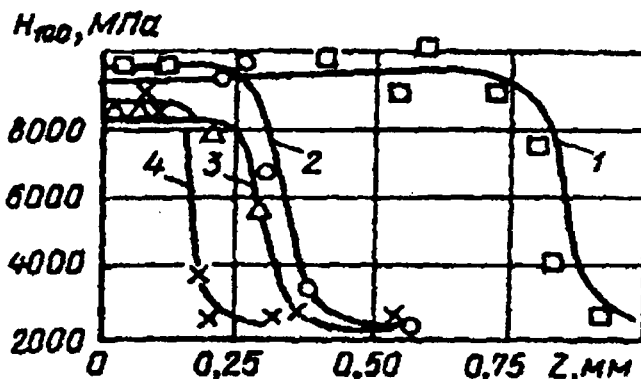
- цементация малоуглеродистых и легированных сталей с последующей лазерной закалкой, которая дает эффект повышения твердости поверхности до 20% по сравнению с традиционными видами упрочнения;

- лазерная закалка перлитных теплостойких сталей с последующим азотированием, технология апробирована при изготовлении запорной арматуры паровых турбин, эффект повышения задиристости, теплостойкости, коррозионной стойкости примерно в 1,5 раза выше, чем после азотирования;

- комбинированная термическая обработка стали – нитроцементация и лазерная закалка; ряд других методов.

Ниже приведены результаты исследования комбинированной обработки лазерной закалкой и последующего деформационного старения.

Проведенное исследование показало, что дополнительное поверхностное пластическое деформирование посредством фрикционного нагружения, а также специальной



абразивной обработки существенно повысило микротвердость поверхности закаленных лазером конструкционных и инструментальных сталей 40, 45X, 65Г, У8, 20ХН3А (цементированная), 80Ф1, 80М2, 80С2, 80Г2, ШХ15, 9ХС. Сравнительные данные о влиянии лазерной и комбинированной (лазер + пластическое деформирование) обработок на микротвердость поверхности ряда исследованных сталей приведены в таблице 1.

Таблица 1. Микротвердость поверхности сталей, ГПа

Марка стали	Лазерная закалка	Лазерная закалка + пластическое деформирование (ПД)	
		ПД трением	ПД абразивными частицами
40	7,4	10,5	8,4
45X	8,0	10,8	8,9
65Г	9,2	11,5	11,1
У8	9,9	12,2	12,2
80Ф1	9,8	12,3	12,7
9ХС	9,5	11,5	12,1
ШХ15	9,3	11,8	12,3
20ХН3А (цемент.)	8,9	11,3	11,8

Уникальность использованной комбинированной обработки состоит в том, что достигнутый с ее помощью высокий уровень твердости поверхности сталей сохраняется и после нагрева до 350° С. Твердость же углеродистых сталей, подвергнутых лазерной или объемной закалкам, резко снижается при нагреве выше 150° С (рис. 2).

Таким образом, комбинированная обработка повышает теплостойкость простых углеродистых сталей до уровня теплостойкости легированных мартенситных сталей (типа 40Х13 и др.).

Высокие твердость и теплостойкость поверхностного слоя сталей, подвергнутых предлагаемой комбинированной обработке, обеспечивают исследуемым сталям большую износостойкость даже при трении с повышенными скоростями скольжения, когда имеет место интенсивный фрикционный нагрев, приводящий к термическому разрушению поверхности и, соответственно, к катастрофическому тепловому изнашиванию.

Металлографическое, рентгеновское и электронно-микроскопическое исследования показали, что структурное состояние, формирующееся в сталях под действием комбинированной обработки, характеризуется очень высокой степенью дисперсности кристаллов мартенсита. Интенсивная локальная пластическая деформация приводит к измельчению мартенситных кристаллов с образованием фрагментов размером 10-200 нм, характеризующихся значительной взаимной разориентировкой. При этом в мартенсите происходят процессы деформационного динамического старения, которые связаны с выходом атомов углерода из октопор ОЦТ кристаллической решетки в примесные атмосферы многочисленных ($\rho \approx 5 \times 10^{12}, \text{см}^{-2}$) дислокаций. Высокая энергия взаимодействия атомов углерода с дислокациями в α -мартенсите обуславливает сильное примесное закрепление дислокаций, которое обеспечивает большую прочность, теплостойкость и износостойкость сталей, подвергнутых комбинированной обработке.

Описанное выше эффективное положительное влияние комбинированной обработки на прочность, теплостойкость и износостойкость имеет место при реализации различных режимов лазерной обработки (закалка с оплавлением поверхности и без

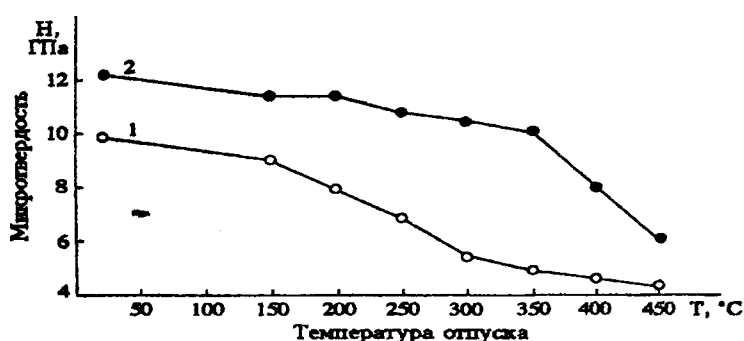


Рисунок 2- Влияние температуры отпуска на микротвердость поверхности стали У8. 1 - закалка; 2 - закалка, пластическое деформирование трением

оплавления; в среде аргона, гелия, воздуха; при использовании газового CO₂ - лазера и твердотельного ИАГ - лазера; различной мощности излучения и др.), а также разных схем поверхностного пластического деформирования (фрикционное нагружение твердосплавным сферическим индентором, воздействие абразивных частиц).

Показана высокая эффективность применения предложенной комбинированной обработки (лазерная закалка + поверхностное пластическое деформирование) для повышения прочности, теплостойкости и износостойкости сталей различного класса. Дополнительное поверхностное деформирование существенно улучшает прочностные и служебные свойства сталей, закаленных лазером.

Положительное влияние комбинированной обработки на прочность, теплостойкость и износостойкость сталей связано с формированием в их поверхностном слое ультрадисперсной структуры α -мартенсита, претерпевшего деформационное динамическое старение.

Предложенная обработка, не требующая значительных дополнительных материальных и энергозатрат по сравнению с лазерной закалкой, может быть использована для повышения служебных свойств стальных изделий самого широкого профиля.

Для расширения возможностей практического применения предлагаемой обработки целесообразно продолжить исследования в направлении изучения эффективности влияния комбинированной обработки на прочность, теплостойкость и износостойкость деталей из различных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.Г.Григорьянц, А.Н.Сафонов. Лазерная техника и технология: В 7кн. – Кн. 3 Методы поверхностной лазерной обработки: Учебн.пос. для вузов. М.: Высш.шк., 1987 – 191с.
2. А.М. Гаджиев Поверхностное термическое упрочнение серых чугунов лазерным излучением. Вестник машиностроения. 2000 №4 С.48 – 49.
3. В.М.Ходаковский. Особенности лазерного упрочнения чугунных деталей судовых технических средств. Новые материалы и технологии производства. 2003. №4 С.26 – 29.
4. В.М.Счастливец рук, Л.Г.Коршунов, исп.А.В.Макаров, И.Л.Солодова Использование комбинированной обработки (лазерная закалка и последующее деформационное старение) для повышения износостойкости и теплостойкости стальных поверхностей. Региональная наука, Свердловская обл. 2004.
5. Е.И.Тескер, В.А.Гурьев, С.Е.Тескер, Е.Н.Кондратьев Перспективы применения лазерных технологий для повышения эксплуатационных свойств деталей машин и оборудования. Упрочняющие технологии и покрытия. 2005. №1 С.35 – 38

УДК 621.771.63

Исаевич Л.А., Малекян М.М.

АНАЛИЗ И СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ УСТРОЙСТВ И СПОСОБОВ ПРОКАТКИ ПОЛОС ПЕРЕМЕННОЙ ПО ДЛИНЕ ТОЛЩИНЫ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Введение

Различные устройства для получения полос переменной по длине толщины применяются в ряде фирм разных стран. Эти устройства можно разделить на четыре группы: 1)

гидрокопировальная прокатка; 2) автоматическая прокатка с контрольными системами; 3) прокатка на профилированной оправке; 4) проката полос с использованием кулачков.

Гидрокопировальная прокатка

К первой группе относится устройство [1], включающее прокатную клеть (рис. 1), клиновой нажимной механизм 1 и натяжное устройство с гидроприводом 2 (рис. 1).

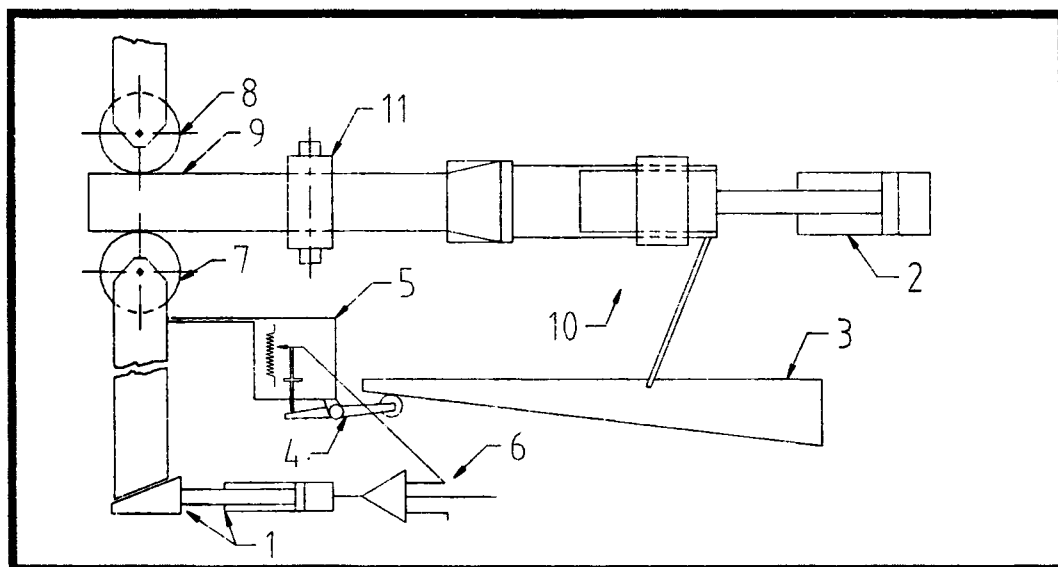


Рисунок 1- Схема прокатки полос переменной толщины в стане с гидрокопировальной следящей системой [1]

Клиновой нажимной механизм управляется натяжным устройством при помощи следящей системы с копиром 3. Копир 3 движется при помощи механизма перемещения заготовки 10, а рычаг 4 постоянно связан с его поверхностью при помощи ролика, который находится на конце рычага. Получаемый сигнал при этом посылается датчику линейных перемещений 5 и потом оттуда передается датчику 6 включения нажимного механизма. Механизм перемещения 1 нижнего валка получает этот сигнал от датчика линейных перемещений 5, и двигает валок 7 синхронно с рычагом 4. Рабочий цикл устройства включает в себя следующие этапы. Верхний валок 8 регулируется для установления заданного положения. Далее заготовка перемещается в направлении валков 7 и 8 гидравлическим цилиндром 2. Затем гидравлический цилиндр возвращает заготовку в исходное положение. В это время нижний валок перемещается механизмом перемещения 1 в соответствии с положением рычага на копиере. Когда закончится первый цикл прокатки, процесс повторяется сначала. Такие последовательные рабочие ходы выполняются до тех пор пока заготовка не приблизится к конечной форме. На предпоследнем этапе ширина заготовки уменьшается между двумя вспомогательными валками 11 на ширину меньшую, чем требуемая конечная ширина, чтобы заготовка приближалась к конечной ширине готовой полосы после последнего этапа прокатки между двумя главными валками 7, 8.

А. Я. Вилсон [2, 3], Л. М. Фасонейсуг-Валзверк [4], М. Кавакуво и другие [5] и А. Ж. Хоеш [6] использовали эту систему без клинового нажимного механизма. В их изобретениях гидроцилиндр непосредственно связан с валками.

Недостатком указанных выше устройств прокатки полос переменной толщины является невозможность получения высокой точности изделий.

Автоматическая прокатка с контрольными системами

Вторая группа включает в себя устройства [7 - 13], на которых используются контрольные системы. Например, разработанное устройство [12], показанное на рис. 2, представляет собой обычный планетарный прокатный стан 1, прижимные ролики 2, втягивающий зажим 3, механизм управления 4, датчик контроля толщины 5 и датчик позиции 6. Верхний

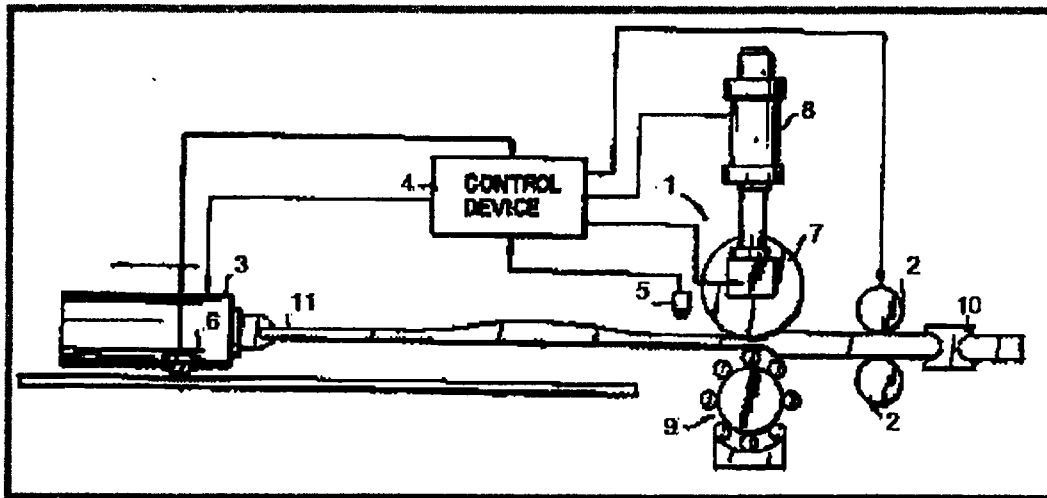


Рисунок 2 - Схема прокатки полос переменной толщины, управляемой контрольной системой [12]

валок 7 обладает способностью перемещаться вертикально цилиндром 8. Прижимные ролики 2 расположена на стороне подачи полосы в прокатный стан.

Втягивающий зажим 3 находится на стороне выхода полосы из валков и обладает способностью двигаться назад и вперед. Гидроцилиндр 8, верхний валок 7, прижимные ролики 2 и втягивающий зажим 3 управляются механизмом управления 4 (рис. 2). Механизм управления 4 включает в себя микрокомпьютер, получающий информацию от датчика контроля толщины 5 и датчика позиции 6. Датчик позиции 6 соединен с втягивающим зажимом 3 и дает сигнал согласно расстоянию перемещения зажима 3. Информация должна корректироваться в связи с возможным нагреванием деталей устройства. Микрокомпьютер сохраняет много видов информации, например, соотношение длины и толщины, характеристики прокатного стана 1 (информацию о корректировании подъема верхнего валка 7 в соответствии с тепловым расширением верхнего валка 7 и планетарного валка 9), изменение длины полосы в результате её охлаждения. Вся эта информация используется микрокомпьютером для автоматической прокатки полос переменной по длине толщины. Процесс включает себе следующие этапы: полоса, удерживаемая прижимными роликами 2, подается в валки 7 и 9 с помощью направляющих роликов 10. Далее происходит обжатие полосы этими валками. Когда конец прокатываемой полосы достигает заранее установленной позиции, втягивающий зажим 3 зажимает конец полосы в ответ на выходной сигнал датчика 5. Затем прижимные ролики 2 разводятся и позволяют полосе свободно перемещаться. На этом этапе полоса подвергается

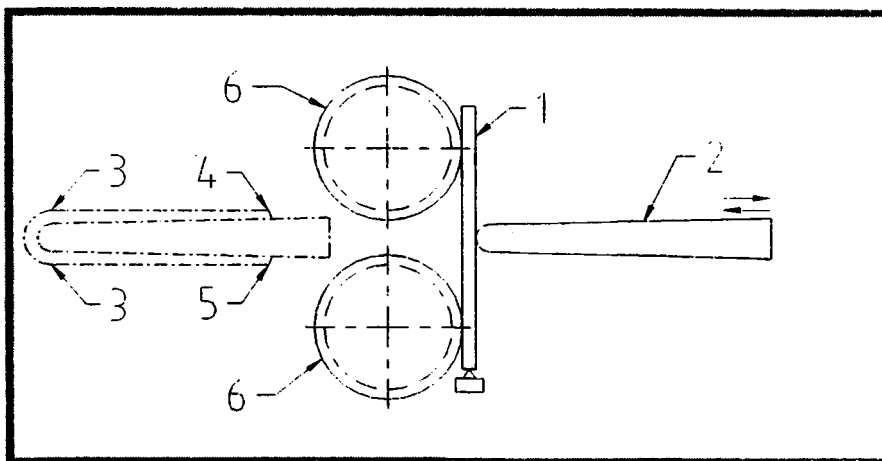


Рисунок 3 - Схемы прокатки или вытяжки с изгибом заготовки [13]

заранее установленному натяжению втягивающим зажимом. Увеличение ширины материала ограничивается вследствие этого натяжения.

Такие системы являются очень гибкими, но они обычно производят прокатку медленно, следовательно, могут возникать нежелательные явления, связанное с охлаждением заготовки. В результате этого явления уменьшается способность заготовки к формоизменению.

Прокатка на профилированной оправке

Третья группа включает в себя устройства [13 - 15], в которых используют прокатку или вытяжку с поперечным изгибом заготовки. В [13] (рис. 3) горячая заготовка 1 помещается на профильной оправке 2 и задаётся в неприводные валки 6 или фильеру. Нагретая прямая заготовка 1 по рольгангу подаётся к оправке 2 и при её движении изгибается валками 6 до прилегания концов заготовки к оправке. Затем производится прокатка. Деформирование осуществляется неизменным калибром или неприводимыми валками 6 и начинается от срединных частей 3 заготовки, продвигаясь к её концам 4 и 5 одновременно, а оправка имеет возвратно-поступательное движение. После прокатки заготовка снимается с оправки и разгибается специальным механизмом.

Недостатком данного способа является сложность изготовления профильной оправки. Кроме того, большая контактная поверхность между заготовкой и оправкой увеличивает отдачу теплоты заготовки и её охлаждение, что уменьшает способность её материала к формоизменению.

Проката полос с использованием кулачков

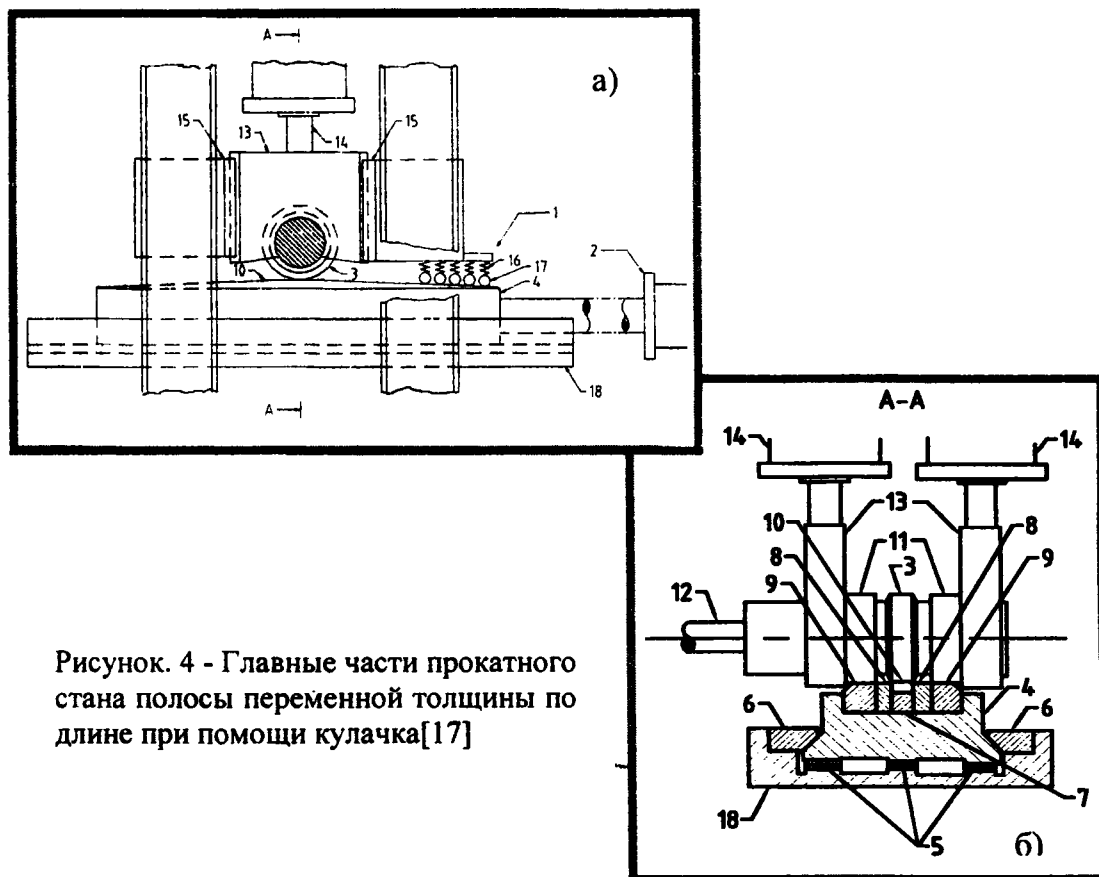


Рисунок. 4 - Главные части прокатного стана полосы переменной толщины по длине при помощи кулачка [17]

Четвёртая группа объединяет устройства [17-24], в которых использован наиболее распространенный способ для промышленного производства различных изделий. Например, разработанное устройство [17] (рис. 4) включает в себя средство 1 для удержания прокатываемой заготовки, гидроцилиндр 2 для её горизонтального движения, а также регулируемый прокатный валок 3 для получения полос переменной по длине толщины. Салазки 4 имеют возвратно-поступательное движение по поверхностям направляющих 5 при помощи гидроцилиндра 2. Планки 6 не позволяют салазкам 4 двигаться в вертикальном направлении. Блоки 7 и 8 штампа и кулачки 9 ограничивают по ширине полосу 10 внутри салазок. Рабочий валок 3 и следящие валки 11 име-

ют одинаковые диаметры и смонтированы на ведомом валу 12. Подшипники 13 вала связаны с гидроцилиндрами 14, чтобы прижимать следящие валки к кулачкам 9. Подшипники 13 могут двигаться между вертикальными направляющими 15, которые находятся на станине устройства.

Рабочий валок 3 поднимается гидроцилиндрами 14, когда салазки 4 находятся в крайней позиции слева, и нагретая заготовка помещается внутрь полости штампа. Затем салазки перемещаются в позицию деформирования, показанную на рис. 4(а), а вал 12 с его комплектующими деталями опускается, чтобы рабочий валок 3 переместился к центральной части заготовки и следящие валки прижимались к кулачкам 9. Салазки 4 движутся налево от позиции (показана на рис. 4а) и, поскольку следящие валки постоянно прижимаются к кулачку 9, заготовка копируется по профилю кулачков. Салазки 4 возвращаются на центральную позицию, а потом другая половина заготовки прокатывается так же. В течение этого этапа пружины 16 ролики 17, действующие на заготовку, не позволяют подниматься её заднему концу

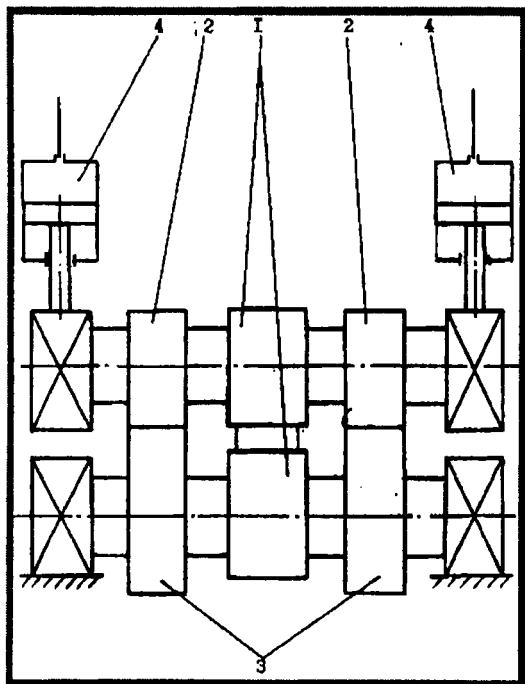


Рисунок 5 - Схема прокатки периодического профиля в валках постоянного профиля [24]

В альтернативном конструктивном исполнении рабочий валок и следящие валки могут быть в качестве одного валка, которые с блоками кулачка составляют ограничивающие поверхности для заготовки.

Недостатком данных способов является большая контактная поверхность между заготовкой и блоками штампа, которая увеличивает отдачу теплоты заготовки в блок штампа и тем самым усиливает её охлаждение, что вызывает повышение сопротивления деформированию и как следствие износ деформирующего инструмента.

Другой вариант такой схемы прокатки [24] показан на рис. 5. Валки 1 постоянного радиуса совмещены с опорными бандажами 2 и профильными кулачками 3. В процессе прокатки бандажи прижаты постоянно к профильным кулачкам за счет гидравлического устройства 4 с усилием, превышающим усилие деформирования металла. Благодаря поддержанию постоянного контакта профильных кулачков с опорными бандажами обеспечивается изменение зазора между валками по заданной программе.

Недостатком указанного выше устройства является скольжение между профильными приводными кулачками 3, имеющими переменный радиус, и опорными приводными бандажами 2 с постоянным радиусом. В результате происходит износ кулачков, что затрудняет получение высокой точности изделия.

Выводы

Анализируя приведенные выше схемы прокатки, можно сделать вывод, что копирование получаемого в прокатанной полосе профиля рессорных листов с помощью кулачковых механизмов является достаточно простым и эффективным процессом. Однако наличие скольжения в кулачковых механизмах как вредного фактора приводит к необходимости его устранения путем использования другого конструктивного исполнения прокатного стана.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент 3793868 США, МКИ В21Н7/00. Taper-rolling of metal / A.Wilson — 14 с.: ил.
2. Патент 1380691 Великобритания, МКИ В21Н7/00. Taper-rolling of metal / A.I.Wilson

(GB) – 15 с.: ил. 3. Патент 4959099 США, МКИ В21Н7/00. Taper rolling of metal / A.Wilson – 9 с.: ил. 4. Патент 78827 ФРГ, МКИ В21Н7/00. Walzwerk zum walzen von dünnem scharf und fein profilirtem walzgute / L.Mannstaedt (BRD) – 6 с.: ил. 5. Патент 4290288 США, МКИ В21В37/14. Device for narrowing the breadth of a sheet spring material in an apparatus for manufacturing a taper leaf spring / M.KAWAKUBO, Y.SAKAI, A.OHNO (Japan) – 8 с.: ил. 6. Патент 1017706 Великобритания, МКИ В21Н7/00. Improvements in the shaping of metal bars / (GB) – 6 с.: ил. 7. Патент 58209404 Япония, МКИ В21В13/02. Taper rolling device / I.Yamamoto; K.Kinoshita; M.Morita (Japan) – 5 с.: ил. 8. Патент 60231519 Япония, МКИ В21В37/24. Taper rolling device for leaf spring / S.Suzuki, T.Furuyama, M.Kawarubo (Japan) – 5 с.: ил. 9. Патент 4512169 США, МКИ В21В37/72. Automatic plate thickness control device / K.Miura (Japan) – 9 с.: ил. 10. Патент 55024758 Япония, МКИ В21В1/38. Taper rolling control unit / M.Uechi, K.Tanaka – 5 с.: ил. 11. Патент 57152303 Япония, МКИ В21В1/22. Rolling method for strip having differential thickness / R.Terakado – 4 с.: ил. 12. Патент 4266418 США, МКИ В21В37/24. Method for manufacturing a taper spring / Y.Sakai, J.Takahashi (Japan) – 8 с.: ил. 13. Патент 3417592 США, МКИ В21Н7/00. Taper-rolling of metals / R.Fielding – 5 с.: ил. 14. Патент 5001918 США, МКИ В21Д7/04. Method and apparatus for making blanks of a profile varying lengthwise / A.V.Stepanenko, V.A.Korol, G.A.Isaevich, A.P.Grechenko, S.S.Benedis, S.S.Poplavski; I.M.Shimanovich, V.L.Markhasin (USSR) – 19 с.: ил. 15. Патент 6012320 США, МКИ В21Д7/02. Leaf spring straightening apparatus / A.V.Stepanenko, V.A.Korol, A.P.Grechenko (Belarus) – 6 с.: ил. 16. Патент 6173599 США, МКИ В21Д7/02. Leaf spring straightening apparatus / A.V.Stepanenko (Belarus), V.A.Korol (Belarus), A.P.Grechenko (Belarus) I.E.Dzieciol (CA), J.C.Waugh (CA), J.J.Murtach (CA) – 10 с.: ил. 17. Патент 974990 Великобритания, МКИ В21Н7/00. Taper roll machine and method / (GB) – 13 с.: ил. 18. Патент 582094044 Япония, МКИ В21В1/38. Taper rolling device / I.Yamamoto, K. Kinoshita, M. Morita (Japan) – 5 с.: ил. 19. Патент 3199327 США, МКИ В21Н7/00. Machine for making single leaf springs and the like / F.R.KRAUSE (США) – 6 с.: ил. 20. Патент 3824829 США, МКИ В21В13/09. Roll mill with shifting cams for shaping bars / J.Miller (США) – 5 с.: ил. 21. Патент 400899 Великобритания, МКИ В21В38/10. Improvements in or relating to means for adjusting or indicating the magnitude of the gap between the rolls in rolling mills / – 7 с.: ил. 22. Патент 1273476 ФРГ, МКИ В21Н7/00. Taper roll machine and method / R.H.Groves, R.R.Greene, J.D.Boadk / (ФРГ) – 5 с.: ил. 23. Патент 3499305 США, МКИ В21Н7/00, В21Н7/00, (IPC1-7): В21В37/14, В21В31/30. Rolling mill and method of rolling strips / T.W.ABERNATHY (США) – 5 с.: ил. 24. А. С. 564068 СССР, МКИ В21НВ/00. Стан для прокатки профилей переменного сечения / О.Г.Кидимник, М.Л.Чеповидцкий, Н.И.Белицкий и др. (СССР). – 4 с.: ил

УДК 621.771

Щукин В.Я., Исаевич Л.А., Кожевникова Г.В.

СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА И ДЕФОРМАЦИИ В ПЛАСТИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ ПРИ ПОПЕРЕЧНОЙ ПРОКАТКЕ

*БНТУ, ГНУ «ФТИ НАН Беларуси»
Минск, Республика Беларусь*

С применением численного метода построим кинематически и статистически корректное поле линий скольжения (ЛС) при поперечной прокатке (ПП). Определим скорости течения металла в очаге деформаций и проанализируем распределение деформаций в пластической области.

Рассмотрим особенности поля ЛС (рис. 1) при ПП. Жесткая область KNL' вращается с угловой скоростью ω вокруг центра O_1 , область LPK' – вокруг центра O_2 .

Проекция расстояния O_1O_2 на контакт равна параметру C . Направления ЛС α и β при ПП принимаются аналогично [1].

Вдоль α -ЛС KNK' реализуется разрыв скорости v_1 , вдоль β -ЛС MNL' и LPM' – разрывы скорости v_2 . Из условия симметрии разрывы скорости по линиям MNL' и LPM' равны. В точках M и M' разрывы скорости отражаются от контакта и согласно теории пластичности (условие непрерывности нормальной компоненты) вдоль α -линий KM и $K'M'$ должны возникнуть разрывы скорости v_3 :

$$v_3 = -ctg\varphi v_2. \quad (1)$$

ЛС KOK' в точке O меняет знак кривизны. В итоге в соответствии с первой теоремой Генки все ЛС, пересекая β -линию SOS' , должны менять знак кривизны.

Рассмотрим скорости перемещения частиц металла в особой точке K . В жесткой области $L'NK$ составляющие скорости равны (рис. 2, а):

$$V_{1X} = R\omega \cos\varphi_1; \quad V_{1Z} = R\omega \sin\varphi_1, \quad (2)$$

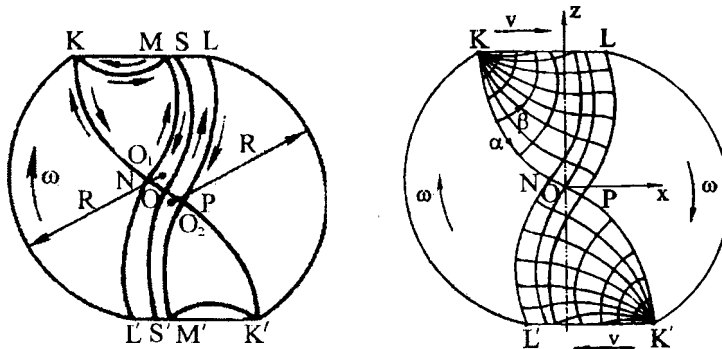


Рисунок 1 - Поле линий скольжения при ПП при степени обжатия 1,10

где R, φ_1 – параметры поперечного сечения заготовки [208].

Составляющая вдоль оси OZ разрыва скорости v_1 равна $v_{1Z} = v_1 \sin\varphi$, где φ – угол между α -ЛС KO и осью OX . Составляющая вдоль оси OZ разрыва скорости v_3 равна

$$V_{3Z} = v_3 \sin\varphi', \quad (3)$$

где φ' – угол наклона α -линии KM . Условие непрерывности нормальной компоненты скорости в точке K запишется в виде

$$R\omega \sin\varphi_1 + v_1 \sin\varphi + v_3 \sin\varphi' = 0. \quad (4)$$

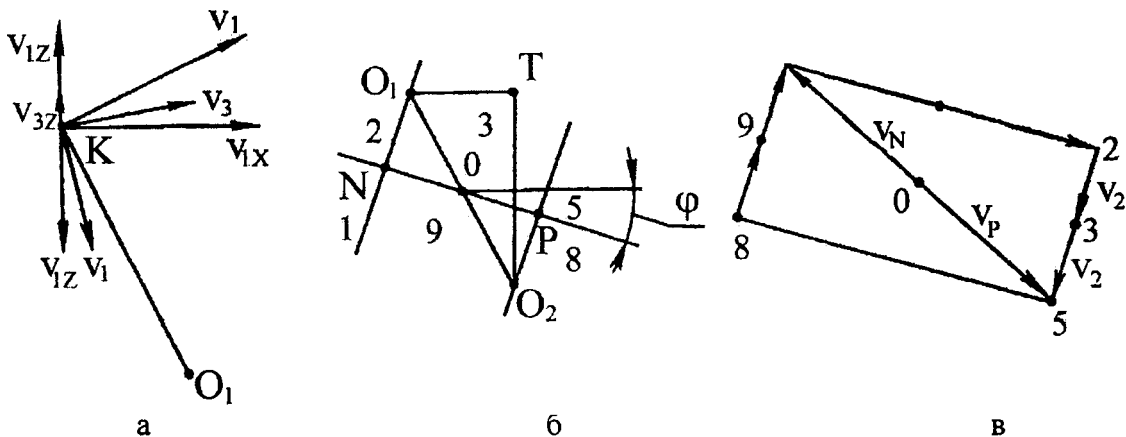


Рисунок 2 - Составляющие скорости в точке K (а) и годограф скоростей(в) в центральной области(б)

Из уравнения (4) может быть найден разрыв скорости

$$v_1 = (R\omega \sin\varphi_1 + v_3 \sin\varphi) / \sin(-\varphi). \quad (5)$$

Знак “-“ в знаменателе соотношения (5) означает, что угол φ отрицательный. В частном случае, когда $v_2=v_3=0$, определение v_1 упрощается:

$$v_1 = R\omega \sin\varphi_1 / \cos(-\varphi). \quad (6)$$

Разрыв скорости v_2 может быть найден из условия непрерывности нормальной компоненты скорости в точке L:

$$v_2 = R\omega \sin\varphi_2 / \cos\varphi, \quad (7)$$

где φ_2 – параметр поперечного сечения образца [2].

Согласно [2] параметр φ_2 не превышает 10° для степени обжатия $\delta < 1,15$. Причем влияние этого параметра на контактное давление $P_\mu/(2K)$ не столь значительно. Для упрощения решения можно допустить, что $\varphi_2=0$. При этом разрыв скорости v_2 также становится равным нулю, а поле будет содержать только один разрыв скорости по линии КОК’.

Рассмотрим годограф скоростей в осевой области образца (рис. 2, в). Скорость точки N равна

$$V_N = R_1\omega, \quad (8)$$

где R_1 – расстояние O_1N (см. рис. 1).

Отложив вектор из полюса 0, получим отображение на годографе скоростей области 1 (рис. 2). Из точки 1 отложим вектор разрыва скорости \bar{v}_1 и получим отображение скорости области 2. Отложив из точки 2 вектор \bar{v}_2 , получим отображение скорости области 3. Вторично отложив вектор \bar{v}_2 , получим отображение скорости области 5. Вектор 0-5 является скоростью точки P. Наглядно видно (рис. 2) выполнение условия симметрии

$$\bar{V}_{01} = \bar{V}_{02}. \quad (9)$$

Из рассмотренного годографа нетрудно определить

$$|2V_{01}|^2 = |V_1|^2 + |2V_2|^2. \quad (10)$$

Для случая $\varphi_2=0$ получим

$$\omega R_1 = 0,5 v_1. \quad (11)$$

Из совместного решения (4) и (6) найдем

$$R \sin\varphi_1 = 2R_1 \sin\varphi. \quad (12)$$

Анализ уравнения (12) показывает, что для выполнения граничных условий по скоростям в осевой области необходимо соблюдать определенное соотношение между параметрами R и R_1 . Из рассмотрения рис.2, б можно установить

$$O_2T = R (1 - \cos\varphi_1);$$

$$O_1T = C;$$

$$O_1O = 0,5 \sqrt{C^2 + R^2 (1 - \cos\varphi_1)^2};$$

$$\angle O_1O_2T = \text{arctg} [C / (R (1 - \cos\varphi_1))]; \quad (13)$$

Таким образом, угол наклона α -ЛС в центральной области образца равен

$$\begin{aligned} \varphi_0 &= \angle NOQ + \angle O_1OT - 90^\circ = \\ &= \arcsin \left[R \sin\varphi_1 / (\sin\varphi \sqrt{C^2 + R^2 (1 - \cos\varphi_1)^2}) \right] + \\ &+ \text{arctg} [C / (R(1 - \cos\varphi_1))] - 90^\circ. \end{aligned} \quad (14)$$

$$O_1N = R_1 = R \sin \varphi_1 / (2 \sin \varphi_K) ;$$

$$\angle NOO_1 = \arcsin [R \sin \varphi_1 / (\sin \varphi_K \sqrt{C^2 + R^2 (1 - \cos \varphi_1)^2})] .$$

Выражение (14) позволяет без построения поля ЛС определить в осевой области образца касательное напряжение τ_{xz} , нормальные напряжения σ_z и σ_x с точностью до постоянного интегрирования. Также представляется возможным определить перепад гидростатического давления между точками О и К.

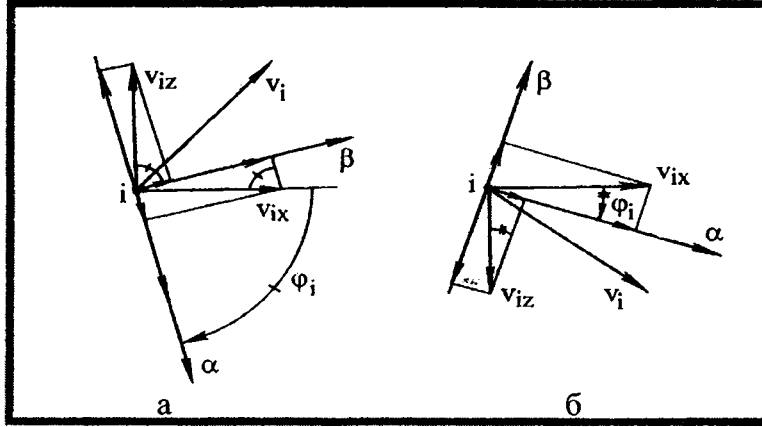


Рисунок 3 - Скорости на линии скольжения KNO (а) и скорости на линии скольжения PP'L (б)

Численное построение поля ЛС для случая $\varphi_2=0$ производится следующим образом. Задаются параметры φ_1 и δ . По известным формулам [2] рассчитываются величины C , R , R_1 , φ_0 . Линия скольжения KNO задается в виде уравнения

$$Az^3 + Bz^2 + Cz + D = x . \quad (15)$$

Из четырех неизвестных A , B , C , D , входящих в уравнение (15), могут быть определены только три, так как известны координаты точек О и К линии KNO в точке О (формула (14)). Таким образом, представляется возможность варьирования одним неизвестным с тем, чтобы вдоль линии KNO и PP' наилучшим образом выполнялось условие уравнения Гейрингера

$$\begin{aligned} du_\alpha - u_\beta d\varphi &= 0 && \text{вдоль направления } \alpha\text{-линии;} \\ du_\beta - u_\alpha d\varphi &= 0 && \text{вдоль направления } \beta\text{-линии.} \end{aligned} \quad (16)$$

Рассмотрим соотношение скоростей (рис. 3, а) на линии скольжения KNO. Со стороны жесткой области скорость равна V_i , где V_{ix} и V_{iz} – ее составляющие. В пластической области к скорости течения металла добавляется разрыв скорости. Составляющие суммарной скорости вдоль линий α и β определяются выражениями

$$\begin{aligned} u_\alpha &= v + V_{iz} \sin \varphi_i + V_{ix} \cos \varphi_i ; \\ u_\beta &= V_{iz} \cos \varphi_i - V_{ix} \sin \varphi_i . \end{aligned} \quad (17)$$

Опустив из точки O_1 перпендикуляр на линию KNO, определяем координаты точек N и P. Кривая KN разбивается на ряд отрезков таким образом, чтобы от одного узла к другому угол φ изменялся на постоянную величину. Далее из точки К разворачивается веер ЛС. Координаты точек определяются численно [3]:

$$\begin{aligned} Z_{m,n} - Z_{m-1,n} &= \left\{ \operatorname{tg} \frac{1}{2} (\varphi_{m,n} + \varphi_{m-1,n}) \right\} (X_{m,n} - X_{m-1,n}) ; \\ Z_{m,n} - Z_{m,n-1} &= - \left\{ \operatorname{ctg} \frac{1}{2} (\varphi_{m,n} + \varphi_{m,n-1}) \right\} (X_{m,n} - X_{m,n-1}) . \end{aligned} \quad (18)$$

Верв разворачивается до тех пор, пока угол наклона α -линии в точке К не станет больше -45° , и вдоль направления β -линии PP' выполняется условие уравнения Гейрингера:

$$du_\beta + u_\alpha d\varphi = 0 \quad \text{вдоль направления } \beta\text{-линии} \quad (19)$$

В точке P' определяется угол наклона линии PP'. Уравнение линии P'L задается в виде

$$A_1 z^3 + B_1 z^2 + C_1 z + D_1 = x. \quad (20)$$

Из четырех неизвестных A_1, B_1, C_1, D_1 можно определить три: координаты точек L, P' и угол наклона линии в точке P'. Четвертый неизвестный параметр уравнения варьируется для выполнения условия (19) вдоль линии P'L.

На рис. 3, б показаны скорости в точке i на линии PP'L. Нетрудно установить, что

$$\begin{aligned} u_\alpha &= V_{ix} \cos \varphi_i - V_{iz} \sin \varphi_i; \\ u_\beta &= -V_{ix} \sin \varphi_i - V_{iz} \cos \varphi_i. \end{aligned} \quad (21)$$

Окончательное построение поля ЛС заканчивается вычислением узлов сетки поля в области KP'L по формулам (18). Абсолютные значения напряжений в узлах сетки ЛС находят с использованием уравнений [2]. Скорости в узлах определяют по уравнениям (16) и (19).

Скорости деформации могут быть определены по полю скоростей с использованием известных [3] зависимостей:

$$\xi_x = \frac{\partial V_x}{\partial x}; \quad \xi_z = \frac{\partial V_z}{\partial z}; \quad \eta_{xz} = \frac{\partial V_x}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial x}; \quad (22)$$

$$H = \sqrt{\frac{3}{4} (\xi_x^2 + \xi_z^2 - \xi_x \xi_z) + \eta_{xz}^2},$$

где $\xi_x, \xi_z, \eta_{xz}/2$ – компоненты тензора скоростей деформации;

H – интенсивность скоростей деформации сдвига.

В таблице приведены результаты проверки выполнения уравнения Гейрингера вдоль α -линии скольжения KNO ($\delta=1,10, \varphi_1=32^\circ, \varphi_2=8^\circ, D=400 \text{ мм}, \omega=1 \text{ с}^{-1}$). Линия описывается уравнением

$$x = 32,82 \cdot 10^{-4} z^2 - 1,228 z. \quad (23)$$

Таблица. Проверка выполнения условий уравнения Гейрингера вдоль α -ЛС

x	z	u_α	u_β	du_α	$u_\beta d\varphi$	Δ
-114,81	181,80	5,98	171,29	—	—	—
-113,76	168,40	20,70	165,82	14,72	14,71	0,01
-111,46	154,72	34,88	158,66	14,18	14,16	0,02
-107,79	140,54	48,34	149,54	13,46	13,45	0,01
-102,47	125,56	60,90	134,01	12,56	12,55	0,01
-95,13	109,49	72,34	123,67	11,44	11,42	0,02
-85,16	91,91	82,98	105,84	10,04	10,01	0,03
-71,65	72,30	90,68	83,60	8,30	8,27	0,03
-53,15	49,94	96,81	55,53	6,13	6,07	0,06
-27,37	23,80	100,14	19,34	3,33	3,27	0,06
$V_{cp} = 89,3$						$\Delta_{cp} = 0,028$

Примечание. Во всех случаях $d\varphi = 0,0872$.

Средняя погрешность составила $\Delta_{cp} = 0,028$, средняя скорость $V_{cp} = 89,3$. Погрешность выполнения условий уравнения Гейрингера вдоль α -линии скольжения составляет

$$k = (\Delta_{cp} / V_{cp}) \cdot 100\% = 0,031\%. \quad (24)$$

Таким образом, численным методом построено кинематически и статистически корректное поле ЛС при ПП плитами. Решение получено с учетом выполнения условия Гейрингера и непрерывности нормальной компоненты скорости. Решение позволяет без построения всего поля

ЛС определять на оси O угол наклона α -линии и компоненты с точностью до постоянной интегрирования. Определены скорости течения металла в очаге деформации при ГП.

Анализ накопленных деформаций и распределения напряжений в очаге деформации при ГП показывает, что в окрестности оси наблюдается неблагоприятная область: в ней действуют растягивающие напряжения и накапливаются (после конкретного значения циклов нагружения) критические деформации, приводящие к разрушению металла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кожевникова Г.В. Развитие теории и технологии формообразования осесимметричных ступенчатых деталей поперечной прокаткой. – Мн.: Издательский дом «Белорусская наука», 2005. – 250 с.
2. Щукин В.Я. Основы поперечно-клиновой прокатки. – Мн.: Наука и техника, 1986. – 223 с.
3. Хилл Р. Математическая теория пластичности. – М.: ГИТТЛ, 1956. – 407 с.

УДК 621.833

Кане М.М.

НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ И МЕТОДЫ ЕЁ ОЦЕНКИ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Начиная с 1969 г. в технических журналах и других публикациях кроме работ по надежности изделий стали появляться статьи и монографии, посвященные вопросам технологической надежности, надежности технологических систем, надежности технологических процессов и операций. Во всех этих работах ставится вопрос о применении общих методов теории надежности к исследованию основных закономерностей изменения параметров технологических систем в процессе изготовления продукции.

Впервые термин «технологическая надежность станков» был введен А. С. Прониковым [1]. Это понятие определено А. С. Прониковым как «способность станка сохранять качественные показатели технологического процесса (точность обработки и качество поверхности) в течение заданного времени». В работах [2, 3, 4] были рассмотрены некоторые количественные оценки технологической надежности токарно-револьверных автоматов, прецизионных токарных станков, бесцентровых внутришлифовальных, радиально-сверлильных и других видов станков. В этих работах исследуется в основном только способность сохранять точность обработки в течение определенного периода времени. Но, очевидно, что точностные характеристики обработанных деталей зависят не только от состояния станка, но и от многих других факторов (состояние инструмента, оснастки, характеристики материалов и т. д.). Поэтому логическим развитием понятия «технологическая надежность станка» явилось введение термина «технологическая надежность». И. В. Дунин-Барковский [3] определил это понятие как «свойство технологического оборудования и производственно-технических систем, таких, как станок — приспособление-инструмент — деталь (СПИД), система литейного, кузнечно-прессового или другого производственно-технического оборудования или автоматических линий, сохранять на заданном уровне выходные параметры качества производимого изделия в течение требуемого времени» [3]. Затем А.С. Проников ввел понятие «надежность технологических процессов». Он пишет, что «большой процент отказов различных машин связан с недостаточной надежностью технологического процесса», что «...технологический процесс должен быть надежным, т.е. не допускать таких показателей, которые могут влиять на качество выпускаемых изделий» [4]. Вопросы оценки надежности технологических процессов и безотказности рассматриваются также в работах П.И. Бобрика [5], А.Л. Меерова и др., причем только с точки зрения способности технологических систем, про-

цессов и операций обеспечивать (в течение заданного времени) изготовление продукции с показателями качества в соответствии с установленными требованиями.

Одной из первых работ, посвященных оценке надежности технологических систем по производительности, является статья Ю.К. Беляева [6], в которой впервые дана классификация типов отказов с точки зрения выполнения заданий по параметрам производительности и изложены общие подходы к решению отдельных случаев. Г.Н. Черкесов [7] рассматривает решение этих же задач с позиций анализа систем с временной избыточностью.

Обобщение двух направлений оценки надежности ТС выполнено А.И. Кубаревым [8] и отражено в стандартах [9, 10]. Надо сказать, что оценка надежности ТС по параметрам качества тесно связана с оценкой надежности ТС по параметрам производительности, т. к. несоблюдение требований к качеству продукции является одним из видов отказа ТС и влечет за собой потерю ее производительности.

Технологическая система – это совокупность средств технологического оснащения, объектов производства и, в общем случае, исполнителей, необходимая и достаточная для выполнения определенных технологических процессов и операций и находящаяся в состоянии готовности к функционированию или в состоянии функционирования в соответствии с требованиями технической документации. Таким образом, можно рассматривать технологическую систему для выполнения одной операции и технологическую систему для выполнения некоторого процесса, состоящего из отдельных операций. Объектом исследования могут быть также ТС одного производственного подразделения (цех, участок) или предприятия в целом.

Надежностью технологической системы будем называть свойство технологической системы выполнять заданные функции, сохраняя показатели качества и ритм выпуска годной продукции в течение требуемых промежутков времени эксплуатации или требуемой наработки. Ритм выпуска – это количество изделий определенного наименования, типоразмера и исполнения, выпускаемых в единицу времени.

Под понятием «надежность технологического процесса» и «надежность технологической операции» понимается надежность технологической системы, обеспечивающей функционирование рассматриваемого процесса или операции в соответствии с требованиями технической документации.

При проведении исследований можно оценивать работоспособность системы как отдельно – по ее способности обеспечивать требуемый уровень качества изготовленной продукции и по параметрам производительности, так и по обоим свойствам одновременно с учетом зависимости между ними.

Будем говорить, что технологическая система работоспособна по параметрам качества, если обеспечивает изготовление продукции с показателями качества, соответствующими требованиям технической документации, и работоспособна по параметрам производительности, если обеспечивает установленный ритм выпуска.

В определенные моменты технологическая система может быть работоспособна по параметрам (показателям) качества и неработоспособна по параметрам производительности (и наоборот). В каждом из этих случаев технологическую систему следует считать неработоспособной.

К технологическим системам можно применять термин «исправность». Это понятие шире, чем понятие «работоспособность», так как предполагает, что отдельная система в определенный момент времени может относиться к категории работоспособных, но в то же время находиться в состоянии неисправности. Например, отдельные отклонения в технологических процессах, не влияющие в данный момент на его производительность и показатели качества продукции, приводят систему в неисправное состояние, не нарушая при этом работоспособности (повреждения окраски оборудования, нарушения в подаче смазки и т. д.).

Отдельные нарушения в технологической системе будем относить к категории повреждений, если они переводят систему из исправного состояния в неисправное, и к отказам, если они переводят систему из работоспособного состояния в неработоспособное.

Таким, образом, отказ технологической системы – это событие, заключающееся в потере работоспособности.

Отказы в технологических системах могут быть внезапными и постепенными, происходить по внутренним (износ и деформация оборудования и оснастки и др.) и внешним (нарушение электроснабжения, отсутствие или низкое качество заготовок и др.) причинам.

Оценка надежности технологических систем сводится к дифференцированной оценке показателей безотказности, долговечности и ремонтпригодности или к вычислению, при необходимости, комплексных показателей, характеризующих одновременно все составные свойства надежности.

Оценка безотказности сводится к определению:

вероятности того, что рассматриваемый технологический процесс (или операция) обеспечит изготовление продукции в соответствии с требуемыми технической документацией показателями качества в течение заданного интервала времени без вынужденных перерывов при одновременном обеспечении заданного объема производства в единицу времени (ритма выпуска);

средней наработки до отказа;

параметра потока отказов.

При оценке показателей безотказности не учитываются вынужденные простои оборудования, обусловленные организационными причинами.

Для непрерывных технологических операций за наработку принимается продолжительность работы (ч); для дискретных технологических операций (обработка резанием, штамповка и т.д.) – число обработанных деталей или число обработанных прутков (при изготовлении деталей из пруткового материала).

При оценке безотказности автоматических линий, а также технологических операций, за единицу наработки принимается количество изготовленных деталей после финишной операции.

Операция контроля должна рассматриваться как неотъемлемая часть соответствующих технологических операций.

Отказом технологической системы по показателям качества не следует считать произошедшее после операции обработки отклонение от требований технической документации по одному из показателей качества, выявленное при контрольной операции, в результате чего дефектная деталь или изолирована или направлена на доработку (переработку). При оценке безотказности по параметрам производительности время изготовления дефектной продукции должно учитываться как время, затраченное на устранение отказа.

Для дорогостоящих и трудоемких в изготовлении изделий безотказность должна оцениваться для операции обработки и отдельно для контрольной операции.

Оценка долговечности сводится к определению:

календарной продолжительности функционирования технологической системы до отказа, капитального ремонта, между ремонтами, до полной замены;

наработок системы до тех же периодов.

Оценка ремонтпригодности технологической системы сводится:

к определению показателей, характеризующих продолжительность и стоимость выявления и устранения отказов;

к установлению времени, потребного для приведения системы в рабочее состояние;

к устранению показателей, характеризующих трудоемкость и стоимость операций технического обслуживания технологических систем, подналадок, смены инструмента.

Классификация показателей надежности технологических систем дана в таблице 1.

Таблица 1 – Укрупненная классификация показателей надежности технологических систем

Признаки классификации	Виды показателей надежности	Примечание
1. По количеству характеризующих свойств	1.1. Единичные	Характеризуют одно из свойств надежности: безотказность, долговечность или ремонтпригодность
	1.2. Комплексные	Характеризуют одновременно несколько свойств надежности (например, долговечность и ремонтпригодность)
2. По стадиям определения	2.1. Планируемые	Устанавливаются перед разработкой новых процессов, задаются в технических заданиях, конкретизируются в планах организационно-технических мероприятий по совершенствованию технологии изготовления
	2.2. Нормативные	Задаются и определяются на этапах технологической подготовки производства
	2.3. Оперативные	Характеризуют реально функционирующие процессы, в условиях существующего на предприятии порядка организации производства. Определяются для некоторого фиксированного момента времени
	2.4. После ремонтные	Характеризуют технологические системы после проведения капитального ремонта основных элементов
3. По уровню дифференцированности	3.1. По показателям качества продукции	Характеризуют степень соответствия в определенный момент времени показателей качества производимой продукции требованиям технической документации
	3.2. По уровню производительности за определенный промежуток времени	Характеризуют степень соответствия фактической производительности за определенный промежуток времени действующим нормативам
	3.3. Интегральные	Характеризуют одновременно и меру соответствия показателей качества производимой продукции требованиям технической документации и фактическую производительность за тот же промежуток времени
4. По области применения	4.1. Надежность технологических операций изготовления	Характеризуют надежность отдельной технологической операции без учета влияния на надежность контрольной операции, если последняя не входит в систему адаптивного управления
	4.2. Надежность контрольных операций Виды показателей надежности	Характеризуют надежность системы контроля после определенной операции обработки Примечание
	4.3. Надежность технологических операций	Характеризуют надежность отдельной технологической операции, послеоперационный контроль рассматривается как неотъемлемая часть технологической операции
	4.4. Надежность технологических процессов	Характеризуют надежность технологических процессов, состоящих из нескольких операций; конечными операциями могут быть сборочные

Оценка надежности технологических систем проводится путем вычисления показателей надежности на этапах технологической подготовки производства, серийного изготовления, а также после капитального ремонта или модернизации важнейших элементов технологических систем.

Обработка технологических операций и процессов по показателям надежности на этапе подготовки производства должна проводиться путем отыскания лучшего технологического решения по экономическим критериям и вероятности выполнения задания по показателям качества изготовленной продукции и параметрам производительности [8].

Основная цель оценок надежности технологических систем – приведение технологических процессов в такое состояние, при котором обеспечивается изготовление продукции в соответствии с установленными в технической документации параметрами и показателями качества при одновременном обеспечении максимальной производительности и минимуме потерь от брака. В зависимости от этапа проведения оценок могут решаться частные задачи:

при планировании – установление объемов производства отдельных участков и цехов, определение экономически обоснованных норм точности;

при технологической подготовке производства – выбор оптимальных технологических процессов (выбор режимов обработки, установление мест контрольных операций в технологическом процессе и планов контроля);

при серийном производстве – определение соответствия параметров технологической системы установленным требованиям, выявление отрицательных факторов и разработка мероприятий по повышению надежности или точности и стабильности технологических процессов;

после проведения ремонтов технологических систем – оценка качества ремонта [8].

Методы и периодичность оценки надежности ТС устанавливаются в отраслевой нормативно-технической документации (НТД) или в стандартах предприятия.

Результаты оценки надежности ТС должны использоваться для:

нормирования показателей надежности разрабатываемых ТС;

разработки и определения эффективности мероприятий по повышению надежности ТС;

оптимизации методов эксплуатации, обслуживания и ремонта средств технологического оснащения;

выбора оптимального варианта проектируемого технологического процесса (операции);

оптимизации технологических маршрутов и режимов обработки;

выбора средств технологического оснащения;

определения периодичности замены инструмента;

установления факторов, приводящих к отказам ТС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Проников А.С. Основы надежности и долговечности машин. –М.: Изд-во стандартов, 1969.
2. Вопросы технологической надежности / Под ред. И.В. Дунина-Барковского. Вып. XI. –М.: Изд-во стандартов, 1974.
3. Дунин-Барковский И.В. Статистические исследования точности операции в связи с оценкой технологической надежности станков. В сб. «Взаимозаменяемость и технические измерения в машиностроении». – Л.: Машиностроение, 1972, № 6.
4. Технологическая надежность станков / Под ред. А.С. Проникова. –М.: Машиностроение, 1971.
5. Бобрик П.И. К расчету надежности технологического процесса. – «Надежность и контроль качества», 1971, № 8, с.41-49.
6. Беляев Ю.К. Производительность при наличии двух типов отказов. Сб. «Кибернетику – на службу коммунизму», том 2. –М.– Л.: Изд-во «Энергия», 1964.
7. Черкесов Г.Н. Надежность технических систем с временной избыточностью. –М.: Изд-во «Советское радио», 1974.
8. Кубарев А.И. Надежность в машиностроении. Изд-во стандартов, 1977.
9. ГОСТ 27.202-83. Надежность в технике. Технологические системы. Методы оценки надежности по па-

УДК 621.833

Кане М.М., Медведев А.И., Ковальков А.Т.

РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛЕГИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ НА ОПЕРАЦИЯХ ЗУБОШЕВИНГОВАНИЯ И ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ (ХТО) ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ШЕСТЕРЕН

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Нами выполнено исследование изменения величины относительной микродеформации кристаллической решетки $\Delta a/a$, размеров блоков мозаики зерен металла D и остаточных напряжений второго рода σ_2 в поверхности зубьев цилиндрических шестерен, изготовленных из сталей 25ХГТ и 20ХНЗА на указанных операциях.

Описание схемы строения блоков и методика расчета указанных параметров приведены в работах [1] и [4].

На рисунке 1 и в таблицах 1 и 2 представлены основные результаты выполненного исследования. В таблицах 1 и 2 приняты следующие обозначения: X_1 и Y_1 – значения $\Delta a/a$ в мм; X_2 и Y_2 – значения D в мм; X_3 и Y_3 – значения σ_2 в МПа на операциях шевингования и ХТО; a и b – коэффициенты уравнения $y = a + bx$ (1); F – критерий Фишера адекватности предложенной модели (1); R^2 – коэффициент детерминации, характеризующий адекватность модели, степень влияния X на дисперсию Y .

Расчет критериев Фишера и R^2 производился по формулам, приведенным в работе [1].

Критическое значение критериев Фишера $F_{кр} = 4,26$ при $N = 12$, $k = 4$ и Стьюдента $t_{кр} = 5,78$ [3]. Предельное значение $R^2 \geq 0,9$, что говорит об адекватной зависимости опытных данных расчетным.

Затем был выполнен расчет параметров нелинейных моделей (зависимости 2 – 7) изменения рассмотренных характеристик поверхностного слоя зубьев цилиндрических шестерен при ХТО.

Результаты данного расчета приводятся в таблице 2.

$$Y = b_0 + b_1X + b_2X^2 \quad (2)$$

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X^2 + b_3X^3 \quad (3)$$

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X^2 + b_3X^3 + b_4X^4 \quad (4)$$

$$Y = a \cdot \ln X - b, \quad (5)$$

$$Y = a \cdot X^b \quad (6)$$

$$Y = a \cdot \ell^{bX} \quad (7)$$

Анализ данных, приведенных на рисунке 1 и в таблицах 1 и 2 позволят отметить следующие особенности изменения параметров кристаллической решетки материалов шестерен на операциях шевингования и ХТО:

1. Имеет место увеличение значений $\Delta a/a$ в равной степени как для стали 25ХГТ, так и для стали 20ХНЗА примерно в 3,3 – 3,5 раза.

2. Между значениями $\Delta a/a$ на данных операциях имеется тесная корреляционная зависимость ($r_{xy} = 0,941 - 0,953$).

3. Отмечено уменьшение значений D в 3,3 раза для стали 20ХНЗА и в 4,15 раз для стали 20ХГТ.

Между значениями D на исследованных операциях существует достаточно тесная взаимосвязь ($r_{xy} = 0,75 - 0,861$).

4. Имеет место увеличение значений σ_2 в такой же степени, как и для параметра $\Delta a/a$.

5. Установлено, что между значениями σ_2 на операциях зубошевингования и ХТО имеется очень тесная корреляционная зависимость ($r_{xy} = 0,94 - 0,95$).

6. Имеет место увеличение значений σ_2 в такой же степени, как и для параметра $\Delta a/a$.

7. Установлено, что между значениями σ_2 на операциях зубошевингования и ХТО имеется очень тесная корреляционная зависимость ($r_{xy} = 0,94 - 0,95$).

8. Все рассчитанные значения критерия Стьюдента t для исследованных параметров не превышают критического значения, что говорит о достоверности рассчитанных значений r_{xy} .

9. Значения критерия Фишера F для параметров D , σ_2 и $\Delta a/a$ также не превышает критического значения, что подтверждает адекватность принятого линейного уравнения регрессии

Расчетные значения критерия R^2 , за исключением параметра D , близки или превышают величину 0,9, что говорит о том, что принятая модель учитывает большинство факторов, влияющих на изменение рассмотренных параметров при ХТО шестерен при условии постоянства режимов ХТО

10. Рассмотренные процессы поддаются математическому моделированию. В наилучшей степени для этого пригодны полиномы 2-ой, 3-ей и 4-ой степени. Однако может быть использована и линейная зависимость (см. табл. 1). Погрешность линейной модели по сравнению с нелинейной не более 12% [2].

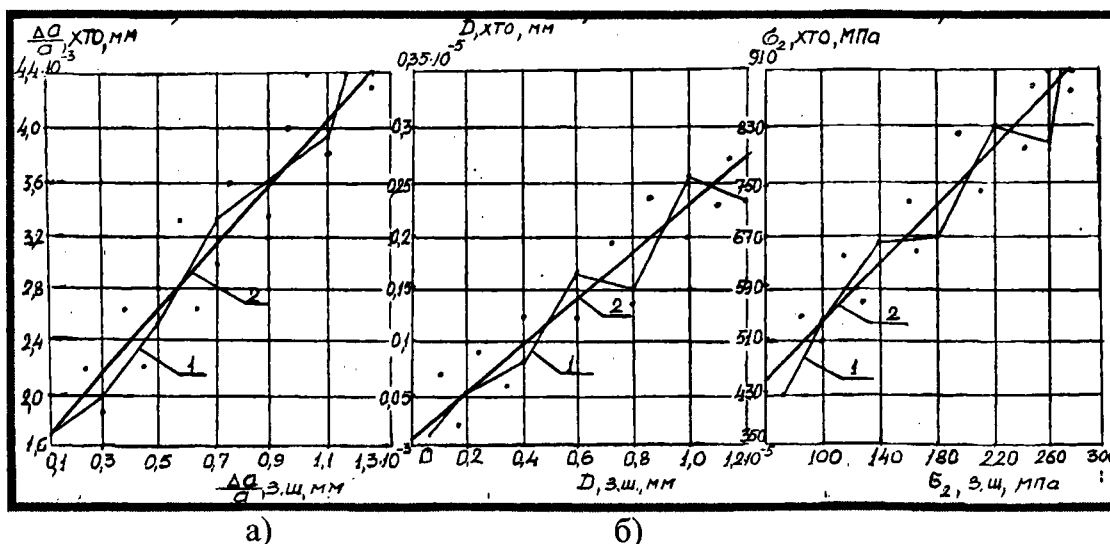


Рисунок 1- Изменение характеристик кристаллической решетки материала цилиндрических шестерен при шевинговании и ХТО (материал детали – сталь 20ХНЗА): а) изменение относительной микродеформации кристаллической решетки $\Delta a/a$; б) изменение размеров блоков мозаики зерен металла D ; в) изменение величины остаточных напряжений 2-го рода σ_2 : 1 – эмпирическая регрессия; 2 – линейная аппроксимация опытных данных.

По результатам выполненной работы можно сделать следующие выводы:

1. При ХТО происходит заметное увеличение микродеформаций кристаллической решетки, что связано с общим искажением этой решетки, вызванное большими термическими деформациями не только поверхностных, но и глубинных слоев металла.

2. Одновременно увеличиваются и остаточные напряжения 2-го рода прямо пропорционально связанные с изменением микродеформаций и уменьшаются (дробятся) блоки мозаики зерен металла, что сопровождается упрочнением поверхностных слоев при ХТО.

3. Закономерный характер изменения исследованных показателей структуры материала зубьев шестерен и высокое значение коэффициентов корреляции подтверждает наличие явления технологической наследственности применительно к значениям $\Delta a/a$, D и σ_2 на операциях зубошевингования и ХТО, что указывает на возможность их целенаправленного изменения и управления свойствами материала шестерен после указанных операций.

ЛИТЕРАТУРА

1. М.М. Кане, А.И. Медведев, А.Т. Ковальков, В.В. Сурков. Рентгенографические исследования микродеформаций кристаллической решетки и размеров блоков мозаики легированных конструкционных сталей на операциях зубофрезерования и шевингования шестерен./ Теория и практика машиностроения. Междунар. научно-технич. журнал. №1. –Мн.: 2003. с.19...22.
2. М.М. Кане. Основы научных исследований в технологии машиностроения. –Мн.: Выш. школа. 1987. –231 с.
3. Е.И. Пустыльник. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. –М.: Наука. 1968. –288с.
4. Рентгенография в физическом металловедении./ Под ред. Ю.Багаряцкого. –М.: НТИЛ по черной и цветной металлургии. 1961. –368 с.

Таблица 1. Характеристики взаимосвязей параметров кристаллической решетки материала цилиндрических шестерен на операциях шевингования и ХТО

Материал зубчатого колеса	Сталь 25ХГТ						Сталь 20ХНЗА					
	$\Delta a/a$, мм		D, мм		σ_2 , мм		$\Delta a/a$, мм		D, мм		σ_2 , мм	
Параметры металлической решетки	X ₁ шев.	Y ₁ ХТО	X ₂ шев.	Y ₂ ХТО	X ₃ шев.	Y ₃ ХТО	X ₁ шев.	Y ₁ ХТО	X ₂ шев.	Y ₂ ХТО	X ₃ шев.	Y ₃ ХТО
Среднеарифметическое значение	6,37E-4	2,56E-3	6,84E-6	1,65E-6	133,8	543,8	7,75E-4	2,73E-3	5,63E6	1,7E-6	162,8	573,02
Среднеквадратичское отклонение	1,09E-6	3,75E-5	1,33E-10	9,46E-12	48,2E-3	171E-4	1,98E-6	1,95E-5	1,06E-10	6,85E-12	87460	895790
Коэффициент пар-ной корреляции r_{xy}	0,941		-0,0254		0,945		0,953		0,861		0,954	
Крит. Стьюдента t достоверности значения r_{xy}	5,36		4,65		5,41		5,64		4,8		5,66	
Коэффициент "а" уравнения (1)	-9,5E-4		1,57E-6		-209,6		4,1·10 ⁻⁴		1,34E-6		86,22	
Коэффициент "b" уравнения (1)	5,52		0,01		5,63		2,994		0,06		2,99	
Крит. Фишера F адекватности уравнения (1)	3,73		2,34		1,82		4,0		2,72		2,19	
Критерий R ²	0,885		0,562		0,894		0,909		0,741		0,910	

Таблица 2. Характеристики взаимосвязей параметров кристаллической решетки материала цилиндрических шестерен на операциях шевингования и ХТО

Материал зубчатого колеса	Изучаемая функция	Значения R ² для следующих зависимостей							Уравнения
		Линейная	полином 2-й степ.	полином 3-ей степ.	полином 4-ой степ.	логарифмическая	Степенная	экспоненциальная	
Сталь 25ХГТ	$\Delta a/a$ Y ₁ =f(X ₁)	0,885	0,896	<u>0,918</u>	0,910	0,816	0,860	0,900	Y=-2E7X ² +42766X ² -22,621X+0,0046
	D Y ₂ =f(X ₂)	0,562	0,735	0,728	0,730	<u>0,745</u>	0,640	0,635	Y=5,8E+11,6X ³ -3,2E+6,1X ² +8,12X-3,2E-6,3
	σ_2 Y ₃ =f(X ₃)	0,894	0,904	<u>0,930</u>	0,930	0,824	0,875	0,911	Y=-0,0005X ³ +0,2247X ² -25,216X+1128,1
Сталь 20ХНЗА	$\Delta a/a$ Y ₁ =f(X ₁)	0,909	0,932	0,932	<u>0,935</u>	0,814	0,873	0,928	Y=-7E+9X ⁴ +2E+7X ³ -9512X ² +9,3462X+0,0001
	D Y ₂ =f(X ₂)	0,741	0,741	<u>0,742</u>	0,742	0,725	0,631	0,625	Y=6E+11X ³ -3E+6X ² +8,0647X-3E-6
	σ_2 Y ₃ =f(X ₃)	0,909	0,932	0,932	<u>0,934</u>	0,817	0,875	0,928	Y=-8E-7X ⁴ +0,0005X ³ -0,0971X ² +9,7892X+5,0755

Примечание: для каждой функции подчеркнуты максимальные значения R²

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ СТАЛЬНЫХ ПЛИТ

Зеленогурский университет
Зелена Гура, Польша

Резка заготовок является одной из наиболее трудоемких технологических операций. Среди технологий резки можно выделить резку на гильотинных ножницах и прессах, резку на металлорежущих станках и пилах, газовую, плазменную и лазерную резку, резку струей воды и др. При выборе технологии резки следует обеспечить минимальный расход энергии, минимальную ширину реза, минимальное влияние высокой температуры на отрезаемую заготовку, высокое качество поверхностей и кромок на отрезанной детали.

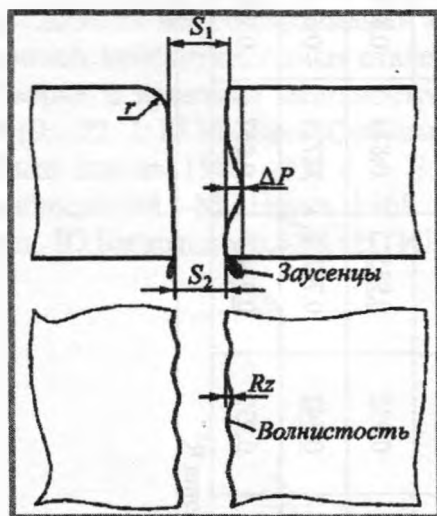


Рисунок 1- Дефекты плазменной резки:
 r – радиус закругления кромок;
 ΔP – отклонение от плоскостности; $\Delta = S_1 - S_2$ – отклонение ширины разреза; Rz – максимальная высота микронеровностей

В настоящее время в машиностроении широко используются процессы плазменной резки, основанные на растапливании материала и удалении его из щели концентрированным потоком плазмы с температурой 10000...30000 К, возникающим между электродом и деталью. Устройства для плазменной резки компьютеризированы, благодаря чему можно с высокой скоростью и точностью получать весьма сложные профили реза. Качество резки зависит от сочетания значительного количества технологических характеристик процесса: силы тока, напряжения, скорости резки, составов, давления и расхода плазмообразующего и защитного газов, конструктивных особенностей электродов, диаметров сопла, положения горелки относительно изделия [1].

При плазменной резке возникают такие дефекты на поверхности отрезки, как оплавление кромок, появление заусенцев, отклонения от плоскостности и перпендикулярности поверхностей, наклон поверхностей и их шероховатость (рис. 1).

Влияние условий плазменной резки на некоторые дефекты поверхности реза (ширину реза S , высоту заусенцев H_{\max} , вы-

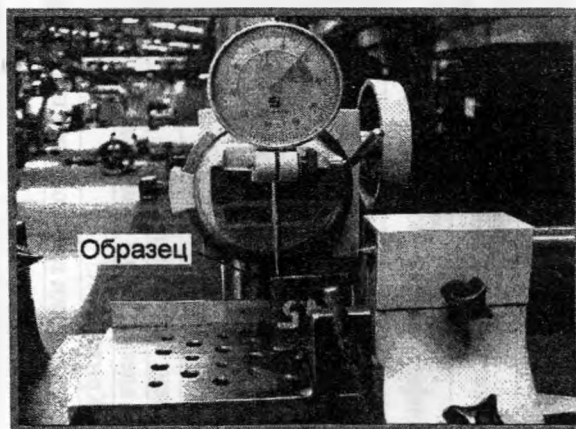


Рисунок 2-Приспособление для измерения высоты волны

соту волны Z_{\max}) исследовалось при резке стальных плит на устройстве для резки JANTAR 2 фирмы ECKERT с плазменной горелкой PB-S 25W и устройством ЧПУ типа NEC 2000S. Основные технические характеристики устройства: ширина резки 3000 мм, длина резки 5000 мм, толщина резки 1...20 мм, длина рабочего хода 6500 мм, точность позиционирования $\pm 0,1$ мм, сила тока 25...70 А, напряжение 400 В.

Ширина реза и высота заусенцев измерялись электронным штангенциркулем с точностью 0,01 мм. Для исследований волнистости было разработано специальное приспособление, которым для измерений использовался индикатор часового типа точности 0,001 мм (рис. 2).

Обрабатываемый материал – низкоуглеродистая сталь 18G2A повышенной прочности с ферритно-перлитной структурой (табл. 1). Толщина плиты 8 мм.

Таблица 1

Химический состав, %, и свойства стали 18G2A

C max	Mn	Si	Ni	Cu	Cr	$\sigma_{\text{пл}}$, МПА	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	δ_5 , %
			max					
0,20	1,00...1,50	0,20...0,55	0,30	0,30	0,30	355	490...630	20

Рассматривалось влияние на исследуемые параметры величины скорости резки V (400 – 800 мм/мин), силы тока A (45 – 70 А), расстояния горелки от детали L (3 – 7 мм), диаметра сопла горелки (1,0 и 1,3 мм) и степени его износа (нового и после 8 ч работы). Использовался дробный факторный план 2^{3-1} (табл. 2).

Таблица 2

Матрица дробного факторного плана

№	Скорость резки		Сила тока		Расстояние горелки от поверхности детали	
	Код	Величина, мм/мин	Код	Величина, А	Код	Величина, мм
1	-1	400	-1	45	+1	7
2	+1	800	-1	45	-1	3
3	-1	400	+1	70	-1	3
4	+1	800	+1	70	+1	7

Были получены уравнения регрессии вида $y = a_i + b_{iV}V + b_{iA}A + b_{iL}L$, коэффициенты и показатели степени которых приведены в табл. 3.

Таблица 3

Коэффициенты и показатели степени уравнений регрессии

Условия резки	Параметр							
	Ширина реза S				Отклонение ширины реза Δ			
	a_S	b_{VS}	b_{AS}	b_{LS}	a_{Δ}	$b_{V\Delta}$	$b_{A\Delta}$	$b_{L\Delta}$
Новое сопло, диаметр 1,0 мм	1,7	$-7,4 \cdot 10^{-4}$	0,0116	0,0054	-	$4,6 \cdot 10^{-4}$	0,002	0,04
Изношенное сопло, диаметр 1,0 мм	1,3	$-11 \cdot 10^{-4}$	0,02	0,009	-0,23	$2,8 \cdot 10^{-4}$	0,034	0
Новое сопло, диаметр 1,3 мм	2,25	0	0	0	4,607	0	0	0
Изношенное сопло, диаметр 1,3 мм	2,04	$-5,6 \cdot 10^{-4}$	0,015	0,045	1,649	$8,4 \cdot 10^{-4}$	-0,026	0

Характер влияния условий плазменной резки на ширину реза и ее отклонения приведен на рис. 3 и 4, а на высоту заусенцев и волнистость поверхности реза – на рис. 5 и 6. Легко заметить, что увеличение скорости перемещения горелки уменьшает ширину реза, но увеличивает ее погрешности, а возрастание силы тока увеличивает ширину реза и ее погрешности.

Минимальная ширина реза зафиксирована для изношенного сопла при относительно небольшой силе тока. Реальный диаметр изношенного сопла больше номинального, как следствие поток плазмы действует на целой ширине реза, не концентрируясь в его центральной части. Однако более правильную форму реза обеспечивает новое сопло. Желательно также иметь минимальное расстояние горелки от поверхности реза.

Высота заусенцев уменьшается при уменьшении скорости перемещения горелки и увеличении диаметра нового сопла.

Регулируя параметры плазменной резки, можно минимизировать дефекты поверхности реза и уменьшить припуск, необходимый для последующей обработки.

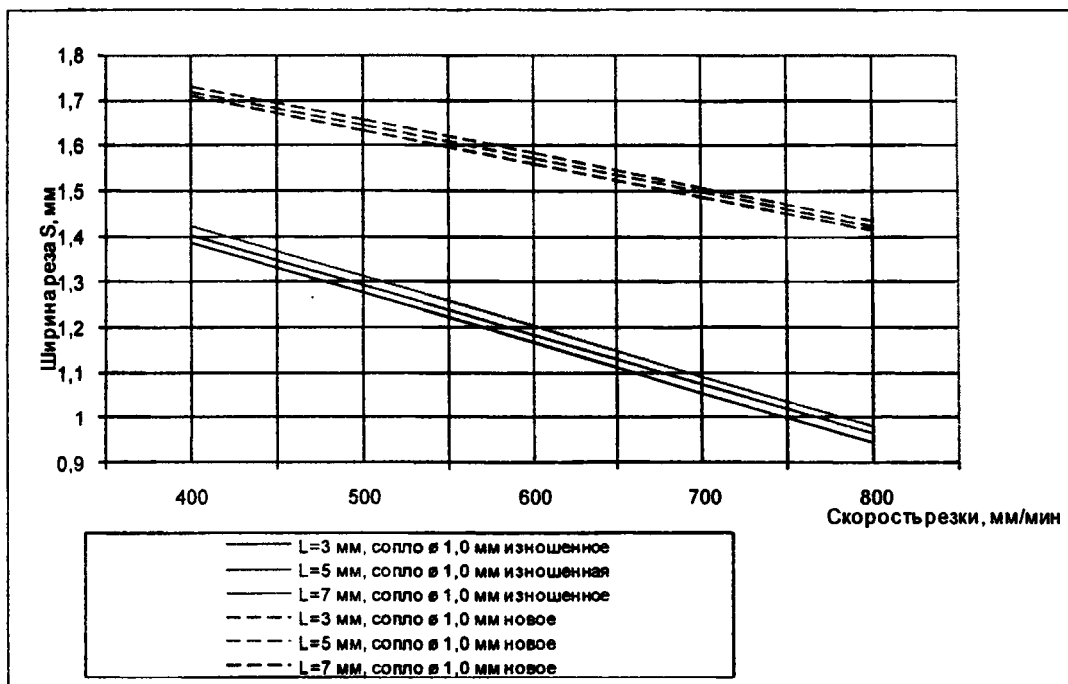


Рисунок 3 - Изменения ширины реза в зависимости от скорости перемещения горелки (сила тока 45 А)

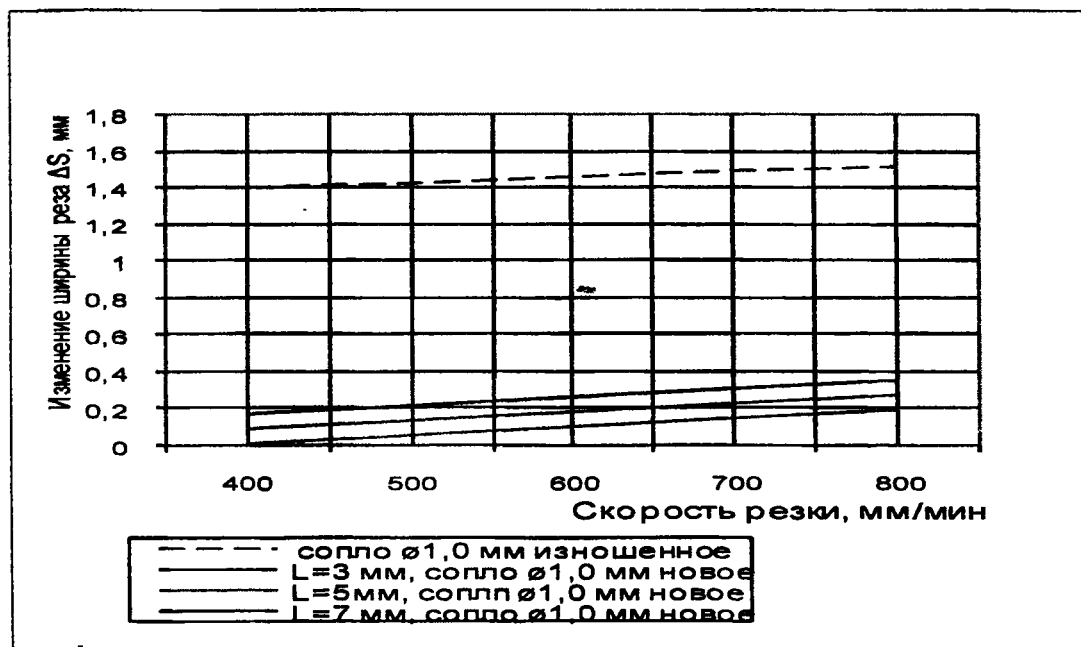


Рисунок 4 - Изменения погрешностей ширины реза в зависимости от скорости

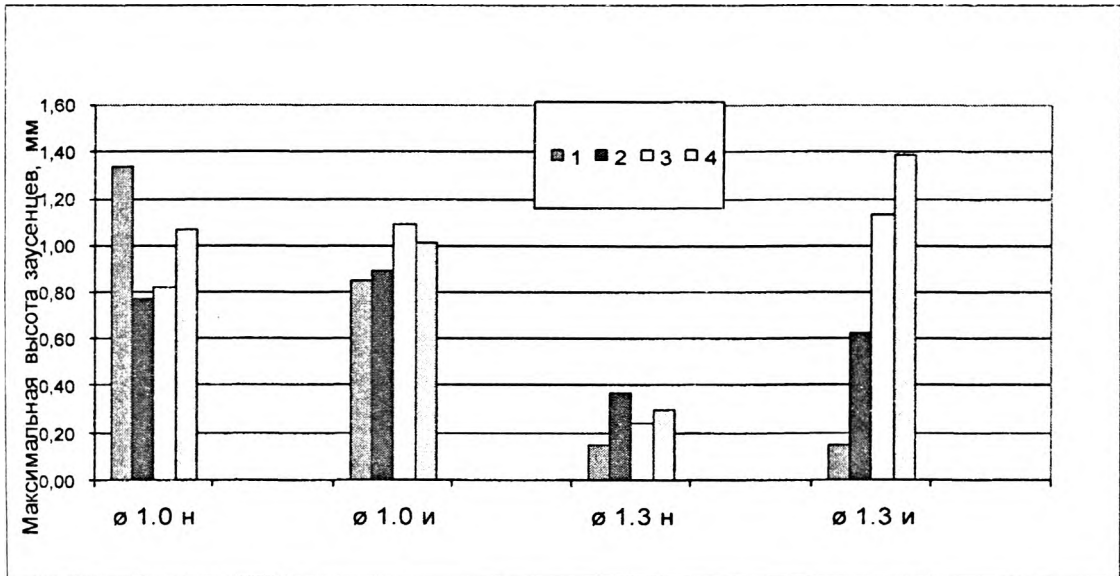


Рис. 5. Изменения высоты заусенцев в зависимости от условий резки и диаметра сопла горелки (1 – 4 – сочетания условий обработки согласно табл. 2; н – новое сопло; и – изношенное сопло)

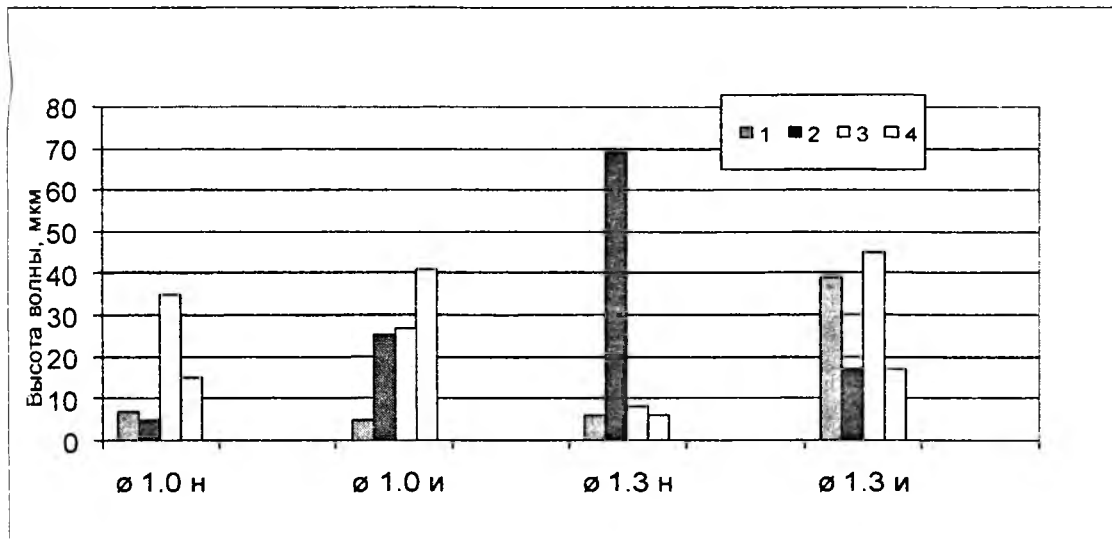


Рисунок 6 - Изменения высоты волны на поверхности реза в зависимости от условий резки и диаметра сопла горелки (1 – 4 – сочетания условий обработки согласно табл. 2; н – новое сопло; и – изношенное сопло)

ЛИТЕРАТУРА

1. Klimpel A. Spawanie, zgrzewanie i ciecie metali: technologie. Warszawa: WNT, 1999.–707с.

АНАЛИЗ СИЛ КРУТЯЩИХ МОМЕНТОВ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ЗЕРЕН ПРИ ОБРАБОТКЕ СФЕРЫ ТОРЦЕМ ЧАШЕЧНОГО КРУГА

Белорусский государственный технический университет
Минск, Беларусь

Обрабатываемое кольцо базируется на опорных роликах, а крутящий момент передается через базовый торец магнитным патроном. Для надежности вводится дополнительный прижим кольца к магнитному патрону посредством прижимных роликов и пневмоцилиндра (рис. 1).

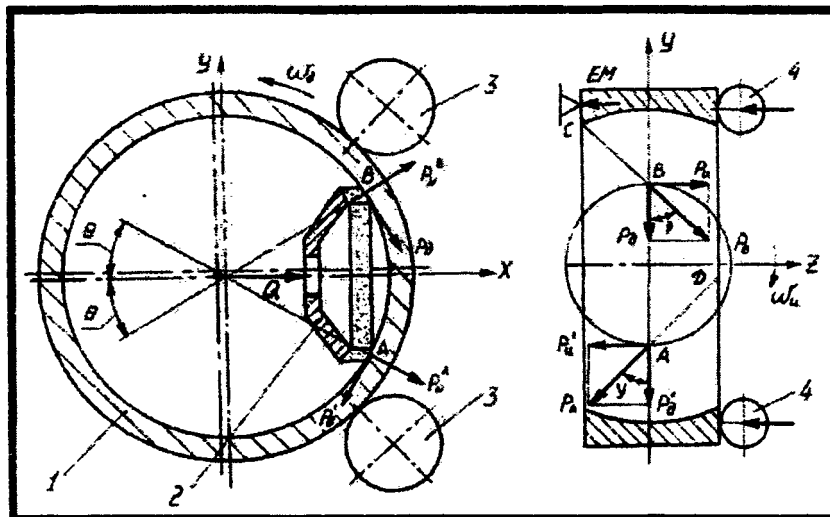


Рисунок 1 - Схема сил резания, действующих на инструмент и деталь при суперфинишировании торцом чашечного круга: 1 - деталь; 2 - абразивный круг; 3 - опорные ролики; 4 - прижимные ролики.

Обработка осуществляется за счет осевого прижима инструмента к обрабатываемой детали усилием Q . При вращении детали и инструмента абразивные зерна, проходя по верхнему сектору касания производят царапание по циклоиде в направлении CB , а по нижнему сектору - в направлении DA . Равнодействующая сила резания всех зерен верхнего сектора, приложенная к детали, представлена вектором P_b , а нижнего - P_a . Каждая из этих сил может быть представлена зависимостью:

$$P_{B(A)} = \frac{Q}{2 \cdot \cos \Theta} f, \quad (1.1)$$

где f - коэффициент трения-царапания, определяемый экспериментально.

Разложение сил $P_{A(B)}$ по осям Y и X дает:

$$P_u = P_u' \frac{Q}{2 \cdot \cos \Theta} f \cdot \sin \nu, \quad (1.2)$$

$$P_o = P_o' \frac{Q}{2 \cdot \cos \Theta} f \cdot \cos \nu, \quad (1.3)$$

где

$$\operatorname{tg} \nu = \frac{V_u}{V_o} = K. \quad (1.4)$$

Пара сил P_u - P_u' создают момент сил резания на шпинделе абразивного круга:

$$M_u = \frac{Q \cdot R_u}{2 \cdot \cos \Theta} f \cdot \sin \nu. \quad 1.5$$

Силы P_∂ - P_∂' создают момент сил резания на детали, который преодолевается приводом бабки изделия:

$$M_\partial = \frac{Q \cdot D_1}{2 \cdot \cos \Theta} f \cdot \cos \nu. \quad 1.6$$

Мощность в кВт приводов инструмента и детали определяется зависимостями:

$$N_u \geq \frac{M_u \cdot \omega_u}{1020 \cdot \eta_u}, \quad 1.7$$

$$N_\partial \geq \frac{M_\partial \cdot \omega_\partial}{1020 \cdot \eta_\partial}, \quad 1.8$$

где η_u и η_∂ - коэффициенты полезного действия передачи крутящего момента от соответствующих электродвигателей.

Размерности во всех зависимостях приводятся в Н, м, с⁻¹.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кривко Г.П. Основы совершенствования способов и технологических процессов механической обработки деталей подшипников. –Мн.: УП «Технопринт», 2001. -220с.

УДК 621.923

Кривко Г.П.

ОСНОВЫ СТРУКТУРИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ПОДШИПНИКОВ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Единой теории структуризации общества, науки, исследований пока не существует. Но по-видимому во вселенной существует единый информационный поток, который произвел структуризацию материи, создав различные вещества, например, металлы с различными кристаллическими решетками в твердом состоянии. Данный информационный поток есть то единое поле, которое посредством объективных законов передачи информации в конечном результате путем структуризации создало из неживой материи живую.

Исходя из вышесказанного, любая деятельность человека должна быть, структурирована для достижения положительного конечного результата. Это также касается создания оптимальных технологических процессов механической обработки любых деталей, а в частности деталей подшипников.

В целом при проектировании технологических процессов мы стараемся свести к минимуму три основных параметра: припуск, допуск и время на обработку. Данные три параметра зависят от множества элементарных составляющих, которые в свою очередь можно детализировать в зависимости от глубины исследований.

В наиболее укрупненном порядке вышеуказанные параметры представляются:

$$\Pi = f(R_{Z_{i-1}}, T_{i-1}, \rho_{i-1}, \varepsilon_i, \delta_i, \delta_{i-1}),$$

$$\delta = f(\Delta_y, \Delta_H, \Delta_u, \Delta_l, \varepsilon_y, \sum \Delta_{cm}),$$

$$T_{штк} = f(t_{осн}, t_{всп}, t_{техобл}, t_{оргобсл}, t_{отд}, t_{нзак}).$$

Любой технологический процесс должен обеспечить оптимальные параметры качества поверхности детали по макрогеометрии, микрогеометрии, физико-механическом и физико-химическим свойствам поверхности слоя деталей.

В задачу наших исследований входило установление пооперационного копирования погрешностей обрабатываемых поверхностей роликов, наружных и внутренних колец роликовых двухрядных сферических поверхностей. На основании произведенных исследований были разработаны эскизные проекты перспективных технологических процессов обработки вышеуказанных деталей с последующим изданием оригинальных альбомов.

При обработке роликов учитывались динамические характеристики станков с помощью комплекта тензометрической аппаратуры, для измерения вибраций отдельных узлов станков использовался комплект приборов К001.

Бочкообразные ролики закаливались после токарной обработки до твердости HRC62...65 по установленной на заводе технологии. После закалки поверхность качения роликов подвергалась черновому бесцентровому шлифованию «напроход», затем ролики проходили предварительное, чистовое и окончательное шлифование. Для более полной оценки микропрофиля поверхности нами определялись коэффициенты заполнения, пустоты и формы

$$K = \frac{R_t - R_p}{R_t}; \quad \lambda = \frac{R_p}{R_t}; \quad \delta = \frac{R_u}{R_p}.$$

Где параметр R_t определяется, как среднее расстояние, измеренное от огибающего до среднего профиля (глубина сглаживания)

Для получения математической модели в виде уравнений регрессии была проведена серия экспериментов по методу центрального композиционного планирования экспериментов при исследовании группового способа обработки сферических торцов роликов. Полученные эмпирические зависимости следующие.

$$R_u = 1,484n_0^{-0,4}S^{0,12}t^{-0,14},$$

$$W = 1,437n_0^{-0,15}S^{0,3}t^{-0,3},$$

$$H = 937n_0^{0,01}S^{0,01}t^{0,01},$$

где R_u - шероховатость, мкм;
 W - волнистость, мкс;
 H - микротвердость, МПа;
 n_0 - частота вращения детали, мин⁻¹;
 S - поперечная подача, мм/мин;
 t - время выхаживания, с.

При анализе технологического процесса механической обработки наружных колец подшипников наиболее детально исследована была операция финишной обработки сферической поверхности детали методом «пересекающихся осей». При исследовании определена особенность формирования сферической поверхности следами траекторий движения зерен и выведена эмпирическая зависимость полной скорости относительного движения зерна и обрабатываемой поверхности:

$$V = R_u \cdot W_u \sqrt{1 - \frac{2 \cos \varphi}{K} + \frac{1}{K^2}}.$$

где R_u - радиус обрабатываемой сферы;
 W_u - угловая скорость;
 φ - угол атаки.

$$K = \frac{V_u}{V_d},$$

где V_u - скорость инструмента;
 V_d - скорость детали.

На основании анализа соотношения скорости вращения инструмента и детали была обоснована схема формирования следами режущих зерен алмазного круга «пересекающейся» шероховатости обработанной поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

Кривко Г.П. Основы совершенствования способов и технологических процессов механической обработки деталей подшипников. -Мн.: УП «Технопринт», 2001.-220с.

УДК 621.923

Кривко Г.П., Черей Д.А.

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУИРОВАНИЯ ПРИВОДНЫХ ВАЛКОВ ДЛЯ ГРУППОВОГО СУПЕРФИНИШИРОВАНИЯ БОЧКООБРАЗНЫХ РОЛИКОВ

*Белорусский национальный технический университет
 Минск, Беларусь*

В целях упрощения технологии изготовления опорных валков для бесцентрового базирования роликов при суперфинишировании и повышения стабильности базирования роликов профиль валков изготавливается в виде двух конических поясков (рис. 1). По положению ролика на опорных валках и характеру взаимного движения возможны три варианта их исполнения. Рассмотрим базирование на примере ролик 73727 (рис. 2).

Вариант 1 (базовый).

Ось ролика параллельна осям опорных валков. Точки контакта ролика с валками расположены на одинаковом расстоянии l от торцев ролика. Приняв $l = 6$ мм, определяем угол наклона конических поясков (рис. 1):

$$\alpha = \arcsin \frac{l_{K1}}{R_{обр}}; \quad (1)$$

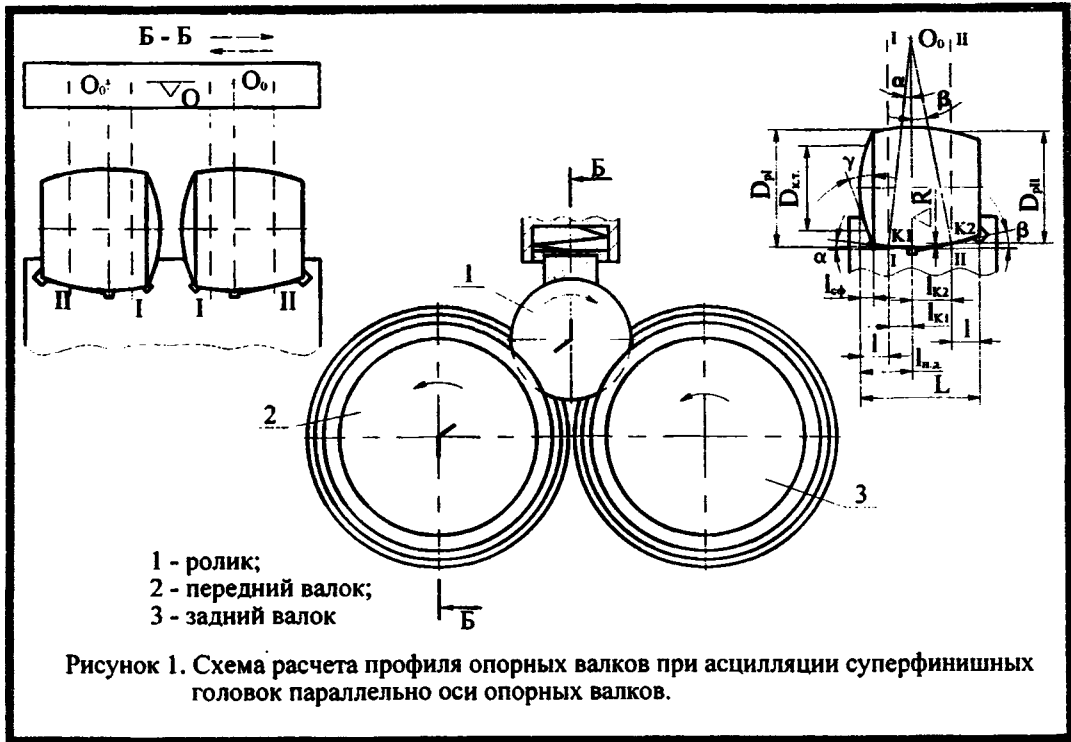
$$\beta = \arcsin \frac{l_{K2}}{R_{обр}}, \quad (2)$$

где l_{K1}, l_{K2} – расстояние от плоскости наибольшего диаметра ролика до точек контакта с валками; $R_{обр}$ – радиус образующей ролика.

$$\alpha = \arcsin \frac{7,008}{120,3} = \arcsin 0,058254 = 3^{\circ}20'22",$$

$$\beta = \arcsin \frac{14,754}{120,3} = \arcsin 0,122643 = 7^{\circ}02'41",$$

Разница радиусов расчетных опорных сечений ролика составляет величину:



$$\Delta R = R_{\text{обр}} (\cos \alpha - \cos \beta) = 120,3 \cdot (0,998303 - 0,992450) = 0,7041 \text{ мм.}$$

Приняв диаметр валка в сечении I $D_{в I} = 100$ мм, диаметр в сечении II составит:

$$D_{в II} = 100 + 2\Delta R = 100 + 2 \cdot 0,7041 = 101,4082 \text{ мм.}$$

Расстояние от точки касания K1 до опорного торца валка:

$$l - l_{\text{сф}} = 6 - 0,262 = 5,738 \text{ мм.}$$

Угол наклона образующей торца валка:

$$\gamma = \arcsin \frac{D_{\text{к.т.}}}{2R_m}, \quad (3)$$

где $D_{\text{к.т.}}$ – диаметр окружности, по которой контактирует торец ролика с валком; R_T – радиус сферического торца ролика.

Примем $D_{\text{к.т.}} = 28$ мм.

После подстановки в (3), получим:

$$\gamma = \arcsin \frac{28}{2 \cdot 540,54} = \arcsin 0,0259 = 1^\circ 29' 03''.$$

Недостатком такого профиля является различие передаточного отношения от валка к ролику в сечениях I и II и наклон хорды, соединяющей крайние точки А и В образующей на угол ε относительно осей валков.

$$\varepsilon = \arctg \frac{D_6 - D_m}{2(L - l_{\text{сф}})}, \quad (4)$$

где D_6, D_m – диаметры большего и меньшего торцев ролика.

$$\varepsilon = \arctg \frac{33,646 - 31,4}{2 \cdot (33,762 - 0,262)} = \arctg 0,033522 = 1^\circ 55' 12''.$$

Значение передаточных отношений в сечениях контакта I и II

$$i_I = \frac{R_{вI}}{R_{рI}} = \frac{50}{17,2958} = 2,891;$$

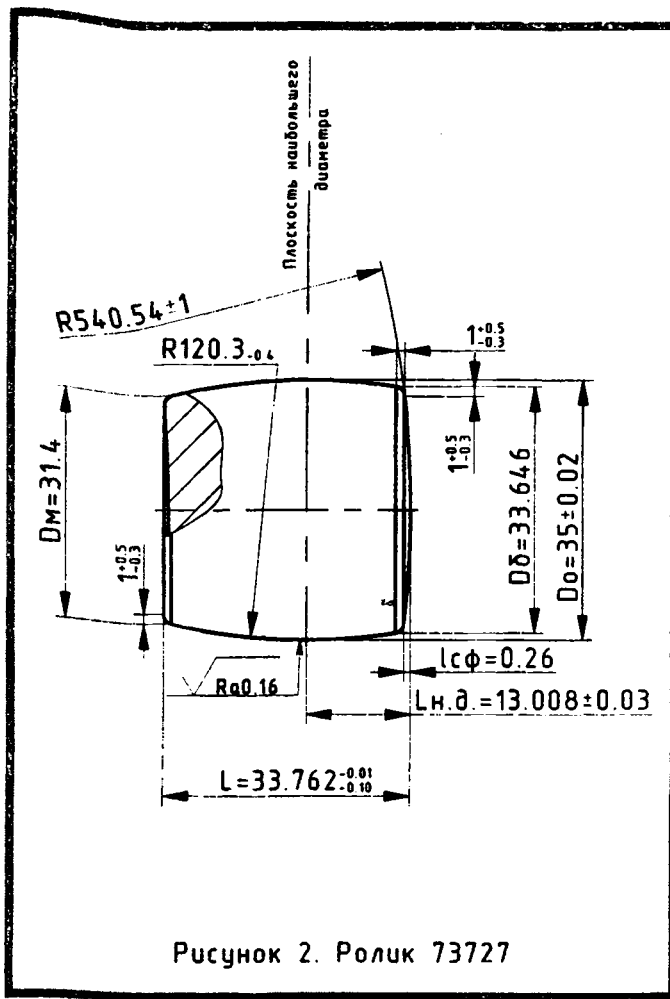


Рисунок 2. Ролик 73727

$$i_{II} = \frac{R_{вII} + \Delta R}{R_{рII} - \Delta R} = \frac{50 + 0,7041}{17,2958 - 0,7041} = 3,056$$

$$\frac{i_{II}}{i_I} = \frac{3,056}{2,891} = 1,057$$

т.е. скольжение, обусловленное геометрическими соотношениями, составляет около 5,7%.

Вариант 2.

Для исключения скольжения необходимо обеспечить равенство передаточных отношений в сечениях I и II. Такой вариант проще всего обеспечить при контактировании ролика с валками в сечениях, равноудаленных от плоскости наибольшего диаметра. При этом $D_{рI} = D_{рII}$ и $D_{вI} = D_{вII}$, а ось ролика параллельна осям валков.

Недостатки такого профиля опорных валков:

1. Различная величина давления на валки в сечениях I и II.
2. Отсутствие осевой составляющей реакции валков, прижимающей торец ролика к буртику валка.

Вариант 3.

Для обеспечения такого положения ролика, когда его хорда АВ параллельна осям валков, необходимо повернуть ролик в вертикальной плоскости на угол ϵ .

Произведя поворот ролика относительно точки K_1 , точка K_2 получит перемещение:

$$\Delta K_2 = (l_{K1} + l_{K2}) \cdot \operatorname{tg} \epsilon = (7,008 + 14,754) \cdot 0,033522 = 0,7295 \text{ мм.}$$

Приращение радиуса валка $R_{вII}$ составит:

$$R_{вII} = \Delta K_2 \cdot \operatorname{Sin} 2\sigma = 0,7295 \cdot 0,34212 = 0,2495 \text{ мм.}$$

Для обеспечения контактирования профиля валка с роликом в новом положении, необходимо повернуть профиль валка относительно точки K_1 на угол:

$$\xi = \arctg \frac{\Delta R_{\text{нл}}}{l_{K1} + l_{K2}} = \arctg \frac{0,2495}{7,008 + 14,754} = \arctg 0,011465 = 0^{\circ}39'25''.$$

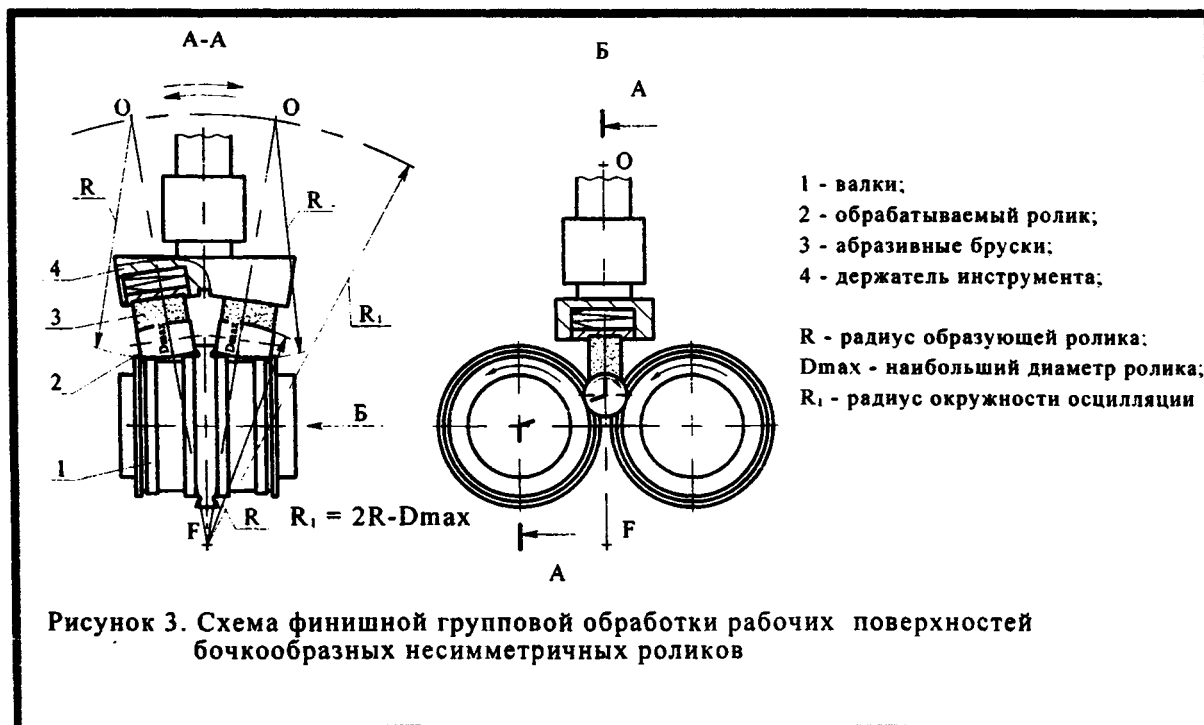
При этом углы β и γ увеличатся на угол ξ , а α – уменьшится на эту же величину.

В табл. 1 приведены размеры, характеризующие профиль опорного валка для всех трех рассмотренных вариантов базирования ролика.

Таблица 1. Геометрические характеристики профиля опорных валков

Обозначение параметра	Вариант базирования		
	1	2	3
l_{K1} , мм	7,008	9,000	7,008
D_{pl} , мм	17,296	17,163	17,296
l_{K2} , мм	14,754	9,000	14,754
D_{pII} , мм	16,592	17,163	16,592
ϵ	1°55'12"	1°55'12"	0
α	3°20'22"	4°17'26"	2°40'57"
β	7°02'41"	4°17'26"	7°42'06"
γ	1°29'03"	1°29'03"	2°08'28"

Однако эти схемы не подходят для одновременной обработки двух роликов по методу качания брусков по дуге окружности. Для реализации схемы обработки при которой ролик обкатывается по рабочим поверхностям приводных валков, а инструменту сообщается осциллирующее движение по дуге окружности с центром, совпадающим с центром кривизны образующей обрабатываемой поверхности, отличающейся тем, что центры кривизны рабочих поверхностей приводных валков располагают на линии, проходящей через центр качания держателя инструмента и центр наибольшего диаметра сечения обрабатываемой детали, и на окружности, радиус которой выбирают равным удвоенному радиусу обрабатываемой поверхности за вычетом величины наибольшего диаметра обрабатываемой детали (рис. 3), необходимо повернуть ролик в вертикальной плоскости на угол ψ , равный углу наклона роликовой дорожки внутреннего кольца ($\psi = 11^{\circ}44'13''$).



Произведя поворот ролика относительно точки K_1 , точка K_2 получит перемещение:
 $\Delta K_2 = (l_{K1} + l_{K2}) \cdot \operatorname{tg} \psi = (7,008 + 14,754) \cdot 0,207763 = 4,52133$ мм.

Уменьшение радиуса вала R_{aII} составит:

$$R_{aII} = \Delta K_2 \cdot \sin 20^\circ = 4,52133 \cdot 0,34212 = 1,5464 \text{ мм.}$$

Для обеспечения контактирования профиля вала с роликом в новом положении, необходимо повернуть профиль вала относительно точки K_1 на угол:

$$\xi = \operatorname{arctg} \frac{\Delta R_{aII}}{l_{K1} + l_{K2}} = \operatorname{arctg} \frac{1,5464}{(7,008 + 14,754)} = \operatorname{arctg} 0,071059 = 4^\circ 03' 52''$$

При этом углы β и γ уменьшатся на угол ξ , а α – увеличится на эту же величину.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильева Т.М., Грин Э.А., Гальперин Б.Я, Мазальский В.Н. Расчет валковых устройств бесцентровых суперфинишных станков // Станки и инструмент.–1972. – №11. – с.16-18.
2. Зарецкий А.В., Кирюхин В.М., Марченко В.В. Расчет валковых устройств и настройка станков для бесцентрового суперфиниширования конических роликов // Труды института. – М.: Специнформцентр ВНИИПа. – 1979. – №1(99). М.– с.69-75.
3. Патент 5473 ВУ. МПК: В 24В 5/37, 35/00. Способ финишной групповой обработки рабочих поверхностей бочкообразных несимметрических роликов и устройство для его осуществления/ Кривко Г.П., Филонов И.П., Пенза В.Н. и др.– №19981151; Заявлено 22.12.1998; Опубликовано /Афіцыйны бюлетэнь. Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь – 2003. – №3. – 4с.

УДК 621.791.753.0

Ловшенко Ф.Г., Ловшенко Г.Ф., Хабибуллин А.И.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ГОРЯЧЕЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКОЙ ЗАГОТОВОК ИЗ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННОЙ МЕДИ

*Белорусско-Российский университет
Могилев, Беларусь*

1. Особенности физико-механических и технологических свойств.

Для изготовления ряда изделий электротехнической промышленности (разрывных электроконтактов, электродов контактной точечной сварки, токоподводящих наконечников для сварки проволокой в среде защитных газов, сопел плазмотронов, электрод-инструмента для электроэрозионной обработки) необходимо применение новых жаропрочных материалов износостойких материалов на основе меди.

Высокие эксплуатационные характеристики достигаются при использовании дисперсно-упрочненных композиционных материалов (ДУКМ) на основе меди, получаемых методом реакционного механического легирования.

Эти ДУКМ на основе меди, получаемые по технологии разработанной в Белорусско-Российском университете, имеют следующие свойства: электропроводность составляет 65-70% от электропроводности меди, твердость – 190-220 НВ, предел прочности при растяжении – 700-900 МПа, длительная прочность – $[\sigma^{50}] = 200 - 250$ МПа, температура рекристаллизации – 800-850⁰С, относительное удлинение – 2 %.

Основные технологические этапы изготовления этих материалов включают в себя реакционное механическое легирование; холодное прессование полученных дисперсно-упрочненных гранулированных композиций; термообработку гранулированных

композиций; экструзию прутков требуемого профиля; формообразование заготовок методами горячей обработки давлением и, наконец, получение изделий с помощью механообработки.

Сложность производства прутков с сечением более 200 мм^2 обусловлена рядом причин: большой неравномерностью деформаций по сечению заготовки; низкой стойкостью технологической оснастки для экструзии при увеличении геометрических параметров; необходимостью применения прессового оборудования усилием более 4000 кН.

В связи с широкой номенклатурой изделий электротехнической промышленности, характеризующейся разнообразием форм и сложностью изготовления профилей с большой площадью поперечного сечения, особое значение приобретает выбор рациональных методов формообразования заготовок.

ДУКМ на основе меди отличаются от других конструкционных материалов меньшей допустимой скоростью нагрева (не более $110^\circ\text{C}/\text{мин}$ при диаметре прутка до 18 мм), ограниченными степенями деформаций, более узкими температурными интервалами обработки давлением ($700\text{--}830^\circ\text{C}$), большим сопротивлением деформации, выраженной анизотропией физико-механических свойств. Эти особенности физико-механических свойств ДУКМ, обусловлены микрокристаллической структурой сплава, замедленной диффузией и рекристаллизацией.

Деформируемость в горячем состоянии характеризуется следующими параметрами: допускаемая степень деформации при свободной осадке вдоль оси до 50–56%; уголгиба до 22–27 % (при радиусегиба равном диаметру прутка); угол закрутки до $42\text{--}48^\circ$ (на длине 100 мм при диаметре прутка 16 мм).

Эти свойства обуславливают невозможность обработки давлением ДУКМ в холодном состоянии и посредственную деформируемость при горячей обработке давлением.

При проектировании штампового инструмента необходимо учитывать различие в коэффициентах линейного расширения материалов заготовки и инструмента (соответственно $16,8 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ и $12,4 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) и разницу их температур.

Верхняя граница температурного интервала горячей объемной штамповки для ДУКМ на основе меди не должна превышать 830°C , т.к. нагрев на более высокие температуры приводит к рекристаллизации и снижению эксплуатационных свойств изделий. Нижняя граница температур должна быть не менее 700°C , в связи со снижением пластичности материала.

В идеальном случае оснастка должна иметь температуру нагретой заготовки, но высокая стоимость и дефицитность штамповых сталей, работающих при высоких температурах, обуславливает их замену полутеплостойкими штамповыми сталями типа 5ХНМ, работающих при температурах до 450°C .

При обработке давлением изделий обладающих малой массой, во избежание снижения температуры в процессе штамповки, возможна замена штамповых сталей быстрорежущими, позволяющими производить нагрев штампового инструмента до температур 600° .

2. Особенности прошивки заготовок.

Механическая обработка осложняется абразивными свойствами ДУКМ, снижающими стойкость режущего инструмента. Особенно это сказывается при глубоком сверлении рабочих каналов токоподводящих наконечников, водоохлаждающих каналов электродов. Использование штамповки позволяет снизить потери металла в стружку, повысить производительность процесса, улучшить эксплуатационные свойства изделий.

Прошивка отверстия в заготовке с раздачей материала в стороны вызывает образование продольных трещин из-за пониженной пластичности ДУКМ поперек волокон. Вследствие этого разность диаметров исходной заготовки и канала матрицы при комнатной температуре не должна превышать 2,5% для ограничения процесса раздачи. Разность диаметров менее 0,8 % приводит к образованию поперечных рванин в прошиваемых заготовках. Это явление

ние связано с заклиниванием заготовки в конической части канала матрицы, в процессе перемещения ее пуансоном в зону сужения, и преждевременным началом процесса прошивки. Таким образом, в «застывшей» в середине канала заготовке передняя ее часть продолжает перемещаться с помощью пуансона, а задняя, с прошитым отверстием, неподвижна или перемещается с меньшей скоростью.

Поперечные рванины, вызываемые теми же причинами, могут наблюдаться и при штамповке в несколько переходов. Для предотвращения этого матрица каждого последующего перехода должна иметь увеличенные размеры рабочих полостей. Расчет размеров производится с учетом коэффициентов линейного расширения материалов заготовки и оснастки, а также разницы их температур.

Конусность канала матрицы должна быть в пределах $0^{\circ}40' - 1^{\circ}20'$. При увеличении конусности снижаются силы трения заготовки о стенки канала матрицы и заготовка остается на прошивне из-за усадки при охлаждении, что затрудняет ее съем. При уменьшении конусности значительно возрастают усилия выталкивания заготовки.

При прошивке глухих отверстий в заготовках имеющих наружную коническую поверхность (что характерно для рабочей части электродов для контактной точечной сварки) прошивень не должен входить в коническую зону канала матрицы. Несоблюдение этого условия приводит к отрыву материала заготовки от стенок канала матрицы и к несанкционированному съему заготовки на прошивне.

Получение тонкостенных поковок с глубоким отверстием сопровождается выраженной разностенностью. Это объясняется разностью диаметров заготовки и канала матрицы, что вызывает эксцентричное расположение отверстия в начале прошивки. Эксцентричность, кроме нарушения геометрических размеров изделия, приводит к образованию трещин в тонкостенной части юбки электрода. Их появление связано с охрупчиванием переохлажденного тонкостенного участка и максимальной раздачей материала в начале процесса прошивки.

Наличие центровочного отверстия на торце заготовки позволяет избавиться от данного вида дефектов.

Разностенность в конце прошивки связана с формой рабочей части прошивня и зависит от кинематики течения материала, сил трения, степени несимметричности течения материала. Наиболее благоприятна, с точки зрения кинематики течения материала, сферическая форма головки прошивня. Однако, при выдавливании с высокими степенями деформации и большой относительной глубиной полости создаются условия приводящие к повышенной адгезии и нестационарности процесса течения материала. Вследствие этого, возникает тенденция к радиальному смещению прошивня.

Профиль рабочей части в виде усеченного конуса уступает сферическому по кинематике течения материала, но повышает устойчивость смазочного слоя, снижает адгезию, способствует стационарности процесса и обеспечивает наименьшую разностенность.

При прошивке электродов точечной сварки с наружными диаметрами до 25 мм и внутренними каналами диаметрами до 16 мм оптимальные значения углов при вершине конической части составляют $(140-160)^{\circ}$, а диаметры площадок составляют 0,4-0,5 от диаметра рабочей части прошивня.

На условия работы прошивня, матрицы, течения материала большое влияние оказывают условия смазки. Применение рекомендуемых в литературе масляно-графитовых суспензий приводит к накоплению в канале матрицы графита и нарушению формы и размеров изделия. Лучшие результаты дает применение высокотемпературных синтетических смазок.

Знание и учет особенностей прошивки заготовок из ДУКМ на основе меди при изготовлении электродов позволяет оптимизировать режимы основных операций штамповки и расширить ассортимент электротехнической продукции сложной формы применяемой на предприятиях Республики Беларусь и стран СНГ.

3. Особенности высадки заготовок.

Сложность производства прутков с высокими физико-механическими характеристиками сечением более 220 мм^2 обусловлена рядом причин: большой неравномерностью де-

формаций по сечению заготовки; низкой стойкостью технологической оснастки для экструзии при увеличении геометрических параметров; необходимостью применения прессового оборудования усилием более 2500 кН.

Потребность в расширении ассортимента изделий имеющих большую площадь поперечного сечения и отсутствие необходимого прессового оборудования вызывают необходимость применения операций осадки для заготовок из дисперсно-упрочненной меди. Низкая пластичность и выраженная анизотропия физико-механических свойств обуславливают невозможность обработки давлением в холодном состоянии и посредственную деформируемость при горячей обработке давлением. Допускаемая степень деформации при свободной осадке прутков диаметром 16 мм нагретых до 800⁰С вдоль оси не превышает 56% . Для повышения пластичности материала необходимо производить осадку в закрытых штампах.

Целью данных исследований являлась оптимизация технологических процессов формообразования заготовок методами обработки давлением.

Для достижения поставленной цели требовалось решение следующих задач: изучение особенностей технологических процессов на основных операцияхковки и оптимизация их режимов; оптимизация режимов на основных операцияхштамповки для типовых изделий электротехнической промышленности; разработка технологических процессов для основных типов изделий и конструирование инструмента и технологической оснастки.

Высадка головки электрода диаметром 25 мм и высотой 16 мм из прутка диаметром 16 мм возможна за 1 переход без потери устойчивости при соотношении Н/Д равное 2,4. Дальнейшее увеличение высоты головки приводит к потере устойчивости и требует применения дополнительного наборного перехода. Этот переход производится в наборном пуансоне с рабочей полостью в форме усеченного конуса с основаниями диаметром 25 и 16 мм. Таким образом, можно высаживать головки с площадью поперечного сечения до 500 мм² и высотой 24 мм из прутка 16 мм без заметного снижения физико-механических свойств. Дальнейшее увеличение высоты высаживаемой головки требует увеличения числа наборных переходов.

Для заполнения рабочей полости штампа давление осадки должно быть не менее 500 МПа при температуре оснастки 450⁰С и температуре нагрева заготовки 800⁰С.

Так как рабочей поверхностью электрода является центральная часть головки, то разрыхление сердцевины за счет раздачи материала при осадке значительно снижает его эксплуатационные свойства. Наименьшее разрыхление сердцевины при наборном переходе достигается расположением большего диаметра усеченного конуса у ножки электрода. При такой схеме раздача материала в центре электрода минимальна. При высадке головок с большим сечением избежать разрыхления центральной части электрода не удастся.

Сочетание высадки с обратным прессованием рабочей части головки позволяет сохранить структуру рабочей поверхности электрода. В этом случае осуществляется вариант открытой штамповки с выдавливанием части материала со стороны рабочей поверхности электрода внутрь пуансона. Течение слоев материала при обратном прессовании противоположно течению при раздаче заготовки во время высадки и является преобладающим процессом.

Характер истечения и глубина деформируемых слоев материала при обратном прессовании зависят от соотношения диаметров высаживаемой головки и отверстия матрицы. Уменьшение выходного отверстия матрицы увеличивает давление высадки и позволяет заполнить рабочую полость штампа, но снижает глубину деформирования слоев материала головки. Оптимальное соотношение площадей сечения высаживаемой головки и выдавливаемого прутка 15 : 1.

На работу штампа и течение материала большое влияние, оказывают условия смазки. Применение рекомендуемых в литературе масляно-графитовых суспензий приводит к накоплению графита в ручье штампа и нарушению формы и размеров изделий. Лучшие результаты дает применение высокотемпературных синтетических смазок.

Рекомендуемые режимы и приемы высадки позволяют расширить ассортимент высококачественных изделий электротехнического назначения из дисперсно-упрочненных материалов на основе меди.

4. Особенности гибки заготовок.

Поставляемые Белорусско-Российским университетом электроды контактной точечной сварки из дисперсно-упрочненного композиционного материала на основе меди, полученного реакционным механическим легированием, хорошо зарекомендовали себя на различных предприятиях машиностроительного профиля. Основные типы применяемых электродов имеют простую геометрическую форму и представляют собой колпачок или цилиндр и могут быть изготовлены выдавливанием.

Но для сварки крыши кабины автомобиля МАЗ применяются электроды сложной конфигурации. Они представляют собой изделие, состоящее из двух усеченных конусов. Причем рабочий конус (с диаметром 11мм у основания) сдвинут относительно посадочного конуса (с диаметром 16мм у основания) на 9 мм. Изготовление такого электрода механической обработкой из прутка приводит к значительным потерям материала в стружку, затратам времени и к снижению эксплуатационных свойств изделий.

Формообразование заготовки методами обработки давлением позволяет избавиться от этих недостатков.

Посредственная деформируемость в горячем состоянии проявляется, в частности, в ограничении допускаемого углагиба до $22-27^{\circ}$ при радиусегиба равном диаметру прутка. Такие технологические свойства не позволяют получить требуемое изделие свободной гибкой.

Известно, что пластичность материала можно повысить при реализации рациональной схемы напряженного состояния. Повышение пластичности, в данном случае, достигается созданием сжимающих напряжений вдоль оси заготовки в процессе гибки.

Нами разработана конструкция штампа, позволяющая производить осадку заготовки одновременно с ее гибкой, что дает возможность изготавливать требуемые изделия из дисперсно-упрочненных композиционных материалов на основе меди.

ЛИТЕРАТУРА

1. Витязь П.А., Ловшенко Ф.Г., Ловшенко Г.Ф. Механически легированные сплавы на основе алюминия и меди.-Мн.: Беларуская навука, 1998.-352с.
2. Инструментальные стали и их термическая обработка. И. Артингер. Справочник./ Пер.с венгер. М.: Металлургия,1982.-312с.
3. Машиностроительные материалы. Краткий справочник./ В.М.Раскатов и др.-3-е изд. перераб. и доп.-М.:Машиностроение,1980.-511с.
- 4.Термическая обработка в машиностроении: Справочник/ Под ред. Ю.М.Лахтина, А.Г.Рахштадта.-М.: Машиностроение,1980.-783с.
- 5.Стали и сплавы. Марочник: Справ, изд. / В.Г. Сорокин и др.; Науч. ред. В.Г. Сорокин, М.А. Гервасьев — М.: “Интермет Инжиниринг”, 2001.-608с.

УДК 621.762.

Дудяк А.И., Сахнович Т.А.

ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ И АКТИВАЦИЯ ПОРОШКА СИСТЕМЫ $Al_2O_3-Al_2TiO_5$ С ЦЕЛЬЮ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Необходимость интенсификации процессов твердофазного спекания керамики из оксидов требует проведения механической обработки (измельчения и активации) исходных порошков до субмикронного размера с высокой поверхностной энергией и наибольшим числом дефектов микроструктуры частиц [1]. С той точки зрения перспективной является обработка порошка в высокоэнергетической мельнице (аттрито-

ре), где благодаря специфическому характеру передачи энергии рабочим телам от внутренней мешалки в значительной мере снижается зависимость энергонапряженности процесса от динамических характеристик размольных тел. Это позволяет существенно уменьшить их размеры и за счет развития суммарной активной поверхности значительно повысить механохимическую активность, однородность и дисперсность обрабатываемого материала [2].

Исследовалась механическая активность порошков системы $Al_2O_3 - Al_2TiO_5$ в высокоэнергетической мельнице, представляющую собой горизонтально расположенную шаровую мельницу объемом 20 литров, имеющую центральный вал с лопастями. Корпус и вал имеют возможность вращаться в противоположных направлениях, что позволяет значительно интенсифицировать процессы измельчения и активации материала практически во всем рабочем объеме. В качестве мелющих тел использовали шары из стали ШХ-15 диаметром 8,5 мм. Обработку порошка проводим сухим способом в среде ацетона без нагрева. Время обработки составляет 30, 60, 90 и 120 минут. Исследовали кинетику помола порошка и помола железа, а также относительную плотность полуфабриката.

На рис. 1 показана кинетика помола железа в обрабатываемых порошках при сухом помоле [1] и в среде ацетона [2]. Видно, что при обработке в среде ацетона содержание железа в порошках имеет тенденцию к резкому росту после 60 мин. обработки. При сухом измельчении после 30 мин. содержание железа достигает около 1% и мало изменяется при продолжительности до 120 мин. При этом следует также отметить, что полученные данные по помолу железа имели высокую воспроизводимость при проведении многочисленных экспериментов для рассматриваемой композиции. В процессе термообработки керамики намотое железо окислялось до оксида железа и способствовало стабилизации титанита алюминия в температурном интервале $900 \div 1300^\circ C$, а также спеканию керамики [3]. Влияние среды и времени обработки на дисперсность порошка представлено в таблице.



Рисунок.1

Условия обработки	Время обработки, мин	S уд. по методу ВЕТ, м ² /г	Размер зерен, мкм				
			< 5	5-10	10-20	20-30	30-40
Сухой помол	30	2,84	-	76	15	3	-
	60	2,91	46	10	18	9	17
	90	5,95	42	12	20	10	16
	120	6,78	54	12	12	12	10
Помол в ацетоне	30	1,45	56	16	8	8	12
	60	4,41	78	8	4	-	-
	90	4,27	86	14	-	-	-

В таблице приведены результаты определения удельной поверхности (Суд), измеренной методом ВЕТ, и сегментационного анализа порошков после различной продолжительности измельчения сухим способом и в среде ацетона. В присутствии ацетона процесс измель-

чения интенсифицируется, а процесс агрегации мелкодисперсных частиц замедляется. При сухом помоле с повышением длительности обработки более 30 мин. наблюдается повышение агрегации частиц (рост доли частиц размером от 10 до 40 мкм) без налипания материала на шары и поверхность барабана.

Показатели S уд, характеризующие полную поверхность зерен с учетом шероховатости, поверхностной и внутренней пористости, с повышением длительности обработки возрастают. При этом, трехкратное повышение S уд. в ацетоне наблюдается при повышении длительности обработки до 60 мин., а при сухом способе примерно в 2,5 раза от 60 до 90 мин. Особо следует отметить, что при сухом способе получены более высокие значения S уд, что говорит о более развитой поверхности частиц.

Благодаря такой развитой поверхности частиц открылась возможность прессования обработанного порошка без применения связующего, что повышает стабильность технологического процесса за счет уменьшения количества технологических операций при изготовлении формовочных смесей, а также более высоких механических свойств полуфабриката

На рис. 2 показана зависимость относительной плотности полуфабриката, спрессованного статическим способом при давлении 1 ГПа (кривые 1,2) и 2 ГПа (кривые 3,4) от продолжительности измельчения сухим способом (кривые 1,3) и в ацетоне (кривые 2,4). В целом с повышением давления прессование независимо от вида измельчения показатели плотности растут. Оптимальная продолжительность сухим способом 60 мин, а в ацетоне 30 мин. В этих условиях плотность прессовки из порошка, прошедшего обработку сухим способом, выше на 12 %. После обжига при 1500°C эта закономерность сохранилась. При этом относительная плотность керамики повышалась на 2÷3 %, а прочность на сжатие на 150 ÷200 МПа.

В результате проведенных исследований установлено, что проведение атриторной обработки сухим способом в течение 60 мин. позволяет получать порошки с более высокой развитой поверхностью,

что гарантирует повышение механических свойств полуфабриката и спеченной керамики

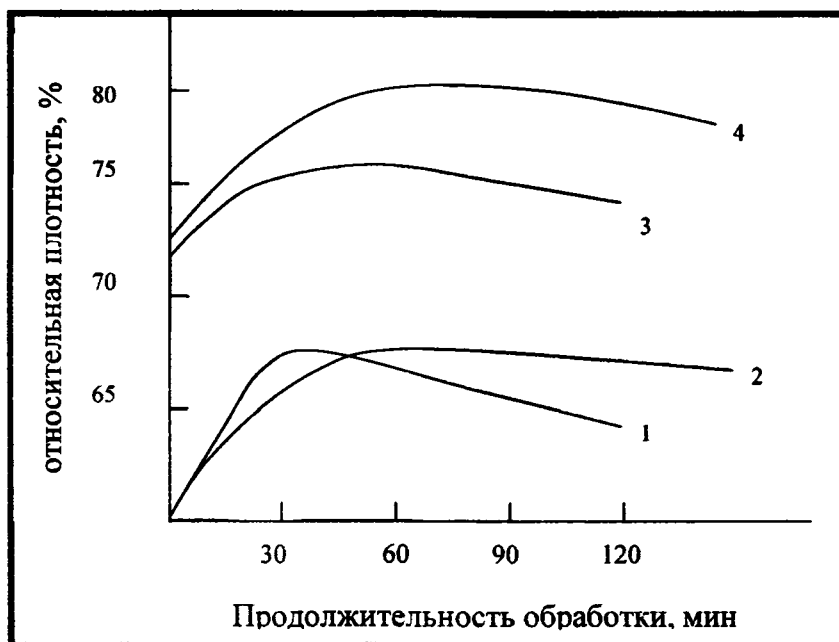


Рисунок 2

ЛИТЕРАТУРА

1. Аввакумов Е.Г. Механические методы активизации химических процессов. — Новосибирск: Наука, 1986. — 304с.
2. Кипарисов С.С., Либексон Г.А. Порошковая металлургия. — М.: Металлургия, 1980. — 495с.
3. Хамано К. Керамика на основе титана алюминия. — Тайкабуцу, 1975, т.27, № 215, с. 520- 527.

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

УДК 621.793

Девойно О.Г., Кардаполова М.А., Яцкевич О.К.

ФОРМИРОВАНИЕ САМОФЛЮСУЮЩИХСЯ ПОКРЫТИЙ, ОПЛАВЛЕННЫХ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Высокая адгезионная прочность самофлюсующегося покрытия с основой после нанесения на подложку может быть обеспечена последующим его оплавлением объемными или локальными источниками нагрева. Причем применение лазерного излучения позволяет внести значительные изменения в технологии формирования покрытий из самофлюсующихся сплавов, обеспечить оплавление покрытия без объемного разогрева детали, что позволяет расширить номенклатуру упрочняемых изделий за счет крупногабаритных и тонкостенных деталей [1].

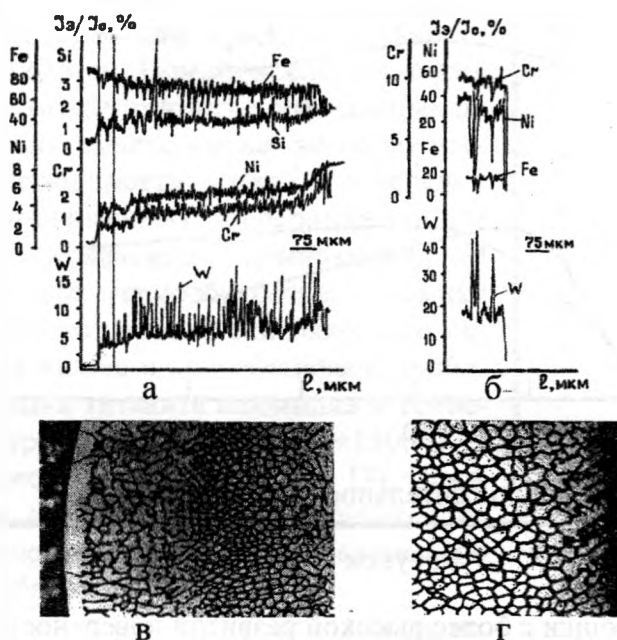


Рисунок 1 - Концентрационные кривые распределения элементов в сплаве ПГ-СРЗ + 30 об. % WC оплавленного лучом лазера с коэффициентом перемешивания $K_p = 2$ в переходной зоне со сталью (а, в) и на поверхности (б, г)

Варьирование режимами лазерной обработки обеспечивает и управляемое изменение физико-механических свойств. Однако на фоне современных тенденций к увеличению мощности и производительности машин, приводящих к росту удельных нагрузок в узлах трения и к повышению требований к надежности и долговечности деталей машин, появляется необходимость постоянного совершенствования порошковых покрытий [2]. Дополнительное легирование самофлюсующегося сплава можно произвести напылением механических смесей с карбидными добавками бора, хрома и вольфрама.

Целью исследования является изучение процесса массопереноса по глубине слоя и на границе покрытия и основы при оплавлении лазерным излучением газотермического самофлюсующегося покрытия с тугоплавкими добавками.

Методика исследований. Для исследования процесса лазерного оплавления газотермического покрытия использовали метод электронно-зондового анализа на микроанализаторе «КАМЕКА». Учитывая, что процесс оплавления имеет общие закономерности для всех композиций и определенные трудности в записи концентрационных кривых бора, углерода (в случае добавки W_4C) и в наложении концентраций хрома покрытия и Cr_3C_2 из ме-

ханической смеси, исследованию подвергались образцы с покрытием ПГ-СРЗ + 30% об. WC.

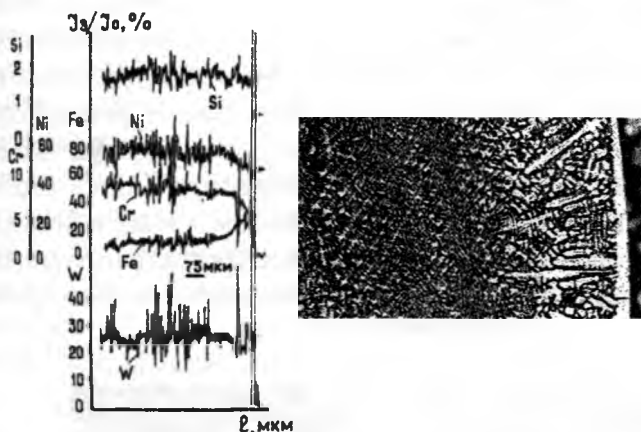


Рисунок 2- Концентрационные кривые распределения элементов в сплаве ПГ-СРЗ + 30 об. % WC оплавленно-го лучом лазера с коэффициентом перемешивания $K_{п} = 1,1$ по глубине слоя

в зоне покрытия – около 20%. Это свидетельствует о том, что несмотря на проплавление металла основы, процесс перемешивания протекает не полностью по всей ванне расплава. Однако содержание легких элементов сохраняется практически неизменным по всей глубине проплавленной зоны.

При лазерной обработке покрытия с проплавлением 5-10% основы (рис. 2) содержание железа не превышает 8-10% и его распределение по покрытию равномерно, так же как и легких элементов, а, значит, и упрочняющей фазы. Показательным является тот факт, что распределение вольфрама по зоне расплава тем равномернее, чем больше степень проплава по сравнению с неоплавленным образцом (рис. 1, 3), что свидетельствует о растворении вольфрама в никелевой матрице.

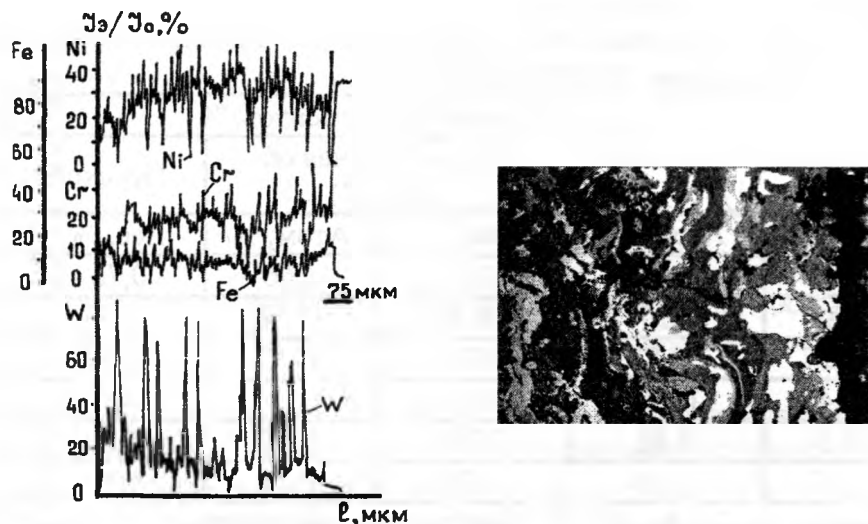


Рисунок 3- Концентрационные кривые распределения элементов в сплаве ПГ-СРЗ + 30 об. % WC после плазменного напыления

Концентрационные колебания вольфрама говорят о наличии карбидов типа $W_x C_{x-1}$. Распределение вольфрама наглядно видно из топографического снимка в рентгеновских лучах $W_{K\alpha}$ (рис. 4, а). Для хрома эта неоднородность выражена менее отчетливо (рис. 4, б). При этом следует отметить более или менее однородное распределение бора (рис. 4, в) в большом масштабе. Однако в масштабе, сопоставимом с размерами фаз, имеются неоднородности,

Суммарное количество бора, углерода, кремния вычислялось как остаток от ста процентов. Исследования проводили на покрытиях, оплавленных по 2-м режимам: с глубоким проплавлением поверхности (рис. 1) и с проплавлением 5-10% основы (рис. 2) Для сравнения исследовали покрытие такого же состава без оплавления (рис.3).

Как видно из рисунка 1, при глубоком проплавлении основы имеет место ожелезнение покрытия. При этом в зоне глубокого проплава с основой содержание железа составляет ~ 80%, а

связанные с наличием боридов. Видимость однородности распределения элементов на топографических снимках связана со строением фаз, входящих в состав покрытия.

В основном, дендритные по строению, структурные составляющие как бы пронизывают друг друга. Из рис. 5, где представлены структуры в поглощенных (а) и отраженных (б) электронах, отчетливо видно, что химический состав дендритов и междендритных областей существенно отличается. В поглощенных электронах дендриты имеют светлый контраст, в отраженных – темный. Светлые ажурные окаймления на рис.5, б – это фазы с высоким содержанием легких элементов – В и С. По различной тональности видно, что эти фазы имеют неодинаковый состав и соответствуют, вероятно, карбидам хрома и вольфрама. Между снимками на рис. 5 и данными точечного микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) структурных составляющих, представленных в таблице 1, имеется тесная корреляция.

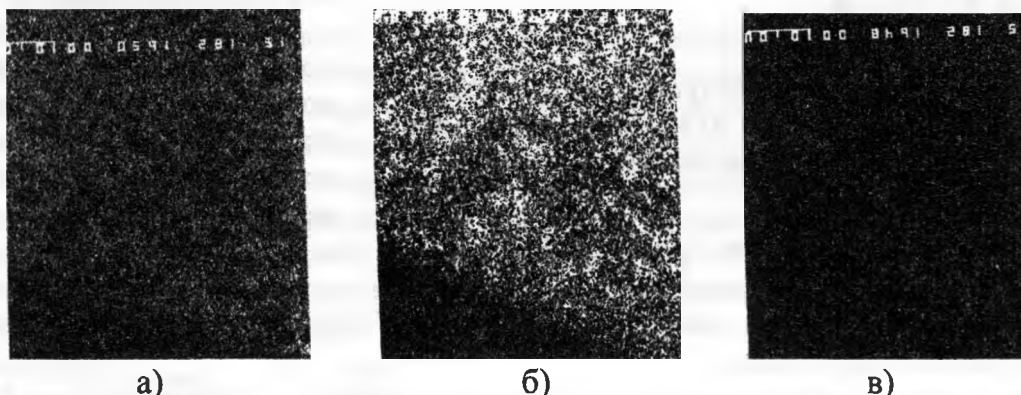


Рисунок 4- Топографическое распределение вольфрама, хрома, бора в рентгеновских лучах W, Cr, B: а – X-Ray-W; б – X-Ray-Cr, в – X-Ray-B

Из данных таблицы 1 следует, что сами дендриты обогащены железом и никелем, а междендритные области – вольфрамом и хромом – последние как раз соответствуют смеси фаз, в том числе карбидов вольфрама и хрома.

Таблица 1. Результаты точечного МРСА зоны глубокого проплава о основной покрытия ПР-СРЗ +30% WC

№ пп	Элемент	Содержание элементов, %					
		Дендрит γ раствора (1)		Междендритная область (2)		Переходная зона (3)	
		Вес, %	Атом, %	Вес, %	Атом, %	Вес, %	Атом, %
1	Si	1,04	2,02	0,74	1,66	0,76	1,33
2	Cr	7,89	8,27	10,71	12,98	6,64	6,32
3	Fe	60,27	58,83	49,19	55,51	60,62	53,73
4	Ni	16,46	15,29	10,57	11,34	16,20	13,66
5	W	11,67	3,46	27,03	9,27	10,41	2,80
6	B,C	2,67	12,13	1,76	9,24	5,37	22,16

Состав дендритов (по Fe, Ni, W, Cr) близок к составу переходной зоны. Об этом свидетельствует их одинаковый контраст на снимках структуры в поглощенных (отраженных) электронах (рис. 5).

При этом, как уже указывалось, вследствие высокой плотности подводимой мощности, высокой скорости нагрева, частично вследствие гауссова распределения энергии по лучу, а также относительно низкой теплопроводности напыленного покрытия, имеет место значительный градиент температур, как по площади, так и по глубине ванны расплава. Это, в свою очередь, обеспечивает наличие градиента сил поверхностного натяжения, который заставляет двигаться поверхностные слои от центра к краям зоны. За счет сил

вязкого трения в это движение ются и внутренние слои расплава, собствуя его перемешиванию, равномерному распределению легирующих элементов, выравниванию температуры по объему ванны расплава и снижению температурного градиента по глубине. При достижении зоной расплава границы покрытие-основа некоторое время происходит омывание ее расплавом покрытия. При этом происходит разогрев материала основы за счет теплопроводности; раскисление окисных пленок. За счет теплопроводности также происходит увеличение зоны проплава и по ширине (шире, чем лазерный луч). В этой части теплоотвод лучше (охлаждение идет в более холодные слои основы), поэтому перегревы здесь меньше, расплав в этих зонах более вязкий и процессы перемешивания протекают менее интенсивно, чем в центре зоны. Развитость процессов перемешивания в центре зоны проплава обуславливает более высокую интенсивность омывания центральной части (находящейся под лучом) подложки перегретым сплавом и поэтому более высокую скорость ее нагрева, (теплопроводность, конвекция). При достижении в этой зоне температуры плавления стали начинается плавление основы и перемешивание ее материала с покрытием. Однако расплав покрытия является сам по себе в этот момент сильно перегретым.

Степень перегрева определяется как:

$$K = \frac{T_{\text{факт.}}}{T_{\text{плавл.}}} = \frac{T_{\text{плавл.}} + \Delta T}{T_{\text{плавл.}}},$$

где: $\Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2$ ($\Delta T_1 = T_{\text{плавл.осн.}} - T_{\text{пл.по кр.}} \approx 300\text{K}$); T_2 - соответствует градиенту температур по глубине слоя и составляет не менее 200 - 300 К. Степень перегрева для покрытия примерно составит:

$$K_{\text{п.покр.}} \approx 1 + \frac{(500 \dots 600)}{1273} \approx 1,5 \dots 1,6.$$

Для основы с учетом того, что температура ее плавления составляет 1670 К, а теплопроводность выше, чем покрытия, степень перегрева будет значительно ниже и $K_{\text{п.осн.}}$ не будет превышать 1,1.

Учитывая то, что вязкость расплава пропорциональна степени перегрева, следует ожидать, что интенсивного сто процентного перемешивания материала проплавленной основы с покрытием не произойдет в относительно ограниченные промежутки времени, что подтверждается данными вышеприведенных МРСА. Такой процесс начинает протекать интенсивно при продолжении воздействия лазерного луча.

После прекращения воздействия лазерного излучения начинается остывание и кристаллизация ванны расплава. Наиболее интенсивное охлаждение и кристаллизация в первую очередь, происходит в зонах, примыкающих к основе и в зонах ее проплава за счет теплопроводности в массу детали. Также интенсивно охлаждение происходит и за счет теплоотдачи в окружающую среду с поверхности ванны расплава. В таких условиях может иметь место случай, что в последнюю очередь кристаллизуется зона или слой, занимающий промежуточное положение между приповерхностными слоями и слоями, прилегающими к подложке.

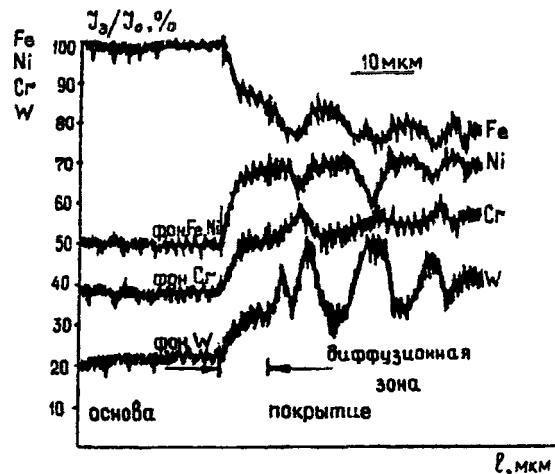


Рисунок 5- Концентрационные кривые распределения Fe, Ni, Cr, W по зоне оплавления покрытия из ПГ-СРЗ+30 об. % WC с основой (сталь 20) Лазерное оплавление

Этот слой имеет более равновесную по сравнению с ними структуру и содержит более крупные структурные составляющие (например, размер карбидо-боридной фазы).

ЛИТЕРАТУРА.

1. Повышение адгезионной связи оплавленных лазерным излучением газотермических покрытий / Л. И. Гречихин [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 1990. – №3. – С. 76–82. 2. Отрадинский, Ю.А. Исследование микроструктуры самофлюсующихся твердых сплавов системы Ni-Cr-B-Si / Ю. А. Отрадинский, В. С. Матвеева, Г. В. Козлова // Ремонт деталей износостойкой наплавкой и сваркой: тез. докл. междунар. научно-техн. конф., Москва, 13—17 апр. 1987 г.— М., 1987.— С. 22—27. 3. Рыкалин, Н.Н. Лазерная обработка материалов / Н. Н. Рыкалин, А. А. Углов, А. Н. Кокора. - М.: Машиностроение. – 1975. – 296 с.

УДК 621.793

Девойно О.Г., Кардаполова М.А., Яцкевич О.К.

РЕНТГЕНОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ ПОКРЫТИЙ ИЗ САМОФЛЮСУЮЩИХСЯ СПЛАВОВ, ОПЛАВЛЕННЫХ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Самофлюсующийся сплав на основе никеля представляет собой многокомпонентную систему Ni-Cr-B-Si-C со сложной структурой, чувствительной к условиям нагрева [1]. Значительное влияние на конечную структуру покрытия из самофлюсующегося сплава оказывает способ оплавления (объемный или локальный). Различие в характере структуры покрытий оплавленных газовой горелкой и излучением лазера объясняется различными температурно-временными параметрами процессов.

Основными факторами, влияющими на формирование структуры обработанного лазерным излучением слоя, являются высокая скорость нагрева поверхностного слоя (порядка $10^4 - 10^6$ К/сек), обусловленная большой плотностью энергии и охлаждения, достигаемого за счет теплоотвода в массу металла. Высокие скорости нагрева приводят к сдвигу точек фазовых превращений, имеющих диффузионную природу. Большая скорость охлаждения расплавленной зоны приводит к неполному протеканию диффузионных процессов, образованию большого числа зародышей и формированию мелкодисперсной и неравновесной структуры. В процессе лазерной обработки с проплавлением материала основы картина осложняется за счет интенсивного перемешивания ванны расплава [2].

Легирование сплава может осуществляться как на стадии напыления покрытия в виде механических смесей, так и на стадии оплавления в виде предварительного нанесения на напыленное покрытие обмазок на основе аморфного бора и окиси хрома. Введение легирующих добавок (карбидов хрома, бора и вольфрама) в состав самофлюсующихся покрытий еще более затрудняет проведение структурных исследований.

В данной статье представлены результаты рентгеноструктурного анализа покрытий, оплавленных лазерным излучением, в зависимости от вида легирующих добавок.

Методика исследования. Изготовлены образцы с покрытием из самофлюсующегося сплава ПГ-СРЗ с различными композиционными добавками, введенными на стадии плазменного напыления в виде механических смесей (таблица 2).

Количественные оценки изменения структуры проводились с помощью рентгеноструктурного анализа. Рентгеноструктурные исследования осуществлялись с использованием

пакета прикладных программ «ARSANAL», который был разработан для автоматизированной обработки данных рентгеноструктурного анализа. Проведение съемок выполнялось в строго идентичных условиях на дифрактометре ДРОН-3,0 при скорости поворота образца 1 град/мин в медном монохроматизированном излучении; при этом в исследованном интервале углов толщина слоя 75%-ного поглощения энергии первичного пучка составила от 3 до 12 мкм (углы θ от 10 до 75°).

Результаты и их обсуждение. В таблице 1 приведены литературные данные о кристаллическом строении фаз, обнаруженных в исследованных покрытиях [3]. Результаты определения фазового состава и составов фаз покрытий приведены в табл. 2.

Таблица 1. Кристаллическая структура основных фаз, входящих в состав покрытий

Фаза	Сингония	Структурный тип	Периоды решетки			Объем ячейки
			a, Å	b, Å	c, Å	
Ni	Кубич.	Cu	3,5238	-	-	43,756
Fe	Кубич.	Mo	2,8664	-	-	23,551
Ni ₃ B	Ромбич.	Ni ₃ C	4,3600	5,20	6,64	150,54
Ni ₂ B	Тетрагон.	CuAl ₂	5,0000		4,24	106,00
Ni ₄ B ₃	Ромбич.	Оригин.	11,9600	2,98	6,57	234,16
NiB	Ромбич.	CrB	2,9360	7,36	2,968	64,14
Cr ₂ B	Ромбич.	Mn ₄ B	14,8370	7,338	1,255	463,26
B	Тетрагон.	Оригин.	10,0800		14,26	1448,91
V ₄ C	Тригон.	λ -Al ₂ O ₃	5,1700	$\lambda=65,75^\circ$	-	234,16

Из приведенных в таблице данных видно следующее: основную долю объема покрытий – от 40 до 60% составляет твердый раствор на основе никеля.

Таблица 2. Результаты рентгеновских исследований самофлюсующихся сплавов с композиционными добавками

№	Состояние образца	Фазы в покрытии	Количественные данные			Периоды решетки, Å			Объем ячейки, Å ³ , опыл/табл.	Вероятная примесь	Концентрация примеси или состав фазы
			Число линий	Σ , мм	Содержание (% об.)	a	b	c			
1	Сплав ПП-СРЗ, плазменное напыление на ст. 45, затем оплавление лазером. Наружная поверхность	Ni	7	502	56	3,5281	-	-	43,917/43,756	Fe	7,5% ат. Fe
		Ni ₂ B	7	73	8	4,9585	-	4,2301	104,64/106,00	Деф. В	Ni ₂ B _{0,9995}
		Ni ₃ B	15	225	25	4,2798	5,4919	6,7295	157,97/150,54	Cr	(Ni ₈₅ Cr ₁₅) ₃ B
		Cr ₂ B	5	98	11	14,9115	6,7931	4,8694	493,26/463,26	Si	Cr ₂ (B ₉₇ Si ₃)
2	То же, поверхность контакта с подложкой – сталью 45	Ni	6	395	58	3,5228	-	-	43,713/43,756	нет	никель
		Ni ₃ B	12	186	27	4,3781	5,3128	6,5060	151,33/150,54	Cr	(Ni ₉₈ Cr ₂) ₃ B
		Cr ₂ B	6	68	15	15,7291	7,2454	4,2364	482,57/463,26	Si	Cr ₂ (B ₉₈ Si ₂)
3	Смесь ПП-СРЗ + 30% об. V ₄ C. Плазменное напыление на ст. 45 сквозное оплавление лазером. Поверхность	Ni	8	531	51	3,5366	-	-	44,236/43,756	B	0,4% ат. B
		Ni ₃ B	4	99	10	4,3697	5,2685	6,6013	151,97/150,54	Cr	(Ni ₉₇ Cr ₃) ₃ B
		Cr ₂ B	7	90	9	15,0994	7,4400	4,2098	472,93/463,26	Si	Cr ₂ (B ₉₉ Si ₁)
		B	11	143	14	14,0407	-	10,1686	1451,55/1448,2	Нет	бор
		V ₄ C	7	169	16	5,5428	-	12,1027	322,00/328,92	Деф. C	V ₄ C _{0,9996}

№	Состояние образца	Фазы в покрытии	Количественные данные			Периоды решетки, Å			Объем ячейки, Å ³ , опыт/табл.	Вероятная примесь	Концентрация примеси или состав фазы
			Число линий	ΣI, мм	Содержание (% об.)	a	b	c			
4	То же, вместо В ₄ С введено 30% об. Cr ₃ C ₂ Поверхность.	Ni	8	522	46	3,5386	-	-	44,34/43,756	Cr	5% ат.
		Ni ₃ B	18	342	30	4,4082	5,2482	6,5592	151,75/150,54	Cr	(Ni ₉₇ Cr ₃) ₃ B
		Ni ₄ B ₃	5	75	7	11,5761	2,8923	6,5413	219,02/234,16	Fe	Ni ₄ B _{2,998}
		Cr ₂ B	13	179	16	14,1619	7,4321	4,2717	449,61/463,26	C	(Cr ₉₆ Fe ₁₄) ₂ B
		B	2	22	1	13,8856	-	10,0479	1401,80/1448,2	C	0,5% ат. C
5	Сплав ПГ-СРЗ, плазменное напыление на ст. 45 (0,7 мм) Добавлено 30% об. WC. Сквозное оплавление лазерным лучом. Поверхность	Ni	4	1240	16	3,5354	-	-	44,19/43,75	W	3% ат.
		Ni ₃ B	17	2940	37	4,3334	5,1602	6,5837	147,22/151,56	Деф. В	Ni ₃ B _{0,97}
		Ni ₂ B	6	645	8	4,9664	-	4,2792	105,55/105,70	нет	Ni ₂ B
		NiB	5	447	6	2,9403	7,2345	2,9631	63,03/63,17	нет	NiB
		Ni ₄ B ₃	8	1072	13,5	11,8359	2,9032	6,7179	232,15/234,16	Деф. В	Ni ₄ B _{2,97}
		W ₂ C	11	1258	16	2,9989	-	4,7345	36,87/36,47	В	W ₂ (C ₉₁ B ₆)
	Cr ₃ C ₂	6	338	3,5	5,6305	2,6104	12,0492	177,1/180,0	Деф. С	Cr ₃ C _{1,96}	

При введении борсодержащих добавок (обмазка перед оплавлением аморфным бором) в никелевой матрице возрастает содержание железа. Это может быть объяснено тем, что при введении бора в процессе перемешивания ванны расплава имеет место подплавление железной основы по механизму контактного эвтектического плавления (система Fe-B) при контакте материала обмазки с основой [4], и образование затем твердого раствора бора в никеле. При лазерном оплавлении покрытия с добавками карбида бора его частицы не успевают раствориться и указанный эффект практически не действует, как и в случае добавок карбида хрома и карбида вольфрама.

Бориды никеля составляют, как правило, 30-35% от объема покрытий, из них от 2/3 до 3/4 приходится на фазу Ni₃B, причем по глубине слоя это соотношение не меняется. Введение бора в сплав в виде обмазки способствует увеличению количества высших боридов никеля - Ni₄B₃ и NiB. В оплавленных покрытиях с добавками карбида бора обнаружено большое количество непрореагировавшего бора, который, по-видимому, является продуктом распада карбидных частиц.

Получению большого количества низшего борида способствует не только высокое содержание самого никеля, но и наличие в покрытии мощного боридообразователя - хрома; в бориде Ni₃B он является обычной примесью. Для высших боридов характерна примесь более слабого, но также достаточно активного боридообразователя - железа, а в ряде случаев - дефицит бора, впрочем, весьма незначительный. Сравнение результатов съемок с поверхности и глубинных слоев покрытий (1 и 2 опыта) подтверждают, что температура, обеспечиваемая лучом лазера при плавлении, быстро снижается по глубине оплаваемой зоны, что является характерным для процесса лазерной обработки. Поэтому бориды никеля (прежде всего те, которых в слое наибольшее количество - Ni₃B и Ni₂B) в приповерхностных зонах легированы значительно сильнее, чем в зоне контакта с подложкой, однако это снижение не настолько значительно, чтобы воспрепятствовать диффузии железа в фазу Ni₄B₃ (показательно, что в этом бориде на поверхности слоя железа меньше, чем в глубине).

От 5 до 15% объема покрытия образует фаза Cr₂B, в которой часть бора, как правило, замещена кремнием, входящим в состав порошка. Интересным является факт, что в покрытии, в котором присутствовали добавки карбида хрома в условиях значительного перегрева, имеющего место при лазерном оплавлении, происходит его растворение без вторичной кристаллизации. Хром перераспределяется в твердый раствор никеля, образует дополнительное количество фазы Cr₂B, легирует бориды.

Другой особенностью является то, что проведенный анализ структуры во всех случаях, кроме лазерного оплавления покрытий с добавками карбида вольфрама, не показал наличия карбидной фазы. Согласно проведенным оценкам, углерод в покрытии присутствует, как примесь свободного бора.

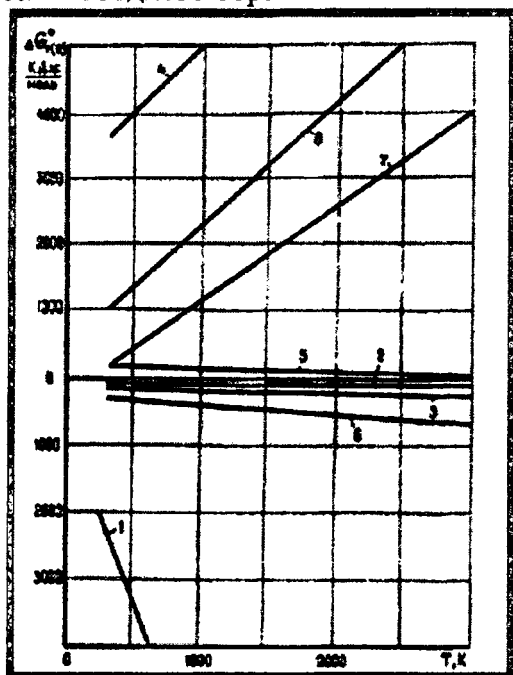


Рисунок 1 - Термодинамическая оценка возможности образования упрочняющей карбидо-боридной фазы
 1 - $23/6Cr + C = 1/6Cr_{23}C_6$; 2 - $3/2Cr + C = 1/2Cr_3C_2$;
 3 - $7/3Cr + C = 1/3Cr_7C_3$;
 4 - $7/27Cr_{23}C_6 + C = 23/27Cr_3C_2$;
 5 - $3/5Cr_7C_3 + C = 7/5Cr_3C_2$; 6 - $Cr + 2B = CrB_2$;
 7 - $1/2BCr_{23}C_6 + B = 32/2BCr_3C_2 + 1/2CrB_2$;
 8 - $1/18Cr_{23}C_6 + B = 1/9Cr_7C_3 + 1/2CrB_2$

Термодинамические оценки боридо- и карбидообразования, выполненные с помощью расчетов температурных зависимостей энергии Гиббса химических реакций (рис. 1) показывают, что карбиды хрома являются более термодинамически устойчивыми, чем бориды. Это видно из значений энергии Гиббса реакции взаимодействия карбидов хрома с бором с образованием боридов хрома. Кроме того, из рисунка видно, что термодинамически более устойчивыми являются низшие карбиды по отношению к высшим. Однако следует учесть, что карбид хрома $Cr_{23}C_6$ кристаллизуется по перитектической реакции, имеет сложную формулу и поэтому его образование в условиях быстрого охлаждения маловероятно. Наиболее вероятным было ожидать появление метастабильного карбида хрома Cr_7C_3 . Следует учесть, что при термодинамических оценках не учитывались изменения удельных энергий с учетом межфазного взаимодействия в расплаве.

Отсутствие линий карбидов на рентгенограммах можно объяснить их высокой степенью дисперсности вследствие высоких скоростей нагрева и охлаждения и тем, что линии перекрываются линиями боридной фазы, интенсивность которых высока вследствие большого количества боридов, а также небольшим процентным содержанием карбидной фазы.

В покрытиях с добавками карбида вольфрама после лазерного оплавления присутствует только гемикарбид вольфрама W_2C , хотя, как показали специально проведенные исследования, в процессе напыления монокарбид вольфрама присутствует. При лазерном оплавлении происходит его разложение в гемикарбид с образованием фазы Cr_3C_2 .

Практически все исследованные покрытия содержат 3-4% по объему элементарного бора; меньше всего его в покрытиях с добавками Cr_3C_2 . Присутствие кристаллического бора положительно влияет на триботехнические свойства покрытия с точки зрения снижения склонности поверхности трения к схватыванию [5].

Следует отметить характерную для процесса лазерного оплавления, как и для других процессов скоростной термообработки, особенность, заключающуюся в неравновесности и легированности твердых растворов и составляющих компонентов покрытия.

Так как время кристаллизации покрытия после проплавления лучом лазера было весьма малым, достаточно высокой представилась вероятность получения у твердого раствора кристаллографической текстуры. По известной методике Харриса мерой совершенства аксиальной текстуры является полюсная плотность отражений текстурной плоскости:

$$P_i = \frac{I_T}{\sum I_T} \cdot \frac{\sum I_{BT}}{I_{BT}}$$

где $I_{БТ}$ -интенсивность отражения плоскости на эталонном снимке, %; $\Sigma I_{БТ}$ -суммарная интенсивность снимка эталона (бестекстурного), %; I_T -интенсивность отражения от предполагаемой текстурной плоскости, мм (мм^2); ΣI_T - суммарная интенсивность отражений фазы, текстура которой исследуется, мм (мм^2).

При идеальной текстуре $I_T = \Sigma I_T$, т.е. предел P_t имеет вид:

$$\lim P_t = \Sigma I_{БТ} / I_{БТ}.$$

Таким образом, о степени совершенства текстуры можно судить по отношению величин P_t и $\lim P_t$.

Таблица 3. Параметры текстуры никелевой матрицы

№ съемки (см. табл. 2)	Параметры уравнения Харриса для линий												Полосная плотность P_t (в скобках предельная величина P_t)		
	(111)				(100)				(110)				111 (2,42)	100 (4,17)	110 (7,56)
	$I_{БТ}$	$\Sigma I_{БТ}$	I_T	ΣI_T	$I_{БТ}$	$\Sigma I_{БТ}$	I_T	ΣI_T	$I_{БТ}$	$\Sigma I_{БТ}$	I_T	ΣI_T			
1	100	242	256	502	58	242	78	502	32	242	71	502	1,23	0,65	1,07
2			198	395			72	395			45	395	1,21	0,76	0,86
3			224	366			17	366			13	17	1,48	0,19	0,27
4			241	531			85	531			100	85	1,09	0,67	1,42
5			263	522			80	522			73	80	1,22	0,64	1,06

Из данных табл. 3 следует, что твердый раствор на основе никеля почти во всех исследованных случаях текстурирован в покрытии таким образом, что в его кристаллитах плоскость (111) ориентирована параллельно защищаемой поверхности ($P_t^{(111)} > 1$) во всех случаях, тогда как величины $P_t^{(100)}$ и $P_t^{(110)}$ существенно превышают единицу, лишь в 1 случае из 5). Однако величина P_t достаточно велика также лишь в одном случае из пяти (съемка 3). Иначе говоря, твердый раствор на основе никеля текстурирован таким образом, что перпендикулярно направлению подвода и отвода тепла ориентированы наиболее плотноупакованные плоскости (111) его кристаллитов; однако степень совершенства этой текстуры невелика. У химических соединений, найденных в покрытиях, признаков текстуры не обнаружено.

Для прогнозирования поведения покрытий в условиях интенсивного изнашивания важно знать характер изменения фазового состава по глубине покрытия. Изучали структуру после лазерного оплавления сплава ПГ-СРЗ и композиции: ПГ-СРЗ+30% об. V_4C на режимах $q = 2,7 \cdot 10^8$ Вт/ мм^2 ; $V = 1,6$ мм/с. Толщина покрытий составляла 0,4 мм. Было произведено 5 съемок: с поверхности и через 100 мкм вглубь после снятия слоев шлифованием.

В задачи исследования входило получить данные о составе фаз (твердых растворов и соединений) и с достаточной точностью определить изменения количеств

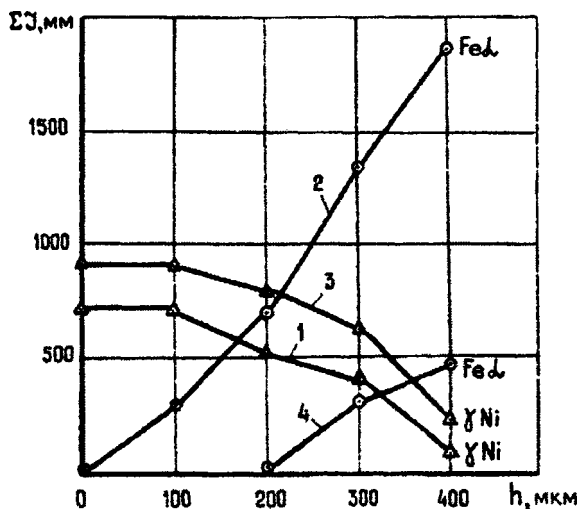


Рисунок 2- Распределение интенсивностей линий никеля и железа по глубине оплавленного слоя сплавов ПГ-СРЗ (1,2) и композиции

фаз в толщине покрытия. Графическая интерпретация полученных результатов приведена на рис. 2-4. Из приведенных данных видно (рис. 2), что количество γ Ni, начиная с 200 мкм, линейно убывает, количество железа линейно возрастает. Железо в исследованных объемах - практически чистый металл. В то же время γ Ni представляет собой твердый раствор, период решетки которого растет линейно до середины покрытия, потом также линейно падает (рис. 3). Это, видимо, связано с условиями неравномерного охлаждения сплава по сечению: центральная часть дальше находится под воздействием температурного фактора или с тем, что ближе к подложке никель легируется бором, который снижает период решетки никеля, образуя растворы смешанного типа.

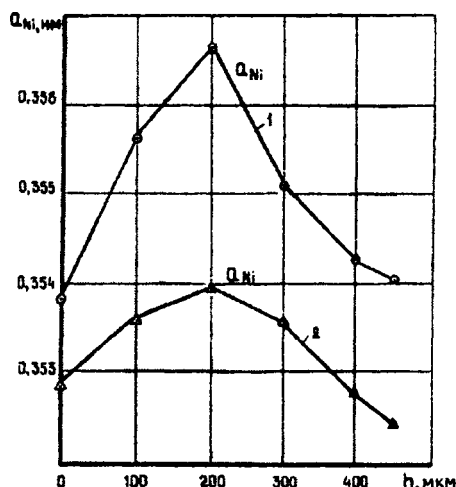


Рисунок 3- Изменение параметров решетки никеля по толщине покрытия сплава ПГ-СРЗ + 30 об. % V_4C (1) с сплава ПГ-СРЗ (2)

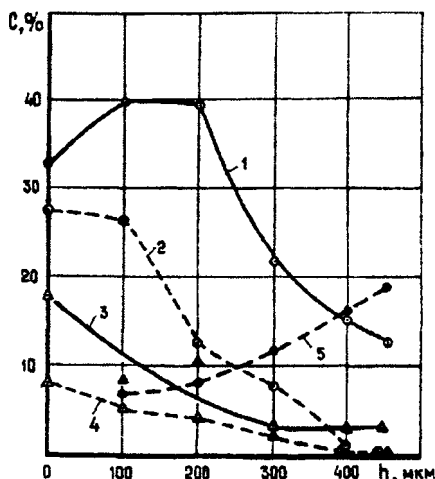


Рисунок 4-Распределение боридных фаз по толщине покрытия сплава ПГ-СРЗ (2,4) и композиции ПГ-СРЗ + 30 об. % V_4C (1,3,5) ○ — бориды никеля, Δ — бориды хрома, ● — бориды железа (Fe_2B)

Количество боридных фаз убывает по глубине покрытия, особенно после 200 мкм. Наиболее быстро уменьшается количество бориды хрома, наиболее медленно - боридов никеля (рис. 4). Закономерность изменения объемов ячеек Ni_3B и Fe_2B по толщине покрытия одинакова: до 300 мкм идет увеличение, затем уменьшение. Вероятно, что в верхних слоях бориды легированы одним и тем же активным боридообразователем - хромом, а ниже - железом. Несмотря на общие закономерности, введение в сплав 30 объемных процентов карбида бора изменило картину фазового состава, как качественно, так и количественно. Как видно из рис. 3, увеличилось общее количество боридов, особенно на толщинах 100-400 мкм.

На глубине 100 мкм в сплаве с карбидом бора появился новый борид - Fe_2B , содержание которого увеличивается линейно к переходной зоне. Это значит, что часть железа из основы связал бор, выделившийся из частично разложенного V_4C . Так как микротвердость Fe_2B составляет 12-16 ГПа, он компенсирует снижение прочностных свойств из-за ожелезнения покрытия. Твердый раствор на основе никеля более легирован, что видно из рис. 3 по увеличению параметра решетки никеля. Это свидетельствует об упрочнении никелевой матрицы не только в процессе лазерного оплавления, но и дополнительно от введения в сплав карбида бора.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Повышение адгезионной связи оплавленных лазерным излучением газотермических покрытий / Л. И. Гречихин [и др.] // Физика и химия обработки материалов. - 1990. - №3. - С. 76-82.
2. Григорьянц, А. Г. Лазерная техника и технология: Методы поверхностной лазерной обработки: учеб. пособие для Вузов / А.Г. Григорьянц, А.Н.Сафонов; под ред. А.Г. Григорьянца. - М: Высшая школа, 1987. - 191 с.
3. Кристаллография, рентгенография и

электронная микроскопия / Я. С. Уманский [и др.] – М.: Металлургия, 1982. – 632 с. 4. Добровольский, И.П. О природе и механизме контактного плавления / И. П. Добровольский, Б. А. Картошкин, А. П. Поляков // Физика и химия обработки материалов. – 1972. – №2. – С. 37-37. 5. Ляхович, Л.С. Повышение износостойкости борированных диффузионных слоев при совместном насыщении сталей бором и углеродом / Л. С. Ляхович, И. О. Дита // Теория и практика создания, испытания и эксплуатации триботехнических систем: тез. докл. – М. – 1986. – С. 100–101.

УДК 621.723

Иващенко С.А., Койда С.Г.

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ИЗ НИТРИДА ТИТАНА НА ИЗДЕЛИЯХ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Наличие большого числа факторов, влияющих на технологию нанесения вакуумно-плазменных покрытий, вносит дополнительные трудности в отработку режимов, формирования покрытий с заданными эксплуатационными свойствами [1]. В данной работе нами ставилась задача оптимизации технологии нанесения износостойкого TiN покрытия на детали из сплава Д16.

На первом этапе методом линейной шаговой регрессии проводился отбор наиболее значимых факторов (независимых переменных). На втором этапе – поиск экстремума построенной функции отклика.

В качестве независимых переменных выделены следующие параметры технологического процесса (см. табл. 1). При выборе факторов к ним предъявлялись следующие требования. Факторы (независимые переменные) должны непосредственно воздействовать на объект (зависимую переменную, параметр оптимизации, целевую функцию), быть независимыми, совместимыми, управляемыми, однозначными и определены операционально [4].

Таблица 1 – Независимые переменные

Код независимой переменной	Физический смысл независимой переменной (условное обозначение)
X_1	Суммарная продолжительность времени очистки, ионами материала катода ($T_{оч.}$)
X_2	Потенциал подложки при очистке ионами материала катода ($V_{под.оч.}$);
X_3	Ток дуги при очистке ионами материала катода ($I_{д.оч.}$);
X_4	Длительность паузы между очисткой и началом нанесения покрытия ($T_{пауз}$)
X_5	Время нанесения адгезионного подслоя ($T_{ад.подсл.}$)
X_6	Время нанесения промежуточного подслоя ($T_{пр.подсл.}$)
X_7	Время нанесения наружного рабочего слоя ($T_{роб.сл.}$)
X_8	Давление реакционного газа в вакуумной камере при нанесении наружного рабочего слоя ($P_{в.к.}$)
X_9	Потенциал подложки при нанесении наружного рабочего слоя ($V_{подл.}$)
X_{10}	Суммарное время очистки в тлеющем разряде ($T_{тл.раз.}$)
X_{11}	Ток дуги при нанесении наружного рабочего слоя ($I_{д.роб.сл.}$)
X_{12}	Продолжительность остывания образцов в вакуумной камере ($T_{ост.}$)
X_{13}	Ток фиксирующей катушки при нанесении наружного рабочего слоя (I)
X_{14}	Наличие защитного экрана

Для каждого фактора были определены предельные значения и интервал варьирования (см. табл.2).

Таблица 2 – Предельные значения и интервал варьирования независимых Переменных

Номер независимой переменной	Единица измерения	Основной уровень (средний)	Интервал варьирования	Верхний уровень	Нижний уровень
X ₁	сек.	16	2	32	2
X ₂	В	.*	700	1500	2200
X ₃	А	.*	.*	180	90
X ₄	сек	300	40	600	0
X ₅	сек.	80**	12**	170	3
X ₆	сек.	90	12**	180	0
X ₇	мин.	17**	2**	36	3
X ₈	10 ⁻² Па	.*	.*	13.6	1.3
X ₉	В	100	10	140	50
X ₁₀	сек.	.**	2**	50	0
X ₁₁	А	.*	.*	1600	90
X ₁₂	мин.	15	2	30	1
X ₁₃	А	1	0.1	2	0.1
X ₁₄	-	.**	.**	1	0

* - данные не записаны или являются приближенными из-за конструктивных особенностей установки нанесения покрытия.

** - данный показатель не устанавливался или назначался по технологическим соображениям.

Уравнение регрессии, которое определяется с использованием пошагового множественного регрессивного анализа [2], может быть представлено в виде полинома первой степени.

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^m a_i X_i, \quad (1)$$

где y - зависимая переменная;

a_0 - свободный член;

a_i - коэффициент при независимых переменных;

X_i - независимые переменные;

m - число факторов, учитываемых при оптимизации.

Для построения данной линейной модели должно выполняться условие:

$$M \geq m + 1;$$

где M - число экспериментов.

В нашем случае:

$$m=14, \text{ следовательно } M \geq 15;$$

В качестве критериев, характеризующих эксплуатационные свойства изделий с покрытием, были выбраны две зависимые переменные. Первая - визуальная оценка качества нанесенного покрытия по десятибалльной шкале (см. табл.3), вторая - определялась как соотношение микротвердости поверхностного слоя с покрытием к микротвердости поверхности исходного образца.

Таким образом, нам необходимо было решить следующую двухкритериальную задачу оптимизации в условиях помех:

$$\max f_i; i = 1, 2;$$

$$\bar{X} \in D;$$

$$\bar{X}(X_1; X_2; \dots; X_{14});$$

где D - допустимая область изменения факторов, определяемая технологическими возможностями (является пересечением допустимых областей по обоим критериям f_1 и f_2);

f_1 - критерий качества, определяемый визуально на основании экспертного оценивания (по десятибалльной шкале);

$$f_2 = \frac{H_{\muокр}}{H_{\muбр}} - \text{количественно вычисляемый критерий};$$

где:

$H_{\muокр}$ - микротвердость поверхности, образца с покрытием;

$H_{\muбр}$ - микротвердость поверхности образца до нанесения покрытия.

Таблица 3 – Критерии оценки качества покрытия

Визуальная оценка качества покрытия	Признаки, определяющие внешний вид покрытия
0	Покрытие полностью отслоилось или поверхность потеряла заданную геометрическую форму
1	На покрытии много дефектов, наблюдается частичное отслаивание покрытия, есть изменения в заданной геометрической форме образца
2	Покрытие имеет низкую адгезию с подложкой, нет блеска
3	Покрытие имеет темный цвет, неоднородность по цвету, есть микротрещины
4	Цвет покрытия желтый, есть отклонения по цвету, есть незначительный блеск
5	Цвет покрытия равномерный, есть следы эрозии подложки, возникающие при очистке, микротрещины
6	Цвет покрытия равномерный. Возможно наличие следов эрозии подложки, микротрещины. (Площадь с дефектами не более 30% от общей)
7	Цвет покрытия равномерный, следы эрозии отсутствуют или их число составляет не более 5% площади покрытия
8	Покрытие с блеском, имеет равномерный желтый цвет. По краям образца допускается наличие следов эрозии (около 1%)
9	Покрытие имеет равномерный цвет с блеском. Допускается неполный блеск из-за наличия капельной фазы
10	Покрытие блестящее, цвет равномерный. Видимых дефектов не имеет

Для поиска Парето оптимальных точек, то есть точек $\bar{X} \in D$ и являющихся неулучшаемыми, предлагалась модификация алгоритма уступок [5], причем за доминантный критерий выбирается $f_1(X)$, а $f_2(X)$, учитывается в виде ограничения. Использовался алгоритм непрямой стохастической оптимизации

На первом этапе, на котором осуществлялся выбор наиболее значимых независимых переменных, применялся метод шаговой линейной регрессии. Выбор значимых регрессоров (независимых переменных) производился по обоим критериям f_1 и f_2 .

Метод шаговой регрессии позволил наряду с получением функции регрессии итерационно выводить наиболее значимые независимые переменные. На основании последовательности их выводов, а также статистических результатов обработки экспериментов были получены уравнения регрессии (2 и 3) и построена диаграмма свойств изучаемого объекта (см. табл. 4).

$$y_1 = -19.5375 + 0.5842 X_1 + 0.118 X_2 + 9.494 X_{14} - 0.085 X_{10} - 0.4784 X_{13} + 1.81413 X_{11} + 0.70225 X_9 - 0.2741 X_7 + 0.29337 X_{13} - 0.085186 X_8 + 0.12924 X_{12} + 0.3 X_4 + 0.1115 X_5 + 0.02143 X_3; \quad (2)$$

$$y_2 = -15.0931 - 4.8945X_{14} + 0.2366X_7 + 0.12489X_8 - 0.121X_{11} - 0.254878X_{12} - 0.5438X_3 + 0.52335X_4 - 0.3465X_{13} + 0.00935X_1 + 0.09X_{10} + 0.187X_6 - 0.11264X_5 - 0.15328X_9 - 0.0244X_2, \quad (3)$$

Таблица 4 - Диаграмма свойств независимых переменных при решении двухкритериальной задачи оптимизации

Критерий увеличения микротвердости				Связь между факторами по критериям f_1 и f_2	Критерий качества по 10-ти бальной шкале f_1			
Множественный коэффициент корреляции на момент ввода	Последовательность ввода	знак	Ранг независимой переменной		Ранг независимой переменной	знак	Последовательность ввода	Множественный коэффициент корреляции на момент ввода
0,566	1	-	X_{14}	↔	X_{14}	+	3	0,856
0,907	6	-	X_3	↔	X_{11}	+	6	0,903
0,935	7	-	X_4	↔	X_9	+	7	0,912
0,953	8	-	X_{13}	↔	X_6	-	5	0,896
0,824	5	-	X_{12}	↔	X_4	+	12	0,944
0,645	2	+	X_7	↔	X_{13}	+	9	0,931
0,986	11	+	X_6	↔	X_7	-	8	0,929
0,996	13	-	X_9	↔	X_{12}	+	11	0,937
0,707	3	+	X_8	↔	X_2	+	2	0,822
0,775	4	-	X_{11}	↔	X_5	+	13	0,960
0,995	12	-	X_5	↔	X_8	-	10	0,935
0,980	10	+	X_{10}	↔	X_{10}	-	4	0,883
0,996	14	-	X_2	↔	X_1	+	1	0,748
0,976	9	+	X_1	↔	X_3	+	14	0,950

Факторы записывались сверху вниз согласно их значимости (ранга).

Зависимые переменные y_1 и y_2 имеют различный физический смысл и, следовательно, влияние на них независимых переменных будет различно. В таблице 4 представлено расположение факторов согласно их значимости, знака, последовательности их ввода и значения множественного коэффициента корреляции на момент ввода. Знак перед каждым фактором говорит о необходимости (+) увеличивать, или (-) уменьшать его для достижения оптимального значения зависимой переменной. Последовательность ввода факторов говорит о влиянии введенного на данной итерации фактора на независимую переменную с учетом ранее введенных факторов. При этом на каждом шаге проводится статистическая обработка результатов [2, 3]. В частности, в таблице 4 для примера приведен множественный коэффициент корреляции.

Выбранные независимые переменные могут оказывать схожее воздействие на параметр оптимизации, и тем самым дополнять или компенсировать друг друга. Так, например, воздействие факторов X_1 и X_{10} на f_2 очень близко. Факторы X_1 ; X_2 ; X_3 ; X_4 ; X_{10} влияют на разогрев подложки при ее очистке, а это сказывается на свойствах наносимого затем покрытия. Факторы X_7 ; X_9 ; X_{11} ; X_{13} ; X_{14} влияют на производительность процесса формирования защитного покрытия, разогрев поверхности в момент нанесения покрытия, то есть зоны их влияния на зависимую переменную, например f_1 могут перекрываться. Возможно равнозначное влияние и других факторов на определенные свойства покрытия.

Исходя из этого, и желая сократить число факторов (за счет исключения малозначимых) было сделано две выборки наиболее значимых факторов (по шесть). Первая выборка получена по итогам проведенных расчетов, а вторая на основе априорной информации (см. таблицу 5).

Таблица 5 – Выборка наиболее значимых факторов

Факторы отобраны по вышеприведенным расчетам (выборка 1)							Факторы отобраны априорно (выборка 2)
Код фактора	Критерий			Критерий			Код фактора
	Ранг	№ ввода		Ранг	№ ввода		
X ₁₄	1	1	0,566	1	3	0,856	X ₁₄
X ₃	2	6	0,907	14	14	0,950	X ₁
X ₄	3	7	0,935	5	12	0,944	X ₇
X ₁₁	10	4	0,775	2	6	0,903	X ₈
X ₁₃	4	8	0,953	6	9	0,931	X ₉
X ₉	8	13	0,996	3	7	0,912	X ₁₁

Наибольший интерес для нас представляют эксплуатационные свойства наносимых покрытий, поэтому дальнейшую оптимизацию будем вести по критерию f_2 .

В результате обработки экспериментальных данных (см. табл. 2) было получено следующее уравнение регрессии:

$$y_2 = 11.526 - 0.0904 X_1 - 0.063 X_2 - 0.696 X_3 - 0.00388 X_4 + 0.0937 X_5 - 0.129 X_6 + 0.0905 X_7 + 0.0415 X_8 - 0.0778 X_9 - 0.0399 X_{10} + 0.33 X_{11} - 0.09 X_{12} + 0.0192 X_{13} - 1.44 X_{14}. \quad (4)$$

После проведенных расчетов можно констатировать, что фактор X₁₄; X₁₂; X₇; X₆; X₈; X₁₁; X₁₀; X₂ имеют очень близкий ранг по критериям f_1 и f_2 , ранг X₃ и X₄ существенно отличаются, а ранг фактора X₁₃; X₅; X₁ и X₉ занимает промежуточное положение.

На втором этапе оптимизации методом шаговой регрессии по выбранным независимым переменным получаем уравнение в виде неполного квадратичного полинома:

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n b_i X_i + \sum_{i \in I} c_i X_i^2.$$

Для первого шага были выбраны следующие номера экспериментов: 5; 16; 7; 8; 25; 17; 18; 21; 23 и получено уравнение регрессии:

$$y = 5932639 - 1.35610X_8 - 2.58068X_{11} - 1.92852X_9 - 0.01676X_{11}^2 + 0.01209X_1^2 - 0.3429X_1 - 0.33029X_9^2 - 0.01427X_8^2.$$

На втором шаге было получено уравнение регрессии:

$$y = 2637999 - 0.32075X_8 - 0.15205X_3^2 + 0.2036X_9^2 - 2.01986X_{11} + 0.01026X_1^2 - 2.17968X_1^2 - 0.29946X_1.$$

На третьем шаге получено уравнение регрессии:

$$y = 5.55052 + 2.48845X_1 + 0.49458X_9^2 - 0.05717X_1^2 + 0.13942X_{11}^2 - 8.69319X_9 + 3.37818X_8 - 0.15004X_2^2 - 3.4239X_{11}.$$

Оптимальные значения переменных в нормированном виде получаются при:

$$X_1 = 15.03; \quad X_8 = 9.54; \quad X_9 = 9.24; \quad X_{11} = 10.0.$$

В натуральном виде получены следующие значения параметров технологического процесса

$$T_{oc} = 15 \text{сек}; V_{под} = 92 \text{В}; I_d = 101 \text{А}; P_{в.к.} = 9.5 \cdot 10^{-2} \text{Па}.$$

ЛИТЕРАТУРА:

1. Вакуумно-плазменные покрытия Мрочек Ж.А., Иващенко С.А., Фролов И.С., Вершина А.К. Латушкина С.Д./ Мн.: УП «Технопринт», 2004. – с. 369.
2. Дрейпер Н., Сминт Г. Прикладной регрессивный анализ. Статистики. М. 1973, с. 392: ил. – Библиогр.: с. 315-322.
- 3.

Кондел М. Дж., Стюарт А. Статистические выводы и связи. М. Наука. 1973. – 899с.: ил – Библиогр.: с. 844-877. 4. Методические указания. Методика Выбора и оптимизация контролируемых параметров в технических процессах РДМУ 190-17. М. Издательство стандартов. 1978, с. 5. 5. Меркурьев В.В., Молдавский М.А. Статистические выводы и связи. М. Наука, 1973. – 484 с.; ил. – Библиогр.: с. 48 – 475.

УДК 621.785

Ивашко В.В., Вегера И.И., Синцов С.И.

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ ДИСКОВ СО СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси»

Минск, Беларусь

Введение. Развитие машиностроения связано с разработкой высокоэффективных процессов упрочнения деталей машин, претерпевающих износ, изгиб, удар и высокие контактные нагрузки. В настоящее время для этих целей применяют методы термической, лазерной, плазменной или химико-термической обработки.

Весьма перспективным для большинства деталей работающих на износ или контактную усталость следует считать поверхностную термообработку с применением высокочастотного нагрева [1-3]. Такая обработка позволяет получать на недорогих сталях поверхностно-упрочненные слои толщиной 1-10 мм, обладающие высокой твердостью и износостойкостью. Достоинствами этого метода являются высокая скорость нагрева и возможность локального упрочнения рабочих поверхностей, позволяющие резко сократить длительность цикла термообработки и снизить энергозатраты. Индукционный нагрев снижает или полностью исключает обезуглероживание и окисление, обладает достаточно высоким к.п.д, исключает загрязнение окружающей среды.

Существенным недостатком данного процесса является проблема, связанная с нагревом деталей сложной геометрической формы, так как поверхностная закалка на высокую твердость таких деталей приводит к возникновению закалочных трещин, поводок, что снижает эксплуатационные характеристики и долговечность. Непосредственной причиной образования трещин при закалке деталей из среднеуглеродистых сталей при охлаждении водой является неравномерность нагрева и охлаждения отдельных зон обрабатываемой детали. Чтобы получить равномерный закаленный слой и исключить образование трещин, необходимо разработать специальные нагревательные и спрейерные устройства оптимизировать режимы нагрева и охлаждения, обеспечивающие получение оптимальной структуры и свойств на рабочих поверхностях дисков.

Цель работы заключалась в изучении влияния режимов скоростного нагрева и охлаждения на структуру и свойства стали 45, в разработке технологических устройств для непрерывно-последовательного нагрева токами высокой частоты и спрейерного охлаждения конических рабочих поверхностей дисков (рис. 1), предназначенных для комплектования машин по переработке зерна.

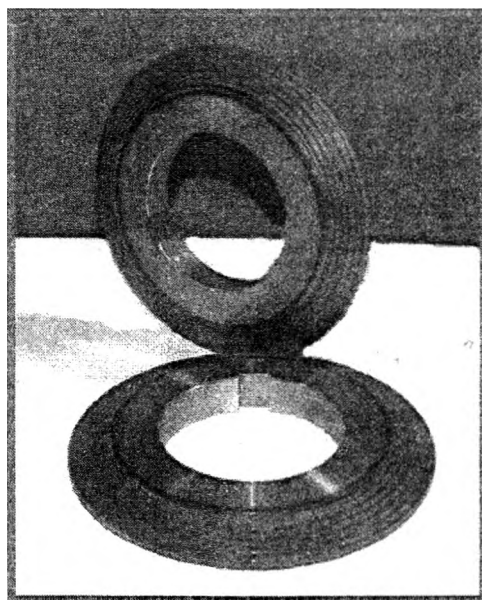


Рисунок 1 – Внешний вид диска после закалки ТВЧ.

Результаты исследований и их обсуждение.

Для изготовления сложнопрофильных деталей, имеющих форму двойного конуса, и работающих при умеренных контактных нагрузках целесообразно применять недорогие термически упрочняемые конструкционные стали. Диски для переработки зерна изготавливают из горячекатаного листа стали 45 толщиной 40 мм. Первоначально методом газовой или плазменной резки вырезают заготовки, а затем подвергают их механической обработке. Исходя из технических условий, конические поверхности дисков необходимо упрочнить на глубину 2-3 мм, обеспечивая твердость 52-60 HRC.

Моделирование процессов скоростной термообработки проводили на установке УКН-3. Образцы стали 45 диаметром 10 мм и длиной 120 мм нагревали до температур 750-1150°C со скоростью 50°C/с. При достижении заданной температуры образцы автоматически погружались в воду. Для сравнения часть образцов нагревали в печи в течение 25 мин до температур 750-950°C, а затем закаливали в воде. Закаленные образцы подвергали отпуску при температуре 200°C, 2 часа. Результаты механических испытаний приведены на рисунке 2. Из приведенных данных видно, что при нагреве в печи максимальный уровень прочности и пластичности достигается после закалки с температуры 900°C ($\sigma_b=1750-1800$ МПа, $\delta=8\%$, $\psi=29\%$). Повышение температуры нагрева под закалку до 950°C сопровождается снижением прочности и пластичности ($\sigma_b=1500$ МПа, $\delta=2,5\%$, $\psi=12\%$).

Оптимальные свойства при скоростном нагреве ($V_n=50^\circ\text{C}/\text{с}$) были получены после закалки с температур 950-1050°C ($\sigma_b=1848-1947$ МПа, $\delta=11,6-12,6\%$, $\psi=40-50\%$). Предел текучести термоупрочненных образцов составил 1520-1685 МПа. Снижение прочности и особенно пластичности происходит после закалки с температуры 1100°C. Таким образом, оптимальной температурой скоростного нагрева дисков под закалку следует считать температуру 950-1000°C.

Для оценки влияния режимов отпуска на механические свойства стали 45 предварительно закаленные образцы ($V_n=50^\circ\text{C}/\text{с}$, $T=1050^\circ\text{C}$) подвергали отпуску при температурах 200-700°C в печи в течение 2 часов и со скоростью 50°C/с. После скоростного нагрева при отпуске образцы охлаждали в воде. Сталь 45 после скоростного нагрева до 1050°C и закалки в воде имела твердость 58 HRC. После нагрева в печи до 200 и 300°C твердость понижалась до 54 и 48 HRC соответственно.

Дальнейшее повышение температуры отпуска до 600°C сопровождается линейным снижением твердости до 26 HRC. Применение скоростного нагрева для отпуска показало, что для достижения твердости соответствующей печному нагреву образцы необходимо нагревать на 75-100°C выше.

В исходном состоянии структура стали 45 представляет собой феррито-перлитную смесь. После скоростного нагрева и закалки с температуры 750°C происходит растворение тонкопластинчатых частиц перлита. Повышение температуры нагрева до 860°C приводит к частичному растворению феррита и цементита. Полное растворение феррита происходит при нагреве до температуры 900°C. Частицы цементита сохраняются при нагреве до 1050°C, однако при этом происходит рост аустенитных зерен до 20-30 мкм. Фиксирование при закалке

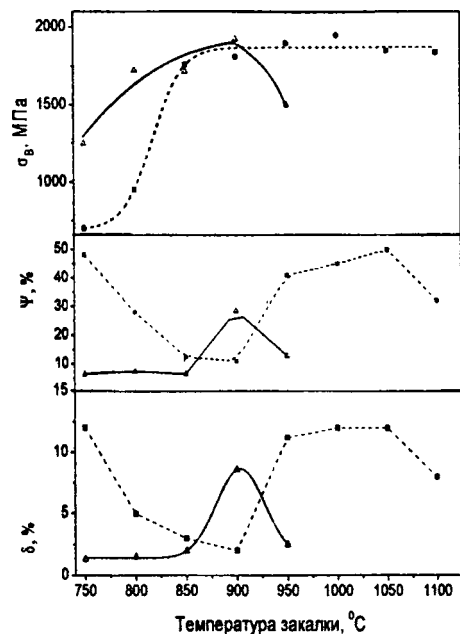


Рисунок 2-
— печной нагрев, 30 мин, вода, отпуск 200°C, 2 ч.;
---- скоростной нагрев ($V_n=50^\circ\text{C}/\text{с}$), вода, отпуск 200°C, 2 ч.

в воде практически однородного мелкозернистого мартенсита позволяет получать высокий уровень механических свойств.

Для реализации разработанных оптимальных режимов при обработке дисков, необходимо было выбрать схему нагрева под закалку и разработать специальное оборудование для ее реализации. Для нагрева использовали установку ВЧГ60/0,066 мощностью 60 кВт. Предварительный анализ показывает, что для одновременного нагрева конических поверхностей диска диаметром 300 мм мощности установки недостаточно. В этой связи для закалки целесообразно было использовать схему непрерывно-последовательного нагрева. Для реализации данного метода была разработана экспериментальная установка для поверхностного упрочнения конусных поверхностей дисков с использованием непрерывно-последовательного нагрева и охлаждения [4].

Опыты, проведенные на данной установке, показали, что в зависимости от мощности генератора, подаваемой на индуктор, можно существенно менять режимы нагрева и толщину упрочняемого слоя. Для отработки оптимального режима нагрева диски нагревали по различным режимам, изменяя подаваемую мощность генератора ТВЧ на индуктор при постоянной линейной скорости вращения диска. После высокочастотной закалки диски разрезали, приготавливали макро- и микрошлифы, исследовали структуру и свойства. Результаты макроанализа, полученные после различных вариантов нагрева (рис. 3) показали, что в зависимости от подаваемой мощности толщина поверхностного слоя может изменяться от 1,5 до 3 мм. Анализ результатов распределения твердости на боковых конических плоскостях, показал, что при подаваемой мощности 45 кВт толщина поверхностно-упрочненного слоя составляет около 1,5 мм, однако твердость на поверхности диска недостаточна и не превышает значений 45-50 HRC. Увеличение мощности до 50 кВт обеспечивает необходимый уровень твердости, составляющий 52-55 HRC. Дальнейшее повышение мощности до 55 кВт, повышает толщину упрочненного слоя до 3 мм на боковых конических поверхностях и резко увеличивает толщину слоя по наружной поверхности диска. Твердость закаленных поверхностей диска составляет 52-57 HRC.

Микроструктура в поверхностно-закаленном слое на глубине 1 мм представляет собой однородный по химсоставу мартенсит с мелкодисперсными включениями цементита по границам зерен. На глубине 1-2 мм наряду с мартенситом сохраняются нерастворенные глобулы феррита и мелкодисперсные карбиды цементитного типа Fe_3C . На глубине 3 мм в бывших колониях перлита регистрируется мартенсит с остаточными карбидами. Центральная область диска представлена феррито-перлитной составляющей.

Многочисленные экспериментальные данные показали, что высокочастотное поверхностное упрочнение дисков позволяет не только повысить твердость и износостойкость поверхностных слоев, но и практически исключить коробление дисков, их окисление и обезуглероживание, сохранить удовлетворительную чистоту поверхности.

Выводы:

Изучено влияние скорости нагрева на механические свойства стали 45 в закаленном состоянии. Определены режимы скоростной термической обработки стали 45, обеспечивающие получение после закалки и отпуска временное сопротивление на разрыв 1600-1800 МПа, относительное удлинение 11-13% и относительное сужение 40-50%.

Изучено влияние режимов индукционного нагрева на структуру и свойства поверхностно-упрочненных слоев дисков. В результате поверхностного упрочнения дисков токами высокой частоты, получили слои с твердостью на поверхности 54-58 HRC и глубиной 2 - 3 мм.

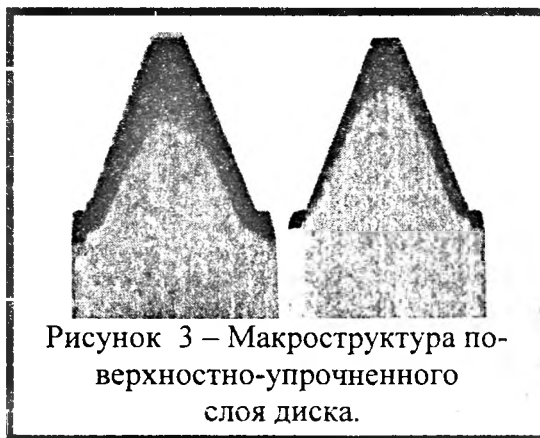


Рисунок 3 – Макроструктура поверхностно-упрочненного слоя диска.

С использованием высокочастотного нагрева разработана технология и опытно-экспериментальное оборудование для поверхностного упрочнения конусных поверхностей дисков, работающих на износ и контактную усталость.

Это позволило повысить износостойкость рабочей поверхности дисков, исключить или уменьшить вероятность образования вмятин и сколов при попадании камней и металлических предметов в зону измельчения зерна, исключить образование трещин, обезуглероженого слоя, окалины и других дефектов поверхности, появляющихся в процессе термической обработки, увеличить долговечность и ресурс работы деталей.

По разработанным режимам с применением опытно-технологических устройств обработана опытная партия дисков в количестве 1500 штук и поставлена заказчику для комплектования разработанных в Беларуси установок “Корм-10”, внедрение данных установок в агропромышленном комплексе Беларуси позволило сократить в 2 раза импорт такого типа оборудования из-за рубежа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г.Ф. Головин, М.М. Замятнин. Высокочастотная термическая обработка. М. “Машиностроение”, 1995, с. 239. 2. Сб. “Технология, оборудование, автоматизация, неразрушающий контроль термических процессов на машиностроительных предприятиях”, под редакцией проф. П.С. Гурченко. Мн., 2005, с.98. 3. Индукционная закалка и ее применение в автомобильной промышленности. Altena H., Schrank F., Oberweger G., Krauss D. // HTM: Harter.-techn. Mitt.– 1999.– 54, №4.– P. 216–221. 4. Пат. 2275 ВУ, МПК C21D 1/06. Устройство для поверхностной закалки дисковых изделий с нагревом токами высокой частоты / Ивашко В.В., Гордиенко А.И. Тарарук А.И., Вегера И.И., Синцов С.И. – № U 20050315; Заявл. 04.04.2005; Опубл. 30.12.2005 // Афіцыйны бюлетэнь / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь.– 2005.– № 4(47).– С. 46.

УДК 621. 923.

Хейфец М.Л., Чемисов Б.П., Грецкий Н.Л., Толстиков, С.К.

ФОРМИРОВАНИЕ ФЕРРОПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ В ПУЛЬСИРУЮЩЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

*Полоцкий государственный университет
Новополоцк, Беларусь*

Повышение надежности и долговечности деталей машин, во многом определяется состоянием их поверхностного слоя [1]. Основными причинами потери работоспособности узлов и механизмов являются изнашивание и усталостные поломки деталей, их разрушение вследствие ползучести, коррозия, эрозия в различных средах, кавитационное разрушение и всевозможные сочетания этих причин. Свыше 80% отказов обусловлено процессами изнашивания или комплексными причинами, в которых изнашивание играет доминирующую роль. Износ деталей различных групп по элементам составляет: 52% - цилиндрические поверхности; 3% - конические и сферические; 1% - плоские; 1% - профильные и фасонные; 2% - зубья и шестерни; 3% - шлицы; 5% - пазы; 10% - резьбы. Причем 13% поверхностей имеют нарушение макрогеометрии и формы; трещины и изломы обнаружены у 9% деталей [2]. Поэтому актуальными являются как разработка новых, так и совершенствование известных методов восстановления.

При восстановлении поверхностей деталей машин используют различные способы нанесения покрытий, позволяющие получать поверхность с требуемым химическим составом, высокой твердостью и износостойкостью. Наиболее перспективными являются элек-

трофизические методы, использующие энергию электромагнитного поля [2]. Одним из таких ресурсосберегающих методов является электромагнитная наплавка [2,3].

Существуют различные устройства для реализации процесса. Наиболее просты двух-полосные и однополосные установки для упрочнения деталей в магнитном поле [2,4]. При упрочнении на двухполосной установке деталь располагается между двумя торцами сердечников электромагнита, имеющими разноименную магнитную полярность, а при упрочнении на однополосной установке – вблизи одного торца сердечника электромагнита. Процесс упрочнения в большинстве случаев имеет низкую стабильность, обусловленную тем, что в рабочих зазорах часто происходит спекание массы ферропорошка и источник технологического тока переходит в режим короткого замыкания.

Для повышения стабильности процесса его иногда проводят в потоке охлаждающей жидкости, но при этом следует учитывать некоторое уменьшение переноса материала ферропорошка на поверхность детали и ухудшение физико-механических свойств упрочняемого слоя [2,4]. Реализация процесса упрочнения деталей ферропорошками в магнитном поле в среде азота [5], позволила установить, что замена воздушной среды азотом фактически не изменяет характеристик упрочненного слоя. Известен способ упрочнения, при котором для интенсификации процесса и улучшения качества поверхностного слоя процесс ведут в среде электролита [6]. Из-за сложности реализации данный способ имеет ограниченное применение в промышленности.

Для повышения стабильности процесса создана установка для упрочнения деталей в пульсирующем магнитном поле с вибрацией полюсного наконечника, которая исключает возможность возникновения короткого замыкания в цепи разрядного тока и позволяет использовать не импульсные источники питания (типа ТД-500, ТД-300 и т.д.) [2-4].

На качество формирования покрытий в электромагнитном поле существенное влияние оказывает взаимная направленность электрического тока и магнитной индукции и фазовые соотношения напряжений, питающие электромагнитную катушку и сварочный трансформатор.

Наибольший перенос порошка и производительность процесса обеспечивается при подключении установки, когда электрический ток и магнитная индукция имеют направление от полюсного наконечника к детали [2,3].

Для обеспечения высокой стабильности процесса и переноса капель расплава ферропорошка на формируемый участок покрытия необходимо, чтобы после завершения электрических раз-

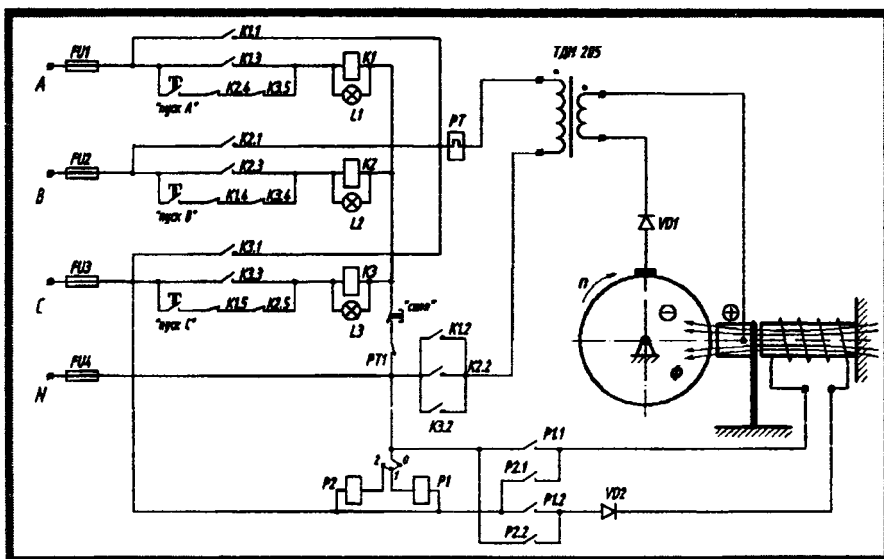


Рисунок 1- Принципиальная электрическая схема установки для упрочнения поверхности детали ферропорошками в электромагнитном поле

рядов за один импульс напряжения в цепи технологического тока величина магнитной индукции в рабочем зазоре принимала минимально возможное значение. В этом случае создаются наиболее благоприятные условия для очистки зазора под действием вибрации полюсного наконечника от продуктов эрозии в твердой фазе и от части зерен ферропорошка не участвовавших в разрядах. Одновременно повысить производительность и качество покрытия при высокой стабильности процесса возможно в случае, если электрические разряды будут завершаться к моменту импульсного механического воздействия полюсного наконечника

на формируемый участок покрытия, а максимальная величина магнитной индукции должна быть близка к значению, при котором наблюдается наибольший перенос капель расплава ферропорошка на поверхность детали.

Для изучения влияния фазового угла смещения между напряжением U_k , питающим электромагнитную катушку для создания вибрации полусного наконечника и переменного

магнитного потока, и напряжением U_t , питающим сварочный трансформатор, предложена принципиальная электрическая схема (рис. 1). Источником технологического тока служит сварочный аппарат ТДМ-205 подключаемый к однофазному напряжению 220V. Предохранители FU1...FU4 защищают установку от высокой перегрузки, а тепловое реле РТ от незначительной длительной перегрузки. Контакторы К1...К4 и реле Р1, Р2 обеспечивают различные варианты смещения напряжений U_k от U_t . Лампочки L1...L 3 показывают, на какую из фаз включен сварочный трансформатор. Диоды VD1...VD2 обеспечивают однополупериодное напряжение питания.

Предложенная электрическая схема (рис. 1) позволяет реализовать шесть возможных вариантов фазового смещения напряжения цепи технологического тока относительно напряжения электромагнитной катушки (рис. 2), когда электрический ток и магнитная индукция имеют направление от полусного наконечника к детали, обеспечивая максимальный переноса капель расплава ферропорошка на формируемый участок покрытия.

Схема на рис. 2 (а) позволяет реализовать режим работы установки без фазового смещения (смещение – 0°), схема на рис. 2 (б) обеспечивает режим работы в противофазе (смещение составляет 180°), схема на рис. 2 (в) реализует режим с опережением напряжения цепи технологического тока относительно напряжения цепи электромагнитной катушки на 120° , схема на рис. 2 (г) обеспечивает режим с отставанием напряжения цепи технологического тока относительно напряжения цепи электромагнитной катушки на 120° , схема на рис. 2 (д) реализует режим с опережением напряжения цепи технологического тока относительно напряжения цепи электромагнитной катушки на 60° , схема на рис. 2 (е) обеспечивает режим с отставанием напряжения цепи технологического тока относительно напряжения цепи электромагнитной катушки на 60° .

Определение порядка или последовательности чередования фаз в трехфазной симметричной системе э.д.с. (напряжений) производится с помощью указателя последовательности чередования фаз. В простейшем исполнении он состоит из двух одинаковых ламп накаливания и конденсатора [7].

На установке для упрочнения деталей в пульсирующем магнитном поле с вибрацией полусного наконечника подключенной по принципиальной электрической схеме (рис. 1) было упрочнено для каждого варианта фазового смещения (рис. 2) на одинаковых режимах упрочнения (разрядный ток до 100А; магнитная индукция в рабочем зазоре 0,6Т; окружная скорость вращения образца 0,3 м/с; рабочий зазор 1,5 мм; зернистость применяемого ферропорошка марки ФБ-1 200...400 мкм; подача ферропорошка в рабочий зазор 17 г/мин [6,8]) по пять предварительно взвешенных образцов

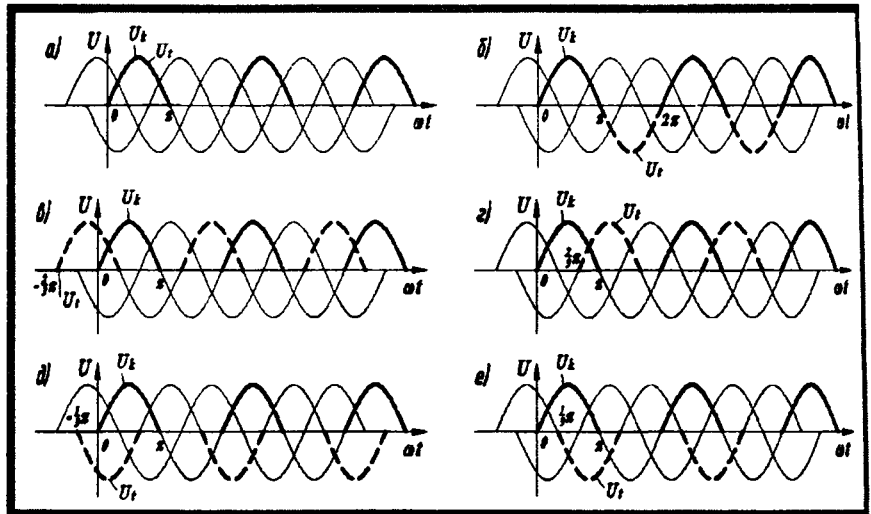
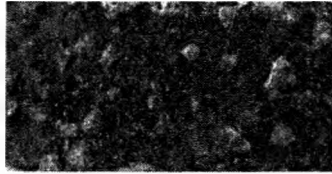
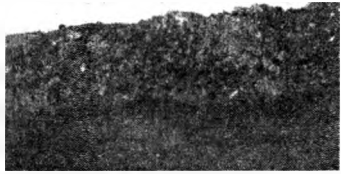
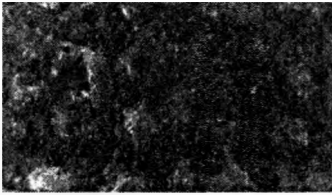
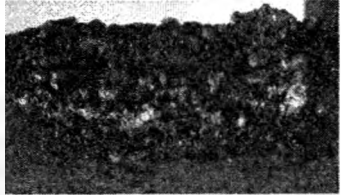
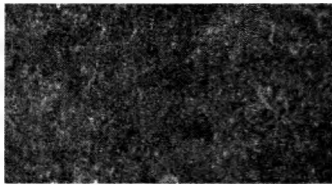

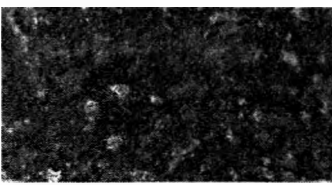
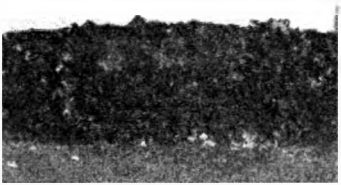
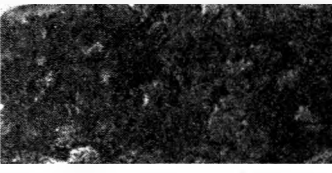

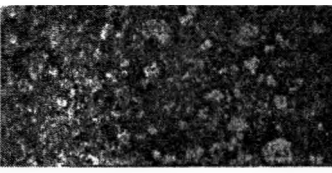



Рисунок 2- Схемы вариантов фазового смещения напряжения цепи технологического тока U_t относительно напряжения цепи электромагнитной катушки U_k ; ω – угловая частота переменного тока; t – время

Таблица
**Результаты упрочнения деталей в пульсирующем магнитном поле
 с вибрацией полюсного наконечника**

№ варианта упрочнения	Описание процесса упрочнения	Поверхность после упрочнения	
		образца	полюсного наконечника
1	Упрочнение без смещения напряжения цепи технологического тока относительно напряжения цепи электромагнитной катушки (рис. 2, а).		
2	Упрочнение со смещением напряжения цепи технологического тока относительно напряжения цепи электромагнитной катушки на 180° (рис. 2, б).		
3	Упрочнение с опережением напряжения цепи технологического тока относительно напряжения цепи электромагнитной катушки на 120° (рис. 2, в).		
4	Упрочнение с отставанием напряжения цепи технологического тока относительно напряжения цепи электромагнитной катушки на 120° (рис. 2, г).		
5	Упрочнение с опережением напряжения цепи технологического тока относительно напряжения цепи электромагнитной катушки на 60° (рис. 2, д).		
6	Упрочнение с отставанием напряжения цепи технологического тока относительно напряжения цепи электромагнитной катушки на 60° (рис. 2, е).		

Анализ полученных результатов, приведенный в таблице, позволяет сделать следующие выводы.

Максимальный привес, как образцов, так и полюсных наконечников приходится при упрочнении по варианту 2 (см. таб.), обеспечивающий режим работы установки со смещением напряжения цепи технологического тока относительно напряжения цепи электромагнитной катушки на 180°. Однако при этом процесс идет не стабильно с сильным разогревом поверхностей детали и полюсного наконечника. Не происходит очистка рабочего зазора от продуктов эрозии в твердой фазе и от части зерен ферропорошка не участвовавшего в разрядах. Покрытие образуется пористое, а его соединение с основой слабое из-за неполного проплавления ферропорошков. В результате происходит налипание зерен ферропорошка, как на рабочую поверхность полюсного наконечника, так и на

деталь, вызывая резкое уменьшение величины рабочего зазора, что приводит к короткому замыканию.

Минимальный привес детали, при малой пористости и максимальной сплошности нанесенного покрытия достигается при упрочнении по варианту 3 (см. таб.), когда напряжение U , питающее сварочный трансформатор, опережает напряжение U_k , питающее электромагнитную катушку, на угол 120° . Процесс упрочнения так же идет не стабильно. Увеличение длины дуги приводит к росту температуры в рабочем зазоре и, в результате, сильному разогреву поверхности детали и оплавлению рабочей поверхности полосного наконечника. Оплавление поверхности полосного наконечника увеличивает рабочий зазор и снижает количество порошка удерживаемого в нем.

При упрочнении по варианту 5 (см. таб.), когда напряжение U_b , питающее сварочный трансформатор, опережает напряжение U_k , питающее электромагнитную катушку, на угол 60° , процесс происходит более стабильно, но незначительно увеличивается привес детали по сравнению с предыдущим вариантом. Однако сильный разогрев полосного наконечника, значительно снижает его ресурс и приводит к высокому тепловложению в деталь, что может вызвать ее коробление.

Все выше рассмотренные варианты из-за нестабильности процесса упрочнения, низкой производительности и больших тепловложений в деталь не могут быть рекомендованы к практическому применению.

При упрочнении по другим вариантам 1, 4, 6 (см. таб.) процесс протекает стабильно.

Среди них максимальный привес образца наблюдается при упрочнении, когда угол смещения составляет 0° вариант 1 (см. таб.). При этом происходит незначительный нагрев детали и полосного наконечника. Перенос расплава порошка осуществляется крупными плотными каплями.

При упрочнении по варианту 4 (см. таб.), когда напряжение U_b , питающее сварочный трансформатор, отстает от напряжения U_k , питающее электромагнитную катушку, на угол 120° (рис. 9, з) перенос расплава порошка осуществляется более мелкими каплями, что повышает сплошность покрытия. При этом несколько снижается привес образцов и увеличивается привес полюсных наконечников.

Упрочнение по варианту 6 (см. таб.), когда напряжение U_b , питающее сварочный трансформатор, отстает от напряжения U_k , питающее электромагнитную катушку, на угол 60° , обеспечивает перенос расплава порошка мелкими каплями, что значительно увеличивает сплошность и уменьшает шероховатость покрытия, при этом снижается привес образцов и полюсных наконечников. Из-за незначительного переноса расплава порошка на рабочую поверхность полосного наконечника и невысокой его эрозии, рабочий зазор остается длительное время постоянным, что значительно повышает стабильность процесса упрочнения. При данном варианте стойкость полосного наконечника максимальна.

Технологический процесс формирования поверхности в электрическом поле вариант 6 (см. таб.), в котором напряжение U_b , питающее сварочный трансформатор, отстает от напряжения U_k , питающее электромагнитную катушку, на угол 60° , можно рекомендовать для упрочнения поверхностей с последующей обработкой до первоначального размера, оставляя при этом только диффузионный слой. Технологический процесс вариант 4 (см. таб.), в котором напряжение U_b , питающее сварочный трансформатор, отстает от напряжения U_k , питающее электромагнитную катушку, на угол 120° , рекомендуется для восстановления и упрочнения, изношенных до $0,1...0,3$ мм поверхностей деталей. Технологический процесс вариант 1 (см. таб.), когда отсутствует фазовое смещение напряжения U_b , питающее сварочный трансформатор, относительно напряжения U_k , питающее электромагнитную катушку, целесообразно использовать при комбинированном восстановлении и упрочнении поверхностей деталей машин со значительным износом (например, с последующей наплавкой углеродистой проволоки).

ЛИТЕРАТУРА

1. Технологические основы управления качеством машин / А.С. Васильев, А.М. Дальский, С.А. Клименко, Л.Г. Полонский, М.Л. Хейфец, П.И. Ящерицин. М.: Машиностроение, 2003. – 256 с.
2. Акулович Л.М. Термомеханическое упрочнение деталей в электромагнитном

поле. – Новополоцк: ПГУ, 1999. – 240 с. 3. Хейфец М.Л., Кожуро Л.М., Мрочек Ж.А. Процессы самоорганизации при формировании поверхностей. – Гомель: ИММС НАНБ, 1999, – 276 с. 4. Абрамов В.И. Исследование технологического процесса упрочнения деталей ферропорошками в пульсирующем магнитном поле; Автореф. дис. ...канд. техн. наук: 05.02.08 / Физ.-техн. ин-т Акад. наук БССР, – Минск, 1982.–19 с. 5. Акулович Л.М., Роценья М.А. Выбор магнитных и электрических параметров процесса магнитоэлектрического упрочнения в среде азота. – В сб.: Вопросы прочности и пластичности металлов. Минск: ФТИ АН БССР 1974, с. 213-214. 6. Мрочек Ж.А., Кожуро Л.М., Филонов И.П. Прогрессивные технологии восстановления и упрочнения деталей машин. – Минск: УП «Технопринт», 2000. –268 с. 7. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи. – М.: Высш. шк., 1978. –528 с. 8. Мрочек Ж.А., Кадников С.А., Кожуро Л.М., Акулович Л.М. Оптимизация технологических параметров формирования износостойких покрытий электромагнитным способом // Электронная обработка материалов. - 1991, №2. – С. 22-25.

УДК 621.791.72

Кардаполова М. А., Дьяченко О. В.

УСТАНОВЛЕНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ МЕЖДУ ИНТЕНСИВНОСТЬЮ ИЗНАШИВАНИЯ, ФАЗОВЫМ СОСТАВОМ И МИКРОТВЕРДОСТЬЮ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Повышение требований техники и промышленности к свойствам поверхностных слоев вызывает необходимость создания композиционных многокомпонентных покрытий, включающих в свой состав химические соединения различных металлов. Установлено, что применение таких защитных покрытий обеспечивает получение на рабочей поверхности слоя, обладающего наряду с хорошей прирабатываемостью еще и комплексом высоких физико-механических и эксплуатационных свойств.

Опыт исследований комбинированных защитных покрытий, получаемых с использованием лазерного оплавления, показывает, что структура, свойства и работоспособность покрытий в значительной степени зависят от технологических параметров лазерной обработки (скорости перемещения луча, его диаметра, коэффициента перекрытия лазерных дорожек и др.) /1, 2/.

Для исследования влияния технологических параметров на структуру и некоторые физико-механические свойства покрытий использовали методы математического планирования - метод полного факторного эксперимента и центральный ортогональный композиционный план (ЦКОП) для двух факторов. /3 – 5, 7/.

Цель настоящей работы – исследовать корреляционную зависимость между интенсивностью изнашивания, фазовым составом и микротвердостью покрытий из самофлюсующихся сплавов на железной основе, а также влияние параметров лазерной обработки и легирования на количество упрочняющей фазы.

Для исследования фазового состава, микротвердости и сравнительных испытаний на износ использовались образцы стали 45 прямоугольной формы сечением 10 x 10 и длиной 30 мм, на которые напыляли самофлюсующийся сплав из порошка ПР-Х4Г2Р4С2Ф следующего химического состава (в %): Fe (83.1 – 87.6), В (3.3 – 4.3), Cr (3.5 – 4.5), Si (2.0 – 2.5), Mn (2.0 – 2.5), С (1.0 – 1.2), V (0.5 – 0.9), Al (0.05 – 0.5), Cu (0.05 – 0.5). В качестве установки для напыления использовали УПУ-3Д с источником питания ИПН-160/600 и плазмотроном ПП-25 на режимах: $I = 250$ А, $U = 80$ В, $P = 0.06$ ГПа. Толщина слоя составляла 0.6 мм. Далее на напыленный слой наносились легирующие обмазки на основе карбида бора, боридов тантала и молибдена на кле-

вой связке (3% клея «AGO» в ацетоне) [6]. Толщина слоя обмазки составляла 0.09 – 0.11 мм и контролировалась толщиномером МТ-40НЦ

Оплавление осуществляли непрерывным лазером ЛГН-702 мощностью $N = 800$ Вт при диаметре пятна лазерного луча от $d_1 = 1.0 \cdot 10^{-3}$ м до $d_1 = 3.0 \cdot 10^{-3}$ м со скоростями перемещения $V_1 = 50$ мм/мин, $V_2 = 100$ мм/мин, $V_3 = 150$ мм/мин, $V_4 = 200$ мм/мин, $V_5 = 300$ мм/мин, с коэффициентами перекрытия $k_{пер} = 0.8$ и $k_{пер} = 1.2$.

После напыления и оплавления образцы разрезали поперек лазерных дорожек для исключения влияния нестабильности температурных условий нагрева и охлаждения на краях образца.

Микрошлифы травили в 5-% растворе пикриновой кислоты в спирте, затем в 5-% растворе азотной кислоты в спирте.

Замер микротвердости проводили на микротвердомере ПМТ-3 на травленных поперечных микрошлифах в покрытиях и переходной зоне.

Рентгеновские съемки производились на дифрактометре ДРОН 3.0 при скорости поворота образца 1 град/мин в медном монохроматизированном излучении в максимально возможном интервале углов от 10° до 75° для качественного и количественного фазового анализа.

Ускоренные сравнительные испытания материалов на износ при сухом трении проводили на машине трения МТ – 1 при линейной скорости вращения истирающего диска 2,3 м/с (угловой 880 об/мин) нагрузке Р (30 – 70 Н), твердости диска 40 –45 НРС.

Полученные данные обрабатывали методами математического планирования.

Поскольку число варьируемых параметров невелико, оказалось возможным реализовать полную реплику, в которой число опытов $Q = 2$ в степени, соответствующей числу факторов n , позволяющую в ходе эксперимента варьировать одновременно несколькими параметрами различной физической природы и получать отдельную, независимую оценку коэффициентов, что невозможно, например, при реализации дробной реплики. При этом необходимо, чтобы все независимые переменные, влияющие на процесс, изменялись на двух уровнях: минимальном и максимальном.

Серия состояла из 8 основных опытов. Полученная модель считалась линейной и учитывала взаимодействие факторов

$$Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + B_3X_3 + B_{12}X_1X_2 + B_{13}X_1X_3 + B_{23}X_2X_3. \quad (1)$$

Для составления таблицы данных (матрицы планирования) находили пределы изменения основных входных параметров, в качестве которых были приняты технологические параметры лазерной обработки. Технологические факторы X_1 – скорость луча лазера относительно детали, X_2 – диаметр лазерного пятна и X_3 – коэффициент перекрытия, выбирали исходя из возможности их изменения при условии точного измерения их величин, а также учитывая их взаимную независимость (ортогональность).

При неадекватности линейного уравнения переходим к плану второго порядка /5/.

Для этого возьмем коэффициент перекрытия возьмем на максимальном уровне, который примем за + 1.

Получаем двухфакторную модель, устанавливающую зависимость между количеством вещества y , %, скоростью движения луча лазера относительно детали (X_1) и диаметром луча лазера (X_2).

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2, \quad (2)$$

Y – параметр оптимизации; b_0 , b_i , b_{ij} , b_{ii} – коэффициенты уравнения; x_i – кодированное значение (уровень) фактора; k – количество факторов.

Далее оценивали корреляции между основными параметрами оптимизации (износостойкостью покрытий и фазовым составом покрытия). Для каждой пары факторов рассчитывали коэффициенты парной корреляции.

После расчетов проведенных по указанной методике получены уравнения регрессии для покрытий после плазменного напыления и легирования MoV, TaV и V_4C .

Таблица 1. Уравнения регрессии полученные для покрытий, легированных MoB

Фаза	Уравнения регрессии
Fe	$Y_1 = 24.625 + 4.792x_2 - 1.325x_1x_2$
MoB	$Y_2 = 8.642 + 0.438x_1 - 0.354x_2 + 0.396x_1x_2$
Бориды Fe	$Y_3 = 18.333 + 0.8x_1 + 1.142x_3 + 2.117x_1x_2$
Mo	$Y_4 = 11.091 - 1.908x_2 + 0.575x_1x_2$
Карбид железа	$Y_5 = 8.483 - 0.883x_1 - 0.658x_2 + 0.683x_3 + 0.558x_1x_2 - 0.65x_1x_3 - 0.592x_2x_3$
Карбиды Cr, V	$Y_6 = 18.925 - 0.858x_1 + 1.383x_2 + 0.642x_3 - 0.75x_1x_2$
Бориды Cr	$Y_7 = 7.825 - 2.542x_2 - 2.071x_1x_2$
H _ц , ГПа	$Y_m = 11.7 + 0.09x_3 + 0.16x_1x_2 - 0.11x_1x_3 + 0.24x_2x_3 + 0.14x_1x_2x_3$

Из данной таблицы следует, что:

Количество пластичной составляющей γ - Fe в большей степени зависит от диаметра луча и повышается с увеличением диаметра луча и уменьшением взаимодействия скорости и диаметра луча.

Параметр Y_2 (количество боридов молибдена) возрастает с увеличением скорости движения луча лазера относительно детали и уменьшением диаметра луча лазера, причем влияние этих коэффициентов незначительно.

Прослеживается зависимость между количеством боридов железа (параметр Y_3) скоростью и коэффициентом перекрытия лазерных дорожек. С их увеличением количество боридов железа возрастает.

Количества карбида железа (параметр Y_5) увеличивается с уменьшением скорости движения луча лазера и диаметра луча лазера, а также увеличением коэффициента перекрытия. Максимальное влияние на количество карбидов железа оказывает скорость движения луча лазера.

Параметр Y_6 (количество карбидов Cr, V) увеличивается с уменьшением скорости движения луча лазера, увеличением диаметра луча лазера и коэффициентом перекрытия лазерных дорожек. В данном случае максимальное влияние на количество карбидов оказывает диаметр луча лазера.

На рост количества молибдена (параметр Y_4) и боридов хрома (параметр Y_7) оказывает снижение диаметра луча и изменение скорости. В первом случае – скорость возрастает, во втором – убывает.

Параметр Y_m (микротвердость) увеличивается с ростом коэффициента перекрытия лазерных дорожек и взаимодействия скорости движения луча лазера с диаметром луча лазера, уменьшением взаимодействия скорости движения луча с коэффициентом перекрытия, увеличением взаимодействия диаметра луча с коэффициентом перекрытия лазерных дорожек и тройного взаимодействия скорости движения с диаметром луча и коэффициентом перекрытия лазерных дорожек. Максимальное влияние на микротвердость оказывает взаимодействие диаметра луча лазера с коэффициентом перекрытия лазерных дорожек.

Таблица 2. Уравнения регрессии, полученные для покрытий, легированных ТаВ.

Фаза	Уравнения регрессии
Fe	$Y_1 = 15.217 - 2.792x_3 + 0.542x_1x_2x_3$
Бориды Та	$Y_2 = 7.225 + 0.646x_1 - 0.588x_2 - 1.838x_1x_2$
Бориды Fe	$Y_3 = 19.229 + 0.788x_1 - 3.038x_3 - 1.813x_1x_2 + 1.454x_1x_2x_3$
Та	$Y_4 = 15.333 - 2.875x_3 + 0.467x_1x_2x_3$
Fe ₃ C	$Y_5 = 9.721 + 1.363x_2 + 1.221x_3 + 1.513x_2x_3$
Карбиды Cr, V	$Y_6 = 22.476 - 2.958x_1 - 1.358x_2 + 5.575x_1x_2$
Бориды Cr	$Y_7 = 14.9 - 1.5x_1 - 1.483x_2 + 0.067x_1x_2$
H _ц , ГПа	$Y_m = 11.1 + 0.44x_1 - 0.19x_3 + 0.163x_1x_2 + 0.175x_1x_3 + 0.34x_2x_3$

Анализируя данную таблицу получим:

Количество пластичной составляющей γ - Fe в большей степени зависит от коэффициента перекрытия лазерных дорожек и повышается с его уменьшением.

На рост параметра Y_2 (количество боридов Ta) в равной степени оказывает влияние увеличение скорости движения луча лазера относительно детали, и уменьшение диаметра лазерного луча.

Количество боридов железа возрастает с ростом скорости луча лазера и уменьшением коэффициента перекрытия, который оказывает максимальное влияние на данный параметр.

Количество Ta растет с уменьшением коэффициента перекрытия и увеличением тройного взаимодействия скорости движения с диаметром луча и коэффициентом перекрытия лазерных дорожек. Максимальное влияние на количество тантала оказывает коэффициент перекрытия лазерных дорожек.

Наблюдается прямая зависимость между количеством карбида железа диаметром луча и коэффициентом перекрытия лазерных дорожек. С их увеличением количество карбидов железа возрастает.

Таблица 3 Уравнения регрессии, полученные для покрытий, легированных B_4C .

Фаза	Уравнения регрессии
Fe	$Y_1 = 30.067 + 1.325x_1 - 1.133x_2$
Бориды Fe	$Y_3 = 26.05 - 2.317x_2$
Карбиды Fe	$Y_5 = 9.125 + 0.821x_1 + 0.041x_2$
Карбиды Cr, V	$Y_6 = 24.375 + 1.192x_1 + 4.875x_2 - 1.242x_1x_1$
Бориды Cr	$Y_7 = 10.108 - 1.223x_1 - 3.325x_2 + 0.758x_1x_2$
H_v , ГПа	$Y_m = 12.225 + 0.275x_2 - 0.225x_3 + 0.275x_1x_3 + 0.225x_1x_2x_3$

Количество карбидов и боридов хрома увеличивается в покрытии с TaB с уменьшением скорости обработки и диаметра луча, причем преобладающее влияние скорости луча наблюдается только в первом случае.

Параметр Y_m (микротвердость покрытия) увеличивается с ростом скорости луча и уменьшением коэффициента перекрытия лазерных дорожек. Максимальное влияние на микротвердость оказывает скорость луча лазера.

Рост скорости движения луча лазера относительно детали максимально влияет на пластическую составляющую γ - Fe (параметр Y_1), которая повышается с увеличением скорости и уменьшением диаметра луча.

С уменьшением диаметра луча лазера количество боридов железа (параметр Y_3) возрастает.

Наблюдается прямая зависимость между количеством карбидов железа (параметр Y_5), количеством карбидов хрома и ванадия (параметр Y_6) скоростью и диаметром луча. С их увеличением количество карбидов железа и хрома – возрастает. Максимальное влияние на количество карбидов хрома оказывает скорость движения луча, карбидов хрома – диаметр луча.

Параметр Y_7 (количество боридов хрома) возрастает с уменьшением скорости движения и диаметра луча лазера, который максимально влияет на данный параметр.

Параметр Y_m (микротвердость покрытия) возрастает с увеличением диаметра луча лазера и уменьшением коэффициента перекрытия. В данном случае максимальное влияние на микротвердость покрытия оказывает диаметр луча лазера.

Проанализировав все уравнения регрессии (для покрытий с обмазками с боридом молибдена, боридом тантала и карбидом бора) наблюдалась одинаковая ситуация: лучше всего фазовый состав коррелирует с интенсивностью изнашивания по формуле:

$$Y = A + B \cdot x, \quad (4.3)$$

где x – один из параметров структуры, Y – параметр оптимизации, A и B – коэффициенты регрессии, и была подтверждена с достаточно высокой достоверностью (0.9 – 0.95 %). Величины коэффициентов регрессии представлены в таблице 4.21.

Таблица 4. Корреляция между параметрами структуры ($Y_1 - Y_m$) и величиной износа $Y_{изн}$ при нагрузке 7 кг.

Параметр	Величины коэффициентов уравнения			Коэффициент корреляции
	A	B	B2	
Для опытов с боридом молибдена				
(Fe) Y_1	нет	нет	нет	нет
(MoB) Y_2	-0.428	0.0667	0.9423	0.5069
(FeB) Y_3	нет	нет	нет	нет
(Mo) Y_4	нет	нет	нет	нет
(Fe ₃ C) Y_5	нет	нет	нет	нет
(CrC,VC) Y_6	нет	нет	нет	нет
(CrB) Y_7	1.3613	0.0723	-1.5437	0.5618
(упр. ф.) Y_8	нет	нет	нет	нет
Y_m	нет	нет	нет	нет
Для опытов с боридом тантала				
(Fe) Y_1	1.5437	-0.0449	0.3781	0.7215
(TaB) Y_2	нет	нет	-нет	нет
(FeB) Y_3	нет	нет	нет	нет
(Ta) Y_4	1.536	-0.044	0.3716	0.7253
(Fe ₃ C) Y_5	0.4236	0.045	-0.4967	0.6054
(CrC,VC) Y_6	1.3878	0.0255	-	0.7435
(CrB) Y_7	нет	нет	нет	нет
(упр. ф.) Y_8	нет	нет	нет	нет
Y_m	-4.6714	0.4843	0.3716	0.615
Для опытов с карбидом бора				
(Fe) Y_1	нет	нет	нет	нет
(FeB) Y_3	нет	нет	нет	нет
(Fe ₃ C) Y_5	нет	нет	нет	нет
(CrC,VC) Y_6	нет	нет	нет	нет
(CrB) Y_7	нет	нет	нет	нет
(упр. ф.) Y_8	нет	нет	нет	нет
Y_m	-1.904	0.1991	-0.4252	0.5565

Для первой серии экспериментов значимыми оказались соотношения $Y_{изн} / Y_2$ и $Y_{изн} / Y_7$. Остальные корреляции оказались незначимыми.

Из этого следует, что на износ покрытий, легированных MoB влияют бориды молибдена и бориды хрома.

Для второй серии экспериментов значимыми оказались соотношения:

$$Y_{изн} / Y_1, Y_{изн} / Y_4, Y_{изн} / Y_5, Y_{изн} / Y_6, Y_{изн} / Y_m$$

Из приведенных данных следует, что в покрытиях с добавками TaB наблюдается прямая зависимость между износом и количеством карбида хрома.

Для покрытий с карбидом бора все соотношения оказались незначимыми. Это говорит о более сложном механизме упрочнения, и за счет легированности матрицы и количества упрочняющей фазы.

Рассмотрим теперь влияние параметров лазерной обработки и легирования на количество упрочняющей фазы.

Анализируя состав покрытий оплавленных горелкой и лазером без легирования приходим к выводу, что наибольших значений в % по объему концентрация упрочняющей фазы достигается при оплавлении покрытий горелкой

Увеличение скорости перемещения луча от 50 до 300 мм/мин (Табл. 5) снижает количество пластичной составляющей, состоящей из α и γ железа с 56.2 до 53.8 % и повышает концентрацию: боридов железа с 13.9 % до 16.2 %; карбидов железа с 7.1 до 7.7 %; карбидов хрома и ванадия – с 12.7 до 15.6 %; и боридов хрома – от 8.6 до 11.0 %.

Таблица 5. Фазовый состав плазменных покрытий после газопламенного и лазерного оплавления.

Фаза	оплавление горелкой	Оплавление лазером			
		$V_1 = 50$ мм/мин	$V_2 = 100$ мм/мин	$V_4 = 200$ мм/мин	$V_5 = 300$ мм/мин
Fe, Y_1	27.6	56.2	55.7	54.8	53.8
Бориды Fe, Y_3	16.8	13.9	14.9	16.2	15.0
Карбиды Fe, Y_5	10.4	7.1	7.5	7.7	7.6
Карбиды Cr, VC, Y_6	27	12.7	14.5	15.7	15.6
Бориды Cr, Y_7	16.7	8.6	9.4	9.5	11.0
H_c , ГПа, Y_m	7.40	9.39	10.15	10.50	11.21
Упрочняющая фаза	70.9	42.3	46.3	49.1	49.2

Микротвердость за счет увеличения твердой фазы повышается с 9.39 до 11.21 ГПа.

Данные результаты хорошо согласуются с предыдущими экспериментами показавшими, что скорость движения луча лазера относительно детали изменяет микроструктуру следующим образом: при $V_1 = 50$ мм/мин образуется в основном литая равновесная структура с осями дендритов первого, второго и третьего порядков. При повышении скорости $V_4 = 300$ мм/мин образуется пересыщенная боридная и карбидо-боридная структура. Мелкодисперсные боридные включения значительно повышают твердость, прочность и износостойкость железной матрицы.

Таблица 6. Состав фаз плазменных покрытий, легированных MoB.

№ опыта	V, мм/мин	d, мм	k	Количество вещества, % и микротвердость							
				Fe	Борид Mo	Mo	Бориды Fe	Карбид Fe	Карбиды Cr, V	Бориды Cr	H_c , ГПа
1	50	1	0.8	31.23	7.9	13.7	17.1	8.6	16.7	11.7	11.88
2	150	1	0.8	26.196	8.0	8.6	16.0	7.6	17.9	7.6	11.90
3	50	3	0.8	23.233	9.1	5.7	15.7	7.6	20.3	7.2	11.18
4	150	3	0.8	27.301	6.4	10.0	19.0	7.8	18.5	14.2	11.44
5	50	1	1.2	25.963	9.0	14.7	22.5	12.9	18.7	8.6	11.86
6	150	1	1.2	24.625	9.2	11.6	17.3	8.1	17.2	12.6	11.08
7	50	3	1.2	23.37	7.6	8.8	15.7	8.8	22.7	6.5	11.77
8	150	3	1.2	25.73	8.7	8.3	21.7	7.2	19.4	3.2	11.6

При легировании MoB за счет появления Mo 5.7 – 14.7% и боридов молибдена 7.9 – 9.1% количество пластичной составляющей, состоящей из α и γ железа уменьшилось с 53.8 – 56.2% и составила 23.37 – 26.196 %.

Лазерное легирование благоприятно влияет на упрочняющую фазу, повышая количество:

- боридов железа с 13.9 – 16.2 % в покрытиях без легирования до 15.7 до 22.5%;
- карбидов железа с 7.1 – 7.7 % до 7.2 – 12.9 %;
- карбидов хрома и ванадия соответственно с 12.7 – 15.6 % до 17.2 – 22.7 %;
- содержание боридов хрома повышается с 8.6 – 11.0 % по 7.6 – 14.2 %;
- микротвердость за счет увеличения твердой фазы повышается с 9.39 – 11.21 ГПа до 11.06 – 11.9 ГПа.

Легирование TaB повлияло на количество пластичной составляющей, состоящей из α и γ железа, которая за счет появления в покрытии Ta 11.2 – 17 % и боридов тантала 3.2 – 10.3 % уменьшилась с 53.8 – 56.2% и составила 4.6 – 21.1 %.

Лазерное модифицирование привело к увеличению количества:

- боридов железа с 13.9 – 16.2 % в покрытиях без легирования до 14.7 – 26.5 %;
- карбидов железа с 7.1 до 7.7 % до 3.2 – 10.3 %;
- карбидов хрома и ванадия соответственно с 12.7 – 15.6 % до 5.0 – 33.3;

– содержание боридов хрома повышается с 8.6 – 11.0 % до 14.2 – 33.3 %.

Таблица 7. Состав фаз плазменных покрытий, легированных TaB

№ опыта	V, мм/мин	d, мм	k	Количество вещества, % и микротвердость							
				Fe	Бориды Ta	Ta	Бориды Fe	Карбид Fe	Карбиды Cr, V	Бориды Cr	H _ц , ГПа
1	50	1	0.8	10.1	7.3	18.5	18.7	9.8	9.4	26.0	11.38
2	150	1	0.8	4.6	3.2	19.7	26.5	7.8	5.0	33.3	11.74
3	50	3	0.8	6.0	3.2	18.0	25.0	7.5	5.7	34.3	10.53
4	150	3	0.8	20.0	9.6	17.0	19.3	8.3	9.2	16.6	11.36
5	50	1	1.2	11.5	5.6	12.8	14.7	6.7	33.3	15.5	10.10
6	150	1	1.2	17.0	10.3	12.6	17.6	10.7	16.3	15.4	10.95
7	50	3	1.2	21.1	7.0	11.2	15.0	13.1	18.1	14.6	10.54
8	150	3	1.2	14.9	5.8	13.0	17.3	5.8	24.0	14.2	12.08

Микротвердость за счет увеличения твердой фазы повышается с 9.39 – 11.21 ГПа до 11.10 – 12.08 ГПа для покрытий, после лазерного легирования TaB.

Таблица 8. Состав фаз плазменных покрытий, легированных В₄С.

№ опыта	V, мм/мин	d, мм	k	Количество вещества, % и микротвердость						
				Fe	Бориды Fe	Карбид Fe	Карбиды Cr, V	Бориды Cr	H _ц , ГПа	Упр. Фаза
1	50	1	0.8	27.3	29.5	11.5	23.3	8.4	12.23	72.7
2	150	1	0.8	30.7	29.1	13.0	23.6	3.7	12.43	69.4
3	50	3	0.8	34.4	27.1	8.5	21.9	8.1	13.13	65.6
4	150	3	0.8	37.8	27.1	11.6	19.3	4.2	12.1	62.2
5	50	1	1.2	30.6	28.6	8.4	25.8	6.3	11.36	69.1
6	150	1	1.2	33.1	27.9	10.1	22.1	6.7	11.8	71.6
7	50	3	1.2	28.3	22.3	9.0	26.3	14.0	11.86	70.7
8	150	3	1.2	29.3	25.1	9.7	23.3	12.6	12.85	

При легировании В₄С количество пластичной составляющей, состоящей из α и γ железа уменьшилось с 53.8 – 56.2% в покрытиях без модифицирования, до 27.3 – 37.8 % в легированных.

Лазерное модифицирование влияет положительно на процентное содержания упрочняющей фазы повышая концентрацию: боридов железа с 13.9 – 16.2 % до 22.3 – 29.5 %; карбидов железа с 7.1 до 7.7 % до 8.4 – 13 %; карбидов хрома и ванадия соответственно с 12.7 – 15.6 % до 19.3 – 26.3 %; содержание боридов хрома с 8.6 – 11.0 % до 3.7 – 14.0 %.

Микротвердость за счет увеличения твердой фазы повышается с 9.39 – 11.21 ГПа до 11.36 – 12.86 ГПа.

Выводы.

1. Изучен фазовый состав и микротвердость покрытий, из самофлюсующегося порошкового материала ПР-Х4Г2Р4С2Ф легированных TaB, MoB и В₄С, а также их интенсивность изнашивания. Получены уравнения регрессии, связывающие скорость движения, диаметр луча и коэффициента перекрытия с интенсивностью изнашивания и содержанием легирующих веществ в покрытии.

2. На снижение интенсивности изнашивания покрытий, легированных боридом молибдена и тантала оказывает влияние увеличение количества боридов молибдена и хрома в первом случае, карбида бора – во втором.

3. Для покрытий после легирования В₄С все соотношения между фазовым составом и интенсивностью изнашивания оказались незначимыми. Это говорит о том, что упроч-

нение происходит за счет сочетания легированности матрицы и количества упрочняющей фазы.

4. Установлено, что лазерная обработка увеличивает количество упрочняющей фазы и повышает микротвердость с 9.39 – 11.21 ГПа в покрытиях без легирования до 11.06 – 11.9 ГПа, легированных MoB, до 11.10 – 12.08 ГПа в покрытиях, легированных TaB и 11.36 – 12.86 ГПа в покрытиях, после легирования V₄C.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ларионов В. П., Болотина Н. П., Аргунова Т. В., Тюнин В. Д., Лебедев Н. П. Влияние лазерной обработки на структуру и состав плазменно-напыленных покрытий системы Ni-Cr-B-Si-C // ФХОМ. 1987. № 1. С. 74 – 78. 2. Спиридонова И. М. Структура и свойства железобороуглеродистых сплавов / *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1984. № 2. С. 58 – 61. 3. Новик Ф.С. Математические методы планирования экспериментов в металлведении. Планирование промышленных экспериментов. - М., 1971. - 36 с. 4. Каледин Б.А. Планирование экспериментов в порошковой металлургии. Методическое пособие по курсу «Математическое планирование экспериментов» для студентов специальности «Порошковая металлургия, и слушателей факультета «Новые материалы» специальности 0414 – «Методы создания композиционных материалов и изделий» Часть I Планы первого порядка. Минск: БПИ, 1982 – 61 с. 5. Каледин Б.А. Планирование экспериментов в порошковой металлургии. Методическое пособие по курсу «Математическое планирование экспериментов» для студентов специальности «Порошковая металлургия, и слушателей факультета «Новые материалы» специальности 0414 – «Методы создания композиционных материалов и изделий» Часть II Планы второго порядка. Минск: БПИ, 1982 – 61 с. 6. Самсонов Г. В. Тугоплавкие соединения. – М.: Металлургия. – 1963. – 398 с. 7. Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. М.: Финансы и статистика, 1981, – 264 с.

УДК 621.733.74

Савчик В.А., Дьяченко О.В., Василенко А.Г.

ИССЛЕДОВАНИЕ АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ПОРОШКОВ НА ЖЕЛЕЗНОЙ ОСНОВЕ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Прочность сцепления покрытия с основой определялась штифтовым методом, как наиболее распространенным. Однако этот метод имеет недостатки. Между оправкой и штифтом образуется зазор около 10 мкм, что может привести к склепыванию или свариванию, которое происходит при соударении высокоскоростных частиц и поверхности штифта. В случае большого зазора частицы могут проникать непосредственно в него. При испытаниях хрупких покрытий наряду с адгезионным отрывом на узких кольцевых участках, прилегающих к периметру штифта, происходит когезионный отрыв. Для устранения штифты выполняют в виде полых усеченных конусов, вставленных один в один и притертых друг к другу. Торцы конусов представляют собой концентрические кольца. Такая конструкция штифтов позволяет получить более однородный отрыв.

Поверхность под плазменно-напыленные покрытия готовили следующим образом: вначале ее обезжировали этиловым спиртом, затем производили обдувку дробью. После дробеструйной обработки штифт проворачивали в приспособлении для устранения погрешности. Порошковый сплав напыляли на верхнюю поверхность образца.[1].

Применявшийся метод штифтовой пробы, основан на непосредственном определении силы, направленной перпендикулярно к напыленной и оплавленной поверхности, отрывающей покрытие от основного материала [2, 3]. Прочность сцепления определялась как отношение усилия отрыва к площади торца штифта. На одну точку испытывалось не менее 10 образцов.

В эксперименте использовалась разрывная машина «RIENLE» с плавно изменяющимся усилием от 0 до 50000 Н. (рис. 1), с заряженной в нее оснасткой, и оснастка (рис. 2)

Для проведения эксперимента была разработана оснастка, представленная на рисунке:

На (рис. б) представлены: (слева - направо) деталь для испытания, сухарики, в верхней части рисунка изображена оправка, состоящая из двух частей.

Испытывались образцы с напыленными плазмой покрытиями без оплавления, с оплавлением лазером и горелкой, а также с клеевыми покрытиями, оплавленными лазером.

В процессе исследования наблюдался адгезионный и адгезионно-когезионный характер разрыва образцов (когда покрытие отрывалось либо полностью, либо часть его оставалась на штифте, причем первый случай характерен для больших скоростей сканирования луча лазера).

Данные покрытия можно рассматривать как многофазную систему, в которой наблюдается адгезионный, когезионный и адгезионно-когезионный типы разрушения. Адгезионный отрыв имеет место в случае максимальной $V = 150 \text{ мм/с}$ $d = 3 \text{ мм}$ $k = 0,8$.

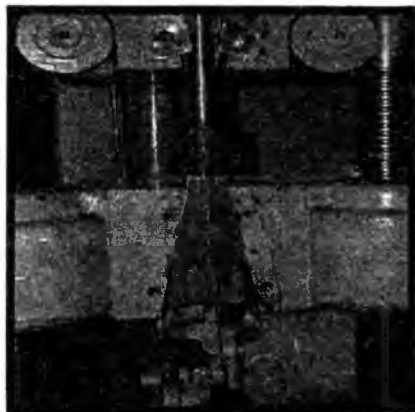


Рисунок 1 - рабочая часть машины «RIENLE»

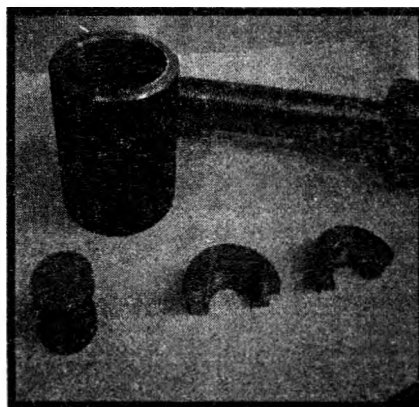


Рисунок 2- слева направо: испытуемый образец, оправка, сухарики

Разрушение покрытия начинается с торцов /5/, где меньше толщина клеевого слоя и имеются дефекты, т. е. нет хорошего контакта клея со склеиваемым материалом. В этих местах концентрируются значительные напряжения. При увеличении нагрузки в них возникают микротрещины, которые постепенно распространяются к центру склеивания. Когда число микротрещин достигает определенного уровня, создаются условия для соединения микротрещин в трещину значительных размеров, что приводит к разрушению.

Клеевые соединения по-разному ведут себя в различных условиях эксплуатации. Они характеризуются хорошими показателями при сжатии сдвиге, удовлетворительными – при равномерном отрыве и плохими – при неравномерном отрыве

Разрушающее напряжение при равномерном отрыве (по ГОСТ 1760 – 69 «Метод определения прочности при отрыве») проводят на цилиндрических образцах диаметром 25 мм, склеенных по торцевым поверхностям.

Площадь всего штифта:

$$A = S = 2 \times \pi \times r^2 = 2 \times 3,14 \times 25 = 157 \text{ мм}^2.$$

Площадь, по которой произошел отрыв:

$$A_1 = 157 : 5 = 31,4 \text{ мм}^2.$$

Разрушающее напряжение при отрыве σ определяется по формуле :

$$\sigma = \frac{P}{A}, \quad \text{где } P \text{ – разрушающая нагрузка, Н, } A \text{ – площадь отрыва, мм}^2.$$

Для нагрузки $P = 2000\text{Н}$:

$$\sigma = \frac{P}{A_1} = \frac{2000}{31,4\text{мм}} = 63,7 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2} \approx 63,7\text{МПа} = 63,7 \cdot 10^6 \text{Па}, \text{Па} = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} 1000 : 31,4 = 31,8$$

Для прутка $\varnothing 6\text{ мм}$ из стали 3: $\sigma_{\text{ст}} = 340\text{ МПа}$.

Измерения проводили по двум шкалам 1000 и 2500 Н. Результаты заносили в таблицу 1:

Таблица 1

№ образца	Вид обработки	Площадь отрыва $A_1, \text{мм}^2$	Сила отрыва, Н	σ отрыва $\frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$	
1	2	3	4	5	6
1	№1	- " -	35	140	286
	№2		27	230	370
	№3		16	587	625
2	№1	Плазменное покрытие без оплавления	157	52	32
	№2		157	35	32
	№3		157	43	32
3	№1	Плазменное покрытие, оплавленное лазером $V=50\text{ мм/мин}, d=1\text{ мм}, k=0,8$	30	580	333
	№2		29	560	290
	№3		31	570	310
4	№1	Плазменное покрытие, оплавленное лазером $V=100\text{ мм/мин}, d=1\text{ мм}, k=0,8$	61,1	85	409
	№2		52,3	160	478
	№3		55,5	125	451
5	№1	Плазменное покрытие, оплавленное лазером $V=300\text{ мм/мин}, d=1\text{ мм}, k=0,8$	34	236	294
	№2		36	200	278
	№3		34,7	170	289
6	№1	Плазменное покрытие, оплавленное горелкой	157	1700	160
	№2		157	850	160
	№3		157	2050	160

Одной из наиболее важных эксплуатационных характеристик покрытий является адгезия. Многочисленные исследования работоспособности деталей с покрытиями убедительно показали, что, несмотря на то, что воздействие внешней среды испытывают поверхности покрытий, основной причиной их разрушения является недостаточная связь между материалами покрытия и основы. /5/.

Исследования адгезионной прочности проводились на разрывной машине «RIENLE» с плавно изменяющимся усилием от 0 до 50000 Н на штифтах из стали 40Х, вставленных один в другой и притертых друг к другу. Торцы конусов представляют собой концентрические кольца. Диаметр меньшего конуса 12 мм, большего 20 мм. Такая конструкция штифтов позволяет получить более однородный отрыв.

Применявшийся метод штифтовой пробы основан на непосредственном определении силы, направленной перпендикулярно к напыленной и оплавленной поверхности и отрывающей покрытие от основного материала [6, 7]. Для закрепления образца в разрывной машине использовались специальные оправки, соединяемые с захватами разрывной машины при помощи гибких тросов. Это обеспечивает перпендикулярность усилия отрыва торцевой поверхности образца. Применялась минимальная скорость нагружения, обеспечивающая статический характер нагрузки. Усилие P_0 , соответствующее моменту отрыва покрытия от штифта, отмечалось на шкале, проградуированной в килограммах, а затем переводилось в ГПа. Прочность сцепления и площадь торцевой поверхности штифта определялись по формулам

$$\sigma_c = \frac{P_0}{A}, \quad A = \frac{\pi \cdot d^2}{4}.$$

С целью сопоставления получаемых значений σ_c для разных образцов толщина напыляемых покрытий выдерживалась постоянной и составляла 0.6 мм. Неизменным сохранялся интервал времени между дробеструйной обработкой и нанесением клеевых покрытий, а также напылением. Для обеспечения статистической достоверности использовалось по десять образцов с покрытиями, нанесенными при одинаковых режимах.

Поверхность штифта под клеевые и плазменно-напыленные покрытия готовили следующим образом: вначале ее обезжиривали этиловым спиртом, затем производили обдувку дробью. После дробеструйной обработки штифт проворачивали в приспособлении для устранения погрешности. На поверхность образца наносили порошковый сплав. Далее на плазменно-напыленный слой наносилось поглощающее покрытие (желтая гуашь).

Оплавление осуществляли непрерывным лазером ЛГН-702 мощностью $N = 800$ Вт при диаметре пятна лазерного луча от $d_1 = 1.0 \cdot 10^{-3}$ м до $d_1 = 3.0 \cdot 10^{-3}$ м со скоростями перемещения $V_1 = 50$ мм/мин, $V_2 = 100$ мм/мин, $V_3 = 150$ мм/мин, $V_4 = 200$ мм/мин, $V_5 = 300$ мм/мин и коэффициентами перекрытия $k_{пер} = 0.8$ и $k_{пер} = 1.2$ с целью получения единого фазового состава и заданных свойств по всей толщине покрытия.

Ряд традиционных методик определения прочности сцепления для покрытий оплавленных лазерным излучением непригоден. Так, при штифтовом методе в процессе оплавления происходит затекание расплава в зазор между матрицей и штофтом и их прочное сваривание. Поэтому для изучения влияния режимов оплавления на адгезионные характеристики железных самофлюсующихся покрытий использовали клеевой метод. Для этого напыление производили на торцевые поверхности цилиндрических образцов из стали 45 диаметром 10 мм на толщину 0.6...0.7 мм. Оплавление проводили на лазерной установке непрерывного действия ЛГН-702 при различных режимах обработки. К полученному покрытию приклеивали образец из стали 45 клеем ВТ-25-200 согласно инструкции, разработанной НИИ пластических масс. В случае образования прочного сварного соединения разрыв происходил по клеевой композиции, при неполной адгезии покрытия отрыв происходил по границе раздела с основой. Оценка времени воздействия лазерного излучения на зону контакта с основой (время нахождения жидкой фазы в контакте с подложкой) производилась следующим образом. С обратной стороны запыленного образца просверливалось отверстие диаметром 1,6 мм, не достигающее поверхности на 0,2 мм. В отверстие зачеканивалась хромель-алюмелевая термопара, а запись производилась быстродействующим самописцем. За время контакта принималось значение, в течении которого фиксировалась температура не менее 1253К. Результаты исследований приведены в таблицу 2:

При режимах с небольшим энерговыделением имеет место непроплавление покрытия на всю глубину, что приводит к его скалыванию или растрескиванию вследствие значительной величины остаточных напряжений, возникающих при высоких скоростях охлаждения расплава. При больших энергетических вкладах происходит проплавление не только покрытия, но и основы. При этом происходит значительное перемешивание указанных материалов (первый и второй опыты), что сопровождается снижением уровня физико-механических и эксплуатационных свойств нанесенного покрытия.

Таблица 2

№	Время воздействия лазерного излучения, с	Скорость перемещения лазерного луча, мм/с	Прочность сцепления, МПа																				
			ПР-53	ПР-36																			
1	2,8	0,53	X	X																			
2	2,4	0,67	X	X																			
3	1,2	1,33	398	391																			
4	1,0	1,67	361	351																			
5	0,8	2,08	273	6	0,6	3,33	218	233	7	0,4	4,17	90	80	8	0,2	6,67	20	20	9	0,1	15	20	21
6	0,6	3,33	218	233																			
7	0,4	4,17	90	80																			
8	0,2	6,67	20	20																			
9	0,1	15	20	21																			

Исследование процесса лазерной обработки покрытий показали, что в ряде случаев когда достигнуто полное проплавление покрытия не происходит качественного сцепления его с подложкой (опыт №7). Это можно объяснить тем, что в условиях кратковременного воздействия жидкого расплава с основой не успевают в полной мере произойти процессы диссоциации оксидных плёнок, возникающих при напылении, и образование металлической связи между элементами покрытия и основы. Во всех опытах за исключением восьмого и девятого наблюдалось полное проплавление покрытия. Частичное раскисление поверхности раздела покрытия с подложкой как видно из таблицы наблюдается уже при времени воздействия лазерного луча порядка 0,4 – 0,6 с, хотя в этих случаях прочность сцепления достаточно высока. При уменьшении времени воздействия степень раскисления подложки снижается и прочность сцепления остаётся практически на уровне значений, достигнутых при напылении. Как видно из рис. 3 прочность сцепления при воздействии лазерного излучения в интервале 0,6 – 1,0 с резко возрастает от 20 МПа до 400 МПа, а при увеличении времени воздействия свыше 1,2 с разрыв происходит по клеевой композиции, что свидетельствует о полном “приваривании” покрытия к основе. Исследования проводились при плотности мощности лазерного излучения $1,6 \times 10^8 \text{ Вт/м}^2$. Из опытных данных видно, что железное самофлюсующееся покрытие обладает наибольшей выявленной в ходе эксперимента адгезионной прочностью с основой при его оплавлении с технологической скоростью перемещения луча не более 1,67 ... 2,08 мм/с. Уменьшение скорости оплавления ведёт к заметному проплавлению основы и перемешиванию с материалом покрытия, что снижает его физико-механические и эксплуатационные свойства.

Исследования проводились и при других плотностях мощности лазерного излучения, согласно которых можно рекомендовать следующие режимы лазерной обработки:

- 1) $q=1,1 \times 10^8 \text{ Вт/м}^2$, $V=1,33 \dots 2,08 \text{ мм/с}$;
- 2) $q=1,6 \times 10^8 \text{ Вт/м}^2$, $V=1,67 \dots 2,08 \text{ мм/с}$;
- 3) $q=2,1 \times 10^8 \text{ Вт/м}^2$, $V=2,08 \dots 3,33 \text{ мм/с}$.

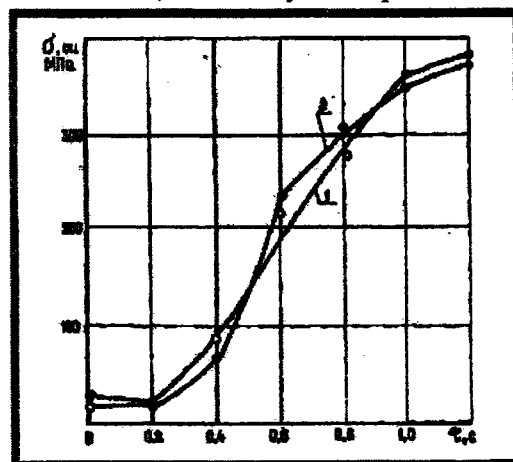


Рисунок 3- Зависимость прочности сцепления покрытия и основы от времени взаимодействия лазерного луча:

- 1 – для сплава ПР-53,
- 2 – для сплава ПР-36

Таким образом, из приведённых расчётов и их экспериментальной проверки следует, что время воздействия высокоэнергетического источника (время контакта жидкой фазы с основой) является важным технологическим параметром в процессе оплавления самофлюсующихся сплавов. С уменьшением времени контакта (менее 0,75...0,6 с) снижается вероятность обменного взаимодействия между атомами покрытия и основы, а значит и уменьшается адгезионная составляющая прочности сцепления. Кроме того, рассчитываемый параметр определяет требования и к методу оплавления. Так как с увеличением времени оплавления увеличивается и количество окислительных реакций, в этой связи процесс термообработки покрытия желательнее вести как можно быстрее. Традиционные методы оплавления в частности ацетиленокислородным пламенем, в силу своих технологических особенностей: предварительный разогрев детали, нахождение покрытия в расплавленном состоянии значительно превышающем расчётное время 0,75 - 0,9 с, трудность контроля процесса оплавления (особенно для железных сплавов), уступают по этому показателю процессу лазерной обработки, при которой, изменяя технологические режимы, можно достичь заранее запланированных характеристик газометрических покрытий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Спиридонова И. М. Структура и свойства железобороуглеродистых сплавов / *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 1984. - № 2. - С. 58 –61.
2. Теория и практика нанесения защитных покрытий/ П.А. Витязь, В.С. Ивашко, А.Ф. Ильющенко и др. – Мн.: Беларуская навука, 1998. - 583 с.
3. Ивашко В.С., Куприянов И.А., Шевцов А.И. Электротермическая технология нанесения защитных покрытий. – Мн. Навука і тэхніка, 1996. – 375 с.
4. Трезно М.С., Москалев Е.В. Клеи и склеивание. – Л.: Химия, 1980 – 120 с.
5. Куприянов И.Л., Геллер М.А. Газотермические покрытия с повышенной прочностью сцепления. – Мн.: Навука і тэхніка. 1990. 176 с.
6. Витязь П. А., Ивашко В. С., Ильющенко А. Ф. и др. Теория и практика нанесения защитных покрытий / Минск: Беларуская навука, 1998.
7. Ивашко В. С., Куприянов И. А., Шевцов А. И. Электротермическая технология нанесения защитных покрытий. Минск: Навука і тэхніка, 1996.

УДК 621.78.011: 621.81

Шматов А. А.

УПРОЧНЯЮЩАЯ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКАЯ ТЕРМООБРАБОТКА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ИЗ БЫСТРОРЕЖУЩИХ СТАЛЕЙ

*Белорусский национальный технический Университет
Минск, Беларусь*

Из большого разнообразия методов поверхностного и объемного упрочнения режущего стального инструмента предпочтение отдается таким способам, которые не требуют значительных затрат на их внедрение, эффективны и экологически безопасны. Среди таких способов следует выделить метод «упрочняющей термоциклической термообработки» (УЦТО), который является методом объемного упрочнения и основан «на постоянном накоплении от цикла к циклу положительных изменений в структуре металлов» [1-4]. Также как традиционная термообработка, УЦТО имеет преимущества перед поверхностными способами упрочнения: возможность многократной переточки инструмента, высокая производительность и эффективность процесса, применение традиционного термического оборудования, простота, низкая стоимость и автоматизация процесса. Наибольший интерес представляет процесс УЦТО, который формирует структуру термически упрочненной (закаленной и отпущенной)

стали с окончательными рабочими характеристиками. В этом случае способ УЦТО является завершающей операцией термообработки инструмента и также получил название «окончательной термоциклической обработки» [2]. В зависимости от марки сталей, режима и последовательности выполнения операций термоциклической обработки, метод УЦТО может иметь более 20 вариантов. По структурным изменениям в сталях УЦТО может проходить с фазовыми или без фазовых превращений, с полными или неполными фазовыми превращениями при нагреве и охлаждении, с различными типами фазовых превращений: бездиффузионным (аустенита в мартенсит), диффузионным (аустенита в перлит) или комбинации этих типов. По температурно-временным параметрам УЦТО можно разделить на следующие виды: средне-, высоко- или низкотемпературный процесс, процесс с изотермической или без изотермической выдержки (для достижения полной или неполной аустенизации) и другие. Основными структурными изменениями при УЦТО является сильное измельчение зерна и блоков мозаики, увеличение плотности дислокаций, уменьшение размера карбидов и устранение структурной полосчатости, однородное распределение химических элементов в структуре, повышение однородности и степени легирования твердого раствора, снижение степени тетрагональности мартенсита и др. Эти позитивные структурные изменения существенно улучшают эксплуатационные свойства инструмента. В частности УЦТО повышает вязкость, прочность (при изгибе и растяжении), твердость, теплостойкость, контактную выносливость, изотропность свойств и износостойкость сталей, уменьшает деформацию и опасность закалочных микротрещин по сравнению с традиционной термообработкой.

На основании приведенного анализа следует, что «упрочняющая термоциклическая термообработка» имеет большие перспективы для своего развития, прежде всего для инструмента, имеющего малый ресурс работы и для инструмента многоцелевого назначения. Особое внимание в этом аспекте следует уделить быстрорежущим сталям, которые в наибольшей мере требуют решения проблемы повышения стойкости режущего инструмента, поскольку все еще остаются менее изученными перед остальными инструментальными сталями в области термоциклического упрочнения.

В связи с вышеназванной целью данной работы являлось (1) провести сравнительный анализ и оптимизацию структуры и свойств различных марок быстрорежущих сталей, подвергнутых УЦТО; (2) определить причины повышения различных механических свойств быстрорежущих сталей после УЦТО; (3) разработать простой, эффективный и недорогой способ УЦТО режущего инструмента из быстрорежущих сталей.

МЕТОДИКА

В настоящей работе были изучены несколько видов УЦТО быстрорежущих сталей, которые согласно опубликованным данным [1-4], являются наиболее эффективными: (1) УТЦО, которая включает многократный нагрев и охлаждение выше и ниже критической точки A_1 с окончательным закалочным охлаждением на последнем цикле и последующим традиционным отпуском; (2) УТЦО, которая включает многократный нагрев и охлаждение только выше критической точки A_1 с окончательным закалочным охлаждением на последнем цикле и последующим традиционным отпуском.

При исследовании процессов УТЦО быстрорежущих сталей варьировали температуру, время нагрева и охлаждения, а также число циклов. Причем во всех циклах при УТЦО время нагрева и охлаждения, а также максимальная (при нагреве) и минимальная (при охлаждении) температуры было постоянными.

Процессы УТЦО изучали на быстрорежущих сталях S6-5-2 (Германия), P6M5 (6% W, 5% Mo), P18 (18% W), P6M5K5 (6% W, 5% Mo, 5% Co) (Россия).

Максимальная температура термоциклирования при УТЦО быстрорежущих сталей соответствовала температуре их нагрева под закалку и была следующая: 1270°C для стали P18 и 1220°C для P6M5, S6-5-2, P6M5K5, а минимальную температуру термоциклирования варьировали от 20°C до 1100°C.

При проведении различных режимов нагрева и охлаждения УТЦО быстрорежущих сталей применяли традиционные составы соляных ванн (95%BaCl₂+5% MgF₂ для темпе-

ратур в пределах 950-1280°C, 50%BaCl₂+47.5%NaCl+2.5% MgF₂ для температур 750-1000°C, 30% BaCl₂+15% NaCl+55% CaCl₂ for для температур 495-950°C, 70%KNO₃+30% NaOH для 180-560°C) и масляные ванны (для 20-180°C); для отпуска при 560°C применяли ванну с расплавом KNO₃ или печь с окислительной атмосферой. Все процессы УТЦО были выполнены на стандартном термическом оборудовании.

Для изучения структуры и фазового состава упрочненных сталей применяли микроструктурный, рентгеноструктурный, дюротрический и микрорентгеноспектральный анализы. Сравнительные испытания механических свойств быстрорежущих сталей после УТЦО и стандартной термообработки проводили на специальных образцах: для определения ударной вязкости использовали образцы размером 10×10×55 мм без надреза, для определения прочности на изгиб применяли образцы размером 5×10×55 мм; определение твердости по Роквеллу осуществляли на поверхности выше упомянутых образцов. Сравнительные испытания на износ проводили путем фрезерования нержавеющей стали 40X13 (HВ 320) концевыми фрезами (диаметром 8 мм), подвергнутых УТЦО и традиционной термообработке. Режимы резания упрочненных фрез были следующие: скорость фрезерования $V_c = 29,9$ м/мин, подача $f_z = 0,01$ мм, глубина фрезерования $a_p = 2$ мм, ширина фрезерования $a_f = 8$ мм. Показатель относительной износостойкости инструмента определяли по формуле $K_w = t_2/t_1$, где t_1 - время работы (или длина пробега) концевой фрезы, обработанной традиционной термообработкой, t_2 - время работы концевой фрезы, обработанной УТЦО до образования критериального значения лунки износа VB_{max} , равного 0,25 мм. Для оптимизации температурно-временных параметров процесса УТЦО по указанным выше свойствам для трех марок быстрорежущих сталей и уменьшения числа опытов в данной работе использовали метод математического планирования экспериментов [5].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Некоторые сравнительные данные по твердости, ударной вязкости и прочности исследуемых быстрорежущих сталей S6-5-2, P6M5, P18 и P6M5K5, которые были обработаны по традиционной технологии термообработки (Трад.ТО) и оптимальному режиму упрочняющей термоциклической обработки с 2 термоциклами (УЦТО) представлены на рис.1. Для равноценного сравнения указанных свойств условия закалки каждой марки быстрорежущих сталей (температура нагрева под закалку и время выдержки при ней, скорость закалочного охлаждения) при проведении УЦТО и традиционной термообработки были одинаковыми.

На основании многочисленных лабораторных испытаний были построены кривые износа «глубина лунки износа – длина пробега» концевых фрез из быстрорежущих сталей S6-5-2, P6M5, P18 и P6M5K5, которые были подвергнуты традиционной термообработке и оптимальному режиму УЦТО с 2 термоциклами. Используя эти кривые определена длина пробега испытуемых фрез, при которой лунка износа режущей кромки соответствовала критериальному значению VB_{max} , равному 0,25 мм. Сравнительные результаты износостойкости концевых термически упрочненных фрез представлены в табл.1.

Таблица 1 - Результаты сравнительных испытаний термически упрочненных концевых фрез

Марка быстро режущей стали	S 6- -5-2		P 18		P6 M5		P6M5 K5	
	Трад. ТО	УЦТО	Трад. ТО	УЦТО	Трад. ТО	УЦТО	Трад. ТО	УЦТО
Продолжительность работы фрезы до ее износа, мм	860	1980	1250	3000	700	1470	810	1820
Относительная износостойкость фрезы, K_w	1	2,3	1	2,5	1	2,1	1	2,2

Трад.ТО – Традиционная термообработка

УЦТО – Упрочняющая термоциклическая термообработка

Условия испытания концевых фрез ($\varnothing 8$ мм):

обрабатываемый материал – нержавеющая сталь 40X13 (HRC32)

$V_c = 29,9$ м/мин, $f_z = 0,01$ мм, $a_p = 2$ мм, $a_f = 8$ мм

Критериальное значение износа $V_{Bk} - 0,25$ мм

В результате оптимизации исследуемых процессов УЦТО установлено, что основными факторами, определяющими структуру и свойства быстрорежущих сталей, являются: верхние и нижние значения температуры цикла, время выдержки при верхней и нижней температуре цикла, скорость охлаждения и нагрева в циклах и количество термоциклов. Оптимальное число циклов при УЦТО быстрорежущих сталей составляет 2-4. Среди выше названных параметров верхняя и нижняя температура цикла оказывают максимальное влияние на механические и износостойкие свойства быстрорежущих сталей при УЦТО. Выявлено несколько температурных областей в цикле при УЦТО (от 3 до 6 в зависимости от марки быстрорежущей стали), в результате которых достигается существенное повышение вязкости, прочности, твердости и износостойкости быстрорежущих сталей по сравнению с традиционной термообработкой.

В заключение следует отметить, что применение УЦТО для различных быстрорежущих сталей приводит к одновременному повышению ударной вязкости быстрорежущих сталей в 1,5-1,7 раза, прочности на изгиб на 10-15%, поверхностной твердости на HRC 1,5-2,5 выше, по сравнению с традиционной термообработкой. Следует отметить, что благодаря особенностям технологии УЦТО поверхностная твердость режущего инструмента из быстрорежущих сталей на HV 50-100 выше, чем в сердцевине. Последнее положительно сказывается на эксплуатационных свойствах режущего инструмента. Лабораторные испытания на износ показали, что стойкость концевых фрез из различных быстрорежущих сталей, упрочненных УЦТО возросла до 2,1-2,5 раза.

Исследование микроструктуры показало, что улучшение механических и технологических свойств быстрорежущих сталей, прошедших УЦТО, связано с измельчением структурных составляющих (зерен и карбидных частиц) и получением однородного химического состава, повышением степени легированности α -твердого раствора вольфрамом, молибденом, ванадием, хромом, уменьшением количества остаточного аустенита.

ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Промышленные испытания термоциклически упрочненного режущего инструмента, проведенные в Беларуси, России, Словакии, Чехии, Польше и Китае, показали увеличение эксплуатационной стойкости режущего инструмента в 1,5-10 раз выше, по сравнению с традиционно термообработанным (табл.2).

Таблица 2 - Результаты промышленных испытаний режущего инструмента, упрочненного УЦТО

Вид инструмента	Марка быстрорежущей стали	Повышение износостойкости инструмента, раз
фрезы	P6M5, S6-5-2, P18	1,6 - 6,3
резцы	P6M5	1,6 - 2
сверла	P6M5, S6-5-2, P18	1,8 - 4,2
развертки, зенкера	P6M5, P18, P9M4K8МП	1,5 - 4
метчики	P6M5, S6-5-2, P18, P9M4K8МП	2 - 10
протяжки	P6M5, P18	1,8 - 2,6

Процесс использован на нескольких предприятиях Беларуси и России. Применяя «упрочняющую термоциклическую термообработку» некоторые белорусские предприятия в настоящее время изготавливают для нужд аэрокосмических компаний России: «САЛЮТ», «УМПО», «Пермские Моторы», «Протон», «Авиадвигатель», «ИСКРА», «ДУКС» и др. различных режу-

щий инструмент такой, как мелкоразмерные метчики, сверла, развертки, зенкера, протяжки и другой тонкий и длиномерный инструмент, предназначенный для механической обработки нержавеющей, жаропрочных и других труднообрабатываемых сталей и сплавов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федюкин В.К. Термоциклическая обработка сталей и чугунов. – Л.: ЛГУ, 1977, - 143 с.
2. Федюкин В.К. Метод термоциклической обработки металлов. – Л.: ЛГУ, 1984, - 192с.
3. Термоциклическая обработка сталей, сплавов и композиционных материалов./Под ред. М.Х. Шоршорова – М.: Наука, 1984, - 186 с.
4. Федюкин В.К., Смагоринский М.Е. Термоциклическая обработка металлов и деталей машин. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1989, - 255 с.: ил.
5. Ф.С.Новик Математические методы планирования экспериментов в металловедении, ч. IV, М., МИСиС, 1971.

УДК 621.793

Коробейников В.В., Сокоров И.О., Володько А.С.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ОПЛАВЛЕННЫХ И НЕОПЛАВЛЕННЫХ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ САМОФЛЮСУЮЩИХСЯ МАТЕРИАЛОВ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

В настоящее время в связи с тем, что все больше узлов и агрегатов автомобилей работает в тяжелых эксплуатационных условиях – при постоянно возрастающих скоростях и нагрузках – серьезно ужесточаются требования к качеству продукции машиностроительной отрасли, в частности свойствам рабочих поверхностей деталей. Расширение применения легированных сталей с высокими физико-механическими свойствами, которые для Республики Беларусь являются статьей импорта, малоэффективно из-за их высокой стоимости. Решить проблему можно с помощью нанесения защитных покрытий на рабочие поверхности изношенных деталей.

Проблема повышения надежности машин и оборудования в условиях интенсификации производства и энерго- и ресурсосбережения ставит задачу создания новых технологических процессов и применение новых материалов.

Повышение износостойкости и антифрикционных свойств поверхностей трения актуально для многих отраслей техники. Не менее важной является проблема восстановления и упрочнения быстроизнашивающихся деталей, на замену которых ежегодно расходуются огромные средства.

Для получения покрытий в настоящее время используют широкую гамму материалов: черные и цветные металлы, сплавы, керамика, композиционные материалы на различной основе. Выбор конкретного материала из столь широкой номенклатуры определяется как требуемыми эксплуатационными параметрами упрочняемой поверхности, так и экономическими соображениями. Как известно, при газотермическом нанесении покрытий затраты на материал обычно являются основной статьей расходов. Поэтому в настоящее время активно ведется разработка новых материалов, обладающих низкой стоимостью при высоком уровне обеспечиваемых свойств.

Особым случаем применения покрытий являются износостойкие покрытия системы Ni – Cr – В – Si, в том числе композиции из них. Такие покрытия позволяют не только увеличить ресурс работы машины и восстановить изношенные детали, но и заменить дефицитные и дорогостоящие материалы более дешевыми. Покрытия на основе Ni – Cr – В – Si обладают

высокой твердостью, износостойкостью, устойчивы к химически-активным средам, имеют достаточно высокую рабочую температуру [1].

В работе проанализированы существующие методы повышения адгезии газопламенных покрытий на деталях, работающих в условиях трения, изучена возможность получения покрытий из композиций на основе самофлюсующихся материалов.

Наиболее приемлемым для использования в различных технологических линиях является метод газопламенного и плазменного напыления. Универсальность и эффективность этих методов напыления антифрикционных и износостойких покрытий обуславливает возможность их применения во всех типах производства, в ремонтных организациях и подразделениях. Но газопламенное напыление наиболее дешевле по сравнению с плазменным напылением и легко реализуемо на предприятии и вследствие чего получило широкое распространение во всех типах производств из-за его универсальности и эффективности. Однако низкая скорость напыляемых частиц приводит к тому, что этот способ напыления позволяет получить покрытия со значительной пористостью (до 10%), которую можно удалить различными видами оплавления.

Сущность процесса газопламенного напыления заключается в расплавлении напыляемых материалов газовым пламенем и распылении их сжатым. Источником тепловой энергии является струя продуктов сгорания горючих газов (ацетилен, природный газ, пропан-бутан, водород, МАФ и др. в смеси с кислородом). Напыляемый материал подается в высокотемпературную зону пламени в виде порошка, стержней или проволоки.

Для газопламенных аппаратов типичны скорости потока газа ниже 700 м/с, частиц порошка до 50—100 м/с, производительность напыления 1...10 кг/ч, прочность сцепления до 50 МПа, температура частиц распыляемого материала близка к температуре плавления.

При газопламенном напылении сравнительно невысокая температура пламени (до 3500 К) ограничивает круг распыляемых материалов. С помощью данного метода могут наноситься покрытия из относительно легкоплавких материалов (цинк, медь, алюминий, сплавы на основе никеля и железа, полимерные материалы). Однако низкая стоимость применяемого оборудования обеспечивает этому методу широкое применение.

Основным недостатком данного метода является низкое качество покрытий из-за относительно невысоких скоростей напыляемых частиц и большого содержания окислов в покрытии. Значительно ограничивают применение данного метода низкое теплосодержание струи и малый процент использования напыляемого материала. Необходимость зажигания и регулирования пламени вызывает неудобства работы с аппаратурой и затрудняет автоматизацию процесса. Основные достоинства данного метода:

- возможность нанесения многослойных покрытий из различных металлов и сплавов, в том числе при сочетании плотных и твердых нижних слоев с мягкими верхними, последнее имеет большое значение для улучшения прирабатываемости износостойких покрытий;
- возможность нанесения покрытий на большие и малые поверхности практически любой толщины;
- покрытие может наноситься равномерно, с точным контролем толщины слоя;
- процесс плазменного напыления может быть автоматизирован и механизирован, что открывает возможности применения его в крупносерийном и массовом производствах.

Одним из упрочняющих способов термической обработки напыленных покрытий является оплавление покрытий из композиций на основе самофлюсующихся материалов. Сущность его заключается в том, что напыленный слой и прилегающий к нему материал основы должны быть нагреты до температуры, близкой к температуре плавления напыляемого материала. При этом происходит уплотнение покрытия, а прочность сцепления его с основой возрастает до 180...220 Мпа [2].

Механизм процесса оплавления напыленных покрытий из порошковых хромоникелевых сплавов, легированных бором и кремнием, можно представить следующим образом. В

запыленном слое в процессе напыления на поверхности расплавленных или нагретых до высоких температур частиц образуются тонкие пленки окислов бора, кремния и хрома. Термодинамический потенциал реакции окисления показывает, что в первую очередь будет происходить окисление бора и кремния. Однако содержание этих элементов в сплавах сравнительно мало и наибольшее количество окислов на поверхности образует хром.

В процессе нагрева оплаваемого покрытия и основы кислород вступает в реакции с бором, кремнием и хромом, образуя окислы SiO_2 , B_2O_3 , Cr_2O_3 . Эти окислы способны объединяться с образованием легкоплавких шлаков. Основная роль при этом отводится борному ангидриду, который, химически воздействуя на окисную пленку основного металла и частицы оплаваемого покрытия, связывает окислы в бораты.

Качество оплавленного слоя во многом зависит от источника нагрева и технологии оплавления. Процесс оплавления покрытий, напыленных самофлюсующимися сплавами, осуществляют путем нагрева покрытия и поверхности изделия газокислородным пламенем, токами высокой частоты (ТВЧ), в печах с контролируемой атмосферой, электронным и ионным лучом, микроплазмой или в жидких теплоносителях.

Оплавление напыленных слоев с помощью газокислородного пламени является наиболее распространенным способом в силу его универсальности и относительно простого оборудования. Оплавление осуществляется с помощью многопламенных закалочных плоских или кольцевых горелок нормальным или слегка науглероживающим пламенем после предварительного подогрева всей детали. Предварительный подогрев детали производят горелкой или в печах для отжига. О нормальном ходе процесса судят по «запотеванию» поверхности покрытия, т.е. при переходе в пластичное состояние покрытие начинает блестеть. Эту операцию должны выполнять квалифицированные рабочие. После оплавления необходимо обеспечить медленное охлаждение в асбесте, песке и т.п.

Одним из факторов, оказывающих влияние на качество покрытий, является химический состав и размер частиц, наносимых на рабочую поверхность детали.

При выборе материалов для газопламенного напыления учитывались следующие положения:

- высокие давления в месте контакта требуют сравнительно высокой твердости покрытия. В противном случае они могут продавливаться. Эти же условия накладывают отпечаток и на толщину покрытия, которая должна быть не менее 1,5 мм;

- гранулометрический состав. Слишком мелкие частицы перегреваются и, слипаясь, засоряют сопло горелки, а слишком крупные не успевают плавиться и ухудшают качество покрытия. Одним из факторов, оказывающих влияние на равномерность подачи порошкового материала, является его текучесть. Большинство порошков, применяемых при напылении, обладает наилучшей текучестью при зернистости 40...80 мкм. Форма частиц в идеальном случае должна быть сферической, чтобы можно было обеспечить равномерную подачу и равномерный их прогрев;

- для повышения физико-механических свойств покрытий, полученных газопламенным напылением, напыленные слои должны подвергаться термической обработке. Наиболее оптимальным способом термической обработки напыленных покрытий является их оплавление. При этом методе термической обработки пористость покрытий можно свести к нулю, снять остаточные напряжения и значительно повысить физико-механические свойства покрытий. Для применения термической обработки в виде оплавления напыленных покрытий необходимо обеспечить их самофлюсование. Такими свойствами обладают порошковые сплавы, легированные бором и кремнием. Бор и кремний в процессе оплавления образуются борсилкаты, которые раскисляют поверхность частиц и основы, увеличивают смачиваемость поверхностей и снижают температуру плавления сплава. Гранулометрический состав порошка может быть рассчитан.

Выбор материалов для напыления является одним из важнейших этапов в процессе нанесения покрытия. Выбор материалов производится в зависимости от свойств поверхности (в данном случае твердости) которые нужно получить. Для обеспечения максимальной твер-

дости и износостойкости при минимальной пористости покрытий наилучшими материалами для напыления являются самофлюсующиеся сплавы [3, 4].

На мировом рынке представлены самофлюсующиеся сплавы производства известной американской фирмы Sulzer Metco на основе Ni, Cr легированные различными элементами. Но из-за высокой стоимости этих порошков в данной работе были использованы порошки производства СНГ (НПО «Тулачермет», Россия и Торезского завода «Твердосплав», Украина). При этом для достижения определенных физико-механических и триботехнических свойств и для удешевления напыленного покрытия были разработаны композиции различных порошков, которые представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Композиции для тяжело нагруженных валов

№ композиции	Состав композиции (в объемных долях)
1	ПТ-НА-01 (1/3) + ПР-Х4Г2Р4С2Ф (2/3)
2	ПТ- ЮНХ16СР3 (1/2) + ПР-Х4Г2Р4С2Ф (1/2)
3	ПТ-ЮНХ16СР3 (1/3) + ПГ-19М-01 (2/3)
4	ПТ-НА-01 (1/3) + ПГ-19М-01 (2/5) + ПР-Х4Г2Р4С2Ф (1/3)
5	ПР-НД42СР (1/3) + ПР-Х4Г2Р4С2Ф (1/3) + ПТ-НА-01 (1/3)
6	ПТ-19Н-01 (1/2) + ПР-Х4Г2Р4С2Ф (1/2)

Таблица 2

Композиции для вытяжных роликов

№ композиции	Состав композиции (в объемных долях)
1	ПГ-СР3 (1/2) + ПР-Х4Г2Р4С2Ф (1/2)
2	ПР-НД42СР (1/2) + ПР-Х4Г2Р4С2Ф (1/2)
3	ПГ-10К-01 (1/2) + ПР-Х4Г2Р4С2Ф (1/2)
4	ПР-Х4Г2Р4С2Ф (1/3) + ПГ-СР3 (1/3) + ПГ-10К-01 (1/3)

На процесс дробеструйной обработки влияет вид абразивного материала, форма, размеры, требования, предъявляемые к свойствам покрытий.

Для подготовки поверхностей деталей под напыление был выбран метод дробеструйной обработки колотой чугунной дробью ДЧК1,8 545 ГОСТ 11964-81 грануляцией 1...2 мм. Режимы обработки следующие:

- давление сжатого воздуха 0,6 МПа;
- дистанция обработки 40...50 мм.

Для оплавления образцов был выбран способ оплавления газопламенной горелкой типа «Москва-6» на установке ТРУ-БЛИ с пультом управления ПУ – 1 со следующими режимами:

- давление МАФ смеси-0,1 МПа;
- давление кислорода 0,3 МПа;
- давление воздуха 0,18 МПа;
- дистанция напыления 200 мм;
- производительность 4,5 кг/ч.

Оплавление осуществлялось до «запотевания» поверхности (температура 1123-1273 К).

После оплавления упрочненная поверхность образцов обрабатывалась эльборовым кругом до шероховатости 0,8 Ra. Толщина напыленного слоя после обработки – 2,5-3,5 мм.

В настоящей работе испытания образцов на износостойкость проводились экспресс-методом на машине торцевого трения по схеме диск – втулка. Основой для машины торцевого трения является настольный вертикально-сверлильный станок модели 2Н112. Изнашивание образца 1 по схеме 1, осуществляется контртелом 6, представляющего собой втулку из твердого сплава ВК8. Нагрузка Р на образец 1 осуществляется набором грузов через шпин-

дель-рейку. На образце 1 в процессе трения образуется канавка, глубина которой представляет величину износа. Была задана нагрузка на образец 60 Н при скорости скольжения $V_{ск}=1,8$ м/с.

Скорость изнашивания определяется как среднее арифметическое пяти замеров по формуле [5]:

$$V = h/t, \quad (1)$$

где h – линейный износ за период испытаний, мкм; t – период испытаний, час.

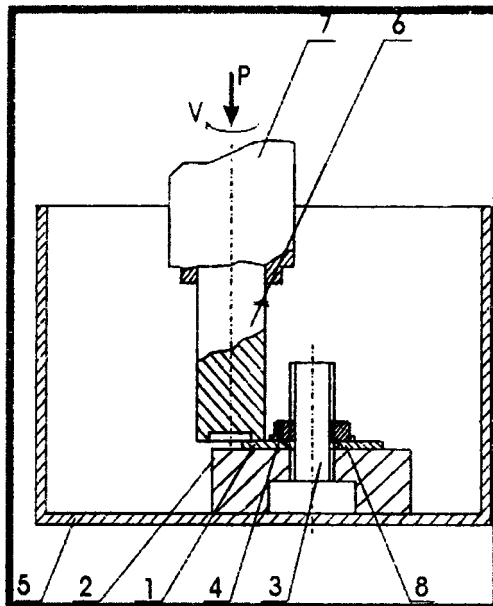


Рисунок 1- Схема установки для проведения испытаний износостойкости:

1 – испытуемый образец; 2 – подставка; 3 – шпилька;

4 – фиксирующая гайка; 5 – емкость;

Износостойкость рассчитывалась как величина, обратная скорости изнашивания [5]:

$$I = 1/V. \quad (2)$$

Далее строились сравнительные диаграммы износостойкости рис. 2 и 3.

$I \times 10^{-3}, \text{ч/мм}$

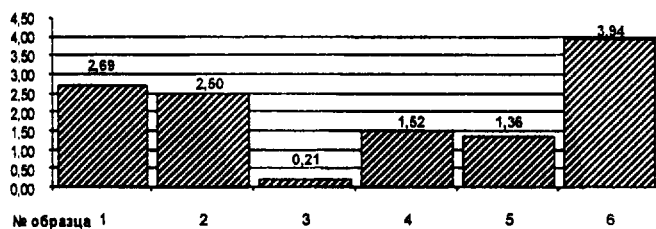


Рисунок 2 - Сравнительная диаграмма износостойкости покрытий

$I \times 10^{-3}, \text{ч/мм}$

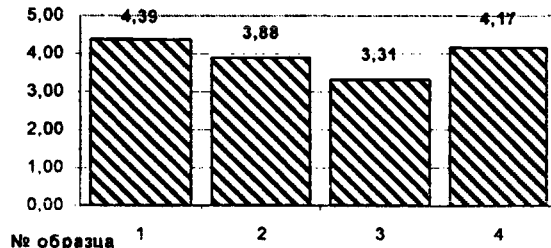


Рисунок 3 - Сравнительная диаграмма износостойкости оплавленных покрытий на основе самофлюсов

Анализ результатов проведенных исследований показал, что можно рекомендовать для упрочнения тяжело нагруженных валов композиции порошков марки ПТ-НА-01, ПТ-ЮНХ16СРЗ, ПТ-19Н-01 и ПР-Х4Г2Р4С2Ф. Эти покрытия можно обрабатывать лезвийным инструментом с последующим шлифованием. Однако у неоплавленных покрытия наблюдается пористость порядка 5% и ниже сопротивляемость агрессивным средам. Пористость может быть использована для задержки смазки, что существенно при недостаточной смазке между трущимися поверхностями. Для волочильного оборуд-

дования рекомендованы износостойкие покрытия из композиций порошков марки ПП-СРЗ, ПГ-10К-01 и ПР-Х4Г2Р4С2Ф. У этих покрытий высокая твердость и коррозионная стойкость. Рекомендуемая последующая обработка – шлифование. Структура покрытия близка к монолитной (однородной).

ЛИТЕРАТУРА

1. Куприянов И.Л., Геллер М.А. Газотермические покрытия с повышенной прочностью сцепления.- Мн. Навука і тэхніка, 1990.-176 с. 2. Кудинов В.В. Бобров Г.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. - М.: Металлургия, 1992. – 432 с. 3. Газотермические покрытия из порошковых материалов. Справочник / Ю.С. Борисов, Ю.А. Харламов, С.А. Сидоренко, Е.Н. Ардатовская. – Киев.: Наукова думка, 1987. – 544 с. 4. Теория и практика нанесения защитных покрытий / П.А. Витязь, В.С. Ивашко, А.Ф. Ильющенко и др. - Мн.: Беларуская навука, 1998. - 583 с. 5. Исследование и изобретательство в машиностроении. Практикум / Под общ. Ред. М.М. Канне. – Мн.: УП «Технопринт», 2003. – 237 с.

УДК 621.923.7

Киселева Н.А., Синькевич Ю.В, Моисеенко С.И.

РАЗРАБОТКА ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ МЕТАЛЛООБРАБОТКИ– ВКЛАД В ИННОВАЦИОННОЕ РАЗВИТИЕ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Эпоха индустриализации в Европе постепенно сменяется эрой инновационной, когда решающее развитие приобретают наукоемкие технологии и разработки. В конце XX столетия Организация экономического сотрудничества и развития начала реализовывать концепцию создания национальных инновационных систем. Задача построения конкурентоспособной и динамичной экономики, основанной на знаниях, стоит сегодня и перед Беларусью. Решением правительства Республики Беларусь разработана и одобрена Концепция национальной инновационной системы. Главной целью разрабатываемой программы является перевод национальной экономики в режим интенсивного инновационного развития в рамках белорусской экономической модели. Она предусматривает взаимную увязку всех звеньев инновационной цепочки: научная идея – научная разработка – освоение в производстве – серийное производство. Главой государства утверждены приоритетные направления научно-технической деятельности, фундаментальных и прикладных научных исследований в Республике Беларусь на 2006–2010 годы. Ускорение социально-экономического развития страны предусматривает всемерную интенсификацию производства на основе научно-технического прогресса. В разрезе отраслей доминирующее положение на рынке инновационной продукции занимают предприятия машиностроения и металлообработки, топливной, химической и нефтехимической промышленности [1]. Поэтому особенно важно уделять пристальное внимание развитию и продвижению технологий именно в этих отраслях. А достижения в машино- и приборостроении зависят, в свою очередь, от процессов обработки металлов.

В машиностроении с каждым годом все шире используются труднообрабатываемые стали и сплавы, применение которых позволяет уменьшить массу конструируемых машин, повысить их мощность и улучшить эксплуатационные характеристики. Нетрадиционные методы обработки, позволяющие получать требуемую точность и качество, находят все боль-

шее применение не только в исследовательских лабораториях, но и в реальных производствах. Поэтому разработка технологических решений для эффективной обработки труднообрабатываемых материалов является актуальной задачей [2].

Под точностью в машиностроении принято понимать степень приближения истинного параметра процесса, вещества, предмета к его номинальному значению. Это одна из основных характеристик деталей машин и приборов. Точность детали, полученная в результате обработки, зависит от многих факторов и определяется отклонениями от геометрической формы детали или ее отдельных элементов, отклонениями действительных размеров детали от номинальных и отклонениями поверхностей и осей детали от точного взаимного расположения. Точность обработки непосредственно связана с проблемой повышения эксплуатационных качеств машин [3]. Во многих случаях получение необходимых характеристик машин может быть достигнуто применением более точной обработки деталей. В то же время вопросы точности оказывают непосредственное влияние на построение технологического процесса изготовления детали. Повышение точности обработки обеспечивает экономию материала за счет уменьшения межоперационных припусков, снижения трудоемкости технологического процесса изготовления данной детали, а также сокращает трудоемкость сборки машины [3]. Особое значение приобретают вопросы обеспечения заданной точности при автоматизации производства. Ведь автоматизация является двигателем интенсификации внедрения инновационных технологий в производство, а значит вопрос установления необходимой точности и способов ее достижения особенно актуален.

Не менее важной характеристикой получаемой детали является качество ее поверхности, которое можно охарактеризовать двумя основными признаками: физико-механическими свойствами поверхностного слоя металла и шероховатостью поверхности. Качество обработанной поверхности металла обуславливается свойствами металла и методами ее обработки. В настоящее время внедрению принципиально новых высокоэффективных технологических процессов, обеспечивающих не только снижение трудоемкости изготовления, но и повышение качества и эксплуатационных характеристик современных машин, уделяется большое внимание и ставится вопрос о развитии специальных отраслей машиностроения, изменении структуры процессов обработки материалов. Особенно остро этот вопрос стоит в связи с широким использованием таких материалов, для которых традиционные способы резания металлов не дают положительных результатов. Именно поэтому появились и интенсивно развиваются различные электрофизические и электрохимические методы обработки материалов – электроэрозионный, электрохимический, ультразвуковой, светолучевые методы и др. Эти методы можно объединить в два основных направления – термические и химические, для которых характерна независимость скорости съема металла от его твердости. Электрохимические и электрофизические методы обработки материалов за последние годы все больше применяются как наиболее эффективные и экономичные, а нередко и как единственно возможные. Расширяется внедрение в промышленность так называемой совмещенной (комбинированной) электрохимической и электрофизической обработки в тех случаях, когда традиционные методы формообразования (обработка резанием, штамповка и др.) дополняются электрохимическим и (или) электрофизическим воздействием на обрабатываемый материал в целях интенсификации операций [4].

По технологическому назначению [5] все разновидности электро-физико-химической обработки (ЭФХМО) можно условно подразделить на две группы: формообразующие и отделочные. К первой относят и заготовительные операции, выполняемые как электрохимической, так и комбинированной обработкой; вторая группа операций включает, в частности, галтование, травление, полирование и др. ЭФХМО и комбинированные методы обработки характеризуются приведенными ниже основными технологическими особенностями, отличающими их от традиционных технологий, которые основаны преимущественно на силовом (контактном) воздействии инструмента на заготовку [6]:

1. Обработка различных материалов практически с любыми физико-механическими свойствами осуществляется без приложения значительных механических усилий или без

непосредственного механического контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью заготовки;

2. Широкие технологические возможности изменения формы, размеров, шероховатости и свойств обрабатываемых поверхностей заготовок;

3. Получение сложных по форме поверхностей заготовок при сравнительно простой кинематике процессов;

4. Незначительная зависимость (а зачастую и полная независимость) основных технологических режимов от физико-механических свойств обрабатываемого материала и сравнительно простое их изменение, при котором, как правило, не требуется замены оборудования, оснастки и инструмента;

5. Минимальное влияние технологических особенностей процессов на механические свойства и эксплуатационные характеристики деталей;

6. Относительная простота, низкая себестоимость и высокая стойкость применяемого инструмента, а иногда и отсутствие его износа. Во многих процессах ЭФХМО инструмент в классическом его понимании вообще отсутствует, а его функции выполняет сформированный соответствующим образом поток электронов, ионов и т.д.;

7. Большие возможности интенсификации многих технологических процессов механической обработки, нанесения покрытий, сварки, пайки и др., выполняемых традиционными методами с большой трудоемкостью и низким качеством обработки;

8. Возможность механизации и автоматизации основных технологических и вспомогательных переходов вплоть до применения робототехнических средств и комплексной автоматизации операций и процессов;

9. Возможность сокращения, а во многих случаях и исключения применения остродефицитных и дорогих инструментальных сталей и сплавов, а также потерь обрабатываемых материалов.

Однако наряду с положительными особенностями ЭФХМО им присущи и некоторые недостатки или ограничения, которые обусловлены их физической сущностью. К ним относятся: повышенная энергоемкость процессов при равнозначных с механической обработкой производительности и качественных показателях, относительная громоздкость применяемого технологического оборудования и оснастки, а также необходимость применения во многих случаях специальных источников питания электрическим током, устройств для подачи, сбора, хранения и очистки рабочей жидкости, необходимость размещения технологического оборудования в отдельных помещениях, связанная с повышенной пожарной опасностью и специфическими требованиями по охране труда.

Термические методы обработки основаны на том, что путем концентрации энергии на маленьком участке детали материал можно расплавить или испарить. Энергия может подаваться в форме теплоты (газопламенная или плазменная обработка), света (лазеры) или путем электронной бомбардировки (электронный луч и электрическая эрозия).

Химические методы кроме способов травления включают различные методы электрохимической обработки (ЭХО). ЭХО металлов занимает важное место в современном машиностроении. Она основана на принципе локального анодного растворения металла при высокой плотности тока в проточном электролите. ЭХО металлов и сплавов на импульсных режимах обработки в настоящее время является одним из эффективных методов, в частности, для электрохимического формообразования. Среди методов импульсной обработки часто используются различные варианты импульсной анодно-катодной обработки [7]. Появившиеся и апробированные новые технологические схемы ЭХО позволяют значительно увеличить точность обработки. Однако наибольшей точности и наименьшей шероховатости поверхности можно достичь на отделочных операциях ЭХО. Поэтому в комплексе ЭХО заметное место занимает группа методов, основной целью которых является выполнение отделочных операций для изменения свойств и состояния поверхности деталей (электрохимическое полирование, шлифование, глянецование и т.п.). Одним из перспективных методов отделочной ЭХО является электроимпульсное полирование (ЭИП), технология которого разработана в Белорусском национальном техническом университете [8].

ЭИП предназначено для высококачественной финишной обработки сложнопрофильных, преимущественно наружных поверхностей изделий из коррозионно-стойких и углеродистых сталей, цветных металлов и сплавов, удаления заусенцев и притупления острых кромок, высокоэффективной подготовки поверхности перед нанесением гальванических и ионно-вакуумных покрытий, очистки поверхности деталей от минеральных и органических загрязнений и удаления окалины небольшой толщины. Минимально достижимая шероховатость поверхности при ЭИП предопределяется микроструктурой металла и составляет $Ra = 0,03...0,02$ мкм, при этом снижение шероховатости поверхности определяется уровнем исходной шероховатости и продолжительностью обработки. В настоящее время ЭИП имеет широкое промышленное применение для обработки деталей, в том числе прецизионных из различных металлов и сплавов, а иногда является единственно возможным методом [9]. В свете последних тенденций развития интереса к ЭИП можно отметить, что этот метод обработки по сравнению с наиболее близкими аналогами (электрохимическим полированием, глянецванием, доводкой) обладает рядом существенных преимуществ, в числе которых наиболее важными является равномерность съема металла на различных участках заготовки, а также возможность обработки деталей различной формы и размеров с высокой производительностью и стабильным качеством.

Однако одно лишь новое не дает гарантии успеха. И если новый процесс не обеспечивает значительных преимуществ и реальной экономии, он не будет существовать. Во многих случаях ясно, что ЭИП имеет условия для существования; вопрос заключается в том, как велика роль, которую будет играть этот процесс в металлообработке в будущем. ЭИП должно привлечь внимание инженеров-технологов, так как предлагает высокую производительность процесса в совокупности с высокими показателями качества и точности обработанной поверхности. Но подобно всем методам ЭИП имеет преимущества и недостатки. К недостаткам этого процесса в настоящее время можно отнести: отсутствие или недостаточность знаний инженеров-технологов в вопросах механизма ЭИП, гидродинамики жидкостей, фильтровании, утилизации отработанного электролита, а также относительно большие электрические мощности и стоимость оборудования. Большинство этих недостатков можно преодолеть только путем накопления опыта. Поэтому исследования, направленные на изучение физико-электрохимических процессов, протекающих на поверхности электродов и в приэлектродных слоях, актуальны и практически важны. Понимание их роли и закономерностей протекания позволит значительно расширить область практического применения ЭИП. В настоящее время существует реальная возможность ознакомления инженеров-технологов прежде всего с возможностями ЭИП, его преимуществами и недостатками. Безусловно, дальнейшее изучение этого процесса необходимо для его успешного применения, однако даже то, что уже известно, позволяет его широко использовать, а возрастающая потребность в высококачественных, точных деталях делает технологию ЭИП все более востребованной. Ведь оптимизация обработки деталей в первую очередь возможна с применением новых технологий, разработка которых должна стать главным приоритетом развития машиностроения на современном этапе.

Положительной тенденцией последних лет стало увеличение научных кадров. Возросшее число ученых и исследователей имеет все шансы превратить идею внедрения собственных новых разработок и технологий в реальное производство. Наряду с реализацией государственных научно-технических программ все шире развивается взаимодействие науки и производства посредством заключения и исполнения двусторонних договоров. Создаются и успешно работают совместные научные лаборатории, кафедры при предприятиях, опытно-экспериментальные производства. Это актуально и важно особенно сейчас, когда многие предприятия республики вновь начинают работать в полную силу и стремятся производить инновационную продукцию, способную конкурировать с лучшими зарубежными образцами и быть востребованной как на внутреннем, так и на зарубежном рынках [1].

Республика Беларусь является полноправным членом Международного сообщества государств, избравших стратегию инновационного развития. Инновации становятся не только главным фактором развития национальной экономики, но и важнейшим условием социального прогресса. Высокий интеллектуальный потенциал белорусского общества, всестороннее развитие

личности, разумная инновационная политика белорусского государства выступают в качестве гаранта решения актуальных проблем страны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Семашко В. Стратегия инновационного развития / В. Семашко // Республика – Экономическая среда. – 2006. – 4 октября – с. 2.
2. Асцатуров Ю.Г. Электрохимические основы и разработка технологических решений эффективной обработки коррозионной стали: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.17.03 / Ю.Г. Асцатуров; Южно-Российский гос. технич. ун-т (Новочеркасский политехнический ин-т). – Новочеркасск, 2005. – 18 с.
3. Корсаков В.С. Точность механической обработки. – М.: Машиностроение, 1961. – 377 с.
4. Артамонов Б.А. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. Учеб пособие (в 2-х томах) Т. II. Обработка материалов с использованием высококонцентрированных источников энергии / Б.А. Артамонов, Ю.С. Волков, В.И. Дрожалова и др; под ред. В.П. Смоленцева. – М.: Высш. шк., 1983. – 208 с.
5. Де Барр А.Е. Электрохимическая обработка (перевод с англ.) / А.Е. Де Барр, Д.А. Оливер. – М.: Машиностроение, 1973. – 184 с.
6. Байсунов И.А. Электрохимическая обработка металлов: Учеб. пособие для СПТУ. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1988. – 184 с.
7. Яхова Е.А. Анодное растворение железа и малоуглеродистой стали в растворах нитратов и хлоратов при импульсной анодно-катодной обработке: автореф. дис. канд. хим. наук: 05.17.03 / Е.А. Яхова; Приднестр. гос. ун-т им. Т.Г. Шевченко. – М., 2002. – 15 с.
8. Головкина Е.Я. Метод электроимпульсного полирования металлов / Е.Я. Головкина, С.Н. Терехов, Ю.В. Синькевич, О.И. Авсеевич // Машиностроение. – Минск, 1988. – Вып. 13. – С. 40 – 43.
9. Синькевич Ю.В. Электроимпульсное полирование прецизионных отверстий / Ю.В. Синькевич, Г.Я. Беляев, И.Н. Янковский, Н.А. Киселева // Машиностроение: сб. научн. трудов. Вып. 22. – Мн.: БНТУ, 2006. – С. 44 – 48.

УДК 621.79

Беляева Г.И., Беляев Г.Я., Крушевский А.Е., Присевок А.Ф.

РАСЧЕТ ФОРМЫ ПИТАТЕЛЯ ПЛАЗМОТРОНА

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

При газопламенном и плазменном напылении порошковых материалов, особенно с малыми значениями удельного веса (порошки на основе пластических материалов и др.), часто наблюдаются случаи прекращения подачи порошка из питателя. Это объясняется тем, что в питателе образуется, несмотря на наличие избыточного давления, купол из порошка, который и держит на себе всю массу порошковой смеси. В связи с этим представляется важным найти математические зависимости, связывающие размерные характеристики формы питателя, физико-механические свойства порошков и параметры процесса напыления.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О СВОДООБРАЗОВАНИИ

Запишем дифференциальные уравнения сыпучей среды для плоского элемента (плоская задача) в полярных координатах:

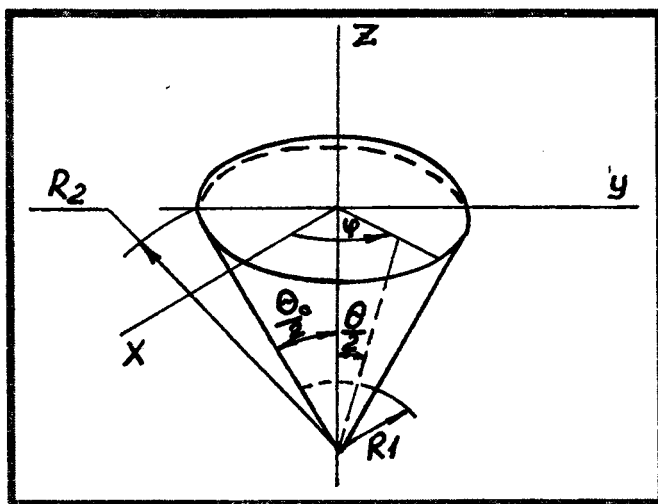


Рисунок 1 – К решению задачи о сводообразовании

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\varphi}{r} + \frac{\partial \tau}{r \cdot \partial \varphi} = \gamma; \quad (1)$$

$$\frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial(r^2 \cdot \tau)}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_\varphi}{\partial \varphi} = 0. \quad (2)$$

Так как растягивающие напряжения для сыпучей среды не существуют, то в расчет принимаются только напряжения сжатия и касательные напряжения. В уравнениях σ_r и σ_φ - нормальные напряжения сжатия; τ - касательные напряжения; γ - насыпная плотность (удельный вес) порошкового материала.

В качестве третьего уравнения используем равенство, учитывающее физико-механические свойства порошка.

$$\sigma_\varphi = \lambda \cdot \sigma_r = -\lambda \cdot p; \text{ причем, } \lambda > 0; \quad (3)$$

где λ - коэффициент бокового распора; p - радиальное давление внутри порошка.

Уравнения (1...3) справедливы для тех областей, в которых силы сцепления между частицами меньше сил трения, т.е.:

$$\tau < \tau_0 + f \cdot p, \quad (4)$$

где τ_0 - начальное сопротивление сдвигу; f - коэффициент трения.

Если равенство (4) нарушается, то это означает, что частицы порошка движутся друг относительно друга. Таким образом, задача сводится к тому, чтобы отыскать в питателе (бункере) область, где соблюдается предельный случай равновесия

$$\tau = \tau_0 + f \cdot p.$$

Учитывая зависимость (3), приведем уравнения (1,2) к виду

$$-\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial(r \cdot p)}{\partial r} + \frac{\lambda \cdot p}{r} + \frac{\partial \tau}{r \partial \varphi} = \gamma; \quad (5)$$

$$\frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial(r^2 \cdot \tau)}{\partial r} - \frac{\lambda \partial p}{r \partial \varphi} = 0. \quad (6)$$

Если теперь умножить уравнение (5) на r^3 и продифференцировать его по r , а уравнение (6) умножить на r^2 и продифференцировать по φ , затем вычтуть одно уравнение из другого, можно исключить τ и получить одно уравнение относительно искомого давления

$$-\frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 \cdot \frac{\partial(r \cdot p)}{\partial r} \right] + \lambda \cdot \left[\frac{\partial(r^2 p)}{\partial r} + r \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial \varphi^2} \right] = 3\gamma \cdot r^2,$$

или после упрощения

$$r^2 \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + r \cdot (4 - \lambda) \cdot \frac{\partial p}{\partial r} + 2(1 - \lambda) \cdot p - \lambda \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial \varphi^2} + 3\gamma \cdot r = 0. \quad (7)$$

Общее решение неоднородного уравнения (7) состоит из суммы общего решения однородного уравнения и частного решения неоднородного:

$$p = \bar{p} + p^*$$

Частное решение неоднородного уравнения p^* ищем в виде:

$$p^* = A \cdot r; \quad A(4 - \lambda) + 2(1 - \lambda) \cdot A = -3\gamma;$$

$$A = -\frac{3\gamma}{6 - 3\lambda} = -\frac{\gamma}{2 - \lambda}; \quad \text{тогда } p^* = -\frac{\gamma \cdot r}{2 - \lambda}.$$

Общее решение однородного уравнения

$$r^2 \cdot \frac{\partial^2 \bar{p}}{\partial r^2} + (4 - \lambda) \cdot r \cdot \frac{\partial \bar{p}}{\partial r} + 2(1 - \lambda) \cdot \bar{p} - \lambda \frac{\partial^2 \bar{p}}{\partial \varphi^2} = 0;$$

ищем в виде

$$\bar{p} = B(r) \cdot \cos \frac{2\pi \cdot n \cdot \varphi}{\varphi_0},$$

где $B(r)$ определяется из обыкновенного дифференциального уравнения Эйлера:

$$r^2 \cdot \frac{d^2 B}{dr^2} + (4 - \lambda) \cdot r \cdot \frac{dB}{dr} + 2(1 - \lambda) \cdot B + \lambda \frac{4\pi^2 n^2 B}{\varphi_0^2} = 0. \quad (8)$$

Решение уравнения (8) запишется в виде:

$$B(r) = r^m,$$

где m определяется из характеристического уравнения

$$m \cdot (m - 1) + (4 - \lambda) \cdot m + 2(1 - \lambda) + \lambda \frac{4\pi^2 n^2}{\varphi_0^2} = 0.$$

Откуда

$$m_{1,2} = \frac{-(3 - \lambda) \pm \sqrt{(1 - \lambda)^2 - \frac{16\pi^2 \cdot n^2 \cdot \lambda}{\varphi_0^2}}}{2}.$$

Тогда общим решением уравнения (7) будет:

$$p(r, \varphi) = \sum_{n=0}^{\infty} (C_{1n} \cdot r^{m_1} + C_{2n} \cdot r^{m_2}) \cos \frac{2\pi n \varphi}{\varphi_0} - \frac{\gamma \cdot r}{2 - \lambda}.$$

Произвольные постоянные C_{1n} и C_{2n} определяются из краевых условий при $r=R_1$ и $r=R_2$.

$$p = p_0 + \sum_{n=0}^{\infty} p_n \cos \frac{2\pi n \varphi}{\varphi_0}.$$

$$\text{При } r=R_1 \quad p=0; \quad \text{при } r=R_2 \quad C_{10} R_1^{-2} + C_{20} R_1^{-(1-\lambda)} = \frac{\gamma \cdot R_1}{2 - \lambda}; \quad (9)$$

$$C_{10} R_2^{-2} + C_{20} R_2^{-(1-\lambda)} = p_0 + \frac{\gamma R_2}{2 - \lambda};$$

$$\left. \begin{aligned} C_{1n} \cdot R_1^{m_1} + C_{2n} \cdot R_1^{m_2} &= 0 \\ C_{1n} \cdot R_2^{m_1} + C_{2n} \cdot R_2^{m_2} &= p_n \end{aligned} \right\} \quad n=1,2,3\dots \quad (10)$$

Решение уравнений (9) и (10) дает следующие выражения для коэффициентов C^b , C^a , C^h , C^z :

$$C_{10} = - \frac{p_0 \cdot R_1^{(1+\lambda)} \cdot \left[R_2^2 + \frac{\gamma(R_2^3 - R_1^3)}{p_0 \cdot (2 - \lambda)} \right]}{R_2^{1+\lambda} - R_1^{1+\lambda}} + \frac{\gamma \cdot R_1}{2 - \lambda};$$

$$C_{20} = \frac{p_0 \cdot R_2^2 + \frac{\gamma}{2 - \lambda} \cdot (R_2^3 - R_1^3)}{R_2^{1+\lambda} - R_1^{1+\lambda}};$$

$$C_{1n} = - \frac{p_n \cdot R_1^{m_2 - m_1}}{R_2^{m_1} \cdot (R_2^{m_2 - m_1} - R_1^{m_2 - m_1})};$$

$$C_{2n} = \frac{p_n}{R_1^{m_2} (R_2^{m_2 - m_1} - R_1^{m_2 - m_1})}.$$

Окончательно для давления p с учетом краевых условий имеем:

$$p(r, \varphi) = \frac{\left[R_2^2 \cdot p_0 + \frac{\gamma}{2-\lambda} \cdot (R_2^3 - R_1^3) \right] \cdot \left[r^{-(1-\lambda)} - R_1^{1+\lambda} \cdot r^{-2} \right]}{R_2^{1+\lambda} - R_1^{1+\lambda}} + \frac{\gamma}{2-\lambda} \left(\frac{R_1^3}{r^2} - r \right) + \sum_{n=1}^{\infty} p_n \cdot \frac{\left(r^{m_2} - R_1^{m_2-m_1} \cdot r^{m_1} \right)}{R_2^{m_1} \cdot \left(R_2^{m_2-m_1} - R_1^{m_2-m_1} \right)} \cdot \cos \frac{2\pi \cdot n \cdot \varphi}{\varphi_0}. \quad (11)$$

Полагая, что $r|\varphi = \pm \frac{\varphi_0}{2} = 0$, для касательных напряжений соответственно получим

$$\tau = \left(\varphi \pm \frac{\varphi_0}{2} \right) \cdot \left\{ \gamma \cdot r + \frac{\left[p_0 \cdot R_2^2 + \frac{\gamma}{2-\lambda} \cdot (R_2^3 - R_1^3) \right] \cdot (1+\lambda) \cdot R_1^{1+\lambda} \cdot r^{-2}}{R_2^{1+\lambda} - R_1^{1+\lambda}} - \frac{\gamma}{2-\lambda} \left[(2-\lambda) \cdot r + \frac{(1+\lambda) \cdot R_1^3}{r^2} \right] \right\} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{p_n \cdot \varphi_0 \cdot \sin \frac{2\pi n \varphi}{\varphi_0} \cdot \left[r^{m_2} (1-\lambda+m_2) - R_1^{m_2-m_1} \cdot r^{m_1} \cdot (1-\lambda+m_1) \right]}{2\pi n R_2^{m_1} \cdot \left(R_2^{m_2-m_1} - R_1^{m_2-m_1} \right)}. \quad (12)$$

Для составления уравнения линии сводаобразования используем зависимость

$$\tau = \tau_0 + f \cdot p,$$

где τ_0 - начальное сопротивление сдвигу.

$$\left(\varphi \pm \frac{\varphi_0}{2} \right) \cdot \left\{ \gamma \cdot r + \frac{(1+\lambda) \cdot R_1^{1+\lambda} \cdot \left[p_0 \cdot R_2^2 + \frac{\gamma \cdot f \cdot (R_2^3 - R_1^3)}{2-\lambda} \right]}{r^2 \cdot \left(R_2^{1+\lambda} - R_1^{1+\lambda} \right)} - \frac{\gamma}{2-\lambda} \left[(2-\lambda) \cdot r + \frac{(1+\lambda) \cdot R_1^3}{r^2} \right] \right\} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{p_n \varphi_0 \cdot \sin \frac{2\pi n \varphi}{\varphi_0} \cdot \left[(1-\lambda+m_2) \cdot r^{m_2} - (1-\lambda+m_1) \cdot r^{m_1} \right]}{2\pi n R_2^{m_1} \cdot \left(R_2^{m_2-m_1} - R_1^{m_2-m_1} \right)} = \\ = \tau_0 + f \cdot \left\{ \frac{p_0 \cdot R_2^2 + \frac{\gamma}{2-\lambda} \cdot (R_2^3 - R_1^3)}{R_2^{1+\lambda} - R_1^{1+\lambda}} \cdot \left[r^{-(1-\lambda)} - R_1^{1+\lambda} \cdot r^{-2} \right] + \frac{\gamma}{2-\lambda} \cdot \left(\frac{R_1^3}{r^2} - r \right) \right\} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{r^{m_2} - R_1^{m_2-m_1} \cdot r^{m_1}}{R_2^{m_1} \cdot \left(R_2^{m_2-m_1} - R_1^{m_2-m_1} \right)} \cdot \cos \frac{2\pi n \varphi}{\varphi_0}.$$

При равномерном давлении $p_n=0$, тогда

$$\left(\varphi \pm \frac{\varphi_0}{2} \right) \cdot \left\{ \gamma \cdot r + \frac{(1+\lambda) \cdot R_1^{1+\lambda} \cdot \left[p_0 R_2^2 + \frac{\gamma}{2-\lambda} \cdot (R_2^3 - R_1^3) \right]}{r^2 \cdot \left(R_2^{1+\lambda} - R_1^{1+\lambda} \right)} - \frac{\gamma}{2-\lambda} \cdot \left[(2-\lambda) \cdot r + \frac{(1+\lambda) \cdot R_1^3}{r^2} \right] \right\} = \\ = \tau_0 + f \cdot \left\{ \frac{p_0 \cdot R_2^2 + \frac{\gamma}{2-\lambda} \cdot (R_2^3 - R_1^3)}{R_2^{1+\lambda} - R_1^{1+\lambda}} \cdot \left[r^{-(1-\lambda)} - R_1^{1+\lambda} \cdot r^{-2} \right] + \frac{\gamma}{2-\lambda} \cdot \left(\frac{R_1^3}{r^2} - r \right) \right\}.$$

Используя две последние аналитические зависимости радиуса r от угла φ и параметров питателя R_1, R_2, φ_0 , а также от физико-механических свойств порошка γ, λ, τ и давления p_0 и p_n при образовании свода, можно осуществить выбор рациональной конструкции питателя, обеспечивающего равномерное истечение порошка.

Выводы

Полученные при решении плоской задачи зависимости размерных параметров питателя от физико-механических свойств порошковой массы и избыточного давления внутри питателя вполне пригодны для определения размеров питателя с малыми углами воронки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудинов В.В., Бобров Г.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. – М.: Металлургия, 1992. – 429 с. 2. Г. Корн, Е. Корн. Справочник по математике. Для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1978. – 832 с. с илл.

The determination of the rational form of a feeder

When powdered mixes are sprayed with gas – flame, especially with low value of relative density (powders on plastic material base and enc.) often there are cases of powder supply termination from the feeder. This is caused by the fact of the powder dome formation in the feeder, even if pressure is excessive, which holds the entire powder mix mass.

That is why it is important to find mathematical dependencies which connect the feeder form characteristics, physical and mechanical properties of powders and parameters of spraying process.

УДК 621.785.53, 621.793.4

Шматов А. А., Федотов Ф. О.

МНОГОКОМПОНЕНТНЫЕ ДИФфуЗИОННЫЕ КАРБИДНЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ЧУГУНАХ

*Белорусский национальный технический Университет
Минск, Беларусь*

В целях экономии некоторые производители погружных насосов для нефтедобычи изготавливают их рабочие органы (направляющие аппараты и рабочие колеса) из модифицированных серых чугунов. Но такие насосы имеют недостаточно высокий ресурс работы, поскольку чугунные детали долго не выдерживают абразивного изнашивания твердых частиц и коррозионного воздействия сернистых соединений, входящих в состав пластовой жидкости, которую выкачивают из скважины. Поэтому нанесение коррозионно-стойких и износостойких покрытий на поверхность чугунных деталей является обязательным условием продления срока службы погружных насосов для нефтедобычи. Этим требованиям в наибольшей степени отвечают многокомпонентные покрытия на основе карбидов, которые могут обладать комплексом высоких физико-химических, механических и технологических свойств [1,2].

Однако процессы нанесения многокомпонентных карбидных покрытий на чугуны пока мало изучены. С другой стороны, известные методы поверхностного упрочнения не всегда могут сформировать карбидные покрытия, одновременно легированные несколькими тугоплавкими металлами. К лучшим зарубежным способам поверхностного упрочнения относятся PVD и CVD процессы для осаждения тугоплавких соединений, в т. ч. карбидов, на поверхность изделий. Эти методы позволяют получать многослойные и многокомпонентные покрытия, причем каждый слой состоит преимущественно из соединений, в т.ч. карбидов, одного и редко двух легирующих металлов. Данный процесс крайне трудоемок, энергоемок, требует применения дорогостоящего вакуумного оборудования и большого расхода дорогих компонентов [3].

В связи с вышесказанным целью настоящей работы являлось (1) проведение сравнительного анализа структуры и свойств одно-, двух- и трехкомпонентных карбидных слоев на сером чугуне, полученных более простым и недорогим методом химико-термической обработки; (2) оптимизация процессов получения многокомпонентных диффузионных карбидных покрытий на сером чугуне.

Разработка новых износостойких и коррозионно-стойких покрытий на чугунах расширит применение чугунов в различных областях промышленности, а в некоторых случаях сэкономят более дорогостоящие нержавеющие стали и сплавы.

МЕТОДИКА

Многокомпонентные карбидные покрытия в системах на основе следующих карбидообразующих элементов: Cr-Ti-V, Cr-Ti-Mn, Cr-Ti-Mo, Cr-V-Mo, Cr-V-Mn и Cr-V-Nb были получены на сером чугуна СЧ20 высокотемпературным методом химико-термической обработки (ХТО). Образцы из серого чугуна помещали в контейнер из жаропрочной стали, заполненного специально приготовленной порошковой насыщающей смесью, которую герметично защищали плавким затвором. Затем контейнер с образцами был загружен в электрическую печь, разогретую до температуры 1100°C, где выдерживали в течение 6 часов. Насыщающую смесь получали методом алюминотермии путем восстановлением оксидов металлов алюминием в порошковых смесях следующего состава, мас. %: 98% (50% Al₂O₃ + 35% Me_xO_y + 15% Al) + 2% NH₄Cl, где оксиды Me_xO_y = Cr₂O₃, TiO₂, V₂O₅, MoO₃, Nb₂O₅ являлись поставщиком карбидообразующих металлов. Предварительно восстановленную смесь размалывали и просеивали. Когда в нее дополнительно добавляли активатор (2% NH₄Cl) смесь для ХТО была готова к употреблению.

Структуру и фазовый состав покрытий изучали методами микроструктурного, дюротрического, рентгеноструктурного и микрорентгеноспектрального анализов. Сравнительные испытания на износ различных видов карбидных слоев в условиях сухого трения скольжения проводили на машине типа Шкоды-Савина. Стойкость карбидных слоев в условиях износа при сухом трении скольжения оценивали в относительных и в абсолютных значениях. Величину абсолютной износостойкости покрытия выражали объемом лунки V (мм³), образованной за 20 мин. контртелом трения (диском из ВКЗ, диаметром 57 мм, толщиной 2,4 мм) при нагрузке 1 МПа и скорости вращения диска 1 м/сек (600 об/мин). Использование относительных показателей износостойкости карбидных слоев позволило провести наиболее наглядный сравнительный анализ. Относительную стойкость покрытия оценивали по формуле: $K_w = V_s/V_n$, где: V_s и V_n – объемы лунок, соответственно, эталона и исследуемого карбидного

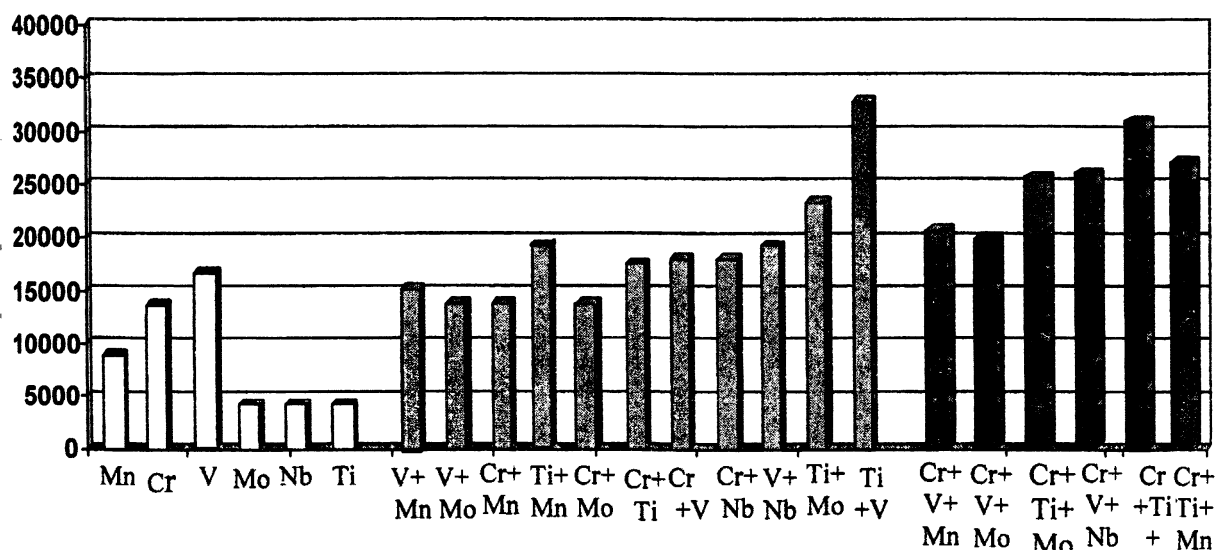


Рисунок 1 - Сравнительные диаграммы микротвердости однокомпонентных, двухкомпонентных и трехкомпонентных карбидных покрытий на чугуна СЧ20. Режим ХТО: T = 1100°C, τ = 6 час.

покрытия. Причем в качестве эталона использовали однокомпонентные карбидные покрытия, полученные на чугуна СЧ20 при диффузионном хромировании.

Для уменьшения количества экспериментов оптимизацию составов насыщающих смесей по свойствам (износостойкости, микротвердости) серого чугуна осуществляли методом математического симплекс - планирования на основании 19 экспериментальных опытов в каждой из шести систем: Cr-Ti-V, Cr-Ti-Mn, Cr-Ti-Mo, Cr-V-Mo, Cr-V-Mn и Cr-V-Nb [4]. На основании рассчитанных математических моделей были построены диаграммы «состав - свойство» для исследуемых карбидных систем.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На основании полученных данных построены сравнительные диаграммы микротвердости H_c (рис.1) и относительной износостойкости при сухом трении скольжения $K_{ст}$ (рис.2) однокомпонентных, двухкомпонентных и трехкомпонентных карбидных диффузионных слоев на сером чугуне.

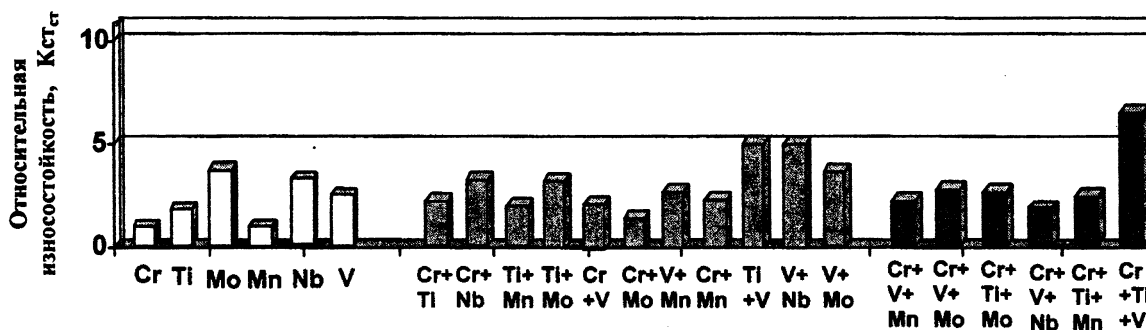


Рисунок 2 - Сравнительные диаграммы износостойкости однокомпонентных (а), двухкомпонентных (б) и трехкомпонентных (в) карбидных покрытий при сухом трении скольжения.

Режим ХТО: $T = 1100^{\circ}C$, $\tau = 6$ час. Условия испытаний: $P = 0,98$ МПа, $V = 1$ м/сек, контртело трения - ВКЗ

Из рис.1 и рис.2 видно, что трех- и двухкомпонентные карбидные покрытия на сером чугуне превосходят по микротвердости однокомпонентные, а наилучшими свойствами при сухом трении скольжения обладают карбидные диффузионные слои на основе ванадия. Отмечено, что повышение микротвердости карбидных покрытий с увеличением числа компонентов обусловлено (1) образованием многофазных слоев с преобладанием в них наиболее твердых карбидов титана или ванадия; (2) высокой степенью их легирования другими карбидами. В условиях сухого трения скольжения лучше работают одно- и двухфазные диффузионные покрытия на базе легированных карбидов ванадия, благодаря наилучшему сочетанию их высокой твердости наряду с низкой хрупкостью [2].

В работе проведена оптимизация порошковых смесей в шести трехкомпонентных системах: Cr-Ti-V, Cr-Ti-Mn, Cr-Ti-Mo, Cr-V-Mo, Cr-V-Mn и Cr-V-Nb по микротвердости и износостойкости при сухом трении скольжения карбидных покрытий на сером чугуне СЧ20. На основании экспериментов, проведенных в соответствии с матрицами планирования, получены математические модели четвертого порядка и построены диаграммы, геометрически описывающие влияние состава насыщающих смесей на свойства многокомпонентных покрытий. В качестве примера, рассмотрим оптимизацию карбидных покрытий на чугуне СЧ20 в одной из шести систем - трехкомпонентной системе Cr-Ti-V. Для нее получены следующие математические модели:

для микротвердости карбидных покрытий на чугуне СЧ20

$$y = 9,8x_1 + 8,6x_2 + 10,0x_3 + 2,4x_1x_2 - 5,6x_1x_3 + 2,3x_2x_3 - 3,3x_1x_2(x_1 - x_2) - 1,6x_1x_3(x_1 - x_3) + 6,8x_2x_3(x_2 - x_3) + 2,7x_1x_2(x_1 - x_2)^2 + 17,0x_1x_3(x_1 - x_3)^2 + 8,1x_2x_3(x_2 - x_3)^2 + 47,4x_1^2x_2x_3 - 42,5x_1x_2^2x_3 + 49,9x_1x_2x_3^2;$$

для износостойкости карбидных покрытий на чугуне СЧ20 при сухом трении скольжения

$$= 2,3x_1 + 3,0x_2 + 3,3x_3 - 0,3x_1x_2 - 0,4x_1x_3 + 0,7x_2x_3 + 1,8x_1x_2(x_1 - x_2) + 6,1x_1x_3(x_1 - x_3) -$$

$$-3,8x_2x_3(x_2-x_3)+9,9x_1x_2(x_1-x_2)^2-0,5x_1x_3(x_1-x_3)^2+4,4x_2x_3(x_2-x_3)^2-17,2x_1^2x_2x_3+25,1x_1x_2^2x_3+11,8x_1x_2x_3^2,$$

где микротвердость и износостойкость при сухом трении скольжения являлись параметрами оптимизации (y), а массовая доля металлооксидов Cr_2O_3 (x_1), TiO_2 (x_2), MoO_3 (x_3) в порошковой смеси являлась переменной величиной. При этом суммарное количество оксидов Me_xO_y в Cr-Ti-V смеси, содержащей 98% (50% Al_2O_3 + 35% Me_xO_y + 15% Al) + 2% NH_4Cl , оставалось постоянной, т.е. суммарное количество Cr_2O_3 + TiO_2 + MoO_3 составляло 100% (или 1 весовую долю).

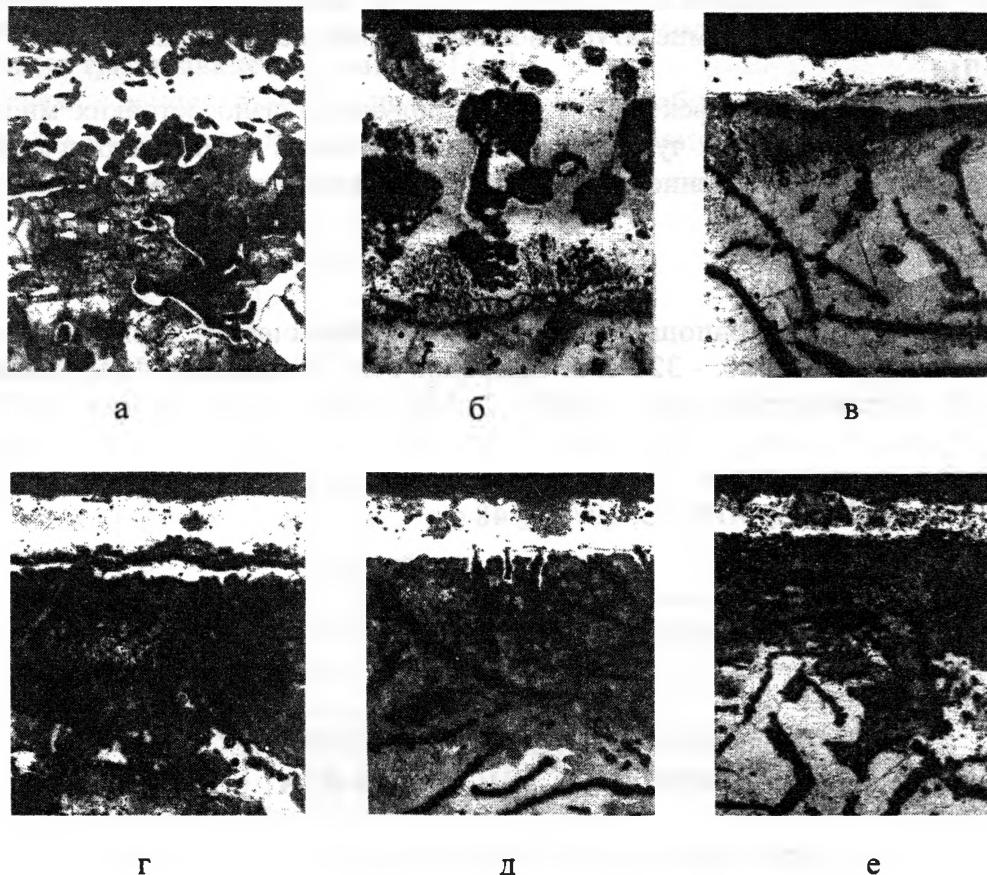


Рисунок 3 - Микроструктуры оптимальных карбидных слоев на чугуне СЧ20, полученных при $T = 1100^{\circ}C$ и $\tau = 6$ час. ($\times 240$). Составы насыщающих смесей по основным компонентам:

а - 15% Cr_2O_3 +85% V_2O_5 ; б - 25% TiO_2 +75% MnO_2 ;

в - 75% Cr_2O_3 +12,5% TiO_2 +12,5% V_2O_5 ; г - 25% Cr_2O_3 +50% TiO_2 +25% V_2O_5 ;

д - 75% Cr_2O_3 +12,5% TiO_2 +12,5% MnO_2 ; е - 25% Cr_2O_3 +50% TiO_2 +25% MnO_2 .

Полученные модели позволили построить диаграммы «состав-свойства» для карбидных покрытий на чугуне СЧ20 в системе Cr-Ti-V. (рис.3). В результате оптимизации выбраны оптимальные составы порошковых смесей, при которых карбидные покрытия обладают наибольшей микротвердостью и износостойкостью в условиях сухого трения скольжения. Структуры карбидных слоев, полученных в оптимальных насыщающих средах, представлены на рис.4. Кинетика роста этих многокомпонентных карбидных слоев носит общеизвестный характер, т.е. зависимость толщины карбидных покрытий от времени насыщения близка к параболической, а зависимость толщины покрытий от температуры процесса - к экспоненциальной. Только рост карбидных покрытий, полученных в смесях с преобладанием MnO_2 (более 70%), носит прямолинейный характер, что объясняется образованием на поверхности жидкометаллической фазы с участием алюминия.

Результаты лабораторных и производственных испытаний свидетельствуют о том, что химико-термическая обработка с использованием оптимальных составов порошковой насыщающей среды, позволяет увеличить стойкость чугунных изделий, рабо-

тающих в условиях коррозии и износа. Чугунные форсунки для распыления малярных составов, направляющие для навивки проволоки, детали нефтедобывающих насосов, на которые были нанесены различные диффузионные карбидные покрытия, прошли промышленные испытания; в результате износостойкость чугунных изделий возросла в 1,5-5 раз, по сравнению с неупрочненными.

Следует отметить, что замена чистых металлов на оксиды карбидообразующих металлов, необходимых для приготовления порошковых насыщающих смесей, позволила существенно (2-10 раз) снизить стоимость этих смесей, увеличив экономичность и применяемость предлагаемого процесса высокотемпературной химико-термической обработки.

ВЫВОДЫ

Предложен простой и эффективный метод получения износостойких многокомпонентных карбидных покрытий на чугунных изделиях путем их химико-термической обработки, который расширит применение чугунов в различных областях промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б.Г. Лившиц, В.С. Крапошин, Я.Л. Линецкий Физические свойства металлов и сплавов, М. Металлургия, 1980. - 320 с. 2. Самсонов Г.В., Винницкий И.М. Тугоплавкие соединения. -М.: Металлургия, 1976. - 560 с. 3. M.G. Hocking, V.Vasantasree, P.S.Sidky Metallic and Ceramic Coatings. Production, Properties and Applications – London, New York, 2000 - 518 p. 4. Ф.С.Новик Математические методы планирования экспериментов в металловедении, ч. IV, М., МИСиС, 1971.- 148 с.

УДК 621.793, 621.787

Шматов А. А., Девойно О.Г.

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЕ УПРОЧНЕНИЕ ИНСТРУМЕНТА

*Белорусский национальный технический Университет
Минск, Беларусь*

Для повышения износостойкости и долговечности инструмента и деталей машин на практике широко применяют различные технологии получения износостойких и коррозионно-стойких покрытий. К лучшим низкотемпературным способам поверхностного упрочнения относится процесс CVD (химического осаждения из паровой фазы), активируемый плазмой для осаждения на поверхность изделий таких тонких пленок из тугоплавких соединений, при которых не меняются размеры изделий [1]. Но этот способ крайне трудоемок, мало производителен и энергоемок, требует применения дорогостоящего вакуумного оборудования и большого расхода дефицитных компонентов. Тонкие пленки можно нанести только на видимые поверхности изделий и невозможно осадить на внутренние их полости. Кроме того, минимальная температура процесса 300-350°C, поэтому способ не может быть применим для деталей машин и инструментов, изготовленных из не теплостойких конструкционных и инструментальных сталей по причине их разупрочнения.

В последние годы большое внимание уделяется развитию нанотехнологий, наноматериалов и применению их в технике. В частности, в машиностроении довольно успешно используют такие синтетические добавки, как фуллерены (наноалмазы), вводимые вместе со смазочными материалами в зону трения деталей машин, поскольку они существенно снижают силы трения и в результате повышают долговечность машин. Последнее объясняется тем, что синтетические молекулы - фуллерены C₆₀ состо-

из 60 атомов углерода, которые выстраиваются в виде правильных пяти- и шестиугольников и вместе составляют шар. В свою очередь, эти вращающиеся шарики, располагаясь между двумя трущимися поверхностями, выполняют функцию «безыносного» подшипника [2,3]. Однако, вопросы, связанные с нанесением на поверхность деталей машин и инструмента наноразмерных тугоплавких соединений, в т.ч. и фуллеренов, различными низкотемпературными способами, т.е. при температуре нанесения ниже 300-350°C, практически не изучены. С другой стороны, все известные низкотемпературные (при температуре процесса ниже 100°C) химические покрытия, получают в водных химических растворах или суспензиях, не содержащих и не образующих наноразмерные тугоплавкие соединения [4,5].

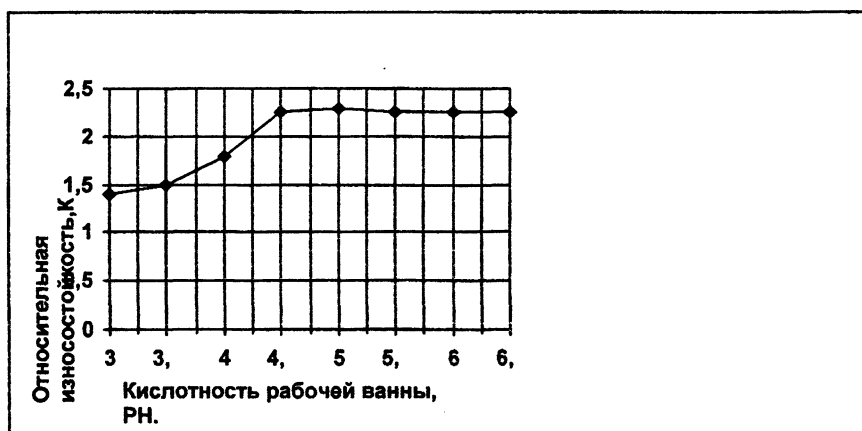
В связи с вышесказанным целью настоящей работы явилось разработка и изучение простого низкотемпературного процесса нанотермохимической обработки готово-



а)



б)



в)

Рисунок 1 - Влияние параметров процесса химической обработки при НТХО на износостойкость фрез, изготовленных из P18

го стального инструмента для получения тонких пленок на базе карбида (или нитрида титана) с высокими эксплуатационными свойствами.

МЕТОДИКА

В работе разработан и изучен низкотемпературный процесс нанотермохимической обработки (НТХО), который обеспечивает упрочнение стального инструмента путем проведения двух операций: (а) химической обработки поверхности сталей при температуре 40-90°C в течение 30-60 минут в специальной водной суспензии на базе ультра-, нанокарбида (или нитрида) титана и карбидо-(нитридо)образующих компонентов и (б) последующей термической выдержке при температуре 130-200°C в течение 60-120 минут в окислительной среде. Специальную водную суспензию готовили путем последовательного введения и механического смешения водорастворимых соединений титана, карбидо-(нитридо)содержащих соединений в различных сочетаниях вместе с нерастворимыми ультрадисперсными, наноразмерными порошками карбида (или нитрида) титана и наноалмаза при температурах ниже температуры проведения процесса. Перед употреблением рабочего раствора дополнительно вводили активаторы процесса: водорастворимые органические поверхностно-активные вещества и неорганические вещества с сильными восстановительными свойствами. Стальные образцы помещали и выдерживали в ванне со специально приготовленной водной суспензией, нагретой до температур проведения процесса. Для подготовки поверхности стальные образцы предварительно обезжировали и выдерживали в кислоте соляной кислоты в течение 2-5 минут, а после каждой операции подготовки и химической обработки поверхности образцы промывали в воде. В Работе процессы НТХО изучали на быстрорежущей стали P18 (18% W).

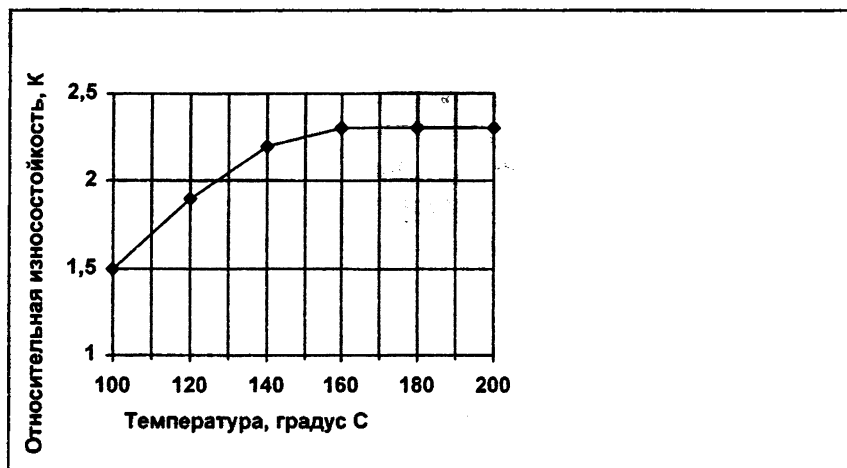
Структуру и фазовый состав покрытий изучали методами микроструктурного, дюрOMETрического, рентгеноструктурного и микрорентгеноспектрального анализов. Сравнительные испытания на износ проводили путем фрезерования нержавеющей стали 40X13 (HВ 320) концевыми фрезами из стали P18 (диаметром 8 мм), подвергнутых НТХО и без упрочнения. Режимы резания упрочненных фрез были следующие: скорость фрезерования $V_c = 5$ м/мин, подача $f_z = 0,01$ мм, глубина фрезерования $a_p = 2$ мм, ширина фрезерования $a_f = 8$ мм. Показатель относительной износостойкости инструмента определяли по формуле $K_w = t_2/t_1$, где t_1 - время работы (или длина пробега) концевой фрезы без упрочнения, t_2 - время работы концевой фрезы, обработанной НТХО до образования критериального значения лунки износа $V_{B_{max}}$, равного 0,25 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

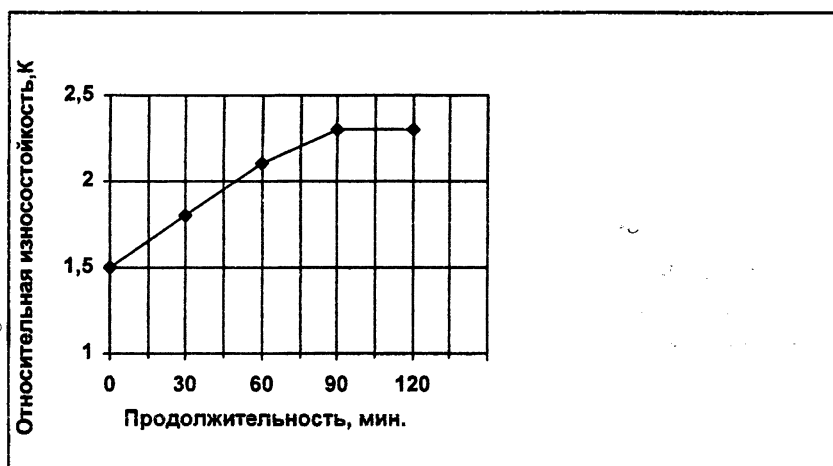
По-видимому, процесс низкотемпературной термохимической обработки (НТХО) имеет двойственный характер упрочнения: во-1-х, на поверхности формируются несплошные покрытия толщиной 0.5-4 мкм, содержащие включения нанокарбидов или нанонитридов титана или их смеси. Данные карбиды (нитриды) образуются и растут на поверхности сталей на базе ультрадисперсных и наноразмерных зародышей карбидов – составляющих водных суспензий в результате химического взаимодействия ионов титана с углеродом (азотом) 2-х, на глубине 1-2 мм в твердых сплавах формируется зона повышенных напряжений сжатия и изменяется химический состав подложки в результате ее пропитки наноразмерными карбидами (или нитридами). Объяснить такие внутренние изменения можно эффектом Ребиндера. Данный эффект носит адгезионный характер взаимодействия поверхности любого твердого тела с жидкой окружающей средой и достигается при взаимодействии твердых тел с поверхностно-активными веществами. В результате такого физико-химического влияния окружающей среды чаще всего наблюдается снижение прочности и пластичности твердых тел за счет уменьшения поверхностной энергии тела. Та кое влияние носит обратимый характер, т.е. после удаления с поверхности твердого тела поверхностно-активных веществ механические свойства тел обычно полностью восстанавливаются. Однако име-

ется несколько примеров, когда в результате прекращения воздействия среды механические свойства не только восстанавливаются, но и возрастают [3,6].

В результате сравнительных испытаний фрез, упрочненных методом НТХО установлено, что их износостойкость зависит от химического состава и кислотности водной суспензии, температуры и времени проведения процесса химической обработки. Наиболее приемлемыми параметрами процесса химической обработки при НТХО сталей являются: температура 80-90°C (Рис.1.а), время 40-60 мин. (Рис.1.б), кислотность рабочей ванны РН 4,5-6,5 (Рис.1.в), что позволяет достичь максимальной износостойкости фрез. Проведение последующей термической выдержки при НТХО повышает износостойкость стального инструмента. Оптимальными параметрами термообработки сталей в окислительной среде являются: температура 150-200°C (Рис. 2.а), время 1-1,5 часа (Рис. 2.б).



а)



б)

Рисунок 2 - Влияние параметров термообработки при НТХО после химической обработки на износостойкость фрез, изготовленных из Р18.

Предполагаемая картина образования термохимических покрытий, по-видимому, следующая: (а) при химической обработке на поверхности сталей осаждаются дисперсные включения наноалмаза, нанокарбида или нитрида титана и металлоорганические комплексы на их основе; микротвердость химических покрытий не превышает 7000 МПа. (б) последующая изотермическая выдержка разлагает эти комплексы и приводит к образованию на базе зародышей наночастиц карбидов (или нитридов) и их коагуляции; микротвердость полученных термохимических покрытий достигает 20000-30000 МПа.

Предполагаемая картина образования термохимических покрытий, по-видимому, следующая: (а) при химической обработке на поверхности сталей осаждаются дисперсные включения наноалмаза, нанокарбида или нанонитрида титана и металлоорганические комплексы на их основе; микротвердость химических покрытий не превышает 7000 МПа. (б) последующая изотермическая выдержка разлагает эти комплексы и приводит к образованию на базе зародышей наночастиц карбидов (или нитридов) и их коагуляции; микротвердость полученных термохимических покрытий достигает 20000-30000 МПа.

ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты лабораторных и производственных испытаний свидетельствуют о том, что НТХО с использованием оптимальных составов водных суспензий на базе нанокарбидов (нанонитридов) титана позволяет существенно увеличить износостойкость стального инструмента, изготовленного из различных инструментальных сталей. Наибольшие показатели износостойкости достигаются при обработке труднообрабатываемых нержавеющей и цветных сплавов. Промышленные испытания термохимически упрочненного инструмента, проведенные за пределами Беларуси, показали увеличение стойкости как режущего, так и штампового инструмента в 1,8-3 раза выше, по сравнению с необработанным (табл.1).

Таблица 1 - Результаты промышленных испытаний за рубежом, готового режущего инструмента, упрочненного НТХО

Вид инструмента	Место проведения испытаний инструмента	Повышение износостойкости инструмента, раз
метчики	“VUHZ” (Czechia), “Daewoo” (Korea)	2 – 3
ленточные пилы	“VUHZ” (Czechia)	2,5 – 3
сверла	“Stock” (Germany), “PS” (Slovakia)	1,8 – 2,9
ножи	“Skloplast” (Slovakia)	1,9 – 2,2
штампы	“ZVL-LSA” (Slovakia)	1,8 – 2

Процесс использован на нескольких предприятиях Беларуси и России. Применяя «низкотемпературную термохимическую обработку» некоторые белорусские предприятия в настоящее время изготавливают для нужд аэрокосмических и энергетических компаний России различных режущий и штамповый инструмент, предназначенный для механической обработки нержавеющей, жаропрочных, титановых и других труднообрабатываемых сплавов.

ВЫВОДЫ

Предложен простой, высокопроизводительный и эффективный метод получения износостойких покрытий на готовом стальном инструменте путем его термохимической обработки, который расширит возможности современных способов поверхностного упрочнения инструмента.

ЛИТЕРАТУРА

1. M.G. Hocking, V.Vasantasree, P.S.Sidky Metallic and Ceramic Coatings. Production, Properties and Applications – London, New York, 2000, 518 p. 2. Балабанов В.И., Ищенко С.А., Беклемышев В.И. Триботехнологии в техническом сервисе машин. - М.: Изумруд, 2005.- 192 с. 3. Гаркунов Д.Н., Корник П.И. Виды трения и износа. Эксплуатационные повреждения деталей машин. - М.: Изд-во МСХА, 2003. –344 с. 4. П.С. Мельников Справочник по гальванопокрытиям в машиностроении.—2-е изд.-М.: Машиностроение, 1991.- 384 с. 5. Вансовская К.М. Металлические покрытия, нанесенные химическим способом.- Л.: машиностроение, Ленингр. Отделение, 1985.- 103 с. 6. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. Т.2. - М.: Машиностроение, 1974.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 621.771

Щукин В.Я., Исаевич Л.А., Кожевникова Г.В.

СОВРЕМЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ПОПЕРЕЧНО-КЛИНОВОЙ ПРОКАТКИ

*БНТУ, ГНУ «ФТИ НАН Беларуси»
Минск, Республика Беларусь*

В настоящее время в машиностроении методом поперечно-клиновой прокатки (ПКП) изготавливается широкая номенклатура изделий типа тел вращения с удлиненной осью. Их конфигурация может быть самой разнообразной: цилиндрические, конические и сфероидальные поверхности со всевозможными канавками и выступами. В металлообрабатывающей промышленности технологии, базирующиеся на использовании метода ПКП, используются для производства промежуточных профилированных заготовок под последующую точную штамповку или иные процессы пластического формообразования, а также под чистовую механическую обработку. Кроме того, существует достаточно обширная группа изделий, например, валы и оси в сельхозмашиностроении, для которых данный метод позволяет получить готовую деталь.

Мировые тенденции устойчивого экономического развития в первую очередь связаны с решением глобальной проблемы оптимизации ресурсопотребления и ресурсосбережения. Технологии ПКП, обеспечивающие коэффициент использования металла 0,8–0,98 полностью соответствуют этим требованиям и сводят к минимуму затраты на хранение и утилизацию отходов. В процессе эксплуатации прокатанные изделия отличаются более высокой прочностью и износостойкостью. В связи с этим ПКП является одним из перспективных направлений обработки металлов давлением.

Фундаментальные исследования и прикладные разработки в области ПКП в настоящее время выполняются в научных центрах Беларуси (ГНУ «ФТИ НАН Беларуси», БНТУ, «Белтехнология», «АМТ Инжиниринг»), России (Московский государственный институт стали и сплавов, ОАО АХК «ВНИИМЕТМАШ» имени академика А.И.Целикова), Германии (Технический университет г. Хемница, Франхоферский институт инструмента и технологии обработки металлов давлением), Чехии (фирма «ШМЕРАЛ»), Польши (Технический университет г. Люблина), США (Питсбургский университет, шт. Пенсильвания), Китая (Исследовательский центр деталепрокатки Пекинского университета науки и техники, Пекинский исследовательский институт машиностроительных электротехнических технологий, Шеньянский Лигонгский университет).

Принцип ПКП реализован в настоящее время в целом ряде конструкций прокатного оборудования и инструмента, производителями которых, кроме Республики Беларусь, являются Германия, Россия, Китай, Чехия, Япония.

К настоящему времени на мировом рынке предлагается оборудование, обеспечивающее следующие схемы процесса (рис. 1): двухвалковую; трёхвалковую; валково-сегментную; двухсегментную; плоскую с двумя подвижными плитами; плоскую с подвижной и неподвижной плитой.

Выпускаемое прокатное оборудование позволяет прокатывать широкий диапазон поковок диаметром до 130мм, длиной до 1000мм.

Из известных принципиальных схем ПКП наибольшее применение получили плоско-клиновая и валковая, на основе которых спроектированы соответствующие виды оборудования. В процессе эксплуатации каждого вида определились их преимущества и недостатки.

Валковые станы (рис. 1, а, б, 2, а) характеризуются более высокой производительностью за счет отсутствия холостых ходов. На валковых станах длина развёртки клина значительно превосходит длину плоского инструмента, благодаря чему расширяются возможности прокатки длинномерных изделий. Использование прокатки из длинномерного прутка позволяет снизить долю концевых отходов, что повышает коэффициент использования металла.

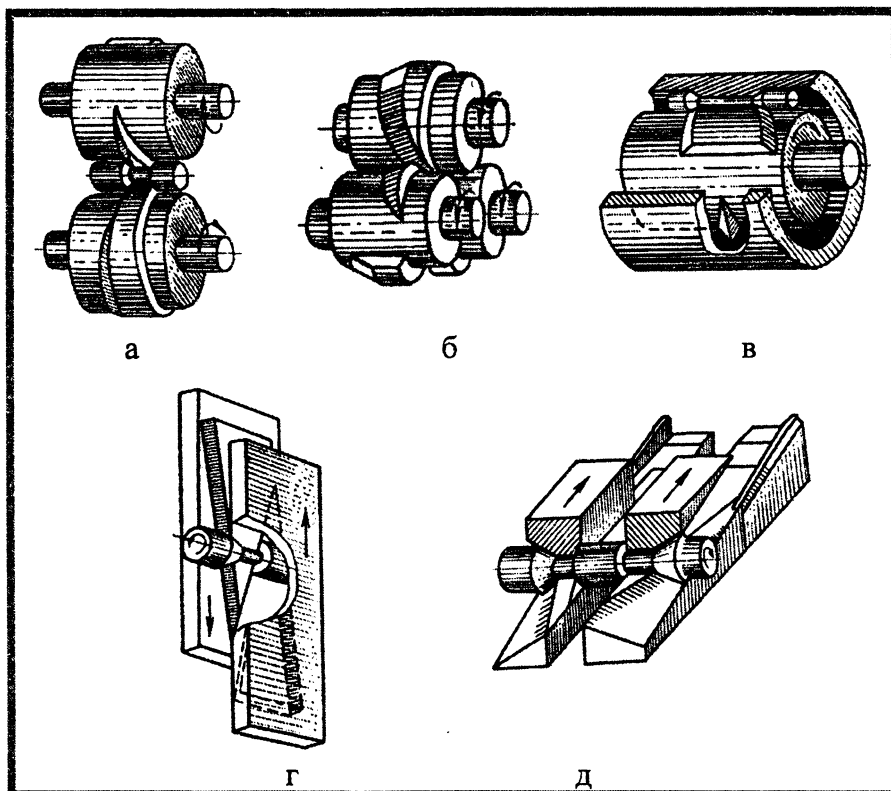


Рисунок 1- Схемы процесса ПКП: а – двухвалковая; б – трёхвалковая; в – валково-сегментная; г – с двумя подвижными плитами; д – с подвижной и неподвижной плитами

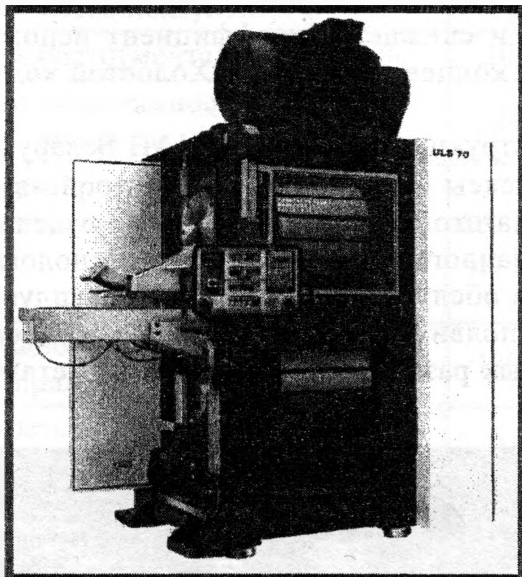
К недостаткам валковых станов следует отнести сложность и высокую трудоемкость изготовления гравюры валкового инструмента, которая выполняется на специальных токарных станках. Применяемая последующая термообработка не обеспечивает твердость, соответствующую твердости плоского инструмента. Как результат, более низкая стойкость валкового инструмента по сравнению с плоским. Кроме того, токарная обработка гравюры даёт более низкую её точность по сравнению со шлифованной гравюрой плоского инструмента, что ведёт к снижению точности прокатанных изделий.

По данным заводов, эксплуатирующих валковые станы, их обслуживают, как правило, двое рабочих. Валковый инструмент более сложен в отладке. Переналадка валкового стана с одной детали на другую занимает более длительное время, чем плоскоклинового. Как правило, двухвалковые станы предназначены для прокатки ступенчатых валов диаметром 30-130мм, длиной до 600м невысокой точности, при этом предъявляются более высокие требования к к прямолинейности оси прутка, а также имеются ограничения по длине прутка. К недостаткам станов валковой прокатки также следует отнести сложности, связанные с раскручиванием прутка большого диаметра, задачей его в индуктор и прокатную клеть. Станы штучной прокатки менее металлоёмки, более компактны.

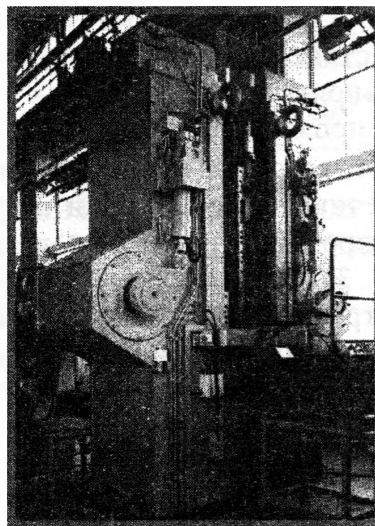
Валково-сегментные станы (рис. 1, в) высокопроизводительны, компактны, предельно просты по конструкции. Однако они работают только со штучной заготовкой. К недостаткам следует отнести отсутствие регулировки закрытой высоты, снижающей точность изделий,

сложность изготовления, ремонта, наладки и стоимости инструмента (40% от стоимости самого стана).

Плоскоклинковые станы с двумя подвижными плитами (рис. 1, г, 2, б) используются для прокатки штучной заготовки диаметром 20-100мм и длиной 100-630мм. Они отличаются невысокой производительностью вследствие необходимости остановки инструментальных плит для загрузки и удаления заготовки, что составляет 40% рабочего цикла. В станах отсутствует регулировка инструмента в ходе прокатки, что снижает точность изделий. К недостаткам стана относится также пожароопасность из-за попадания ещё не остывших концевых отходов в фундаментный приямок, вызывающих загорание скапливающегося там масла из гидросистемы.



а



б

Рисунок 2- Оборудование ПКП: а – валковый стан ULS 70 фирмы «Šmeral», Чехия; б – стан ПКП с двумя подвижными плитами, Германия

Станы с подвижной и неподвижной плитами (рис. 1, г, д), предназначены для прокатки штучных заготовок диаметром 5-120мм и длиной 30-400мм. При прокатке заготовка, вращаясь, движется вдоль неподвижного нижнего инструмента, поэтому зоны загрузки и выгрузки заготовки разделены, что упрощает автоматизацию такого комплекса. Стан не требует остановки для подачи в зону прокатки заготовки и удаления из нее прокатанной детали, что повышает производительность этого оборудования по сравнению с плоскоклинковыми станами с двумя подвижными плитами.

Плоско-прокатные станы обладают рядом преимуществ по сравнению с валковыми станами:

- простота изготовления, высокая точность и низкая себестоимость плоско-клинового инструмента, поскольку он изготавливается на универсальном фрезерном и шлифовальном оборудовании;
- стабильное положение детали на плоскости инструмента, в то время как при валковой прокатке деталь необходимо удерживать в зоне прокатки направляющими линейками;
- более высокая точность получаемых изделий, обеспечиваемая высокоточным плоско-клиновым инструментом и точным положением детали в процессе прокатки относительно плоского инструмента;
- более высокая стойкость плоского клинового инструмента (до 0,5 млн. деталей), достигаемая за счёт изготовления его составным, применения качественных марок сталей и качественной термообработки деформирующих клиньев.

Достоинством плоскоклиновых станов является также изготовление клинового инструмента составным из отдельных секций на универсальных фрезерных и плоскошлифовальных станках. Такой инструмент прост по конструкции и его обработка возможна в условиях любого завода. Инструмент закаливается до твердости HRC 52-56, чем обеспечивается его высокая стойкость. Шлифованием получают размеры клиновых элементов высокой точности, благодаря чему достигается и высокая точность прокатанных деталей. Сборный инструмент позволяет производить замену отдельных быстроизнашиваемых частей инструмента, кроме того упрощается отладка новых технологии за счет подналадки и переделки отдельных вставок инструмента.

Недостаток плоскоклиновых станов заключается в невозможности прокатки от прутка. Вследствие этого увеличивается трудоёмкость процесса за счёт введения операции рубки прутка на мерные заготовки, и снижается коэффициент использования металла вследствие необходимости отрезки концевых отходов. Холостой ход снижает производительность станов.

Плоско прокатное оборудование конструкции ГНУ «ФТИ НАН Беларуси» представляют собой автоматизированные комплексы [1], включающие устройства и механизмы, обеспечивающие функции нагрева заготовки, профилирования изделия, а также транспортирования заготовки и прокатанного изделия в ходе технологического процесса (рис. 3). Комплексы ПМ удобны в обслуживании, просты в эксплуатации. В них предусмотрена регулировка нижнего неподвижного инструмента, обеспечивающая точное получение линейных и диаметральных размеров прокатываемой детали без останова процесса прокатки.

В ФТИ НАН Беларуси разработан ряд плоскопрокатных комплексов серии ПМ, охватывающий широкий диапазон размеров прокатанных изделий: диаметром 5 – 60мм, длиной 30 – 350мм. В таблице представлены технические характеристики этих комплексов.

Недостаток плоскоклиновых станов, заключающийся в невозможности прокатки от прутка, устраняется установкой в комплекс ПКП отрезной машины конструкции ГНУ «ФТИ НАН Беларуси» [2]. Принципиальная схема отрезной машины базируется на технологии планетарного профилирования и резки нагретых прутков.

Принцип работы комплекса следующий. Часть прутка, нагретая токами высокой частоты до необходимой температуры, подается до упора отрезной машины. В процессе пластического деформирования нагретого прутка двумя валками, совершающими планетарное вращение, отрезается мерная цилиндрическая заготовка, имеющая конические торцы или торцы иной необходимой формы. Пруток при этом не вращается, вследствие чего нет ограничений по его длине и кривизне. Затем на стане ПКП выполняется операция пластического формообразования. При этом металл торцевых конусов заполняет объём утяжины, которая образовалась бы при традиционной прокатке заготовки с плоскими торцами. Обе технологические операции (пластическое отделение мерной заготовки и пластическое формообразование изделия) производится с одного нагрева в индукционной установке. Применение комбинированной технологии плане-



Рисунок 3 - Клеть плоскоклинового стана комплекса ПМ конструкции «ФТИ НАН Беларуси»

гарной резки и последующей ПКП позволяет увеличить КИМ дополнительно на 10-14%.

Таблица

Технические характеристики комплексов поперечно-клиновой прокатки

Наименование параметров	Модель					
	ПМ5.135	ПМ5.155	ПМ5.150	ФТИ550	ПМ5.117	ПМ5.095
Максимальное усилие прокатки, кН	250	300	200	70	150	100
Ход ползуна, мм	2800	2200	2650	1900	1900	1400
Количество ползунов	2	2	1	1	1	1
Длина инструмента, мм	2500	2000	1250	900	900	600
Производительность, ходов/час	180	240	240	600 720*	300	600
Размеры прокатываемой заготовки, мм – диаметр – длина	60...120 до 1000	60...120 до 860	50...110 до 520	30...60 до 350	33...50 до 250	14...25 до 160
Мощность главного привода, кВт	120	130x2	90	75	60	60
Мощность индукционного нагревателя, кВт	800	250	250	-	250	100
Частота тока, питающего нагреватель индукционный, Гц	1000	2400	2400	-	2400	8000
Температура нагрева заготовок, °С	900... 1200	900... 1200	900... 1200	900... 1200	900... 1200	900... 1200
Расход охлаждающей воды, м ³ /ч	50	5...10	1...10	1...12	1...12,5	1...10
Кол-во обслуживающего персонала, чел.	1	1	1	1	1	1
Габаритные размеры, мм – длина – ширина – высота	16000 8000 1700	7660 3000 2360	5600 2500 3100	5600 4200 1700	9500 6700 2750	7500 4500 2200
Масса, кг	40000	40000	19000	8000	25000	12000

* – при комплектации стана импортной гидравлической системой

Для монтажа оборудования не требуется фундамент.

ЛИТЕРАТУРА

1. Щукин В.Я. Основы поперечно-клиновой прокатки. – Мн.: Наука и техника, 1986. – 223с.
2. Кожевникова Г.В. Развитие теории и технологии формообразования осесимметричных ступенчатых деталей поперечной прокаткой. – Мн.: Издательский дом «Белорусская наука», 2005. – 250 с.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИОАНАЛОГИЙ В ПРОЕКТИРОВАНИИ КОМПАКТНЫХ СИСТЕМ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

*Витебский государственный технологический университет
Витебск, Беларусь*

На протяжении всей истории развития науки и техники человек часто использовал знания о живой природе в целях совершенствования создаваемых технических объектов. В последние десятилетия на стыке кибернетики и биологии возникло и развивается самостоятельное научное направление – бионика, исследующая аналогии между живыми и искусственными системами. В настоящей статье показаны примеры использования закономерностей основных явлений живой природы: адаптации организма к условиям окружающей среды, естественной эволюции и нервной деятельности в процессе создания конкурентоспособных производственных систем на малых и средних машиностроительных предприятиях.

Эффективная работа любого предприятия в условиях рынка основывается на динамической самоорганизации и реструктуризации производства для обеспечения максимальной рентабельности за счет адекватной реакции на внешние воздействия [1]. Идея рациональной адаптации производственной системы предприятия к перманентным изменениям рыночной конъюнктуры легла в основу концепции компактной (ресурсонеизбыточной) организации производства на предприятиях машиностроения [2]. Предлагаемая автором принципиальная структура подобной компактной производственной системы (КПС) как объекта оптимального управления на малых и средних предприятиях в условиях изменяющегося спроса на машиностроительную продукцию включает два основных компонента: инвариантный и адаптивный (рис. 1). Инвариант комплекса технических средств технологической системы W стабильно преобразует поток ресурсов X (информационных, энергетических и материальных) в конечную основную продукцию Y за счет того, что адаптивный системный компонент (адаптер) постоянно компенсирует внешние возмущения f – изменения потока производственных заказов. Таким образом, предприятие ритмично выпускает конкурентоспособную продукцию.

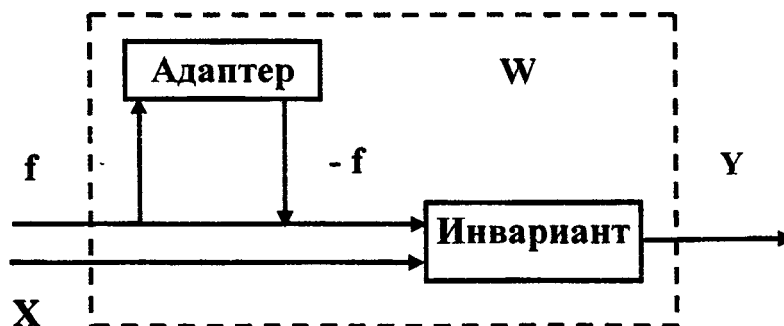


Рисунок 1 – Кибернетическая модель

Процесс организационно-технического проектирования КПС (т.е. ее структурирования) проходит в три стадии: макропроектирование, оптимизационный синтез и адаптивная структурная настройка. По сути, он представляет собой «перевод» проектного описания (образа) конструктивного инварианта продукции в описание технологического, а затем и технического инварианта КПС с реализацией последнего в станочном комплексе основного технологического оборудования [2].

Процедура выделения конструктивного инварианта продукции – существенно общего ее атрибута – может быть, по мнению автора, формально интерпретирована как классифика-

ционная задача группирования объектов (изделий). В этом случае для ее решения эффективен бионический метод современной теории распознавания образов, основанный на использовании сети искусственных нейронов – нейросетевая компьютерная технология. Функционирование формального нейрона (рис. 2), состоящего из взвешенного сумматора и нелинейного элемента, определяется формулами:

$$NET = \sum_i w_i x_i$$

$$OUT = F(NET - \theta)$$

где x_i – входные сигналы, совокупность всех входных сигналов нейрона образует вектор X ; w_i – весовые коэффициенты, совокупность весовых коэффициентов образует вектор весов W ; NET – взвешенная сумма входных сигналов, значение NET передается на нелинейный элемент; θ – пороговый уровень данного нейрона; F – нелинейная функция, называемая функцией активации.

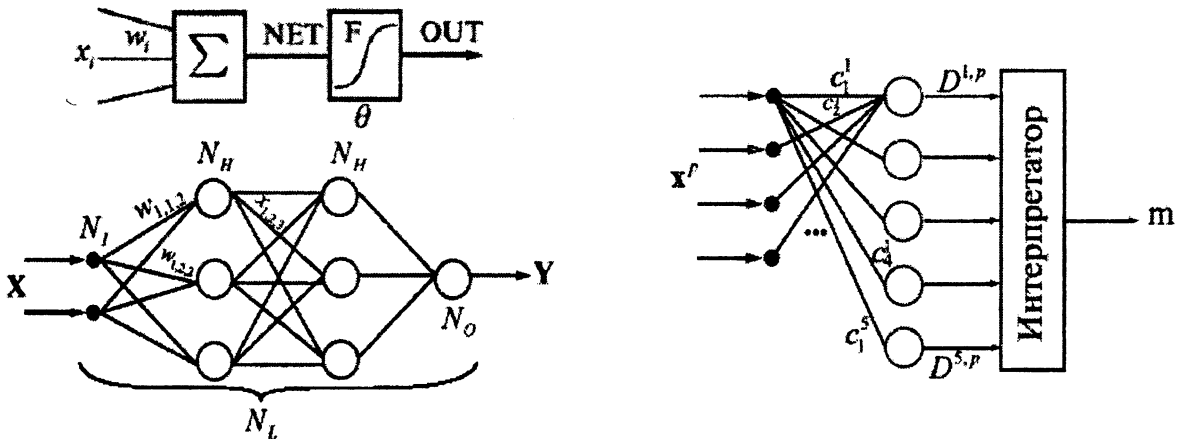


Рисунок 2 – Функциональные схемы формального нейрона, нейросети и ее слоя

Нейрон имеет несколько входных сигналов X и один выходной сигнал OUT . Параметрами нейрона, определяющими его работу, являются: вектор весов W , пороговый уровень θ и вид функции активации F . Формальные нейроны объединяются в сеть различным образом. Самым распространенным видом нейросети в последнее время стал «многослойный персептрон» (см. рис. 2), состоящий из произвольного количества слоев нейронов. Нейроны каждого слоя соединяются с нейронами предыдущего и последующего слоев по принципу «каждый с каждым». Первый (слева) слой с N_I нейронами называется сенсорным или входным, внутренние слои с нейронами N_H называются скрытыми или ассоциативными, последний (самый правый) с одним нейроном N_O — выходным или результативным, т.к. в нем формируется вектор выходных сигналов Y . Количество нейронов в слоях может быть произвольным, но обычно во всех скрытых слоях одинаковое количество нейронов.

Сеть нейронов, использующая евклидову меру близости для классификации объектов, называется сетью Кохонена. Нейроны слоя Кохонена генерируют сигналы $D^{m,p}$ (см. рис. 2). Интерпретатор выбирает максимальный сигнал слоя и выдает номер класса m , соответствующий номеру входа, по которому интерпретатором получен максимальный сигнал. Это соответствует номеру класса объекта, который был предъявлен на входе, в виде вектора X^p . Ядра c^m являются весовыми коэффициентами нейронов. Каждый нейрон Кохонена запоминает одно ядро класса – конструктивный инвариант, и отвечает за определение объектов в своем классе, таким образом, величина выхода нейрона тем больше, чем ближе объект к данному ядру класса. Общее количество классов совпадает с количеством нейронов Кохонена, имеющих линейную функцию активации. Меняя количество нейронов, можно динамически менять и количество классов.

Такую же нейросеть можно использовать и на последующем этапе макроструктурирования при анализе типовых маршрутов изготовления рассматриваемых изделий для оценки

существенности их технологического подобия с использованием специально разработанного критерия – относительные приведенные затраты на операцию:

$$K = C_{Mi} t_i / \Sigma (C_{Mi} t_i),$$

где t_i – длительность i -ой операции (мин); C_{Mi} – приведенные минутные затраты на i -ой операции (руб / мин).

Стадия макроструктурирования КПС завершается этапом формирования ее производственной программы и выбора наилучшего ассортимента выпускаемой продукции на основе ее конструктивного инварианта. Такое оптимальное объемное планирование дискретного многономенклатурного машиностроительного производства в математической постановке является экспоненциально сложной для вычисления задачей комбинаторного программирования ранцевого (рюкзачного) типа. По мнению автора, наиболее эффективным способом компьютерной поддержки ее решения следует считать еще один бионический метод – генетическое программирование.

Генетические алгоритмы являются разновидностью эволюционных вычислений. Это поисковые алгоритмы, основанные на механизмах селекции и генетики. В отличие от эволюционного программирования основная их цель состоит в оптимизации структуры отдельного объекта, а не поведения целого семейства («популяции») [4]. Они реализуют стратегию «выживание сильнейших» среди рассматриваемых вариантов структуры объекта, формируя и изменяя поисковый алгоритм на основе моделирования естественной эволюции. В каждой генерации новое множество вариантов структуры (как последовательностей элементов) создается, используя части старых и добавляя новые части с «хорошими» свойствами. Использование информации, накопленной в процессе эволюции, отличает генетическое программирование от компьютерных методов случайного поиска.

Применяемый в настоящем исследовании стандартный генетический алгоритм (рис. 3) представлял собой метод решения задачи комбинаторной оптимизации вида: «максимизировать $f(s)$ при условии, что $s \in \Omega = \{0, 1\}^n$ ». Здесь функция $f: \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ называется функцией пригодности («fitness function»); $s \in \Omega$ – n -мерный двоичный вектор из дискретного множества Ω – хромосомой длины n . Множество $\Omega = \{0, 1\}^n$ представляет собой множество вершин n -мерного гиперкуба с ребром, равным 1; $\mathbb{R} = (-\infty, +\infty)$ – множество действительных чисел.

Вначале на основе априорной информации создавалась исходная популяция $S(0)$ из M двоичных хромосом: $S(0) = \{s_1, s_2, \dots, s_M\} \in \Omega$, каждая из которых содержала n битов с кодированными значениями интересующего параметра в виде «1» или «0». Вычислялось начальное значение функции пригодности $f(s)$ или ее нормированного представления $f_H(s): \Omega \rightarrow [0, 1]$, полученное из исходной функции $f(s)$ путем линейного масштабирования:

$$f_H(s) = (f(s) - f_{\min}) / (f(s) - f_{\max}),$$

где f_{\max} и f_{\min} – соответственно максимально и минимально возможные значения функции $f(s)$.

Используя начальную популяцию $S(0)$, последовательно переходили к формированию и анализу характеристик популяций $S(1)$, $S(2)$ и т.д., применяя генетические операторы репродукции (отбора), кроссинговера (кроссовера) и мутации. Репродукция – процесс, в котором хромосомы копируются согласно значениям их функции пригодности. Наиболее простой способ копирования (отбора и сохранения) хромосом с «лучшими» значениями $f(s)$ в алгоритмической форме имитирует вращение колеса рулетки, на котором каждый конкурирующий вариант (хро-

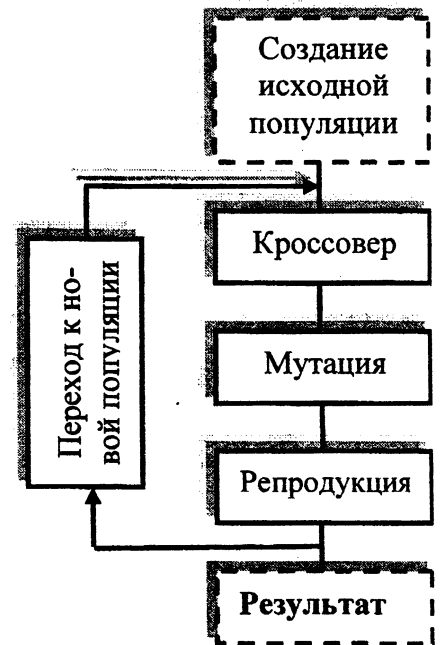


Рисунок 3 – Обобщенный генетический алгоритм

мосома) имеет поле площадью, пропорциональной значению функции пригодности. Колесо вращалось столько раз, сколько вариантов необходимо для следующей генерации (поколения), всякий раз останавливаясь напротив конкретного варианта.

К отобранным таким образом хромосомам далее применяли генетический оператор кроссовера (скрещивания). В простейшем случае для случайно выбранной пары назначается случайное число $k \in \{1, 2, \dots, n-1\}$, называемое местом (сайтом) кроссовера, после которого участки этих двух хромосом с вероятностью $P_{\text{кр}}$ меняются местами. Кроссовер отвечает за смешивание информации, его вероятность обычно принимается $P_{\text{кр}} = 0,6$. Процесс повторялся для всех остальных хромосом текущей популяции $S(t)$, пока она не оказывалась пустой.

После кроссовера к хромосомам-вариантам применялся генетический оператор мутации, состоящий в случайном изменении (на противоположное) значение каждого бита с вероятностью $P_{\text{мут}}$. Таким образом, цель оператора мутации заключается в повышении разнообразия поиска за счет введения новых хромосом в популяцию, поскольку число членов популяции M намного меньше общего числа возможных хромосом (2^n) в пространстве поиска Ω . Применение мутаций обычно осуществляется с вероятностью $0,001 \leq P_{\text{мут}} \leq 0,01$, т.к. слишком частое применение мутации приводит к разрушению хромосом с высокими значениями функции пригодности, что ухудшает сходимость результата.

Применение рассмотренного генетического алгоритма позволяет компьютеризировать формирование производственной программы – завершающую процедуру макроструктурирования КПС. Тот же генетический алгоритм используется и на второй стадии проектирования КПС для оптимизационного синтеза структуры обобщенного технологического процесса и реализующего его станочного парка.

На последней стадии создания КПС во время всего ее срока службы происходит адаптивная структурная настройка – реструктурирование адаптивного компонента комплекса технологического оборудования. При трансформации адаптера имеют место рассмотренные ранее задачи классификации и комбинаторной оптимизации, автоматизированная поддержка решения которых основана на нейросетевой технологии и генетическом программировании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов М.Е., Попов А.М. Динамическая самоорганизация производственной системы, взаимодействующей с конкурентной средой // Вестник машиностроения, 2006, № 3, С. 62.
2. Свирский Д.Н. Компактная производственная система как объект автоматизированного проектирования. – Мн.: ОИПИ НАН Беларуси, 2000. – 48с.
3. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика. – М: Мир, 1992. – 164 с.
4. Курейчик В.М. Генетические алгоритмы. Состояние. Проблемы. Перспективы. // Известия РАН. Теория и системы управления, 1999, № 1, С. 144-160.

УДК 621.9.044+621.06-52

Романюк С.И., Якимович А.М.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ СРЕДСТВАМИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Определение понятия "высокоскоростное фрезерование"

Попытка определения понятия "высокоскоростное фрезерование" наталкивается на несколько различных подходов к трактованию этого способа обработки. Прежде всего, нет его однозначного общепринятого названия: в литературе встречается несколько – HSM (High

Speed Machining – высокоскоростная обработка), HSC (High Speed Cutting – высокоскоростное резание), "высокоскоростное фрезерование", "сверхскоростное резание" и т.д. Из них наиболее употребима аббревиатура HSM. Кроме того, нет общепринятого объяснения самого явления "высокоскоростное фрезерование". Что принимать за основу: увеличенную скорость подачи или высокую частоту вращения шпинделя? С другой стороны, некоторые исследователи полагают, что определяющим является скорость резания, при которой обрабатываемая деталь остается холодной. С некоторых пор стали учитывать фактор, который определяет эффективность HSM, а именно – большой объем стружки, удаляемой в минуту.

Основным фактором, определяющим физику явлений при высокоскоростной обработке, является именно скорость резания. Поэтому HSM следует определить как способ обработки, основанный на применении высоких скоростей резания, при которых количество тепла, выделяемого при обработке, уменьшается. Как известно, в традиционном диапазоне скоростей резания (примерно до 300 м/мин) при ее увеличении возрастает нагрев детали, стружки и инструмента. Однако рост температуры отстает от роста скорости резания и, начиная с некоторого критического значения скорости резания, происходит снижение температуры.

Причина этого заключается в том, что скорость обработки превышает скорость теплопроводности обрабатываемого основного материала. Фреза как бы "опережает" распространение тепла, образующегося в зоне контакта, в основной металл детали и инструмента. Основная доля тепла от резания отводится со стружкой. За счет этого значительно увеличивается стойкость инструмента [1]. Другое объяснение базируется на положении физики твердого тела, согласно которому при увеличении скорости пластической деформации металла область последней уменьшается и металл становится более хрупким. Т.е. начиная с критических значений скорости резания, отделение срезаемого слоя происходит в результате не пластического, а хрупкого разрушения. Вследствие этого уменьшается относительная работа пластической деформации, а, следовательно, температура в зоне резания [2].

При более высокой скорости резания равнодействующая сила резания уменьшается. Благодаря большой скорости резания можно значительно увеличить объем резания, т.е. достигнуть большей производительности, и улучшить качество поверхности, т.е. уменьшить остаточную шероховатость и улучшить точность формы. Поверхность после HSM часто полностью исключает необходимость в дополнительном ручном полировании.

При высокоскоростном фрезеровании сталей скорость резания составляет от 700 до 1500 м/мин, алюминиевых сплавов – 2000-5000 м/мин. Высокая скорость резания комбинируется с высокими скоростями подачи, находящимися в диапазоне от 2 до 20 м/мин (при традиционных рабочих подачах 80-100 мм/мин) [1]. Для обеспечения таких скоростей резания необходимы соответствующие скорости вращения шпинделя – 10000-50000 об/мин и более. Например, фрезу диаметром 6 мм при высокоскоростной обработке необходимо вращать со скоростью примерно 40000 об/мин.

Такой вид обработки деталей возможен лишь благодаря новым концепциям станков, инструментов и систем управления. Станки для HSM должны иметь более жесткие конструкции, особенно конструкции приводов, а также высокий коэффициент усиления, обеспечивающие достижение необходимых ускорения и точности. В режущих инструментах необходимо применять современные твердосплавные материалы и покрытия, обеспечивающие более высокую стойкость. Используются специальные конструкции патронов для крепления фрез.

HSM-станки имеют три-пять одновременно управляемых NC-осей и автоматическую смену инструмента. Это обеспечивает широкий диапазон применения этих станков и одновременно диктует определенные требования к системе управления.

Проблемы HSM при линейно-кусочной аппроксимации

Традиционно для аппроксимации сложных пространственных кривых использовались короткие прямые линии (так называемая линейно-кусочная аппроксимация) или в лучшем случае дуги окружностей. Следствием линейной аппроксимации является ломаная линия с углами между прямолинейными участками. Такая аппроксимация сложной траектории вызывает ряд проблем в процессе высокоскоростной обработки [3-5]:

1) динамические погрешности, или так называемый "заброс" инструмента, т.е. отклонение от заданной траектории вследствие люфтов и ограниченных динамических характеристик станка при прохождении на высоких скоростях узловых точек ломаной траектории. Отклонения от траектории зависят как от угла излома траектории, так и от величины подачи. Для исключения динамических погрешностей при сохранении заданной подачи углы между сопрягаемыми отрезками траектории должны приближаться к 180°. Такие значения углов могут быть достигнуты за счет уменьшения длин линейных участков траектории;

2) скачки ускорения. Наличие изломов требует введения торможения при их прохождении. В результате эффективная подача может заметно снижаться по сравнению с расчетной. Для поддержания усредненной подачи на приемлемом уровне требуется высокое осевое ускорение. Теоретически возникает необходимость в бесконечно большом ускорении. Однако система управления должна ограничивать динамику отдельных осей, чтобы не превышать максимально допустимое ускорение. Это удастся только при определенном уменьшении пиковой скорости на узлах, что снижает производительность обработки;

3) колебания. Скачки ускорения при использовании систем регулирования без слежения приводят к колебаниям станка и экстремальной нагрузке на приводы подачи;

4) время отработки кадра. Система ЧПУ является тактовой системой. Время цикла кадра обычно от 1 до 10 мс. Между средним отрезком траектории L (в мм), временем T (в мс) и максимально возможной подачей F_{\max} (в м/мин) существует зависимость [3]:

$$F_{\max} = \frac{L}{T} * 60.$$

Например, при $L = 10$ мкм и $T = 2$ мс максимальная подача ограничивается до $F_{\max} = 0,3$ м/мин. Поэтому короткие линейные участки траектории приводят к ограничению максимально возможной подачи, что противоречит необходимой подаче при HSM;

5) объем управляющей программы (УП). Сокращение длины прямолинейных участков траектории неминуемо приводит к увеличению объема УП. Объем УП может достигать 20-30 Мбайт, в то время как объем памяти современных УЧПУ составляет 0,25-6 Мбайт. В связи с большим объемом УП возникают две существенные проблемы:

- сегментирование УП, т.е. деление программы на части (до нескольких десятков);
- время ввода УП в устройство ЧПУ и ее "электронная" обработка при формировании управляющих сигналов для приводов станка. Электронная обработка программы при большом ее объеме будет фактически отставать от реальной обработки детали, а, следовательно, будет тормозить ее.

Управление HSM-станками

Чтобы отвечать специальным потребностям HSM-станков, системы ЧПУ должны обладать достаточной вычислительной мощностью и удовлетворять нескольким важным требованиям:

- короткий цикл кадра управляющей программы не более 1 мс и соответственно скорость обработки приблизительно 100 кадров в секунду. При высоких скоростях подачи, используемых в HSM-станках, кадры должны обрабатываться быстро, оставляя очень короткое время для их считывания и подготовки;

- функция "look ahead" ("просмотр вперед"), т.е. предварительный просмотр траектории инструмента, позволяющий заранее обнаружить углы и кромки, автоматически на время снизить скорость до допустимого уровня и предотвратить отклонения в контуре. Одновременно должна соответствующим образом регулироваться скорость вращения шпинделя;

- интерполяция сложных поверхностей посредством сплайнов. Сплайн-интерполяция включает аппроксимацию сложных поверхностей посредством многих тысяч небольших линейных траекторий и решает ряд проблем HSM, связанных с качеством и производительностью обработки, динамикой перемещения рабочих органов, длиной управляющей программы и временем ее обработки;

- по возможности, "нулевое рассогласование с контуром". Несмотря на высокие скорости подачи, движение по оси не должно иметь никакой ошибки рассогласования, чтобы достичь высокой степени точности контура;

- ограничение темпа ускорения по направлению траектории и по направлению оси для защиты станка;

- компенсация статических, динамических и температурных ошибок станка. При этом можно достигнуть точности обработки, которая раньше достигалась только при больших затратах на механические компоненты.

Для реализации режима "look ahead" в устройстве ЧПУ используется специальный блок, который выполняет комплекс расчетов: 1) определение продолжительности отработки кадра УП в постоянных циклах интерполяции; 2) вычисление вектора контурной скорости в начале и в конце кадра; 3) определение пути инструмента в системе координат станка; 4) расчет радиуса кривизны траектории движения. В результате определяется скорость в конце кадра и новое значение контурной скорости подачи.

Следует учитывать, что необходимое для HSM незначительное ускорение одновременно с большой подачей и короткими перемещениями могут увеличить необходимую дистанцию предпросмотра до 1000 кадров. Если существует небольшой буфер просмотра вперед, то подачу траектории необходимо ограничить так, чтобы можно было регулировать торможение в любом месте программы.

Все станки, реализующие HSM, оснащаются блоком (одним или несколькими) сплайн-интерполяции. Опыт показывает, что одна запись сплайнов может заменить от 5 до 10 линейных кадров при одинаковой точности [3].

Растущее использование CAD/CAM-систем требует новых подходов к формированию данных для системы ЧПУ и их обработке. Программирование посредством кусочно-ломаной аппроксимации заменяется либо на передачу сплайнов непосредственно из системы CAM в систему ЧПУ, либо на геометрическое преобразование (компрессию) линейных кадров внутри ЧПУ. По существу, формируемые системой CAD геометрические данные о сложных поверхностях представляют собой неравномерный рациональный базовый сплайн, или NURBS (non-uniform rational b-spline). Данные могут прямо приниматься и обрабатываться непосредственно системой ЧПУ. В таком случае отпадает необходимость в постпроцессоре, преобразующем программную информацию в команды ЧПУ. Это обеспечивает гораздо более ровную динамику станка, несмотря на высокие ускорения и скорости, что в свою очередь положительно влияет на качество обработанной поверхности.

Цифровые приводы

Одной из важнейших функций ЧПУ для высокоскоростной обработки является точное управление приводами подачи и шпинделями. Традиционное аналоговое соединение ЧПУ с аналоговыми приводами заменяется цифровыми приводами, которые подключаются к ЧПУ посредством цифровой высокоскоростной шины. Для регулирования положения, частоты вращения и момента двигателя используются технологии цифрового управления. При этом измерительные системы очень точно определяют фактическое положение осей. В рамках регулирования посредством цифрового привода существуют следующие функции [3]:

- цифровая регистрация частоты вращения и траектории;
- алгоритмы регулирования высокого порядка, особенно компенсация ошибок вычисления траектории благодаря предварительной установке частоты вращения и момента;
- разнообразные виды анализа, например, измерение частотных характеристик;
- автоматическое круговое тестирование с самооптимизацией реверсивных ошибок, возникающих на мертвых точках осей (квадрантные ошибки), посредством нейронной сети;
- подключение непосредственных приводов, например линейных двигателей;
- двухканальная реализация функций защиты станка посредством процессора ЧПУ и привода.

Многочисленные структуры управления для сокращения ошибок вычисления траектории и проблем жесткости станка, такие как ограничение темпа ускорения, предварительная установка частоты вращения и момента, повышают производительность обработки и точность деталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Высокоскоростное фрезерование (HSC). По материалам проработок фирмы Hermle // Galika AG [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: http://www.galika.ru/article_8.htm. 2. Ящерицын П.И., Фельдштейн Е.Э., Корниевич М.А. Теория резания. – Мн.: Новое знание, 2005. – 512 с. 3. Высокоскоростное фрезерование. Информационные материалы департамента "Автоматизация и приводы" фирмы Siemens. [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: http://www.automation-drives.ru/mc/archive/press/hsc_ito.pdf. 4. Аркадов А.Ю., Николаев П.М. Программирование обработки сложных поверхностей с повышенными точностью и производительностью // Информационные технологии в проектировании и производстве (ИТПП). – М.: 2000, №1. – С.54-57. 5. В.И.Шпорт, В.Ф.Кузьмин, С.Б.Марьин. Высокоскоростное фрезерование криволинейных поверхностей // Теория и практика машиностроения. – Мн.: 2003, №1. – С.53-56.

УДК 621.313.84

Литвинов Е.А., Карпович С.Е., Агранович А.А.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПЛАТФОРМЫ МАНИПУЛЯЦИОННОГО МЕХАНИЗМА С ШЕСТЬЮ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ СРЕДСТВАМИ MATLAB/SIMULINK

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Беларусь*

ВВЕДЕНИЕ

Механизм, представленный на рис. 1, относится к классу параллельных манипуляционных механизмов с шестью степенями свободы. Данный класс исполнительных робототехнических устройств нашёл широкое применение в промышленных роботах, станках с ЧПУ, системах тестирования и контроля параметров объекта [1]. Манипуляционные механизмы с шестью степенями свободы позволяют создавать управляемые электромеханические системы, реализующие любые перемещения исполнительного элемента в пространстве, задаваемые шестью независимыми законами движения, например, тремя линейными координатами и тремя угловыми координатами, характеризующими пространственное, плоскопараллельное и угловое перемещение при переходе исполнительного элемента из одного положения в другое [2].

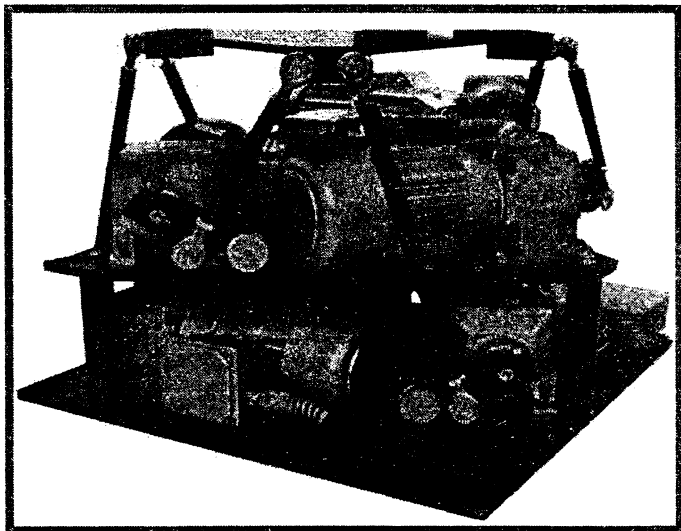


Рисунок 1 - Манипуляционный механизм с шестью степенями свободы

АНАЛИЗ ДВИЖЕНИЙ ПЛАТФОРМЫ МАНИПУЛЯЦИОННОГО МЕХАНИЗМА

Рассматриваемый механизм, в соответствии с его схемой (рис. 2), состоит из подвижной площадки P , звеньев 1, 2, ..., 6, жёстко связанных с вращающимися элементами

двигателей $D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, D_6$ которые, в свою очередь, посредством сферических шарниров и промежуточных шатунов 7, 8, ..., 12 связаны с площадкой P [3].

В соответствии со структурной схемой (рис. 2) механизма звенья 1, 2, ..., 6 являются входными, законы перемещения которых, задаются непосредственно управляемыми двигателями. Выходное звено механизма – это подвижная площадка P , связанная с подвижными входными звеньями посредством шести подвижных шатунов 7, 8, 9, 10, 11, 12, образующих, как с подвижной площадкой, так и с входными звеньями сферические кинематические пары $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6$ и $N_1, N_2, N_3, N_4, N_5, N_6$.

Моделирование перемещений платформы манипуляционного механизма с шестью степенями свободы сводится к определению положения и ориентации подвижной площадки P относительно абсолютной (неподвижной) системы координат $OXYZ$ по заданным геометро-конструктивным параметрам механизма, входным переменным параметрам, задаваемым обобщёнными угловыми координатами поворота подвижных элементов шести приводов.

Для механизма, изображённого на рис. 2, входными задаваемыми переменными будут углы поворота валов двигателей ($\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_6$), выраженные как углы поворота соответствующих кривошипов $O_1N_1, O_2N_2, \dots, O_6N_6$. Таким образом, по известным углам σ_i ($i = 1, 2, \dots, 6$) ставится задача в определении соответствующего положения и ориентации платформы в пространстве. Под положением платформы понимают x, y, z смещения, а под ориентацией – углы поворота вокруг оси z (угол φ), поворота вокруг оси y (угол θ), поворота вокруг оси x (угол ψ).

Сферические шарниры, характеризуемые на схеме (рис.2) точками N_i ($i=1, 2, \dots, 6$), связаны с рабочей площадкой P шестью шатунами, представленными длинами N_iA_i ($i=1, 2, \dots, 6$), которые в точке A_i сопрягаются с площадкой тоже сферическими шарнирами. Это конструктивное исполнение механизма может быть аналитически описано векторным условием неизменности в процессе движения длин самих шатунов:

$$|\vec{R}^{(N_i)} - \vec{R}^{(A_i)}| = l, \quad (1)$$

где $\vec{R}^{(N_i)}, \vec{R}^{(A_i)}$ – радиус-векторы соответственно точек N_i и A_i в декартовой системе координат $OXYZ$.

Радиус-вектор $\vec{R}^{(A_i)} = (x^{A_i}, y^{A_i}, z^{A_i})$ определяет положение каждой точки A_i принадлежащей площадке P в системе координат $OXYZ$. Для пересчёта координат точек A_i из системы координат площадки P неподвижную систему координат $OXYZ$ необходимо воспользоваться матричным равенством:

$$\vec{R}^{(A_i)} = M \cdot \vec{R}_i, \quad (2)$$

где

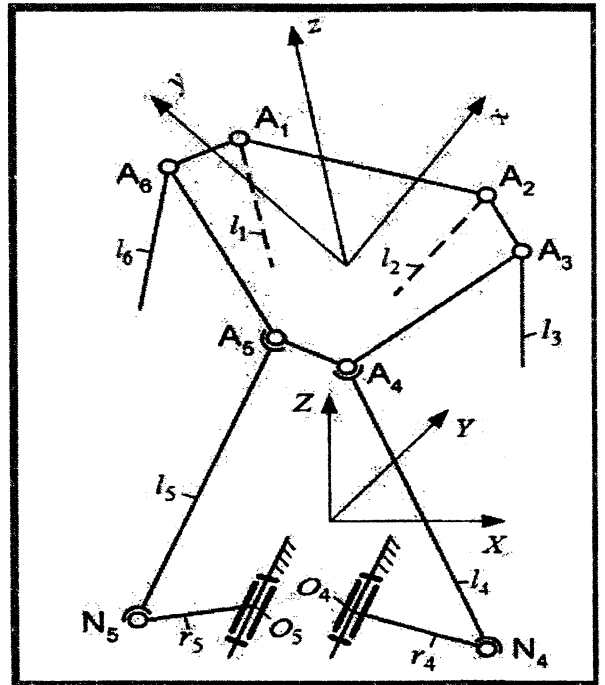


Рисунок 2 - Структурная схема механизма

$$M = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \theta & -\sin \varphi \cos \psi + \cos \varphi \sin \theta \sin \psi & \sin \varphi \sin \psi + \cos \varphi \sin \theta \cos \psi & x_0 \\ \sin \varphi \cos \theta & \cos \varphi \cos \psi + \sin \varphi \sin \theta \sin \psi & -\cos \varphi \sin \psi + \sin \varphi \sin \theta \cos \psi & y_0 \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \psi & \cos \theta \cos \psi & z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Векторное условие (1) для всех шести шатунов можно записать в скалярном виде:

$$(x^{A_i} - x^{N_i})^2 + (y^{A_i} - y^{N_i})^2 + (z^{A_i} - z^{N_i})^2 = l_i^2, \quad (i=1, 2, \dots, 6). \quad (4)$$

Выполнив подстановку в выражение (4) координат $x^{A_i}, y^{A_i}, z^{A_i}$ и $x^{N_i}, y^{N_i}, z^{N_i}$ на функциональном уровне получим систему из шести уравнений:

$$\begin{cases} F_1(x^{A_1}, x^{N_1}, y^{A_1}, y^{N_1}, z^{A_1}, z^{N_1}) - l^2 = 0 \\ F_2(x^{A_2}, x^{N_2}, y^{A_2}, y^{N_2}, z^{A_2}, z^{N_2}) - l^2 = 0 \\ F_3(x^{A_3}, x^{N_3}, y^{A_3}, y^{N_3}, z^{A_3}, z^{N_3}) - l^2 = 0 \\ F_4(x^{A_4}, x^{N_4}, y^{A_4}, y^{N_4}, z^{A_4}, z^{N_4}) - l^2 = 0 \\ F_5(x^{A_5}, x^{N_5}, y^{A_5}, y^{N_5}, z^{A_5}, z^{N_5}) - l^2 = 0 \\ F_6(x^{A_6}, x^{N_6}, y^{A_6}, y^{N_6}, z^{A_6}, z^{N_6}) - l^2 = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Если в системе уравнений (5) координаты точек $x^{A_i}, y^{A_i}, z^{A_i}, x^{N_i}, y^{N_i}, z^{N_i}$ выразить через переменные $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_6$ и $x, y, z, \varphi, \theta, \psi$, то станет очевидно, что входные переменные $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_6$ и выходные переменные $x, y, z, \varphi, \theta, \psi$ связаны через трансцендентные нелинейные выражения, не позволяющие разрешить выходные переменные в явном виде. Поэтому вычислительное решение в сделанной постановке возможно только численными методами [4].

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПЛАТФОРМЫ СРЕДСТВАМИ MATLAB/SIMULINK

На программном уровне моделирование перемещений платформы манипуляционного механизма формулируется в нахождении искоемых величин $x, y, z, \varphi, \theta, \psi$ определяющих положение и ориентацию подвижной площадки, в зависимости от входных значений углов поворота подвижных элементов шести приводов, входного вектора начальных значений $(x_0, y_0, z_0, \varphi_0, \theta_0, \psi_0)$ поиска решений и заданного метода оптимизации.

Под вектором начальных значений поиска решений понимают значения переменных $x_0, y_0, z_0, \varphi_0, \theta_0, \psi_0$ в области поиска решений начиная с которых происходит процесс оптимизации. Система нелинейных уравнений в вычислительном алгоритме – это совокупность уравнений с искомыми переменными $x, y, z, \varphi, \theta, \psi$. Процесс оптимизации происходит до тех пор пока значение оценочной функции в процессе итерационного поиска решений не станет меньше заданной точности или новые значения искоемых переменных параметров в процессе оптимизации изменяются на величину меньшую чем заданную предельно допустимую.

Для моделирования перемещений платформы манипуляционного механизма в пакете моделирования MATLAB/SIMULINK была создана расчётная программа. Интерфейс программы приведён на рис. 3.

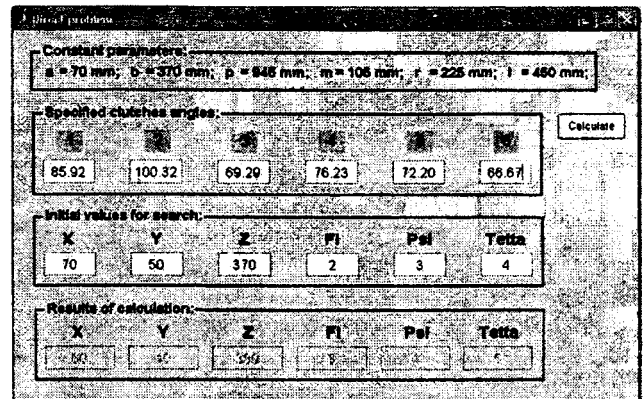


Рисунок 3 - Интерфейс программы моделирования перемещений

Для тестового примера рассмотрим случай нахождения положения (координаты x, y, z) и ориентации (углы φ, θ, ψ) подвижной площадки платформы относительно абсолютной (неподвижной) системы координат $OXYZ$ для заданных углов поворота $\sigma_1, \sigma_2 \dots, \sigma_6$) подвижных элементов (валов) шести приводов. Зададим следующие входные данные: $\sigma_1 = 85, 92^\circ, \sigma_2 = 100, 32^\circ, \sigma_3 = 69, 29^\circ, \sigma_4 = 76, 23^\circ, \sigma_5 = 72, 20^\circ, \sigma_6 = 66, 67^\circ$. Зададимся вектором начальных значений поиска решений $(x_0, y_0, z_0, \varphi_0, \theta_0, \psi_0)$, где величины $x_0, y_0, z_0, \varphi_0, \theta_0, \psi_0$ определяют начало поиска решений (точку спуска). Примем $x_0 = 70$ мм, $y_0 = 50$ мм, $z_0 = 370$ мм, $\varphi_0 = 2^\circ, \theta_0 = 4^\circ, \psi_0 = 3^\circ$.

Выходом из данной ситуации служит разработанный и реализованный в данной программе подход последовательных решений, в соответствии с которым, решение предыдущего этапа прямой задачи (значения искомым переменных $x, y, z, \varphi, \theta, \psi$) является входной начальной точкой спуска итерационного процесса нахождения новых конечных решений $x, y, z, \varphi, \theta, \psi$ для следующих значений $\sigma_1, \sigma_2 \dots, \sigma_6$. Как показывают результаты, такой подход имеет существенное преимущество при моделировании перемещений платформы манипуляционного механизма для плавно изменяющихся значений углов поворота управляющих валов двигателей.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Ahranovich, S. Karpovich, K. Zimmermann, J. Zentner Multicoordinate Positioning System for Industrial Equipment Design Method // Proceedings of 51st International Scientific Colloquium Ilmenau (Germany), September 11-15, 2006 TU-Ilmenau, 2006. - p.139-140.
2. Русецкий А.М. Координатные позиционеры гибких производственных систем для электронного машиностроения. – Мн.: Военная академия РБ, 1998. – 177 с.
3. Межинский Ю.С. Построение систем перемещений для гибкого автоматизированного оборудования. – Минск: Технопринт, 2002. – 120 с.
4. Карпович С.Е., Жарский В.В., Ляшук Ю.Ф., Межинский Ю.С. Прецизионные координатные системы на основе электропривода прямого действия. – Минск: ГНПКТМ «Планар», 2001. – 198 с.

УДК 621.313.84

Карпович С.Е., Поляковский В., Жарский В.В., Агранович А.А.

АНАЛИЗ И ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ КОЛЛИЗИЙ ПЛАНАРНЫХ ПОЗИЦИОНЕРОВ В СИСТЕМЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ТРИПЛАНАР

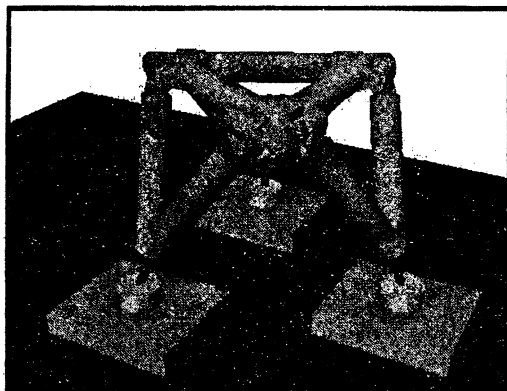
*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Беларусь*

ВВЕДЕНИЕ

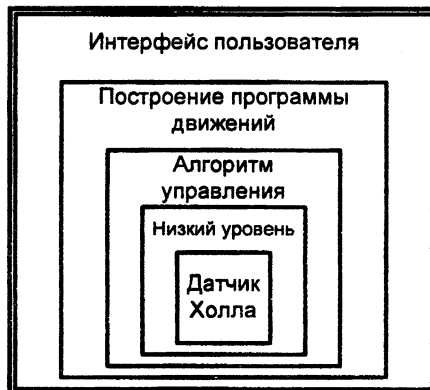
В последние годы в станках с ЧПУ, промышленных роботах, автоматизированном измерительном и спецтехнологическом оборудовании все чаще используются параллельные манипуляционные системы (ПМС), которые характеризуются высокой структурной жесткостью, повышенными кинематическими и динамическими свойствами, хорошими массогабаритными показателями. К такому классу механизмов относится рассматриваемый в настоящей статье Трипланар [1], созданный совместными усилиями технического университета г. Ильменау (Германия), БГУИР (Минск) и СП Рухсервомотор (Минск).

Трипланар представляет собой ПМС в виде раскрывающегося тетраэдра (рис. 1,а), верхние ребра которого определяют подвижный треугольник (исполнительный элемент), с которым жестко связывается рабочая платформа с инструментом или заготовкой. Верхние ребра представляют собой шарнирные соединения, нижние выполнены таким образом, что

нижние вершины боковых треугольников могут быть связаны с тремя планарными приводами посредством сферических шарниров. Рабочая платформа механизма обладает шестью степенями свободы за счет независимого плоскопараллельного перемещения трех планарных приводов. В качестве датчиков обратной связи в планарных приводах ПМС Трипланар используются датчики на основе эффекта Холла.



а



б

Рисунок 1- Внешний вид и уровни системы управления Трипланар

Систему управления Трипланар можно представить состоящей из пяти уровней. Каждый уровень системы управления базируется на более низком уровне, используя для обработки информацию с этого уровня. Структурная блок-схема, дающая представление об иерархии системы управления ТриПланар, представлена на рис. 1,б.

Самыми низкими подуровнями в иерархии системы управления являются датчик Холла и система измерения, включающая аппаратные или программные фильтры, а также другие средства обработки сигнала датчика с целью получения достоверной информации о положении каждого из трех подвижных двухкоординатных планарных позиционеров. Под алгоритмом управления понимается регулятор системы управления отдельным приводом, это может быть ПИД-регулятор, регулятор на основе фильтра Гизекина [3] или другой, обеспечивающий необходимые динамические и точностные характеристики исполнительного механизма.

Интерфейс пользователя необходим для взаимодействия пользователя с системой управления и облегчения ввода управляющей информации для системы управления. Подсистема, реализующая построение программных движений, связывает интерфейс пользователя с остальными уровнями.

РАСЧЁТНАЯ МОДЕЛЬ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ КОЛЛИЗИЙ ДЛЯ ТРЁХ ПЛАНАРНЫХ ЛШД НА ОДНОМ СТАТОРЕ

Расчетная модель системы перемещения построенная на трех планарных ЛШД, в дальнейшем называемых координатными позиционерами КП1, КП2 и КП3 показано на рис.2.

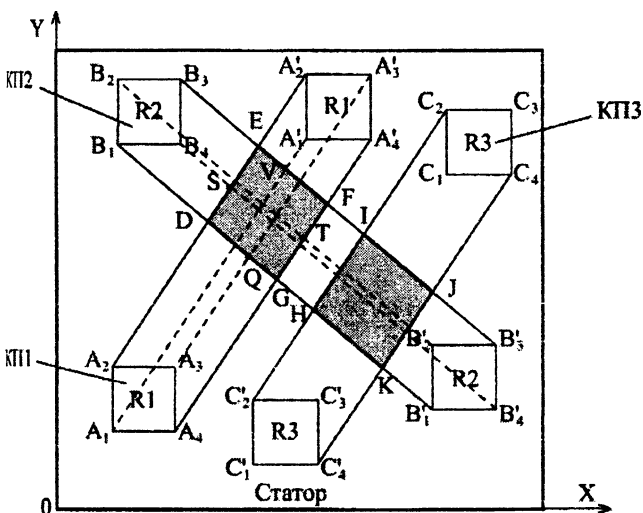


Рисунок 2 - Расчетная модель анализа коллизий трех планарных позиционеров на одном статоре

Внешний прямоугольный контур, показанный на рис.2, определяет рабочую зону на статоре, выход за границы которой в процессе перемещения позиционеров не возможен. Прямоугольники $A_1A_2A_3A_4$, $B_1B_2B_3B_4$ и $C_1C_2C_3C_4$ определяют область, которую в начальный или в данный момент времени занимают соответственно КП1, КП2 и КП3. Квадратные, а в

общем случае прямоугольные области позиционеров, это по сути дела их проекции на рабочую плоскость статора. Прямоугольники $A_1A_2A_3A_4$, $B_1B_2B_3B_4$ и $C_1C_2C_3C_4$ определяют геометрическое место конечного положения соответственно КП1, КП2 и КП3.

Предполагается, что проекции инструмента, в общем случае инструментальных роботов R1, R2, R3, установленных соответственно на КП1, КП2 и КП3, не выходят за контуры площади позиционера.

В дальнейшем в работе будет рассматриваться геометро-кинематический анализ движения трех планарных позиционеров на одном статоре при их линейном перемещении между соответствующими двумя точками с постоянной скоростью [2]. Геометрически зоны перемещения позиционеров в работе принято описывать их так называемыми шлейфами, которые представляют собой геометрическую область, в которой осуществляется движение позиционера при переходе из начального положения в конечное. Так, для позиционера КП1 в соответствии с рис.2 шлейфом является фигура в виде шестиугольника $A_1A_2A_2'A_3A_4A_4'$. Геометрическая область, образованная пересечением шлейфов позиционеров является зоной, в которой возможно столкновение позиционеров (общая зона). Так, для КП1 и КП2 общей зоной является четырехугольник DEFG.

Из анализа расчетной модели следует, что при совместном движении координатных позиционеров КП1, КП2 и КП3 возможны различные ситуации:

коллизии в одновременном движении позиционеров полностью отсутствуют, когда шлейфы движения, построены по начальным и конечным положениям позиционеров не пересекаются;

коллизии в движении позиционеров возможны, если шлейфы пересекаются. В этом случае для бесколлизийного движения позиционеров необходимо формировать и обеспечивать при движении необходимые условия, построенные на правиле приоритетов, устанавливающим очередность вхождения позиционеров КП1, КП2 и КП3 для каждой пары позиционеров в их общую зону;

особые случаи коллизий, которые включают критические зоны, возникающие при некоторых частных конфигурациях, при которых полное движение позиционеров от начальной до конечной точки не возможно, или возможно при особых условиях.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ АНАЛИЗА И ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ КОЛЛИЗИЙ ТРЕХ ПЛАНАРНЫХ ЛШД НА ОДНОМ СТАТОРЕ ПРИ ИХ РАВНОМЕРНОМ ДВИЖЕНИИ

Разработанный алгоритм основан на том, что каждый позиционер представляется его проекцией на плоскость статора в виде геометрического места, ограниченного подвижным четырехугольником.

Не нарушая общности решения поставленной задачи по предотвращению коллизий, нами разработан и реализован алгоритм анализа коллизий трех планарных позиционеров КП1, КП2 и КП3, имеющих форму квадрата с длиной стороны L, при их прямолинейном движении между начальными и конечными положениями.

Параметрические уравнение перемещения любой точки позиционера в выбранной системе координат X0Y (рис.2) имеют вид:

$$\begin{cases} x = x_0 + v_x t, \\ y = y_0 + v_y t, \end{cases} \quad (1)$$

где $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$ - скорость позиционера на траектории в виде прямой.

При этом уравнение траектории будет иметь вид:

$$y = k \cdot x + b, \quad (2)$$

где $k = \operatorname{tg} \varphi = \frac{v_x}{v_y}$ - угловой коэффициент траектории движения.

Если задана начальная и конечная точки перемещения, то постоянные параметры прямой (2) рассчитываются по формулам:

$$k = \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0}, \quad b = y_0 - \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} x_0, \quad (3)$$

где x_0, y_0 координаты начальной точки перемещения; x_1, y_1 - координаты конечной точки перемещения.

В этом случае значения v_x и v_y будут определяться по формулам:

$$\begin{cases} v_x = v \cdot \cos\varphi \\ v_y = v \cdot \sin\varphi, \end{cases} \quad (4)$$

где

$$\begin{cases} \arctg\left(\frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0}\right), \text{ если } y_1 - y_0 \geq 0, \\ 180 + \arctg\left(\frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0}\right), \text{ если } y_1 - y_0 < 0. \end{cases} \quad (5)$$

Таким образом, по заданным начальным и конечным точкам движения позиционеров однозначно определяем уравнения их траекторий.

Так, для позиционера КП1 уравнение траектории будет иметь вид:

$$y = k_1 \cdot x + b_1, \quad (6)$$

где коэффициенты k_1 и b_1 определяются по формулам (3).

Это уравнение можно записать в параметрической форме:

$$\begin{cases} x = x_0^{(1)} + v_x^{(1)} t, \\ y = y_0^{(1)} + v_y^{(1)} t, \end{cases} \quad (7)$$

где $v_x^{(1)}$ и $v_y^{(1)}$ определяются по формуле (4).

Аналогичные выражения можно записать и для траекторий перемещений позиционеров КП2 КП3.

Как следует из рис.2, областью, в которой возможно столкновение позиционеров является геометрическое место пересечения их шлейфов движения. Так, общей зоной для позиционеров КП1 и КП2 является четырехугольник DEFG, для КП2 и КП3 – HIJK. При движении позиционеров производится анализ их местоположения относительно этих участков. При этом алгоритм построен таким образом, что при нахождении одного из позиционеров в общей зоне другому вход в нее запрещен. Далее алгоритм анализа и предотвращения коллизий рассмотрим на примере движения позиционеров КП1 и КП2.

Для позиционера КП1 точкой входа в запрещенную зону является точка Q, точкой выхода – точка V. Позиционер КП2 входит в запрещенную зону в точке S и выходит в точке T. Координаты этих точек определяются из следующих выражений:

$$X_S = \frac{b_{B_4A_4} - b_{A_2A_2}}{k_1 - k_2}, \quad Y_S = \frac{b_{B_4A_4} - b_{A_2A_2}}{k_1 - k_2} \cdot k_1 + b_{A_2A_2}; \quad (8)$$

$$X_T = \frac{b_{B_2B_2} - b_{A_4A_4}}{k_1 - k_2}, \quad Y_T = \frac{b_{B_2B_2} - b_{A_4A_4}}{k_1 - k_2} \cdot k_1 + b_{A_4A_4}; \quad (9)$$

$$X_Q = \frac{b_{A_3A_3} - b_{B_1B_1}}{k_2 - k_1}, \quad Y_Q = \frac{b_{A_3A_3} - b_{B_1B_1}}{k_2 - k_1} \cdot k_2 + b_{B_1B_1}; \quad (10)$$

$$X_V = \frac{b_{A_1A_1} - b_{B_3B_3}}{k_2 - k_1}, \quad Y_V = \frac{b_{A_1A_1} - b_{B_3B_3}}{k_2 - k_1} \cdot k_2 + b_{B_3B_3}; \quad (11)$$

где C_s, Y_s - координаты точки S_T , X_T, Y_T - координаты точки T ; X_Q, Y_Q - координаты точки Q ; X_V, Y_V - координаты точки V ; $b_{A_1A_1}, b_{A_2A_2}, b_{A_3A_3}, b_{A_4A_4}, b_{B_1B_1}, b_{B_2B_2}, b_{B_3B_3}, b_{B_4B_4}$ - постоянные параметры реализуемой прямолинейной траектории, выражаемые через прямые $A_1A_1, A_2A_2, A_3A_3, A_4A_4, B_1B_1, B_2B_2, B_3B_3, B_4B_4$ соответственно.

k_1, k_2 - угловые коэффициенты реализуемой прямолинейной траектории позиционеров КП1 и КП2 соответственно.

При разработке алгоритма принято следующее правило приоритетов: преимущество при движении имеет тот позиционер, который первым войдет в общую зону. Для определения моментов времени, в которые позиционеры войдут в общую зону, используем следующие соотношения:

$$t_{1in} = \frac{\sqrt{(X_Q - X_O)^2 + (Y_Q - Y_O)^2}}{V_1}, \quad t_{2in} = \frac{\sqrt{(X_S - X_M)^2 + (Y_S - Y_M)^2}}{V_2}, \quad (12)$$

где x_0, y_0 - координаты точки O , X_M, Y_M - координаты точки M ;

V_1, V_2 - скорость движения позиционеров КП1 и КП2 соответственно.

Сравнивая значения t_{1in} и t_{2in} , определяем позиционер, который имеет приоритет.

Предположим, что $t_{1in} < t_{2in}$. Тогда приоритет движения имеет позиционер КП1, т.е. он может двигаться без остановок.

Позиционер КП2 не может войти в общую зону пока в ней находится позиционер КП1. Момент времени, в который позиционер КП1 покинет общую зону определяется из следующего соотношения:

$$t_{1out} = \frac{\sqrt{(X_O - X_V)^2 + (Y_O - Y_V)^2}}{V_1}. \quad (13)$$

Если $t_{2in} < t_{1out}$, то позиционер КП2 должен остановиться на время

$$\Delta t = t_{out1} - t_{in2}. \quad (14)$$

В момент времени $t = t_{in2} + \Delta t$ позиционер КП2 может продолжить свое движение.

Аналогично производится расчет временных характеристик входа и выхода позиционеров КП1, КП2 и КП3 в другие общие зоны. Дальнейший совместный анализ этих временных характеристик позволяет формировать диаграмму движения $S(t)$ в виде графика перемещения соответствующего позиционера во времени.

ИНТЕРАКТИВНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ДВИЖЕНИЯ ДВУХ ПЛАНАРНЫХ ЛШД НА ОДНОМ СТАТОРЕ

Представленный выше алгоритм был использован при разработке программы интерактивной визуализации бесколлизийного движения трех планарных позиционеров на одном статоре. Интерактивная визуализация была разработана в среде Macromedia Flash MX 2004.

Интерфейс разработанной программы представлен на рис.3.

Движение позиционеров А, В, С осуществляется в пределах прямоугольной рабочей зоны статора. Начальное и конечное положение позиционеров на статоре задается при помощи мыши. Для задания скорости позиционеров имеются специальные окна. В нижнем правом углу в реальном масштабе времени синхронно с перемещениями позиционеров отображаются их циклограмма движения, отражающая перемещение позиционеров относительно их начальной точки движения.

Интерактивная работа пользователя с программой визуализации осуществляется в такой последовательности:

- пользователь задает скорости движения позиционеров;

- устанавливает с помощью мыши начальные и конечные положения позиционеров А, В, С на рабочем поле статора;
- нажатием на кнопку Play активизируется визуализация циклического движения позиционеров из начальных положений в конечные при управлении движением по разработанному алгоритму предотвращения коллизий, который формирует текущее состояние позиционеров и согласованных диаграмм движения.

Разработанная программа интерактивной визуализации предназначена для программирования бесколлизийной работы двух планарных позиционеров на одном статоре. Эта проблема является весьма актуальной в зондовом оборудовании контроля многослойных печатных плат, имеющих большие размеры, когда автоматическое тестирование возможно только с помощью четырех и более зондов, попарно расположенных на координатных позиционерах верхнего и нижнего статора [2]. Эта программа позволяет проводить анализ траектории движения координатных позиционеров при реализации общего задания на тестирование и выбора оптимальных траекторий движения. При некоторой доработке разработанная программа на базе алгоритма бесколлизийного движения двух планарных позиционеров может быть встроена в общий программный комплекс системы управления класса оборудования для микроэлектроники, в котором используется совместная работа двух планарных позиционеров.

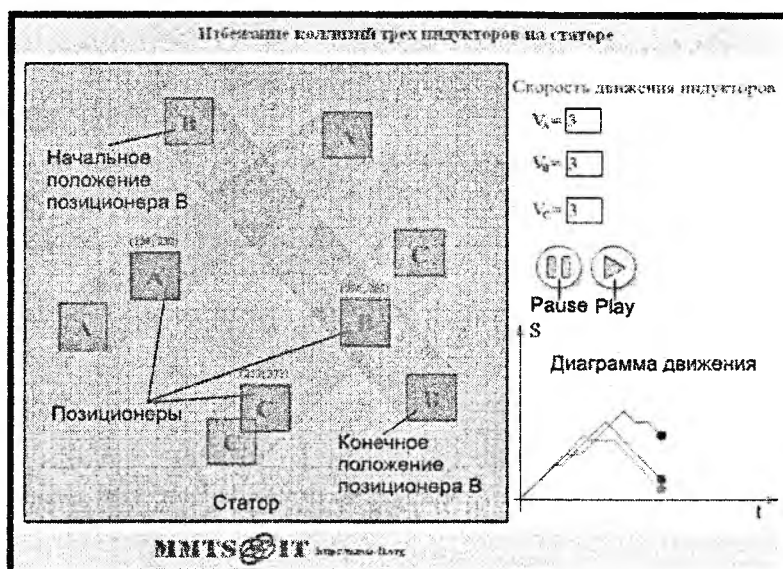


Рисунок 3 - Интерфейс интерактивной визуализации для исследования трех планарных ЛШД на одном статоре

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показано, что построение программных движений комплекса Трипланар связано с необходимостью алгоритмического представления возможных коллизий при перемещениях трех планарных позиционеров на одном статоре;

2. Предложен параметрический аналитический алгоритм предотвращения коллизий трех планарных позиционеров, полученный методами аналитической геометрии, в сочетании с заложенной в алгоритме системой приоритетов. Программное обеспечение на основе разработанного алгоритма предназначено для встраивания в ПО системы управления Трипланар;

3. Разработана программа интерактивной визуализации движения трех планарных позиционеров при задаваемых с помощью мыши их начальных и конечных положений. Эта программа может быть использована при наладке системы перемещений Трипланар по визуализации, формируемой позиционными датчиками Холла, имеющимися в планарных позиционерах.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Ahranovich, S.Karpovich, K.Zimmermann, J.Zentner Multicoordinate Positioning System for Industrial Equipment Design Method // Proceedings of 51st International Scientific Colloquium Ilmenau (Germany), September 11-15,2006 TU-Ilmenau, 2006. - p.139-140.
2. Онегин Е.Е., Зенькович В.А., Битно Л.Г. Автоматическая сборка ИС – Мн.: Выш. шк., 1990. – 383 с.

ПЛАНАРНЫЙ ПРИВОД С МЕХАНИЗМОМ ОГРАНИЧЕНИЯ РАЗВОРОТА

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Беларусь

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время элементной базой многокоординатного электропривода являются электромагнитные координатные позиционеры, обеспечивающие прямолинейные, вращательные, плоскопараллельные движения, а также сложные движения в декартовой, цилиндрической и сферической системах координат, осуществляемых без кинематических трансмиссий и преобразователей [1...3].

Наиболее широко в спецтехнологическом оборудовании для производства изделий микроэлектроники применяются планарные позиционеры на базе линейных шаговых двигателей (ЛШД), позволяющие реализовать позиционные и контурные перемещения [4...7]. При этом координатные позиционеры на ЛШД характеризуются модульностью, однотипностью независимо от вида движения и управления, возможностью работы по программе и построения как разомкнутых систем, так и систем с обратной связью в зависимости от назначения оборудования.

Одним из факторов, влияющих на точность позиционирования планарного позиционера, является разворот в плоскости движения вокруг оси Z . Анализ этой проблемы и ее решению посвящена настоящая работа.

АНАЛИЗ УГЛА РАЗВОРОТА

Будем рассматривать планарный X, Y -позиционер, координатные модули которого расположены симметрично относительно центра масс. Тяговое усилие каждой координаты при этом является суммой тяговых усилий, развиваемых каждой симметричной частью (элементарным координатным модулем) координаты.

В общем случае тяговые силы каждого плеча имеют распределенный характер. Однако для анализа общего характера тяговых сил, который будем проводить для одной координаты (координаты X), и синхронизирующих моментов, развиваемых планарным модулем в статике, можно считать, что тяговые силы F_1 и F_2 приложены в центре зубцовой зоны каждого плеча O_1 и O_2 . Тогда, если считать, что масса X, Y -платформы сосредоточена в центре O , то на эту платформу всегда действует пара сил F_1 и F_2 , которая может быть сведена к одной тяговой силе:

$$F = F_1 + F_2 \quad (1)$$

и моменту вращения M массы вокруг центра O , причем этот момент пропорционален разности этих сил

$$M = r(F_1 - F_2), \quad (2)$$

где r – плечо силы.

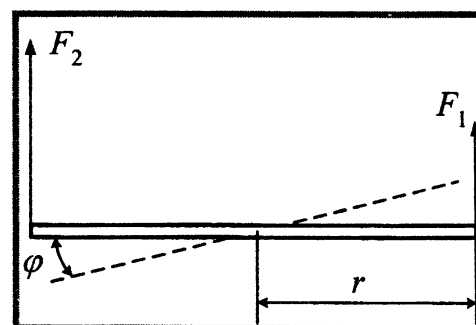


Рисунок 1- Силовая модель разворота планарного позиционера

Таким образом, подвижную платформу с полезными движениями по осям X и Y идеализированно можно представить в виде сосредоточенной массы m , обладающей моментом инерции J (рис. 1).

При воздействии на левое и правое плечи, каждое длиной r , внешних сил F_1 и F_2 уравнения движения тела массой m будет выглядеть как

$$\begin{aligned} m \cdot a &= F_1 \\ J \ddot{\varphi} &= M_1 \end{aligned} \quad (3)$$

где a – ускорение тела под действием результирующей силы.

Для шагового двигателя силы F_1 и F_2 есть тяговые координатные силы, являющиеся функцией тока фазной обмотки и динамической ошибки $(\gamma - x)$ или $(\gamma - y)$.

Для симметричных конструкций планарных позиционеров и одинаковом управлении левого и правого плеч $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma$. Тогда при идеальной эксплуатации привода силы, возникающие в планарном двигателе строго одинаковы с обеих сторон по отношению к центру масс системы

$$F_1 = F_2 = F_m \cdot \sin(\gamma - x). \quad (4)$$

На практике, однако, всегда может возникнуть неравенство сил F_1 и F_2 , обусловленное различными причинами. В результате поворот платформы на угол $\varphi_{\text{мех}}$ и возникающий при этом перенос зубцов индуктора относительно зубцов статора сводится к тому, что одно из плеч машины уходит вперед по отношению к центру масс, а другое отстает, что при анализе угловых характеристик равносильно изменению динамической ошибки, которая является углом рассогласования между мгновенными осями статора и индуктора. Увод в противоположные стороны левого и правого плеч платформы, согласно схеме, представленной на рис. 1, очевидно равен

$$x_{\text{мех}} = r \cdot \sin \varphi_{\text{мех}}. \quad (5)$$

Тогда при малых значениях φ , обычно имеющих место в реальном случае, уравнения для сил примут вид:

$$F_1 = F_m \cdot \sin(\gamma - x + \varphi); \quad F_2 = F_m \cdot \sin(\gamma - x - \varphi). \quad (6)$$

Суммарное синхронизирующее усилие одноименной координаты при этом равно

$$F = 2F_m \cdot \sin(\gamma - x) \cos \varphi, \quad (7)$$

а синхронизирующий момент имеет вид:

$$M = r(F_1 - F_2) = r \cdot 2F_m \cdot \cos(\gamma - x) \cdot \sin \varphi = M_m \cdot \cos(\gamma - x) \cdot \sin \varphi, \quad (8)$$

где $M_m = r \cdot 2F_m$.

Из выражения (7) видно, что при возникновении поворота величина тяговой силы модулируется по закону изменения $\cos \varphi$, т.е. поворот φ всегда действует в сторону уменьшения тяговой силы.

В соответствии с (8), развиваемый синхронизирующий момент пропорционален $\sin \varphi$, а его амплитуда зависит от величины динамической ошибки $(\gamma - x)$, т.е. от положения центра масс платформы. При $(\gamma - x) = \pi/2$ имеет место симметричное расположение левого и правого плеч платформы, и тогда, при возникновении поворота φ , тяговые усилия обоих плеч оказываются равными

$$\begin{aligned} F_1 &= F_m \cdot \sin(\gamma - x) \cdot \cos \varphi = F_m \cdot \cos \varphi, \\ F_2 &= F_m \cdot \sin(\gamma - x) \cdot \cos(-\varphi) = F_m \cdot \cos \varphi. \end{aligned} \quad (9)$$

Суммарное синхронизирующее усилие одноименной координаты равно максимальному значению

$$F_1 = 2F_m \cdot \cos \varphi, \quad (10)$$

а синхронизирующий момент, определяемый разностью сил левого и правого плеч, в соответствии с формулой (8), равен нулю.

Это важное обстоятельство имеет следующую физическую интерпретацию. Имеются две крайних ситуации. Первая крайняя ситуация соответствует движению с максимальным ускорением, когда $(\gamma - x) = \pi/2$. При этом $F = 2F_m$, и ускорение $a = 2F_m / \sum m = a_{max}$. Это сводится к тому, что суммарная электромагнитная сила может полностью использоваться в виде тяговой силы, и тогда синхронизирующий момент $M=0$. Это означает, что полностью отсутствует возможность для борьбы с поворотом, т.к. любое, даже самое незначительное поворотное воздействие приведет к неконтролируемому развороту подвижной платформы, и произойдет перенос зубцов индуктора относительно зубцов статора. Это повлечет за собой модуляцию тягового усилия в соответствии с (10), изменение ускорения $a = \frac{F}{m} \cos \varphi$. В результате нарушается программа движения.

Вторая крайняя ситуация сводится к следующему. Электромагнитные ресурсы двигателя могут быть полностью использованы для реализации поворотного движения или сопротивлению поворотному движению, при этом, однако, тяговое усилие равно нулю. Этот случай соответствует режиму холостого хода, когда $(\gamma - x) = 0$; $F = 2F_m \cdot \sin(\gamma - x) \cdot \cos \varphi = 0$, а ускорение $a = 2F_m / \sum m = 0$.

МЕХАНИЗМ ОГРАНИЧЕНИЯ УГЛА РАЗВОРОТА ИНДУКТОРА

Существенный недостаток всех систем перемещений на основе планарных ЛШД состоит в том, что устойчивое равновесное состояние индуктора поддерживается только благодаря восстанавливающему компенсационному моменту, возникающему при угловом смещении зубцовых структур индуктора относительно зубцовых структур статора. При этом такое смещение не должно превышать половины полюсного деления на периферии индуктора. При больших угловых смещениях происходит так называемое «опрокидывание» индуктора с выходом его из синхронизма.

По этим причинам проблема ограничения разворота и предотвращения «опрокидывания» индуктора при его программируемом движении была решена на конструктивном уровне, с помощью разработанного с участием авторов статьи и защищенного патентом 6986 РФ С1 [8] механизма формирования плоскопараллельного планарного движения (рис. 2).

Система перемещений состоит из неподвижного статора 1 с пересеченной зубцовой структурой типа «вафля» 2 и подвижного планарного индуктора 3, связанного с пантографным механизмом 4, у которого, по крайней мере, одно плечо сделано регулируемым в пределах величины A , обеспечивая при этом максимальный угол разворота индуктора $\pm \alpha$. При этом угол между канавками на статоре равен

$$\varphi_1 = 90^\circ \pm \Delta\varphi_1, \quad (11)$$

где $\Delta\varphi_1$ – угловой допуск на изготовление канавок.

Ряды зубцов электромагнитов на индукторе образуют между собой угол

$$\varphi_2 = 90^\circ \pm \Delta\varphi_2, \quad (12)$$

где $\Delta\varphi_2$ – угловой допуск на взаимное расположение зубцов электромагнитов.

В результате применения разработанного механизма формирования плоскопараллельного движения стабилизируется угол разворота в плоскости движения, что приводит к по-

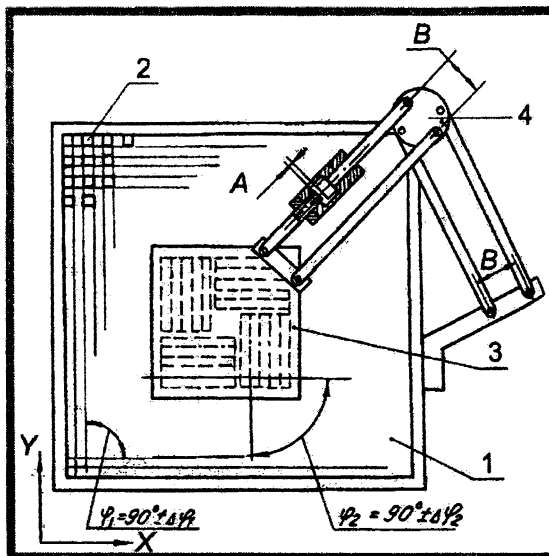


Рисунок 2- Схема механизма формирования планарного движения:

A – параметр настройки;
B – параметр пантографа

стоянству тяговых характеристик по ортогональным координатам планарного привода, обеспечивая их значения, приближенные к максимальным, во всем диапазоне перемещений.

Проведенные теоретические расчеты показали, что разработанный механизм позволяет повысить ускорение в 1,2...1,5 раза, а, значит, и быстродействие перемещений, повысить метрологические точностные характеристики и сохранять их во время перемещения за счет отсутствия разворота индуктора по углу, исключить «опрокидывание» индуктора в процессе движения.

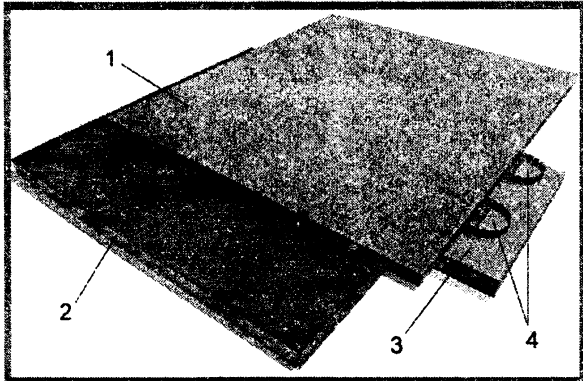


Рисунок 3- Планарный привод с устройством ограничения угла разворота:

- 1 – предметный стол; 2 – статор;
- 3 – кронштейн; 4 – пантографный механизм

ремещений, а также обеспечивает удержание индуктора в положениях наибольших тяговых сил по координатам X и Y , что способствует снижению позиционных и динамических погрешностей при выполнении координатных перемещений.

Разработанный механизм также позволяет повысить ускорение в 1,2...1,5 раза, а, значит, и быстродействие перемещений, повысить метрологические точностные характеристики системы перемещений и сохранять их во время движения за счет отсутствия разворота индуктора по углу, исключить его «опрокидывание» при координатных перемещениях и расширить область применения на оборудование со средне-нагруженными планарными приводами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карпович С.Е., Межинский Ю.С., Жарский В.В. Прецизионные системы перемещений // Доклады БГУИР. – 2004. – №3(7). – С.50-61.
2. Русецкий А.М. Координатные позиционеры гибких производственных систем для электронного машиностроения. – Мн.: Военная академия РБ, 1998. – 177 с.
3. Аналитическая механика и мехатронные системы перемещений / С.Е.Карпович, А.Яковлюк, М.Чех и др.; Под ред. С.Е.Карповича. – Минск: Технопринт, 2004. – 187 с.
4. Ляшук Ю.Ф. Линейный шаговый электропривод для прецизионного оборудования. – Минск: Технопринт, 2002. – 139 с.
5. Межинский Ю.С. Построение систем перемещений для гибкого автоматизированного оборудования. – Минск: Технопринт, 2002. – 120 с.
6. Карпович С.Е., Жарский В.В., Ляшук Ю.Ф., Межинский Ю.С. Прецизионные координатные системы на основе электропривода прямого действия. – Минск: ГНПКТМ «Планар», 2001. – 198 с.
7. Ляшук Ю.Ф. Линейный шаговый электропривод для прецизионного оборудования. – Минск: Технопринт, 2002. – 139 с.
8. Пат. 6986 Респ. Беларусь, С1 2005.06.30. Механизм шагового перемещения / С.Е.Карпович, Ю.С.Межинский, А.В.Стреха, И.В.Дайняк, Д.А.Степанов. – № а 20000413; Заявл. 28.04.2000; Оpubл. 30.06.2005. // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2005. – №2. – С.252.

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ РАЗМЕРОВ РАБОЧЕГО ПРОСТРАНСТВА ГЕКСАПОДА

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

В настоящее время усилился интерес к разработке станков с параллельной кинематикой (parallel kinematic machines, РКМ). Такие разновидности РКМ как гексаподы и триподы включают в себя подвижную платформу, которая соединена со станиной посредством штанг. При изменении длины штанг подвижная платформа с установленным на ней инструментом (или заготовкой) перемещается и поворачивается в пространстве.

Гексаподы отличает высокая скорость рабочих перемещений, структурная жесткость и относительная дешевизна. Тем не менее, в настоящее время использования таких станков незначительно. Одной из причин этого может служить нетривиальность действий при расчете гексаподов. Например, если для станков с традиционной кинематикой размеры рабочего пространства (зоны обработки) однозначно определяют характеристики приводов, то для гексаподов этот параметр сложным образом зависит от геометрии конструкции. Недостаток данных о характере связи между геометрическими параметрами конструкции и зоной обработки гексапода затрудняет выбор его размеров, обеспечивающих заданные характеристики станка. Поэтому целью настоящей работы является разработка методик оценки связи между размерами гексапода и зоной обработки, а также способы выбора основных размеров гексапода, который сможет обеспечить обработку в заданной рабочей зоне.

Зона досягаемости рабочего органа гексапода определяется двумя основными факторами:

- максимально допустимым углом поворота штанг в шарнирах $\Omega_{\text{МАХ}}$;
- минимально и максимально допустимой длинами штанг.

В дальнейшем во внимание будем принимать влияние только максимально допустимого угла поворота штанг в шарнирах $\Omega_{\text{МАХ}}$, как параметра, наиболее трудно поддающегося изменению. Тогда зона досягаемости рабочего органа гексапода представляет собой поверхность, в каждой точке которой значение угла поворота в одном или нескольких шарнирах станины или платформы достигает предельно допустимого значения $\Omega_{\text{МАХ}}$.

Как правило, зону доступа определяют одним из численных методов [1, 2, 3, 4]. Общий подход любого численного метода в том, что непрерывную исследуемую область разбивают на конечное число тестовых точек. Выходное звено гексапода последовательно помещают в тестовые точки анализируемой области. В каждой точке определяется возможность обработки, исходя из условия не превышения угла поворота штанг в шарнирах допустимого значения. Чем больше число тестовых точек, тем более точно рассчитывается объем зоны доступа, но тем больше времени требуется для расчета. Развернутый алгоритм нахождения поверхности зоны доступа заключается в следующем:

- задаются базовые параметры гексапода:
- координаты центров шаровых шарниров станины в глобальной системе координат;
- координаты центров шаровых шарниров расположенных на подвижной платформе в системе координат, связанной с платформой;
- векторы нейтральных осей шарниров станины и платформы, соответственно, в глобальной и локальной системах координат;
- углы наклона плоскости платформы α , β , χ в глобальной системе координат относительно осей координат;

- рассчитываются координаты шарниров, расположенных на подвижной платформе, при нахождении центра платформы в точке с координатами (X, Y, Z) в глобальной системе координат;
- рассчитываются координаты концов векторов нейтральных осей шарниров станины и платформы при тех же условиях;
- определяются угол между осью штанги и нейтральной осью для всех шарниров, расположенных как на станине, так и на платформе;
- проверяется условие, что ни для одного шарнира угол между осью штанги и нейтральной осью не превышает предельного допустимого для значения,
- если условие (5) выполняется, то центр платформы перемещается на некоторый шаг в избранном направлении и пункты (2) – (5) повторяется для этого нового положения центра платформы. Например, поиск границы зоны обработки может начинаться от центра глобальной системы координат при фиксированном Z и продолжаться вдоль каждого из N радиусов, с постоянным или переменным шагом,
- если условие (5) не выполняется, то координаты предыдущего положения центра платформы принимаются за координаты поверхности зоны доступа гексапода,
- пункты (2) – (6) повторяются до тех пор, пока поверхность зоны доступа гексапода не определится с необходимой точностью.

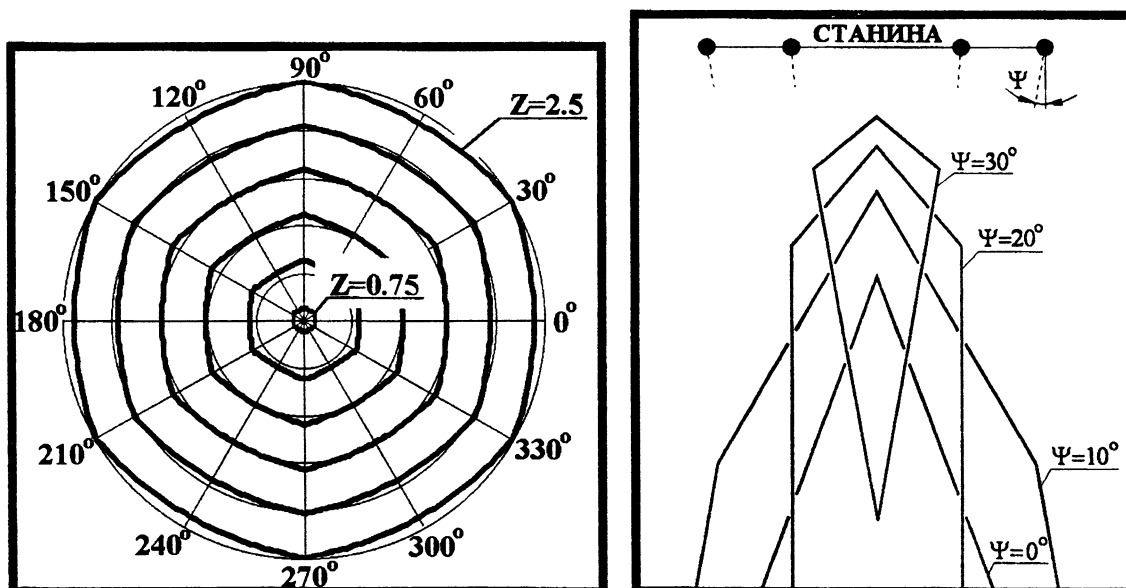


Рисунок 1 – Зона досягаемости рабочего органа гексапода при плоском движении

Для демонстрации возможностей алгоритма определим зону доступа гексапода классической структуры. Подвижная платформа с установленным на нем рабочим органом удерживается шестью штангами управляемой длины. Концы штанг соединяются с подвижной платформой и с неподвижной станиной посредством шаровых шарниров. Примем, что шарниры на станине и на платформе равномерно размещены на окружностях O_1 и O_2 , диаметры которых равны, соответственно, $D_{\text{СТАН}}$ и $D_{\text{ПЛАТ}}$. Начало глобальной цилиндрической системы координат (r, φ) станка совпадает с центром окружности O_1 , ось Z перпендикулярна к плоскости O_1 и направлена в сторону платформы. Расчетное положение рабочего органа примем в центре платформы. Для общности рассмотрения примем, что нейтральные оси шарниров станины симметрично наклонены на угол Ψ к центру станины, а нейтральные оси шарниров платформы тоже наклонены на угол Ψ , но уже от центра платформы.

Определим зону доступа гексапода по описанному выше алгоритму для случая, когда платформа при перемещении остается параллельной плоскости станины. Такой тип движе-

ния соответствует 3-осевой обработке. Результаты расчета приведены на рисунке 1 для $D_{STAN}=1$, $D_{PLAT}=0.5D_{STAN}$, максимально допустимому углу поворота штанг в шарнирах $\Omega_{MAX}=20^\circ$. В частности, на рисунке 1, а показаны горизонтальные сечения зоны доступа при $\Psi=0^\circ$ и $Z = 0.75; 1.0; 1.25; 1.5; 2; 2.5$. В горизонтальном сечении зона доступа имеет вид криволинейного шестиугольника, форма которого слабо зависит от значения Ψ . По мере увеличения расстояния от станины Z поверхность зоны доступа, в общем, сглаживается.

На рисунке 1, б показаны вертикальные сечения зоны доступа, проведенные через противоположные шарниры станины и ось Z , при $\Psi = 0^\circ; 10^\circ; 20^\circ; 30^\circ$. В зависимости от соотношения между Ω_{MAX} и Ψ зона доступа гексапода может принимать четыре различных формы:

- а) при $\Psi=0^\circ$ зона доступа имеет вид конуса со слабой шестиугольной огранкой (на рисунке 1, б сечение этой зоны обозначено $\Psi = 0^\circ$);
- б) при $\Omega_{MAX} > \Psi > 0^\circ$ она представляет собой объединение двух конусов, обращенных вершинами вверх (на рисунке 1, б сечение этой зоны представлено линией, обозначенной $\Psi = 10^\circ$);
- в) при $\Psi = \Omega_{MAX}$ зона доступа представляет собой объединение конуса и цилиндра (на рисунке 1, б сечение этой зоны обозначено $\Psi = 20^\circ$);
- г) при $\Psi > \Omega_{MAX}$ она представляет собой объединение двух конусов с общим основанием (на рисунке 1, б сечение этой зоны обозначено $\Psi = 30^\circ$).

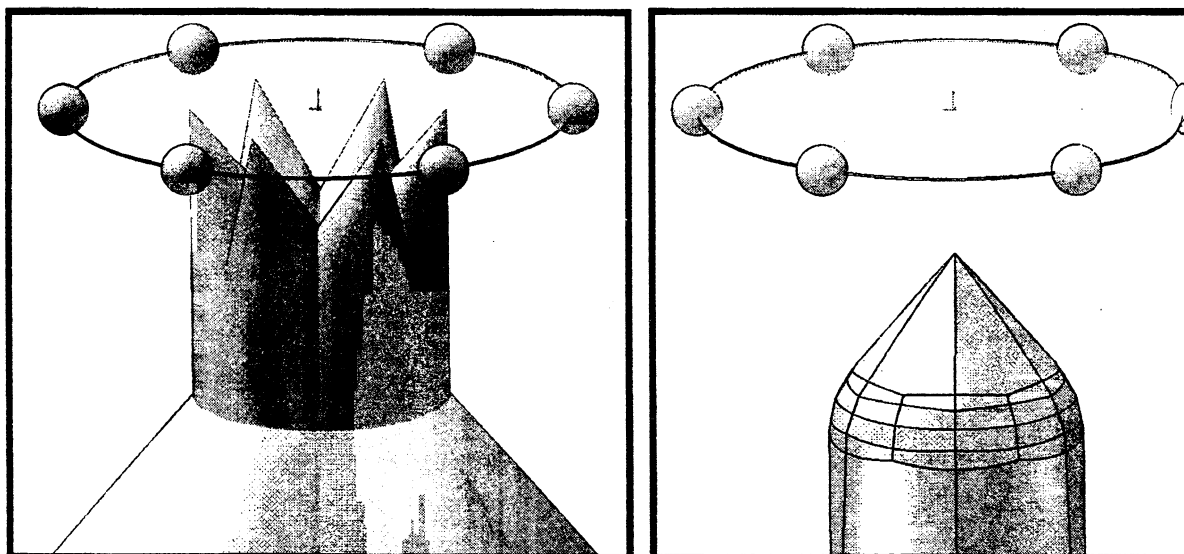


Рисунок 2 – Формирования зоны доступа в пакете твердотельного моделирования

Основное отличие описанного алгоритма от известных в том, что при анализе зоны доступа учитывается ориентация нейтральных осей шарниров. Такой подход позволяет производить целесообразный выбор их ориентации. Например, при выборе $\Psi = \Omega_{MAX}$ получается зона доступа с минимально возможным расстоянием от станины и в то же время обеспечивающая произвольную глубину обработки. Пример вертикального сечения такой зоны приведен на рисунке 1, б при $\Omega_{MAX} = \Psi = 20^\circ$. Кроме того, выбирая различные направления наклона нейтральных осей, возможно получить несимметричную зону доступа, наиболее точно покрывающую заданную (например, в виде параллелепипеда) область обработки.

В ряде случаев для определения зоны доступа гексапода удобно использовать возможности современных САД-пакетов. С точки зрения геометрии, возможные положения платформы при плоском движении обусловлены ограничением поворота в каждом из шарниров станины. Графически это ограничение поворота можно представить как наклонный конус с вершиной в центре шарнира станины. В предельно допустимом положении центр сопряженного шарнира платформы будет лежать на поверхности этого конуса ограничений. Поскольку определяется положение не шарнира, а центра платформы, то конусы ограничения для каждого шарнира станины необходимо радиально сместить к центру станины на величину $D_{PLAT}/2$. На рисунке 2, а показан набор конусов ограничения для гексапода, у кото-

рого $D_{STAN}=1$, $D_{PLAT}=0.5D_{STAN}$, $\Omega_{MAX}=20^\circ$ и $\Psi = 20^\circ$. Тогда область пространства, одновременно принадлежащая всем конусам, и будет представлять собой зону доступа при заданных условиях. Зона доступа, полученная посредством выполнения такой логической операции над конусами ограничений, представлена на рисунке 2, б.

Процесс выбора необходимых размеров гексапода существенно упрощается, если в модель станка дополнительно ввести 3D-модель заданной зоны обработки. Для этого следует совместить зону обработки в соответствии с заданием и зону обработки гексапода, полученную по вышеописанной методике и обусловленную его размерами. Изменяя размеры или характеристики шарниров, легко подобрать минимально необходимые размеры станины, в интерактивном режиме или используя встроенные средства CAD-пакета.

Определим также связь между размерами гексапода и зоны доступа для платформы, наклоненной на некоторый угол. В общем случае платформа может быть повернута на угол α вокруг оси X и на угол β вокруг оси Y локальной системы координат платформы (начало координат лежит в центре платформы, ось X проходит через шарнир №0). При этом поверхность зоны доступа принимает форму, достаточно сложным образом зависящую от значений углов α и β . Например, горизонтальные сечения зоны доступа гексапода при $D_{STAN}=1$, $D_{PLAT}=0.5$, $Z=1$, $\Psi=10^\circ$, $\Omega_{MAX}=20^\circ$ и углах наклона платформы, соответственно $\alpha=10^\circ$, $\beta=0^\circ$ и $\alpha=0^\circ$, $\beta=10^\circ$ показаны на рисунке 3 штриховыми линиями.

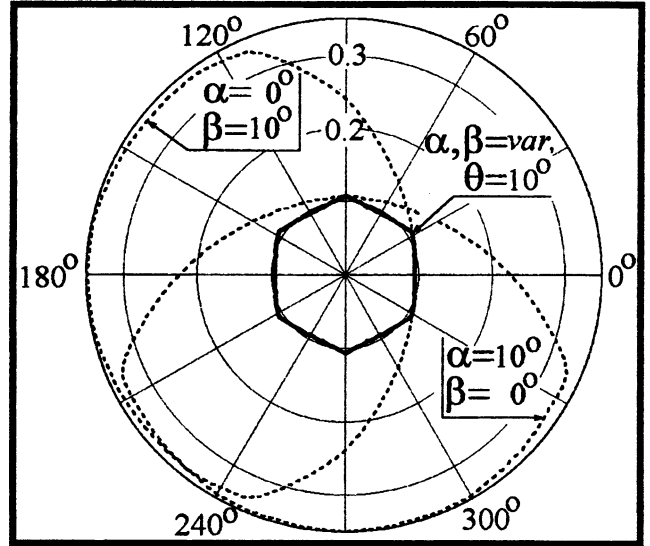


Рисунок 3 – Горизонтальные сечения зоны доступа гексапода при различных углах наклона платформы

Для оценки влияния наклона платформы на размеры зоны доступа удобно рассматривать движение платформы, наклон которой определяется только одним параметром. Пусть это будет угол θ между нормалью к плоскости платформы и осью Z. Такое положение платформы соответствует перемещению ее центра по некоторой конической поверхности с углом при вершине $2 \times \theta$. Кроме того, при таком характере наклона платформы зона доступа имеет, вероятно, минимально возможные размеры (рисунок 3, утолщенная линия в центре).

Сравнивая результаты численных расчетов при движении плоской и повернутой платформы, можно сделать вывод о том, что зона доступа платформы гексапода, наклоненной на угол θ , соответствует зоне доступа горизонтальной платформы, но при следующих коррективах расчетных параметров:

- значения Ω_{MAX} уменьшается на величину угла поворота θ ;
- диаметр платформы D_{PLAT} принимается равным величине $D_{PLAT} \times \cos(\theta)$;
- расстояние от станины до платформы Z увеличивается на величину $(D_{PLAT}/2) \times \sin(\theta)$.

В первом приближении зона доступа платформы гексапода, наклоненной на угол θ , соответствует зоне доступа аналогичной горизонтальной платформы, но при уменьшении расчетного угла максимально возможного отклонения оси штанги от нейтральной оси шарнира Ω_{MAX} на величину угла θ между нормалью к плоскости платформы и осью Z. Погрешность такого приближения не превышает 5% при $Z=Z_{ПЕР}$, $D_{PLAT}/D_{STAN} < 0.8$. В результате даже при небольшом наклоне платформы гексапода размеры зоны доступа существенно уменьшаются. Отсюда следует, в частности, что при $\Omega_{MAX}=\theta$ зона доступа вырождается (становится равной нулю).

Рассмотренные выше методики численной оценки размеров зоны обработки гексапода позволяет как оценить размеры зоны обработки по известным размерам гексапода, так и выбрать минимально необходимые базовые размеры гексапода, который сможет обеспечить обработку в заданной рабочей зоне.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бушуев В.В., Подзоров П.В. Особенности проектирования оборудования с параллельной кинематикой // СТИН. – 2004. – №4. – С. 3...10; №5. – С. 3...8. 2. Потапов П.В. Механизмы с параллельной кинематикой в машиностроении // Приложение. Справочник. Инженерный журнал. – 2005. – №8(101). 3. Gosselin C. Determination of the Workspace of 6-DOF Parallel Manipulators // Journal of Applied Mechanical Design. – 1996. – Vol. 112. – pp. 331...336. 4. Luh C. и др. Working Capability Analysis of Stewart Platforms // ASME Journal of Mechanical Design. – 1996. – Vol. 118. – pp. 220...227.

УДК 004.891

Романюк Г.Э., Романюк С.И., Криволапов Д.В.

СОЗДАНИЕ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ СРЕДСТВАМИ СУБД ACCESS

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Экспертные системы (ЭС) возникли как значительный практический результат в применении и развитии методов искусственного интеллекта (ИИ) - совокупности научных дисциплин, изучающих методы решения задач интеллектуального (творческого) характера с использованием ЭВМ [1].

Экспертная система — это программа для компьютера, которая оперирует со знаниями в определенной предметной области с целью выработки рекомендаций или решения проблем.

Экспертная система состоит из базы знаний (части системы, в которой содержатся факты), подсистемы вывода (множества правил, по которым осуществляется решение задачи), подсистемы объяснения, подсистемы приобретения знаний и диалогового процессора .

Основу успеха ЭС составили два важных свойства, отмечаемые рядом исследователей [2]:

в ЭС знания отделены от данных, и мощность *экспертной системы* обусловлена в первую очередь мощностью базы знаний и только во вторую очередь используемыми методами решения задач;

решаемые ЭС задачи являются неформализованными или слабоформализованными и используют эвристические, экспериментальные, субъективные знания экспертов в определенной предметной области.

Основными категориями решаемых ЭС задач являются: диагностика, управление (в том числе технологическими процессами), интерпретация, прогнозирование, проектирование, отладка и ремонт, планирование, наблюдение (мониторинг), обучение.

Основу ЭС составляет подсистема логического вывода, которая использует информацию из базы знаний (БЗ), генерирует рекомендации по решению искомой задачи. Чаще всего для представления знаний в ЭС используются системы продукций и семантические сети.

Обязательными частями любой ЭС являются также модуль приобретения знаний и модуль отображения и объяснения решений. В большинстве случаев реальные ЭС работают также на основе баз данных (БД). Только одновременная работа со знаниями и большими объемами информации из БД позволяет ЭС получить неординарные результаты, например, поставить сложный диагноз (медицинский или технический), открыть месторождение полезных ископаемых, управлять ядерным реактором в реальном времени.

ЭС хорошо решают узкие специфические проблемы в определенной сфере знания, но проигрывают в решении задач, требующих широкого кругозора.

Важную роль при создании ЭС играют инструментальные средства. Среди инструментальных средств для создания ЭС наиболее популярны такие языки программирования, как LISP и PROLOG, а также экспертные системы-оболочки: KEE, CENTAUR, G2 и GDA, CLIPS, AT_ТЕХНОЛОГИЯ, предоставляющие в распоряжение разработчика - инженера по знаниям - широкий набор для комбинирования систем представления знаний, языков программирования, объектов и процедур.

Существуют специальные готовые оболочки экспертных систем, которые позволяют посредством редактора БЗ заполнить ядро экспертной системы и превратить схемы правил вывода в конкретные правила. Занимается этим специалист, которого обычно называют *инженером по знаниям*, или *когнитологом*. Можно сказать, что он выступает промежуточным звеном между живыми экспертами и создаваемой БЗ.

Создание экспертной системы вполне доступно средствами СУБД Access, без специального изучения языков логического программирования [3]. Использование Access делает процесс создания экспертной системы и ее работу визуализированной, чего трудно достигнуть при использовании языка PROLOG и других подобных языков. Разумеется, создаваемая таким образом экспертная система - это весьма простая модель настоящих экспертных систем. Тем не менее, как всякая модель, она отражает основные принципы экспертных систем.

Создание ЭС.

Для примера спроектируем ЭС "Определение неполадок мониторов".

Создаваемая система относится к классу идентификационных (или диагностических) систем. Системы этого класса решают задачу определения, т.е. идентификации, объекта по его признакам. Такие системы составляют значительную часть существующих экспертных систем. Для простоты ограничиваемся лишь рассмотрением детерминированных систем, когда пользователь может точно ответить на вопрос о наличии или отсутствии того или иного признака.

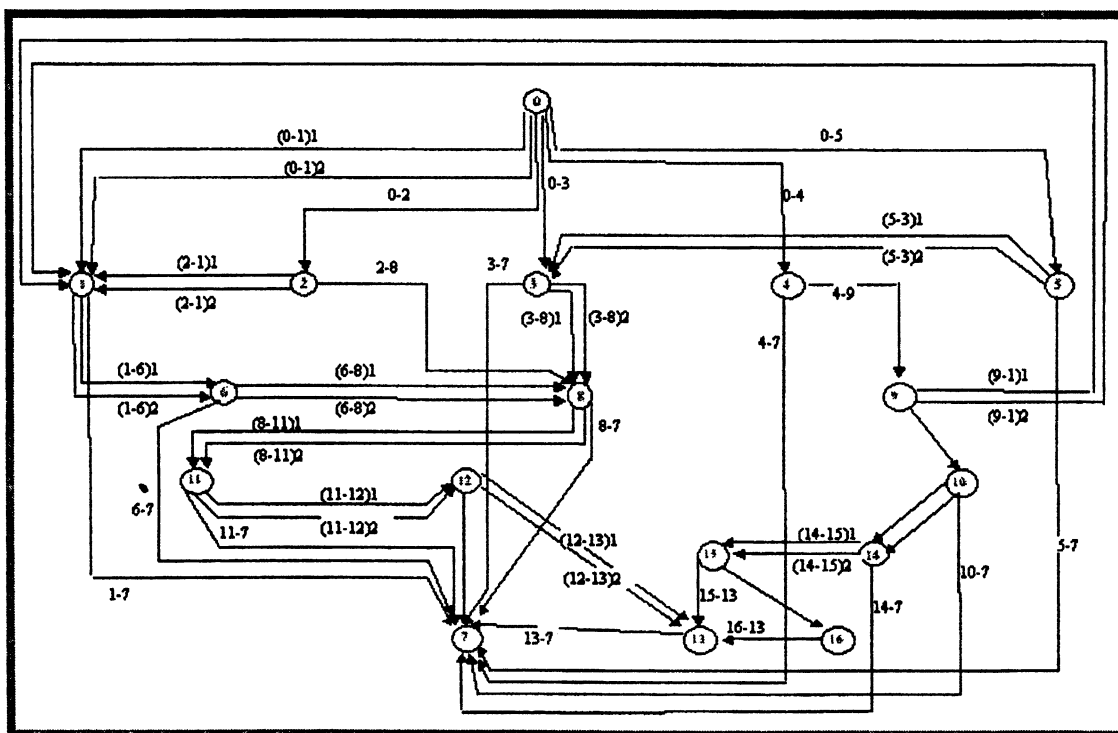


Рисунок 1

Модель ЭС строим на основе Access.

Вначале создаем базу знаний в предметной области ЭС (в данном случае - диагностика неполадок мониторов).

Затем создаем систему логического вывода (решатель). Для наглядности работу решателя изображаем орграфом. На рис. 1 представлен граф, отражающий знания экспертной системы. Каждая вершина графа помечена уточняющим вопросом экспертной системы к пользователю или ее ответом на задачу. Для удобства все вершины пронумерованы, начиная с нуля. В дальнейшем вершина орграфа будет называться "состоянием экспертной системы".

По существу, работа экспертной системы означает "путешествие" по этому орграфу. Такое путешествие состоит из последовательности однотипных шагов, на каждом из которых пользователь должен решить, по какой дуге он пойдет из очередной вершины.

Применяя реляционный подход, следует теперь описать этот орграф подходящими таблицами.

Значения вершин и ребер графа сведены в таблицы 1-3.

В экспертной системе вершинам графа соответствуют вопросы, задаваемые пользователю, и пояснения. Вопросы и пояснения сведены в таблицы «Вопросы» (табл. 1) и «Объяснения» (табл. 3) соответственно, в которых столбец «Состояние» отражает номер вершины графа.

Таблица «Ребра графа» (табл. 2) отражает варианты ответов на поставленные вопросы. Поле «Начало» содержит номера вершин графа (вопросов), которым соответствуют данные ответы. Поле «Конец» содержит номера вершин, в которые переводит данный вариант ответа.

Таблица 1

Вершины графа	
Состояние	Вопрос
0	Какой у вас вид неполадки?
1	Соответствуют ли настройки экрана используемому оборудованию?
2	Возникают неполадки при обновлении экрана?
3	Используется неверный драйвер видеоадаптера?
4	Продолжить работу со средством устранения неполадок?
5	Правильно ли выбран монитор в настройках экрана?
6	Поддерживается ли DirectDraw драйвером видеоадаптера?
7	Благодарим за использование средства устранения неполадок экрана.
8	Поддерживает ли Windows видеоадаптер?
9	Показывается ли что-то на экране дополнительного монитора?
10	Используется Adobe Type Manager?
11	Попытайтесь уменьшить аппаратное ускорение.
12	Переустановите драйвер видеоадаптера.
13	Не удастся устранить неполадку с помощью данного средства.
14	Дополнительный монитор включен?
15	Используются видеоадаптеры PCI или AGP?
16	Необходим специальный драйвер для видеоадаптера PCI или AGP

Таблица 2

Ребра графа		
Начало	Конец	Варианты ответов
0	1	Получено следующее сообщение об ошибке: "Неполадки экрана. Продолжение программы невозможно."
0	3	Не удастся установить монитор.
0	4	Неполадки со средством отображения на нескольких мониторах.
0	1	Видеозаписи или анимации не воспроизводятся правильно.

Ребра графа		
Начало	Конец	Варианты ответов
0	5	Не удастся установить разрешение выше 640 × 480 с 16 цветами.
0	2	Экран мерцает или искажен.
1	6	Нет, по-прежнему возникают неполадки.
1	7	Да, неполадки устранены.
1	6	Пропустить шаг и попробовать другие средства.
2	1	Не знаю
2	8	Нет, неполадки при обновлении экрана не возникают.
2	1	Да, возникают неполадки при обновлении экрана.
3	8	Пропустить шаг и попробовать другие средства.
3	8	Нет, по-прежнему возникают неполадки.
3	7	Да, неполадки устранены.
4	9	Да, все подключено правильно и я продолжаю работу.
4	7	Нет, источник неполадок был указан выше и теперь все работает правильно. Закрыть средство устранения неполадок.
5	3	Нет, по-прежнему возникают неполадки. Или правильный монитор уже выбран
5	7	Да, неполадки устранены.
5	3	Пропустить шаг и попробовать другие средства.
6	8	Нет, драйвер поддерживает DirectDraw, но неполадки возникают.
6	7	Да, неполадки устранены.
6	8	Пропустить шаг и попробовать другие средства.
7	0	Начать сначала?
8	7	Да, неполадки устранены.
8	11	Пропустить шаг и попробовать другие средства.
8	11	Да, Windows поддерживает видеоадаптер.
9	1	Да, на экране дополнительного монитора что-то отображается.
9	10	Нет, экран дополнительного монитора пуст. Или не удастся установить дополнительный видеоадаптер.
9	1	Пропустить этот вопрос.
10	14	Нет, по-прежнему возникают неполадки. Или Adobe Type Manager не используется.
10	7	Да, теперь можно использовать поддержку нескольких мониторов.
10	14	Пропустить шаг и попробовать другие средства.
11	12	Пропустить шаг и попробовать другие средства.
11	12	Нет, аппаратное ускорение установлено в режим Нет, но по-прежнему возникают неполадки со звуком.
11	7	Да, неполадки устранены.
12	13	Пропустить шаг и попробовать другие средства.
12	13	Нет, по-прежнему возникают неполадки.
12	7	Да, неполадки устранены.
13	7	Да, попытаюсь получить справку где-нибудь еще.

Ребра графа		
Начало	Конец	Варианты ответов
13	0	Начать сначала.
14	15	Нет, дополнительный монитор по-прежнему работает неверно.
14	7	Да, неполадки устранены.
14	15	Пропустить шаг и попробовать другие средства.
15	16	Да, используются подходящие видеоадаптеры.
15	13	Нет, один или оба адаптера принадлежат к другому типу
16	0	Начать сначала.
16	7	Да я установлю специальные драйвера для видеоадаптеров PCI или AGP.

Таблица 3

Объяснения	
Состояние	Объяснение
0	Выберите вариант, соответствующий вашей неполадке
1	Некоторые настройки экрана, неверно заданные для имеющегося видеоадаптера (видеоплаты), могут помешать правильной работе Windows. Корректировка этих настроек может привести к устранению неполадок. Если вы ничего не видите на экране компьютера, перезагрузите компьютер в безопасном режиме и исправьте настройки экрана. После изменения настроек экрана неполадки устранены?
2	Компьютер неверно обновляет области экрана при перемещении или изменении размеров окон?
3	Если указан неверный драйвер видеоадаптера (видеоплаты), могут возникать неполадки при установке монитора или задании разрешения выше 640 × 480 с 16 цветами. Если имеется обновленный драйвер, следуйте инструкциям по загрузке программного обеспечения на ваш компьютер. Если драйвер не устанавливается автоматически, воспользуйтесь описанной выше процедурой для поиска и установки драйвера. После установки правильного драйвера для видеоадаптера неполадки устранены?
4	Прежде чем продолжить, убедитесь, что кабели мониторов надежно присоединены и на мониторы подается питание.
5	Проверьте, что в окне "Свойства: Экран" отображается правильный монитор. Если выбран неверный монитор, Windows не сможет использовать все возможности монитора и выбор экранного разрешения может оказаться ограниченным. После выбора правильного монитора неполадки устранены?
6	Неполадки с экраном могут возникать, если драйвер видеоадаптера не поддерживает интерфейс программирования приложений Microsoft DirectDraw. Чтобы проверить, поддерживается ли DirectDraw драйвером видеоадаптера На вкладке Дисплей нажмите кнопку Проверить DirectDraw. Если драйвер видеоадаптера не поддерживает DirectDraw, то обновленный драйвер может оказаться доступным для загрузки с веб-узла Windows Update. Чтобы попасть на веб-узел Windows Update, нажмите кнопку Пуск, укажите на команду Все программы и выберите Windows Update. После установки обновленного драйвера неполадки устранены?
7	
8	Если видеоадаптер не включен в список совместимого оборудования или включен, но не отмечен как совместимый с Windows XP, корпорация Майкрософт не обеспечивает для него поддержку или драйверы. Обратитесь к изготовителю

Объяснения	
Состояние	Объяснение
	адаптера или посетите веб-узел изготовителя, чтобы получить драйвер, совместимый с Windows XP. Поддерживает ли Windows видеоадаптер?
9	
10	Программное обеспечение Adobe Type Manager несовместимо с поддержкой нескольких мониторов. После установки Adobe Type Manager поддержка нескольких мониторов отключается.
11	В следующей процедуре потребуется перезагрузка компьютера, что приведет к закрытию данного средства устранения неполадок. Если возможно, откройте это средство на другом компьютере, а затем выполняйте действия по устранению неполадок на вашем компьютере.
12	Если Windows не запускается или на экране появляется искаженный или нечитаемый текст, причиной может быть неверный драйвер видеоадаптера. Переустановите драйвер или установите обновленную версию драйвера, если имеется. После переустановки видеоадаптера неполадки устранены?
13	Возникли неполадки, которые не удается устранить с помощью данного средства. Для доступа к дополнительным ресурсам Windows нажмите кнопку Пуск, укажите на команду Все программы и выберите Windows Update.
14	
15	Для поддержки нескольких мониторов требуются видеоадаптеры (видеоплаты) PCI (Peripheral Component Interconnect) или AGP (Accelerated Graphics Port). Видеоадаптеры архитектуры ISA/EISA (Industry Standard Architecture/Extended Industry Standard Architecture) не поддерживаются. Чтобы определить, используются ли видеоадаптеры PCI или AGP, обратитесь к документации видеоадаптера или к изготовителю. Если один из ваших видеоадаптеров имеет другой тип, необходимо заменить его на адаптер PCI или AGP.
16	

В данной экспертной системе возможны ситуации, когда разные варианты ответов переводят к одной вершине графа. (На графе такие переходы отражены в виде $(m-n)k$, где m -вершина, из которой выходит данное ребро; n -вершина, в которую приводит данное ребро; k -порядковый номер вопроса, приводящего в данную вершину. Если между вершинами m и n всего одно ребро, параметр k опускается.

Например:

Обозначения ребер $(0-1)1$ и $(0-1)1$ показывают, что в вершину графа 1 приводят два варианта ответа на вопрос, поставленный в вершине 0

$(0-1)1$ -- Получено следующее сообщение об ошибке: "Неполадки экрана. Продолжение программы невозможно."

$(0-1)2$ -- Видеозаписи или анимации не воспроизводятся правильно.

Таким же образом экспертная система переводит пользователя к следующему вопросу, если он затрудняется ответить на поставленный вопрос или желает пропустить данный вопрос.

Например:

$(6-8)1$ -- Нет, драйвер поддерживает DirectDraw, но неполадки возникают.

$(6-8)2$ -- Пропустить шаг и попробовать другие средства.

Данный подход позволяет исключать тупиковые ситуации. Разработанную ЭС можно рассматривать как экспериментальный (или исследовательский) образец ЭС с минимальной БЗ.

В разработанной системе:

- 1) опыт накопления знаний не предусматривается,
- 2) методы представления знаний позволяют описывать лишь статические предметные области,
- 3) модели представления знаний ориентированы на простые области.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бешенков С.А., Гейн А.Г., Григорьев С.Г. Информатика и информационные технологии - Свердловск: УрГПУ, 1995, - 144 с. 2. Томпсон Б., Томпсон У. Анатомия экспертных систем. // Реальность и прогнозы искусственного интеллекта - М.: Мир, 1987, 167 с. 3. А.Б. Ливчак, А.Г. Гейн. Создание ЭС средствами Access. - <http://inf.1september.ru/2002/5/art/access.html-ssi>

УДК 621.9.014.5.001.57

Бжезинский А.А., Колесников Л.А.

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА РАДИАЛЬНОЙ ЖЕСТКОСТИ МОТОР-ШПИДЕЛЯ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

При проектировании станков особое внимание уделяется расчету шпиндельного узла, поскольку его характеристики в значительной мере определяют качество обработки. В частности, обязательно проводится расчет шпинделя на жесткость и точность [1, 2]. Для проведения такого расчета необходимы рассчитанные или табличные значения жесткостей (радиальной, угловой и осевой) расчетных опор шпинделя, обычно представляющих собой стандартные подшипниковые опоры.

В последние годы в станкостроении широкое распространение получили мотор-шпиндели. В такой конструкции ротор регулируемого электродвигателя (обычно асинхронного) смонтирован непосредственно на шпинделе. Однако такая конструкция привносит в расчетную схему шпиндельного узла дополнительную условную опору, обусловленную упругостью электромагнитного поля в воздушном зазоре между ротором и статором мотор-шпинделя. К сожалению, численные значения констант для определения упругих свойств электромагнитного поля не приводятся ни в доступной литературе, ни в нормативных документах производителей. Соответственно, невозможно адекватно оценить влияние конструкции мотор-шпинделя на качество шпиндельного узла. Поэтому была предпринята попытка оценить радиальную и угловую жесткость дополнительной расчетной опоры, привносимую электромагнитным взаимодействием между ротором и статором мотор-шпинделя.

Значение радиальной j_R и угловой j_Θ жесткости опоры определяются из следующих выражений:

$$j_R = \frac{F}{e},$$

$$j_\Theta = \frac{M}{\Theta} = \frac{F \times l}{\Theta},$$
1)

где F – сила, приложенная к опоре в радиальном направлении, Н;
 e – радиальное смещение под действием силы F , мкм;
 Θ – поворот в опоре под действием момента $M = F \times l$, радиан.

Ротор электродвигателя мотор-шпинделя размещен в отверстии статора с некоторым зазором δ . При смещении ротора на величину e возникает возвращающая радиальная сила F_R (Н), которую можно определить из выражения [3]:

$$F_R = 2 \times 10^5 \times \pi D L B_\delta^2 \times \frac{e}{\delta}, \quad (2)$$

где B_δ – средняя по длине зазора магнитная индукция, Тл;
 D – диаметр отверстия статора, м;
 L – длина ротора, м.

Величина магнитной индукции B_δ в каждый конкретный момент времени определяется техническим уровнем электромоторов. Поэтому эта величина примерно одинакова для однотипных электромоторов разных производителей. Из анализа эмпирических данных о величине B_δ , представленных в [4, 5], возможно записать следующую аппроксимирующую зависимость (для $D=80\dots350$ мм):

$$B_\delta = 1.26 + 0.15 \times \ln(D). \quad (3)$$

Рекомендуемый воздушный зазор δ , м, между статором и ротором электродвигателей определяется эмпирической формулой [5]:

$$\delta = (0.25 + 1.5 \times D) \times 10^{-3}. \quad (4)$$

Тогда, после подстановки выражений (2) – (4) в (1), выражения для оценки радиальной жесткости j_R , Н/мкм, примет вид:

$$j_R = 2.513 \times 10^3 \times \frac{D \times L \times [1.26 + 0.15 \times \ln(D)]^2}{1 + 6 \times D}, \quad (5)$$

Выражение для угловой жесткости j_θ , Н×м/рад, после очевидных преобразований, можно записать в следующем виде:

$$j_\theta = 2.513 \times 10^9 \times \frac{D \times L^3 \times [1.26 + 0.15 \times \ln(D)]^2}{6 \times (1 + 6 \times D)}. \quad (6)$$

Кроме того, в конструкции роторов современных мотор-шпинделей широко используются т.н. редкоземельные магниты на основе самария, неодима, бария. При использовании спеченных магнитов типа Nd-Fe-B магнитная индукция в зазоре достигает величины $B_\delta=1.42$ Тл (Мищенко А.С. и др.). При подстановке в (1) – (2) этой величины, а также величины среднего зазора, равного $\delta = 0.45 \times 10^{-3}$ м, выражение для расчетной радиальной и угловой жесткости существенно упрощаются и принимают следующий вид:

$$j_R = 2815 \times D \times L, \quad (7)$$

$$j_\theta = 4.69 \times 10^8 \times D \times L^3. \quad (8)$$

Таблица 1 – Характеристики жесткости некоторых мотор-шпинделей

Размеры ротора, D×L, мм	При электромагнитном возбуждении		При возбуждении постоянными магнитами	
	j_R , Н/мкм,	j_θ , Н×м/рад	j_R , Н/мкм,	j_θ , Н×м/рад
106×186	25.82	1.5×10^5	55.5	3.2×10^5
106×236	32.76	3.0×10^5	70.4	6.5×10^5
106×286	39.7	5.4×10^5	85.3	11.6×10^5
106×361	50.12	10.1×10^5	107.7	23.4×10^5
126×60	9.75	0.06×10^5	21.3	0.13×10^5
126×213	34.61	2.6×10^5	75.6	5.7×10^5
126×263	42.74	4.9×10^5	93.3	10.8×10^5
126×363	59	13.0×10^5	128.6	28.3×10^5
145×187	34.31	2.0×10^5	76.3	4.4×10^5
145×237	43.49	4.1×10^5	96.7	9.1×10^5
145×287	52.66	7.2×10^5	117.1	16.1×10^5
145×387	71	17.7×10^5	158	39.4×10^5

Результаты расчетов по формулам (5) – (8) для некоторых мотор-шпинделей производства Siemens приведены в таблице 1. Расчетная индукция B_δ при электромагнитном возбуждении изменялась в диапазоне 0.93...0.97 Тл; расчетный зазор δ – в диапазоне 0.46...0.52 мм. При возбуждении постоянными магнитами расчетная индукция B_δ принималось равной 1.42 Тл; расчетный зазор $\delta = 0.45$ мм.

Анализ расчетных данных позволяет сделать вывод о соразмерности дополнительной жесткости, вносимой электромагнитным взаимодействием между ротором и статором, с жесткостью традиционных подшипниковых опор. Поэтому при расчете мотор-шпинделя на жесткость и точность необходимо использовать не двухопорную, а трехопорную схему. В этом случае становится актуальным выбор расстояния между опорами, обеспечивающего максимально возможную жесткость шпиндельного узла (с учетом длины используемого ротора).

ЛИТЕРАТУРА

1. Кочергин А.И. Конструирование и расчет металлорежущих станков и станочных комплексов. Курсовое проектирование: Учеб. пособие для вузов. – Мн.: Вышэйшая школа, 1991.
2. Проектирование металлорежущих станков и станочных систем: Справочник-учебник. В 3-х т. Т.2. Ч.1. Расчет и конструирование узлов и элементов станков / Под общ. ред. А.С.Проникова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, Машиностроение, 1995.
3. Шубов И.Г. Шум и вибрация электрических машин. Л., «Энергия», 1973. – 200 с.
4. Гольдберг О.Д. и др. Проектирование электрических машин. – М.: Высш. шк., 2001. – 430 с.
5. Проектирование электрических машин / Под ред. И.П.Копылова. – М.: Высш. шк., 2002. – 757 с.

УДК 658.512.22

Аверченков В.И., Беспалов В.А.

РАЗРАБОТКА СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ САПР ГИДРОЦИЛИНДРОВ

*Брянский государственный технический университет
Брянск, Россия*

В настоящее время условия современного рынка накладывают повышенные требования к качеству изделий машиностроения, а также гибкости машиностроительного производства. Производитель должен обеспечить минимальные затраты на изготовление изделия при сохранении необходимого качества.

Осуществить такие требования представляется возможным используя средства вычислительной техники на всех этапах производства. Особая роль отводится применению электронных вычислительных машин (ЭВМ) в системах автоматизированного проектирования (САПР).

Проведенный обзор предприятий, занимающихся проектированием и изготовлением гидроаппаратуры, выявил потребность в специализированных САПР гидроцилиндров. В частности, системой такого назначения заинтересовался ОАО «Агрегатный завод» – один из крупнейших поставщиков силового гидрооборудования общего, специального и горношахтного назначения для различных отраслей промышленности России и Беларуси.

Разработка и широкомасштабное использование САПР в области конструирования и расчета гидроцилиндров позволяет снизить затраты на создание и эксплуатацию проектируемых изделий, повысить производительность труда проектировщиков, конструкторов и технологов, снизить объем проектной документации. Автоматизация проектирования позволяет сделать труд разработчиков более творческим.

Основной проблемой, возникающей при постоянной сменяемости типоразмеров объектов проектирования, является минимизация трудоемкости и временных затрат на проекти-

рование. Несмотря на высокий уровень типизации элементов конструкции гидроцилиндров, в каждом конкретном случае приходится выполнять большой объем проектно-конструкторских работ. Учитывая острую необходимость в сокращении сроков проектирования, делались попытки использовать существующие универсальные САПР. Однако такие системы автоматизированного проектирования не дают возможности получать твердотельные модели и конструкторские чертежи проектируемого изделия в автоматизированном режиме и требуют дополнительной реализации алгоритмов автоматизированного расчета.

Разработанная специализированная САПР гидроцилиндров представляет собой набор программных модулей, осуществляющих расчет и построение моделей гидроцилиндров с использованием САД-системы Autodesk Inventor.

При использовании подобных систем специалист вводит в систему проектирования данные технического задания. Далее осуществляется автоматизированный процесс генерации проекта, в котором проектировщик принимает принципиальные решения путем их выбора из вариантов, предлагаемых компьютером на основе использования формализованных инженерных знаний.

В основу разработки структурно-функциональной схемы САПР гидроцилиндров в соответствии с ГОСТ 23501.101-87, регламентирующим основные принципы создания САПР, заложены принципы системного единства и совместимости, типизации, развития и модульности.

Разработанная САПР гидроцилиндров включает в себя следующие основные подсистемы (рис.1):

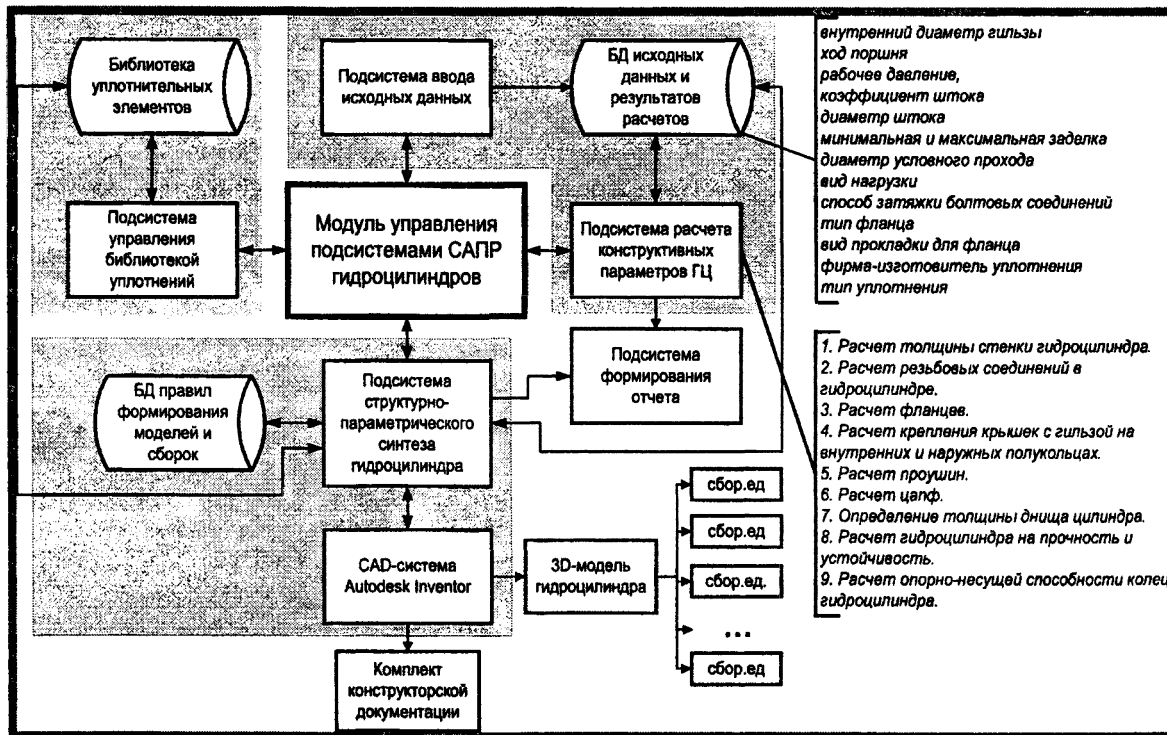


Рисунок 1- Структурная схема САПР гидроцилиндров

Исходными данными для проектирования гидроцилиндра является его диаметр и развиваемое им рабочее давление. В разработанной САПР гидроцилиндров имеется возможность выбрать значение из стандартного ряда диаметров, задать рабочее давление гидроцилиндра, ход поршня, диаметр штока, максимальную и минимальную заделку, указать требуемый тип фланца, а также вид прокладки для фланца, тип нагрузки и вид болтовых соединений

Подсистема ввода исходных данных предназначена для указания необходимого диаметра гидроцилиндра (имеется стандартный ряд диаметров гидроцилиндров), рабочего давления гидроцилиндра, хода поршня в зависимости от выбранного диаметра. Подсистема позволяет выводить информацию о диаметре штока, максимальной и минимальной заделках, авто-

матически подбирать соответствующее уплотнение, передав необходимую информацию в подсистему управления библиотекой уплотнительных элементов.

Подсистема расчета конструктивных параметров гидроцилиндра предназначена для автоматического расчета усилия, развиваемого гидроцилиндром; толщины стенки гидроцилиндра; расчета резьбовых соединений в гидроцилиндре, расчета фланцев, расчета крепления крышек с гильзой на внутренних и наружных полукольцах; расчета проушин, цапф; определение толщины днища цилиндра, расчета гидроцилиндра на прочность и устойчивость, а также расчета опорно-несущей способности колец гидроцилиндра. Подсистема расчета конструктивных параметров гидроцилиндров позволяет автоматически подобрать внутренний диаметр гильзы, ближайший к стандартному диаметру уплотнений, которые имеются в библиотеке уплотнительных элементов, и произвести все необходимые расчеты.

По окончании расчета в распоряжении проектировщика имеются следующие данные: толщина стенки гильзы; растягивающее напряжение в резьбе штока (гильзы); касательное напряжение штока (гильзы); приведенное напряжение в резьбе штока (гильзы); толщина тарелки фланца; напряжение среза; напряжение смятия; напряжение растяжения в опасном сечении гильзы; напряжение на внешней и внутренней поверхностях; суммарное напряжение в проушине при наличии втулки; напряжение смятия цапфы; толщина днища цилиндра; напряжение сжатия штока.

Данные, полученные в результате работы расчетного модуля, сохраняются в базе данных (БД) и служат, в дальнейшем, основой для построения твердотельной параметрической модели гидроцилиндра.

Основную часть информационного обеспечения САПР гидроцилиндров составляет база данных – информационные массивы, где хранятся необходимые для проектировочных расчетов данные, результаты выполнения этих расчетов, а также правила, необходимые для автоматической генерации трехмерной модели элементов гидроцилиндра. В процессе функционирования рассматриваемой САПР, БД пополняется, корректируется и, кроме того, производится ее защита от неправильных изменений.

В процессе разработки САПР гидроцилиндров была создана и наполнена библиотека уплотнительных элементов фирм Элконт и Ролурас, которые используются ОАО «Агрегатный завод» при изготовлении гидроцилиндров. В библиотеке представлены модели уплотнений для поршней гидроцилиндров стандартных диаметров, работающих в среде минеральных масел и водомасляных эмульсий при давлении до 80 МПа, температуре от -50 до $+200^{\circ}\text{C}$.

Построение твердотельной модели гидроцилиндра осуществляется подсистемой структурно-параметрического синтеза, которая состоит из следующих модулей: модуля формирования твердотельных параметрических моделей элементов гидроцилиндра, модуля управления и редактирования 3D-моделей, модуля создания сборочной модели гидроцилиндра, модуля управления правилами создания сборки, модуля генерации чертежной документации. На вход подсистемы подаются данные расчетов конструктивных параметров гидроцилиндра, и на основании этих данных подсистема посредством программного интерфейса Application Programming Interface (API), доступ к которому осуществляется при помощи COM-технологии, генерирует сначала набор моделей деталей гидроцилиндра, а затем автоматически осуществляет сборку общей модели изделия.

Модель любой детали, входящей в гидроцилиндр, представляет собой последовательное описание составляющих ее геометрических примитивов и конструктивных элементов. Конструктивные элементы могут быть заданы с помощью формообразующих эскизов (элементы, полученные выдавливанием, вращением, сдвигом по траектории), а также созданы на базе уже имеющихся элементов (отверстия, фаски, скругления, оболочки, ребра жесткости, перегородки, литейные уклоны, резьбовые элементы). Модель детали M_D можно представить в виде зависимости:

$$M_D = \{ \mathcal{E}_{2D}, Op \}, \quad (1)$$

где \mathcal{E}_{2D} – полностью определенный двухмерный эскиз;

Op – операция трехмерного моделирования;

- количество элементов детали.

Для создания трехмерной модели детали гидроцилиндра в САД-системе использовался алгоритм, при помощи которого, можно получить модель с необходимыми размерами, представленными в виде переменных. Вначале, программным способом в системе Autodesk Inventor строится безразмерный вспомогательный двухмерный эскиз, необходимый для создания трехмерной модели или ее элемента при помощи API-интерфейса. Затем осуществляется наложение необходимых геометрических зависимостей между элементами двухмерного эскиза (параллельность, перпендикулярность, касательность, соосность и др.). После этого указываются размеры основных элементов эскиза, который становится полностью определенным. И в завершении выполняются операции трехмерного моделирования (вытапливание, вращение, лоттинг, булевы операции и др.). Если модель детали имеет сложную форму и не может быть получена с помощью одного такого цикла, то он повторяется необходимое количество раз.

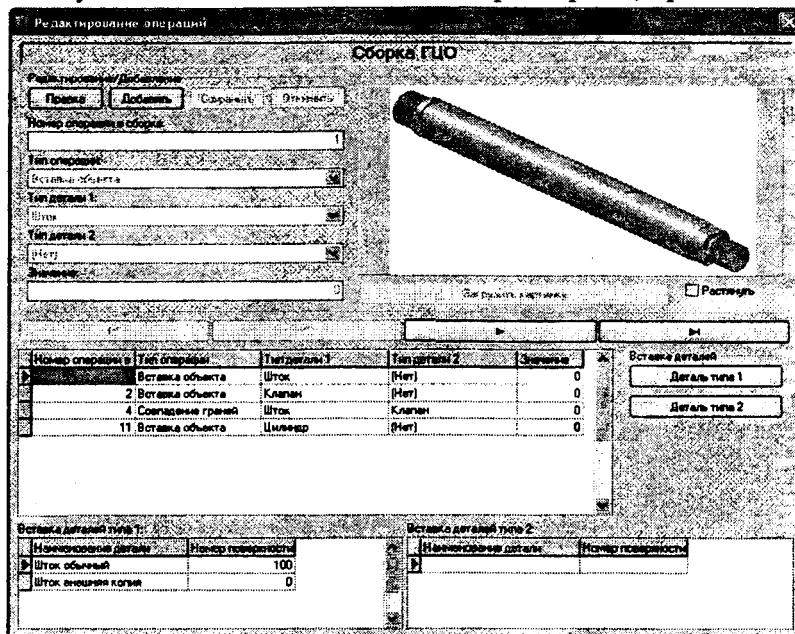


Рисунок 2- Окно добавления новой сборочной единицы

Преимуществом такого подхода к параметризации моделирования является то, что, имея описание модели детали, можно варьировать ее размерные характеристики простым изменением параметров ключевых переменных, содержащих конкретные значения размеров элементов эскиза и операций трехмерного моделирования. Параметры переменных передаются в данный модуль из подсистемы расчета конструктивных параметров гидроцилиндра.

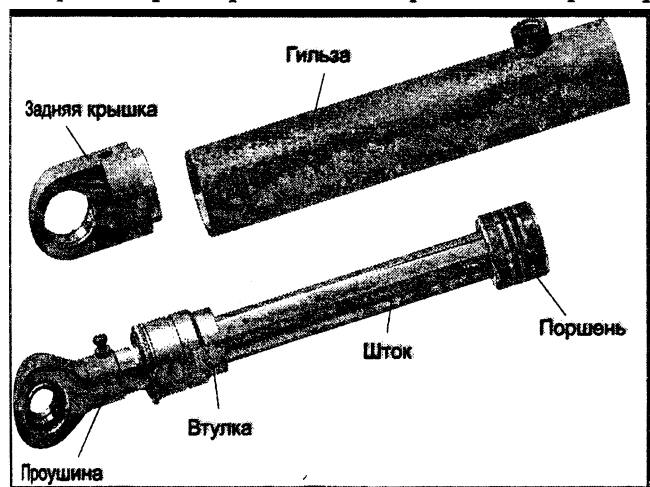


Рисунок 3 – Полученная модель гидроцилиндра

При необходимости добавить новую сборочную единицу система позволяет создать правила, в соответствии с которыми новая модель будет использоваться в сборке (рис. 2).

Все эскизы, полученные при построении модели, являются полностью определенными, модели сборочных единиц – параметрическими. Параметры можно сохранять во внешнем файле и загружать в модель, а также считывать из файла или из модели.

Дальнейшим шагом работы модуля автоматизированного построения твердотельных моделей является вставка полученных на предыдущем этапе деталей в сборку. Сборочную модель гидроцилиндра $M_{сб}$ можно представить следующим образом:

$$M_{сб} = \{M_D, O_s\}, \quad (2)$$

M_D – множество моделей деталей гидроцилиндра;

O_s – совокупность отношений между сборочными моделями деталей гидроцилиндра.

При этом был применен следующий алгоритм. Вначале осуществляется вставка в файл сборочной трехмерной модели базовой детали, относительно которой будут определены все остальные модели деталей гидроцилиндра. Затем, в файл сборочной модели гидроцилиндра осуществляется добавление требуемых, в соответствии с заданной конструкцией, моделей деталей. После этого накладываются взаимосвязи между моделями для определения их относительного положения в сборке. В результате проектирования формируется трехмерная модель объекта (рис.3) и комплект рабочих чертежей.

В настоящее время САПР гидроцилиндров проходит апробацию на предприятии ОАО «Агрегатный завод» и внедрена в учебный процесс на кафедре «Компьютерные технологии и системы» при подготовке инженеров по специальности «САПР».

ЛИТЕРАТУРА

1. Аверченков В.И. Разработка специализированной САПР на основе системы T-FLEX CAD / В.И. Аверченков [и др.] // САПР и графика. – 2002г. №7 с. 49-52. 2. ГОСТ 6540-64 и 14063-68 Гидроцилиндры и пневмоцилиндры. Ряды основных параметров.

УДК 004.92

Бурдо Е.Н.

СОВРЕМЕННЫЕ CAD-СИСТЕМЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

За последнее десятилетие уровень информационных технологий в проектировании значительно вырос и кардинально изменил представление о рабочем месте инженера-конструктора. Сегодня компьютер стал неотъемлемым инструментом специалиста конструктора практически во всех важных наукоемких областях промышленности (судостроение, авиастроение, двигателестроение, автомобилестроение и т.д.).

Рынок специализированного программного обеспечения или **CAD (Computer Aided Design)** технологий для проектирования и выпуска конструкторской документации насыщен всевозможными пакетами, и часто не легко сделать выбор, отдав предпочтение какой-либо из развитых CAD системе. Основные задачи, которые ставятся перед любой системой автоматизированного проектирования, – это сокращение сроков разработки нового изделия и повышение качества выполнения проекта.

Современные лидеры CAD систем – это, так называемые, системы «тяжелого» САПР. К наиболее известным в промышленности «тяжелым» системам можно отнести следующие CAD системы: **Pro/ENGINEER, UNIGRAPHICS** и **CATIA**.

Помимо «тяжелых» CAD-систем в данном обзоре представлены и другие широко известные системы.

Pro/ENGINEER

Pro/ENGINEER (продукт компании PTC) – это многомодульная ассоциативная система, позволяющая работать в едином информационном пространстве проектировщикам-механикам, проектировщикам-электрикам, расчетчикам, технологам и дизайнерам. При использовании в производстве станков с ЧПУ Pro/ENGINEER позволяет выполнять весь перечень работ от эскиза детали до передачи данных управляющей программе обрабатывающего станка.

Pro/ENGINEER – это система трехмерного (3D) твердотельного проектирования. Следует отметить, что MCAD система Pro/ENGINEER, появившаяся в восьмидесятых годах, изначально создавалась как система 3D твердотельного проектирования. Преимущества 3D

проектирования очевидны, это наглядность в работе и удобство при создании сложных деталей и компоновок.

Вся информация в Pro/ENGINEER параметризирована. Это позволяет быстро модернизировать геометрию на любой стадии проектирования и легко осуществлять управление создаваемой конструкцией в процессе изменения исходных данных. Использование параметров модели позволяет автоматизировать заполнение штампов чертежей и создание спецификаций.

Pro/ENGINEER прост в использовании. Весь процесс создания модели идеологически близок процессу реального изготовления деталей. Черчение в процессе создания чертежей отсутствует. Виды создаются как оформленные определенным образом представления 3D модели.

CATIA

(Computer Aided Three-Dimensional Interactive Application)

CATIA одна из известнейших универсальных CAD/CAM/CAE/PDM-систем. Заслуженное место в лидирующей группе на мировом рынке достигнуто ею благодаря реализации всестороннего комплексного интегрированного подхода, позволившего в одной системе успешно осуществлять весь цикл создания нового изделия: от разработки концептуальных моделей до подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ и выпуска необходимых чертежей и конструкторско-технологической документации.

К настоящему моменту CATIA Solution является полнофункциональной системой САПР и технологической подготовки производства, включающей в себя развитый интеллектуальный инструментальный трехмерного моделирования, подсистемы программной имитации самых сложных технологических процессов, средства анализа сложных механических агрегатов, развитую базу данных для хранения текстовой и графической информации. Ассоциативная связь «модель-чертеж» позволяет по созданной пространственной модели изделия создавать полную конструкторскую документацию и оперативно автоматически ее корректировать при внесении необходимых изменений в созданное изделие.

Система CATIA разработана фирмой Dassault Systemes (Франция,) и предлагается на рынке компанией IBM и ее партнерами. Качество предлагаемых программно-технических решений позволило системе занять достойное место в самых высокотехнологичных отраслях машиностроения: автомобильной, аэрокосмической, электронной и др. отраслях промышленности.

CATIA занимает около 70% мирового рынка систем автоматизированного проектирования и технологической подготовки производства в авиакосмической промышленности и более 45% – в автомобилестроении (ее используют 14 из 20 крупнейших автомобилестроительных компаний).

Unigraphics

CAD/CAE/CAM Unigraphics – система высокого уровня, предназначенная для решения всего комплекса задач, стоящих перед инженерами на всех этапах создания сложных технических изделий (предварительное проектирование, этап инженерного анализа и оптимизации конструкции, изготовление). По всему миру Unigraphics широко используется в аэрокосмической промышленности, автомобилестроении, общем машиностроении, производстве бытовой техники, игрушек, медицинских инструментов (продукт компании UGS).

Рабочее место представляет собой набор модулей, каждый из которых отвечает за определенные функции. Это позволяет составить оптимальный набор для решения задач дизайнера, конструктора, технолога.

Подход, основанный на назначении и анализе «сценариев», позволяет еще на ранних стадиях проекта манипулировать различными вариантами изделия и находить оптимальное конструкторское решение. Для моделирования литья пластмасс создан специальный модуль, имеющий препроцессор, средства анализа как такового и постпроцессор. Задав расчетную модель, ассоциативно связанную с геометрией детали, можно проанализировать процесс литья по времени заливки, по вероятности образования пузырьков воздуха, линий смятия потоков

и вероятности получения полной отливки. При расчете используется библиотека типовых материалов. Имеются средства наглядной эмуляции процесса на закрашенной или каркасной геометрии. Результаты анализа включают анимацию движения фронта отливки, время заполнения, расположение линий стыка, степень заполнения и изменение температур в процессе отливки.

Все это позволяет оценить пригодность созданной модели и при необходимости внести в нее изменения.

MSC.ADAMS

(Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems)

MSC.ADAMS – это программная система, предназначенная для виртуального моделирования сложных машин и механизмов, разработанная компанией MSC.Software Corporation (www.mssoftware.com).

MSC.Adams заменяет дорогостоящие и длительные натурные эксперименты быстрым и подробным компьютерным моделированием, обеспечивая предприятиям экономию значительных средств и выход на рынок с всесторонне оптимизированными изделиями. С помощью MSC.Adams быстро создается полностью параметризованная модель изделия. Задав связи компонентов модели, приложив нагрузки, определив параметры кинематического воздействия и запустив расчет, можно получить данные, полностью идентичные результатам натурных испытаний системы. Таким образом, представление о работе изделия складывается еще до начала раскроя металла или отливки пластика для изготовления опытного образца.

MSC.ADAMS предоставляет пользователю следующие средства:

- Средства подготовки расчётной модели;
- Средства решения уравнений динамики объекта;
- Средства анализа результатов моделирования.

MSC.Adams может использоваться для улучшения конструкций всего, что движется: от простых механических и электромеханических устройств до автомобилей и самолетов, железнодорожной техники и космических аппаратов.

AutoCAD

На сегодняшний день одна из самых популярных в мире систем автоматизированного проектирования и выпуска рабочей конструкторской и проектной документации. С его помощью создаются двумерные и трехмерные проекты различной степени сложности в области архитектуры и строительства, машиностроения, генплана, геодезии и т.д. Формат хранения данных AutoCAD де-факто признан международным стандартом хранения и передачи проектной документации.

Основные продукты: AutoCAD R14, R14 Internet Utilities, AutoCAD R13, R13 Internet Publishing Kit, AutoCAD LT, S8 Architectural, S8 Architectural Designer, S8 Architectural Professional, S8 Building Services, S8 Civil/Survey, S8 Survey Professional, AutoCAD AEC (UK/Ire.), AutoCAD Mechanical, Autodesk Mechanical Desktop, AutoCAD Map.

AutoCAD Mechanical – специальная версия AutoCAD, ориентированная на машиностроительное проектирование. Включает средства проектирования деталей машин, деталей типа «тело вращения», библиотеку стандартных деталей по восемнадцати международным стандартам. Основные стандарты проектирования и оформления документации – DIN, ANSI и ISO.

MSC.EASY5

MSC.EASY5 система моделирования и расчета гетерогенных технических систем и устройств.

MSC.EASY5 – специализированный продукт для моделирования широкого круга сложных технических систем и устройств на схемном уровне. Средствами этого программного продукта моделируются цифровые и аналоговые системы управления, гидроприводы, трансмиссии, двигатели внутреннего сгорания, пневматические, механические и электрические устройства, системы кондиционирования, управления аэродинамическими поверхностями, системы впрыска топлива и т.д.

Программный пакет MSC.EASY5 включает множество готовых математических моделей, реализованных в виде отдельных функциональных блоков. С помощью языков С или Fortran можно создавать собственные функциональные блоки.

На базе перечисленных возможностей системы MSC.EASY5 и в интеграции с другими системами MSC создаются полные функциональные модели самолетов, автомобилей, танков, экскаваторов, приборов и т.д., исследуется их работа при выполнении различных задач и в различных условиях эксплуатации. Результатом становятся оптимальные решения, найденные благодаря точному комплексному компьютерному моделированию.

Среди пользователей MSC.EASY5 – ведущие мировые компании, работающие в авиационной, ракетно-космической, автомобильной, электронной, энергетической и других отраслях промышленности.

ITI-SIM

ITI-SIM – разработка фирмы ITI GmbH Dresden позволяет строить модель из объектов, которые собраны в библиотеки Механика, Моторы, Передачи, Пневматика, Гидравлика, Сигналы и т.д. Программа автоматически составляет и решает уравнения движения. Результатом расчета являются силы, моменты, ускорения, скорости, энергия и другие, важные для конкретного модельного объекта, характеристики.

Основные достоинства программы **ITI-SIM**:

- Быстрое построение моделей из интуитивно-понятных объектов механики, пневматики и гидравлики, машиностроения и управления;
- Взаимодействие в одной модели механических, электрических, пневматических и гидравлических объектов и управляющих сигналов;
- Практически любые нелинейности, в том числе заданные таблично;
- Графическое представление результатов – нажатием кнопки на «мышке»;
- Автоматический анализ собственных частот и форм колебаний;
- Анимация построенных моделей с программой ITI-Vis3D;
- Наличие в Интернете описания большого количества примеров применения.

Matlab

MATLAB – это высокоуровневый язык для технических расчетов, а также интерактивная среда для анализа данных, разработки алгоритмов и приложений. Версия **MATLAB 7** содержит множество важных новшеств в части эффективности программирования и генерации исполняемого кода, графики и визуализации, математики, доступа к данным, производительности.

MATLAB 7 предлагает встроенную поддержку для целочисленной математики и математики с плавающей точкой, а также языковые конструкции для обработки и анализа больших наборов данных. Большое количество оптимизаций для типов данных, операций, функций и аппаратного обеспечения привело к значительному повышению скорости вычислений пользовательских приложений. Обновлен и усовершенствован компилятор **MATLAB Compiler**, который теперь полностью поддерживает язык **MATLAB**, позволяя разработчикам более эффективно создавать независимые приложения.

Среди новых программных возможностей следует отметить переработанный интерфейс, включающий новые программные и отладочные инструменты, автоматический анализ качества кода, а также возможность сохранения файла программы непосредственно в HTML- и Word- форматах. Новые интерактивные инструменты построения графиков обеспечивают более быстрое и удобное создание **MATLAB** графиков, включая возможность генерации кода для повторного многократного создания графиков.

Содержащийся в семействе продуктов **MATLAB 7** компилятор **MATLAB Compiler** поддерживает весь язык **MATLAB**, включая большинство приложений (**MATLAB Toolboxes**). Улучшенный компилятор **MATLAB Compiler** дает возможность инженерам распространять независимые приложения, разработанные в **MATLAB**, или включать их в такие средства разработки, как Excel, С, С++, и COM. В результате, ин-

женеры и ученые теперь могут создавать значительно более широкий спектр MATLAB-приложений и более широко их распространять.

1 Марта 2006 года вышел в свет новый релиз семейства продуктов MATLAB & Simulink - Release 2006a.

В новой версии помимо ядер программы MATLAB&Simulink существенные изменения претерпели 10 продуктов и были незначительно обновлены еще 62 продукта данного семейства.

Новый релиз R2006a позволяет использовать в MATLAB 64-битную адресацию под Windows XP 64-bit и ряд новых возможностей распределенных вычислений.

Кроме того, в этой версии обновлены средства разработки MATLAB для платформы .Net, средства генерации кода и интерфейс в Simulink.

SimMechanics - Simulink

SimMechanics является составной частью семейства продуктов для моделирования физических систем в среде Simulink и позволяет моделировать системы управления с помощью ненаправленных сигнальных графов, объединять их с физическими моделями и моделями из других библиотек. Это дает возможность моделировать такие объекты, как наземные транспортные средства, летательные аппараты, производственное оборудование, до того, как будет начато их производство.

SimMechanics может моделировать различные геометрические конфигурации и реакции на механические воздействия и вырабатывать эффективные стратегии управления, добиваясь увеличения производительности и сокращать время разработки того или иного устройства.

Основные функциональные возможности пакета:

- моделирование механических систем с использованием модели твердого тела.
- допускается объединение механических блоков с другими типами блоков системы

Simulink.

- анализ трехмерных моделей и моделирование.
- библиотеки соединений и ограничений.
- моделирование линейных и угловых движений, заданных уравнениями сил и моментов.
- поддерживает операции триммирования и линеаризации при проектировании систем управления.

Modelica

Modelica – объектно-ориентированный язык для моделирования сложных физических систем. Разрабатывается с 1996 года.

Основные особенности языка Modelica:

- Многопрофильность.
- Открытость.
- Гибкость.
- Высокая скорость разработки моделей.

Пакеты визуального моделирования позволяют пользователю вводить описание моделируемой системы в естественной для прикладной области и преимущественно графической форме, а также представлять результаты моделирования в наглядной форме, например, в виде диаграмм или анимационных картинок.

Одним из главных достоинств систем визуального моделирования является то, что они позволяют пользователю не заботиться о программной реализации модели, как о последовательности исполняемых операторов, и тем самым создают на компьютере некоторую чрезвычайно удобную среду, в которой можно создавать виртуальные, параллельно функционирующие системы и проводить эксперименты с ними. Образы можно перемещать, соединять и разъединять с помощью мыши. Кроме того, пользователь может видеть и оценивать результаты моделирования по ходу эксперимента и, при необходимости, активно в него вмешиваться.

Еще одной важной особенностью современного пакета автоматизации моделирования является использование технологии объектно-ориентированного моделирования, что позволяет резко расширить границы применимости и повторного использования уже созданных и подтвердивших свою работоспособность моделей.

Успех новой технологии резко расширил круг пользователей визуальных пакетов моделирования, что обострило вечную проблему достоверности получаемых решений. Графическая оболочка скрывает от пользователя сложную процедуру получения численного решения. В то же время, автоматический выбор нужного для решения конкретной задачи численного метода и настройка его параметров часто являются далеко не тривиальной задачей. В результате появляется опасность быстрого получения красиво оформленных, но неправильных результатов.

Продукты T-FLEX

Российский программный комплекс **T-FLEX CAD/CAM/CAE/CAPP/PDM**, - набор современных программных средств для решения задач технической подготовки производства любой сложности в различных отраслях промышленности. Комплекс объединяет системы для конструкторского и технологического проектирования, модули подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ и инженерных расчетов. Все программы комплекса функционируют на единой информационной платформе системы технического документооборота и ведения состава изделий.

Единый комплекс **T-FLEX CAD/CAM/CAE/CAPP/PDM**, предлагаемый компанией «Топ Системы», включает программы для решения широчайшего спектра задач автоматизации технической подготовки производств.

Комплекс позволяет решить практически все задачи конструкторско-технологической подготовки производства: от получения заказа до изготовления изделия.

Новая версия системы для проектирования изделий – **T-FLEX CAD 10** – это множество новых и улучшенных возможностей для моделирования сложных трехмерных деталей и сборок, а также для создания чертежной документации.

В **T-FLEX CAD 10** был существенно усовершенствован диагностический механизм, который обеспечивает доступ ко всей информации по элементам, включая параметры проектирования, отношения между элементами и связи, заданные между ними. Добавлены новые инструменты по созданию и редактированию тел, поверхностей, сложных деталей, больших сборок. Новые возможности простановки размеров, шероховатостей, надписей и других элементов оформления непосредственно на 3D-модели позволяют теперь передавать не только геометрическую, но и технологическую информацию в прикладные программы. Кроме того, эта функциональность помогает ускорить оформление чертежей, полученных с помощью проектирования трехмерных моделей.

SolidWorks

SolidWorks – система автоматизированного проектирования, инженерного анализа и подготовки производства изделий любой сложности и назначения. **SolidWorks** является ядром интегрированного комплекса автоматизации предприятия, с помощью которого осуществляется поддержка жизненного цикла изделия в соответствии с концепцией **CALS-технологий**, включая двунаправленный обмен данными с другими **Windows**-приложениями и создание интерактивной документации.

Разработчиком **САПР SolidWorks** является **SolidWorks Corp.** (США), независимое подразделение компании **Dassault Systemes** (Франция) - мирового лидера в области высоко-технологичного программного обеспечения. Разработки **SolidWorks Corp.** характеризуются высокими показателями качества, надежности и производительности, что в сочетании с квалифицированной поддержкой делает **SolidWorks** лучшим решением для промышленности.

В зависимости от класса решаемых задач заказчикам предлагается три базовых конфигурации системы: **SolidWorks**, **SolidWorks Professional** и **SolidWorks Premium**.

1. http://www.ptc.com	9. www.iti.de
2. http://www.paracomtech.ru	10. http://www.spbstu.ru
3. http://www.dassault-systemes.com , http://www.catia.spb.ru	11. http://matlab.exponenta.ru
4. http://www.ugs.com	12. http://rrc.dgu.ru
5. http://www.consistent.ru	13. http://www.exponenta.ru
6. http://www.mssoftware.ru , http://www.csoft.ru	14. http://www.tfex.ru
7. http://www.autocad.ru	15. http://www.solidworks.ru
8. http://www.csoft.ru	

УДК 621.4Д23

Лихтарович Е.С., Присевок А.Ф.

СИСТЕМА БЕНЗОВОДОРОДНОГО ПИТАНИЯ ДВС С ИСКРОВОМ ЗАЖИГАНИЕМ И ПУТИ ЕЕ МОДЕРНИЗАЦИИ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Аннотация

Разработана система бензоводородного питания ДВС с искровым зажиганием. Применение данной системы снижает расход горючего и значительно понижает содержание токсичных составляющих в выхлопных газах двигателей. Повышает моторесурс двигателя.

Введение. Для обеспечения высоких мощностных, экономических и экологических показателей ДВС, необходимо совершенствовать процесс сгорания топливовоздушной смеси. Важную роль здесь играет смесеобразование, т.е. подготовка топливовоздушной смеси, ее состав, равномерность распределения по цилиндрам, степень испарения, вихревое движение заряда, температура, количество остаточных газов.

В горящей луже с бензином яркое пламя первой вспышки тотчас сменяется густым, темным дымом. Никогда лужа не горит красивым голубым пламенем, как бензиновая горелка, хороший примус или паяльная лампа, потому что после вспышки продукты сгорания мешают притоку свежего воздуха, она настолько богата топливом, что последнее горит медленно, сгорает плохо, не полностью.

В отличие от лужи с ее "неорганизованным" пламенем, состав смеси, сгорающей в примусе, паяльной лампе, во всех двигателях внутреннего сгорания, а также газотурбинных, ракетных и так далее, регулируемый: бензин, керосин, дизельное или ракетное топливо смешивается с окислителем (кислородом воздуха, жидким кислородом, азотной кислотой и др.) в строго определенных соотношениях. Горючая смесь состоит из бензина и воздуха, в которой на 1 кг паров бензина приходится 15 кг воздуха (со стандартным содержанием в нем кислорода), принято называть нормальной. Если на ней работает двигатель вашего автомобиля, его мощность достаточно высока при неплохой экономичности.

Уменьшим поступление воздуха до 12,5-13 кг. Смесь, как принято говорить, обогатится (бензином) - станет так называемой мощностной, потому что, сгорая в цилиндрах наиболее быстро, создает максимальное давление на поршни, а значит, высокую мощность. Правда, экономичность ухудшается довольно ощутимо, на 15-20% в сравнении с "идеалом". Если стремиться к экономичности, воздуха к смеси следует немного добавить - до 16 кг на 1 кг бензина. Такую смесь и называют экономичной. Расход бензина становится минимальным, правда, ценой некоторых потерь мощности - до 8-10% в сравнении с "мощностной". Смесь такого состава принято называть обедненной. Если при сгорании на 1 кг бензина затрачивается лишь 11-12 кг воздуха, смесь называют богатой. Дальнейшее обогащение 5-6 кг

воздуха на 1 кг топлива приводит к тому, что способность смеси к воспламенению ухудшается настолько, что двигатель вообще может остановиться.

Нельзя обеднять смесь беспредельно: когда воздуха больше 20 кг на 1 кг бензина, воспламенение от искры станет ненадежным и может вообще прекратиться. А пока он хоть как-то работает на бедной смеси, нечего ждать не только достаточной мощности, но и, как ни странно, экономичности. Ведь тяговые характеристики машины ухудшаются настолько, что водитель вынужден ее "подхлестывать" - например, переходя на пониженную передачу там, где вчера легко ехал на высшей.

Для регулирования подачи горючей смеси были изобретены систем питания двигателя. В настоящее время на автомобилях применяются следующие типы систем питания двигателя:

карбюраторные системы питания различного типа с одним, двумя и четырьмя карбюраторами;

системы с моновпрыском топлива;

инжекторная система питания;

системы с распределенным асинхронным впрыском топлива.

Карбюраторные системы питания и системы питания с впрыском топлива имеют свои преимущества и недостатки.

Карбюраторные системы питания в автомобильных двигателях применяются давно. Применяют карбюраторы с вертикальным, горизонтальным и наклонным потоком смеси. В серийных автомобилях наиболее широко применяют карбюраторы с вертикальным (падающим) потоком смеси. В сильно форсированных и спортивных автомобильных двигателях широкое распространение получили карбюраторы с горизонтальным потоком смеси. Карбюраторы бывают с одной или несколькими топливными камерами, которые в свою очередь могут работать последовательно или параллельно. В двигателях широкого применения как правило применяют двух- и четырех- камерные карбюраторы с последовательным открытием заслонок вторичных камер, а в горизонтальных карбюраторах спортивных двигателей - карбюраторы с параллельным (одновременным) открытием дроссельных заслонок, организованных таким образом, что впускной канал каждого цилиндра имеет свою камеру карбюратора. Сечение диффузора карбюраторов также может быть постоянным или меняющимся, что позволяет обеспечить постоянную скорость топливовоздушной смеси в карбюраторе.

Преимуществами карбюраторных систем питания является их простота, надежность, хорошая ремонтпригодность в дорожных условиях, способность автомобиля перемещаться своим ходом даже при значительных неисправностях карбюратора, относительно меньшая требовательность к качеству моторного топлива, легкость изменения тарировочных характеристик и регулировки состава смеси, что необходимо при форсировании двигателя, возможность получения неплохих динамических характеристик двигателя, а также относительно невысокая стоимость. Недостатками карбюраторных систем питания являются более высокий расход топлива по сравнению с системами впрыска, худшие пусковые характеристики двигателя при низких температурах и меньшая стабильность достигнутых характеристик, т.е. требуется более частая подстройка.

Системы впрыска топлива используются механические и электронные. Механические системы впрыска топлива во многом аналогичны топливной аппаратуре дизельного двигателя. В связи со сложностью обеспечения требуемых характеристик состава смеси во всем диапазоне оборотов и нагрузки на двигатель, требований к обеспечению норм по токсичности, системы механического впрыска топлива применяются крайне редко. Системы электронного впрыска топлива разделяются на системы с центральным впрыском (или моновпрыском), где топливо впрыскивается во впускной коллектор аналогично работе карбюратора, и системы с распределенным впрыском, где топливо впрыскивается непосредственно на разогретый впускной коллектор. Системы с распределенным впрыском в свою очередь разделяются на системы с асинхронным впрыском, в котором форсунка каждого цилиндра работает по отдельному алгоритму, и системы с синхронным впрыском, в которых все форсунки управляют одновременно, т.е. их управление осуществляется параллельно.

Преимуществами систем впрыска топлива (инжекторных) являются стабильность регулировочных характеристик, хорошие пусковые характеристики двигателя, топливная экономичность. Недостатками этих систем являются относительная сложность подстройки характеристик системы под форсированный двигатель (требуется так называемый "чип-тюнинг"), сложность ремонта таких систем в условиях вне мастерской, что создает большие трудности при эксплуатации или отдельных поездках автомобиля в отдаленных областях, сложность ремонта и диагностики, для которого требуется высококвалифицированный персонал и специализированное оборудование, критичность к качеству моторного топлива, невысокая надежность отдельных компонентов системы впрыска, а также весьма значительную стоимость. Особо следует отметить системы центрального впрыска (моновпрыска) - такие системы по большинству параметров не имеют каких либо заметных преимуществ по сравнению с карбюраторными системами питания, имея при этом существенно меньшую надежность и большую стоимость. Такие системы применяют в основном для выполнения заданных норм токсичности при экспорте автомобилей в страны с заданными требованиями.

Постановка задачи. Существуют двигатели работающие на смесях. Рассмотрим смесь бензина и водорода. Перспективность использования водорода в автомобильном транспорте связана главным образом с экологической чистотой и высокими моторными свойствами.

Использование водорода позволит также устранить один из основных недостатков автомобильных двигателей - резкое снижение КПД (с 30% до 10%) на частичных нагрузках в условиях городской эксплуатации. Водород даже при небольших добавках 1-6% к бензину уже позволяет поднять топливную экономичность на частичных нагрузках на 30-40%. Это достигается благодаря тому, что предельная величина воспламенения для водорода более широкая, чем для бензина. Пределы воспламенения в % по объему для водорода находятся в интервале 4,7 - 74,2, а для бензина - 0,59 - 6,0. Более показательным для пределов воспламенения является пересчет объемных долей на коэффициент избытка воздуха, который соответственно имеет пределы воспламенения: для водорода от 0,15 до 10, для бензина только от 0,27 до 1,7. Особый интерес представляет нижний предел воспламенения, который показывает степень обеднения топливовоздушной смеси. Для водорода предел обеднения смеси в несколько раз больше, чем для бензина. Следовательно, водородное горючее позволяет в более широких пределах регулировать мощность двигателя. Водородовоздушные смеси обладают высокой скоростью сгорания, благодаря чему повышается эффективность рабочего процесса.

Расстояние гашения пламени - толщина пристеночного слоя топливовоздушной смеси, в котором прекращается реакция окисления - для водорода более чем в четыре раза меньше. Это приводит к более полному сгоранию топлива и снижению токсичной части углеводородных составляющих в выхлопных газах. Водород по целому комплексу свойств: широкие концентрационные пределы, высокая скорость сгорания и высокая диффузионная подвижность характеризует себя идеальной добавкой к топливу для ускорения процесса сгорания углеводородных воздушных смесей. Это позволяет повысить топливную экономичность и значительно понизить содержание токсичных компонентов в отработанных газах. Оценка экологической эффективности при добавке только 1% водорода к бензину приведена в таблицу 1.

Таблица 1

Таблица экологической эффективности системы бензоводородного питания ДВС (тысяч тонн)

Состав выхлопных газов	Россия		Земля		Эффект %
	H ₂ = 0%	H ₂ = 1%	H ₂ = 0%	H ₂ = 1%	
CO ₂	92400	74700	1650000	1300000	11,1
CO	9240	3721	165000	66450	55,7
NO _x	3080	2654	55000	47400	5,2
C _x H _x	924	826	16500	14745	1,7

1-6% водорода (H_2) в горючей смеси бензинового двигателя:

- уменьшает токсичность выхлопных газов в 2-20 раз;
- снижает расход горючего на 15 – 24%;
- повышает моторесурс двигателя и его КПД на 40% в режиме городского цикла.

Результаты испытаний подтвердили экологические преимущества водорода. Видно, что значительно понижаются токсичные составляющие в выхлопных газах при понижении расхода бензина.

Теоретическая модель системы бензоводородного питания ДВС. Рассмотрим этап сгорания топливовоздушной смеси. При попадании ее в цилиндр она воспламеняется. Распыленная смесь имеет множество маленьких капелек с различной формой, которые имеют вес, что подтверждается экспериментально (при распылении топлива, через форсунку инжектора она падает вниз). Капли не сгорают полностью, а обгорает только их значительная часть. Оставшееся часть топлива выделяется в окружающую среду. Создан механизм, который превращает топливо из жидкого в газообразное состояние, такой механизм имеет достаточную экономичность, мощность и при этом соблюдает все экологические нормы. Данная система работает как с добавкой водорода, так и без нее. Возможность оснащения турбонаддувом. Имеет широкий диапазон регулирования подачи смеси, как обедненной так и обогащенной. Система питания конструктивно проста и может устанавливаться на двигателя различных производителей.

Заключение. Учитывая важность решения проблемы экологически чистого транспорта для больших городов, определен начальный этап повышения чистоты выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания за счет небольших (до 5%) добавок водорода к углеводородному топливу. Для решения этой проблемы разработана система комбинированного бензоводородного питания ДВС. Способствует повышению моторесурса двигателя, повышает мощность, увеличивает КПД ДВС. Конструкция устройства позволяет производить его установку на всех видах бензиновых двигателей.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.И. Мищенко. Применение водорода для автомобильных двигателей. Наукова думка, Украина, Киев, 1984 г. 2. СМАЛЬ Ф.В. и АРСЕНОВ Е.Е. Перспективные топлива для автомобилей. Москва, «Транспорт», 1979 г. 3. ГРИГОРЬЕВ Е.Г., КОЛУБАЕВ Б.Д. и др. Газобаллонные автомобили. Москва, «Машиностроение», 1989 г.

УДК 658.51

Горюшкин А.А.

ПРОГРАММНЫЙ МЕТОД ВЫБОРА МИНИМАЛЬНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ЦИКЛА ОБСЛУЖИВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫМ РОБОТОМ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Беларусь*

Известно, что при автоматизации производства на промышленные роботы (ПР) возлагаются функции, выполняемые человеком при обслуживании технологического оборудования, они берут заготовки, переносят их от одного станка к другому, вставляют и закрепляют заготовки на станках. Длительность цикла – это затраты времени на обслуживание технологического оборудования от первого станка до последнего и возвращение к первому станку. Его длительность зависит от алгоритма обслуживания. Чем меньше длительность цикла, тем выше коэффициент использования оборудования. В прямой зависимости от величины длительности цикла обслуживания ПР технологиче-

ского оборудования находится объем выпуска продукции роботизированного технологического комплекса. Снижение величины длительности цикла позволяет, не прибегая к закупке нового оборудования, а также привлечения других капитальных вложений, повысить объем выпуска продукции. Что кроме прочего позволит снизить себестоимость, а это в свою очередь благоприятно скажется на снижении цены и конкурентоспособности продукции. Предложение использовать такой подход при решении проблемы повышения конкурентоспособности продукции предприятия имеет существенные преимущества, так как возможность избежать дополнительных капитальных вложений позволяет предприятию беспрепятственно произвести внедрение данной методики. Исходя из этих аргументов предлагается методика выбора минимальной длительности цикла с использованием программного обеспечения.

Кроме аналитического и графического методов выбора минимальной длительности цикла обслуживания промышленным роботом технологического оборудования разработан также программный метод, позволяющий максимально быстро и наглядно показать наиболее эффективный вариант обслуживания с наименьшей длительностью цикла.

Разработанная программа имеет ряд необходимых свойств:

- возможность добавления времени обработки деталей и времени транспортировки;
- возможность удаления и редактирования времени обработки деталей и времени транспортировки;
- вывод графика, определяющего минимальную длительность цикла обслуживания оборудования.

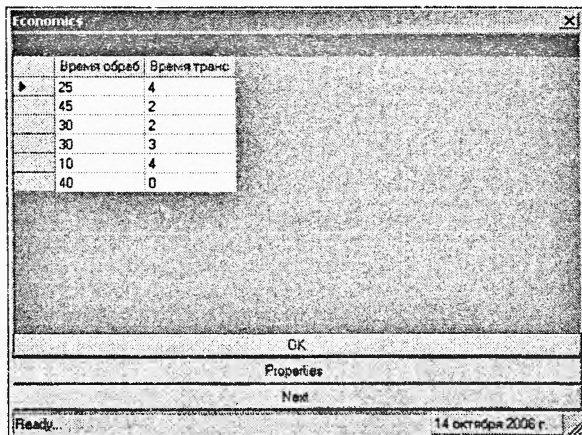


Рисунок 1- Интерфейс программы

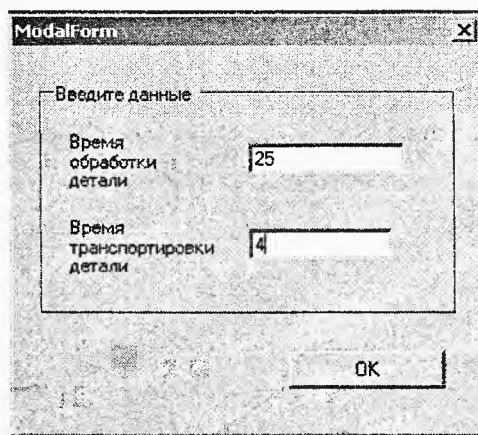


Рисунок 2 - Модальное окно

Программа представляет собой диалоговое окно с возможностью добавления времени обработки деталей и времени транспортировки (рис. 1).

Для обработки данных программой необходимо ввести время обработки детали и время транспортировки следующим образом: нажатием кнопки “OK” и далее необходимо ввести в модальное окно (рис. 2) время обработки и время транспортировки деталей на первой операции; затем прделывается та же процедура для всех остальных операций. После того как время обработки и время транспортировки деталей введено, необходимо установить параметры смешанного варианта, для чего нужно нажать кнопку “Properties”. После произве-

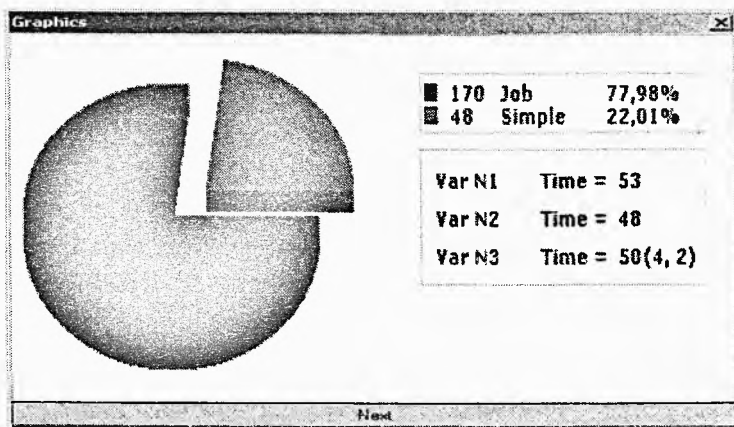


Рисунок 3- Вывод результатов обработки данных

данных смешанного варианта, для чего нужно нажать кнопку “Properties”. После произве-

данных процедур введения данных можно запустить обработку, нажав кнопку “Next”. На экране появится график, иллюстрирующий результаты работы программы (рис. 3).

На рис. 3 наглядно можно увидеть длительность цикла обслуживания технологического оборудования ПР по каждому из трёх вариантов и однозначно сделать вывод о наиболее эффективном варианте. На рис. 3 также можно увидеть процент загрузки оборудования, который наглядно демонстрируется в виде диаграммы.

Данная программа реализована в среде Microsoft Visual Studio 2003.NET на языке программирования C#.NET.

Для использования и реализации функций, которая предоставляет программа “Economics”, необходимо использовать следующие пространства имён платформы .NET:

- System;
- System.Collections;
- System.ComponentModel;
- System.Drawing;
- System.IO;
- System.Threading;
- System.Windows.Forms.

В данной программе реализованы следующие классы:

- класс самого проигрывателя – `public class Economics: Form`;
- класс зажатой кнопки – `public class PushButton: Control`;
- класс аргументов обработчика нажатия кнопки – `public class PushChangedEventArgs: EventArgs`;
- класс аргументов события отправки запроса на проверку нажатия кнопки – `public class WmCommandEventArgs: EventArgs`;
- класс, инкапсулирующий текущие данные – `public class MyArrayList: ArrayList`;
- класс, выводящий график определения минимальной длительности цикла обслуживания оборудования – `public class MyUserControl: UserControl`.

Разработанная программа выбора минимальной длительности цикла обслуживания промышленным роботом технологического оборудования “Economics” позволяет за короткое время определить наиболее эффективный вариант обслуживания, освобождая исследователя от длительных ручных расчётов, производя их машинным способом.

ПРОЦЕССЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ И РЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ

УДК 621.91.04

Данилов В.А., Киселев Р.А.

КОЛЕБАНИЯ В ОБРАБАТЫВАЮЩЕЙ СИСТЕМЕ ПРИ ОБРАБОТКЕ ТОРЦОВЫХ ЗУБЧАТЫХ КОНТУРОВ

Полоцкий государственный университет
Новополоцк, Беларусь

Высокое качество обработки относится к основным требованиям, предъявляемым к современным металлорежущим станкам. Оно обеспечивается как параметрами обрабатывающей системы, так и режимами резания и зависит от кинематики применяемой схемы формообразования и схемы срезания припуска.

Одним из явлений, сопровождающим процесс резания и определяющим показатели качества, являются колебания элементов обрабатывающей системы. От них зависит стойкость режущего инструмента, энергозатраты на процесс обработки, долговечность оборудования и т.п. Поэтому для оценки эффективности новых схем формообразования следует проводить анализ виброустойчивости обрабатывающей системы. Характер возникающих в обрабатывающей системе колебаний определяется в первую очередь ее конструктивными особенностями, схемой формообразования и изменением сил резания в процессе обработки.

Кинематика схемы формообразования торцовых зубчатых контуров при непрерывном движении деления представлена на рис.1. Согласно ей инструменту 2 и заготовке 1 сообщают согласованные вращательные движения вокруг скрещивающихся под прямым углом осей [1]. За счет настраиваемых параметров L и λ установки инструмента обеспечивается требуемая ориентация пазов. Он выполнен в виде резцового сектора, режущие зубья которого спрофилированы по форме паза или имеют меньшую ширину и расположены в определенном угловом секторе. Инструмент установлен эксцентрично относительно оси вращения, благодаря чему обеспечивается плавное возрастание подачи на зуб при врезании и ее уменьшение при окончании обработки паза.

Анализ характера изменения сил резания был установлен при анализе динамики процесса обработки торцовых зубчатых контуров [2]. Результаты данного анализа согласуются с экспериментальными данными по динамической устойчивости системы. Характер изменения главной составляющей силы резания изображен на рис. 2 (кривая 1) и в упрощенном варианте может быть представлена в виде синусоидальной зависимости 2, описываемой уравнением:

$$P = F(\sin(\omega t) + |\sin(\omega t)|), \quad (1)$$

где F – коэффициент главной составляющей силы резания;

ω – угловая частота колебаний;

t – время.

Наличие переменной силы в обрабатывающей системе при обработке пазов по рассмотренной схеме приводит к возникновению колебаний, источником которых является процесс резания. Для исключения явления резонанса при проектировании обрабатывающей системы

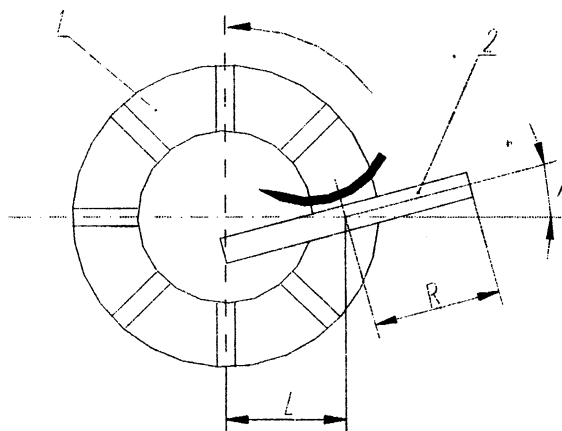


Рисунок 1 - Кинематическая схема обработки пазов на торце детали

необходимо обеспечить определенный разрыв между частотой ее собственных колебаний и частотой изменения сил резания.

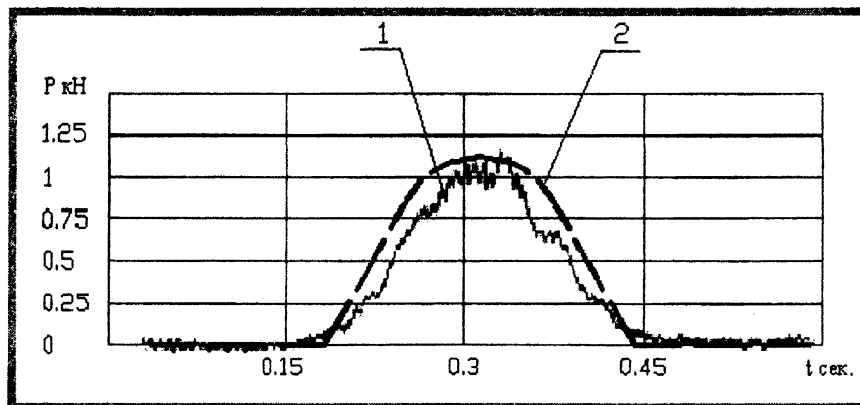


Рисунок 2. Изменение главной составляющей силы резания при обработке торцовых зубчатых контуров

В частности, применительно к рассматриваемой схеме формообразования пазов задача сводится к определению частоты собственных колебаний инструментальной оправки или критической скорости, под которой понимается значение скорости, при которой движение оправки (вала) становится неустойчивым и возникают недопустимые поперечные отклонения оси от геометрически правильного положения. Такое состояние наиболее вероятно при совпадении угловой скорости вала с угловой частотой его собственных поперечных колебаний.

Критическая скорость вала с насаженным на него неуравновешенным диском определяется из условий равенства центробежной силы, под действие которой прогиб вала увеличиваться, и восстанавливающей силы упругого вала [3]:

$$\omega_{кр} = \sqrt{\frac{C}{m}}, \quad (2)$$

где C - жесткость вала;

m - неуравновешенные вращающиеся массы.

Известно, что для устойчивого вращения вала между его рабочей угловой скоростью Ω и критической скоростью $\omega_{кр}$ должно быть выдержанно определенное соотношение, а именно:

$$\text{при работе в докритической зоне } \omega_1 \geq 1.3 \Omega ;$$

$$\text{при работе в надкритической зоне } \omega_1 < 1.4 \Omega .$$

Прогиб вала в рассматриваемом случае будет создаваться под действием не только центробежных сил, но и составляющей силы резания, нормальной к оси вращения вала. Действие данной силы носит внешний характер, поэтому обрабатывающая система имеет вынужденные колебания. В этом случае устойчивость системы оценивается коэффициентом демпфирования (коэффициент затухания или коэффициент сопротивления). При экспериментальном исследовании резонансной кривой данный коэффициент определяется по формуле [3]:

$$\gamma = \frac{\Delta\omega}{\omega_{кр}} \sqrt{\frac{A_r^2}{A_r^2 - A^2}}, \quad (3)$$

где A_r - амплитуда резонансных колебаний;

A - какая-либо избранная амплитуда вынужденных колебаний;

$\Delta\omega$ - разность частот, соответствующих равным амплитудам A на обеих ветвях резонансной кривой.

При анализе вынужденных колебаний необходимо учитывать, что силы резания изменяются по двум частотам, одна из которых соответствует общей динамике изменения сум-

марной силы резания, воспринимаемой инструментом, а вторая определяется частотой входа и выхода из контакта с заготовкой режущих элементов. Таким образом, обрабатывающая система испытывает воздействие внешних сил, характеризуемых двумя гармониками, при этом их составляющие воспринимаются колебательной системой по-разному, так как каждая имеет свой определенный, соответствующий ей коэффициент динамического усиления ν . Величина коэффициента усиления в системе с одной степенью свободы для каждой из гармонических составляющих находится из формулы [3]:

$$A = \frac{A_0}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + \gamma^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}} = \nu A_0, \quad (4)$$

где A_0 – перемещения от статической силы, равной амплитуде гармонической силы.

Основной динамический эффект обычно дают те гармонические составляющие сил резания (периодические силы), частоты которых близки к резонансным, так называемые околорезонансные гармонические, что определяется соотношением $\frac{\omega}{\omega_0}$.

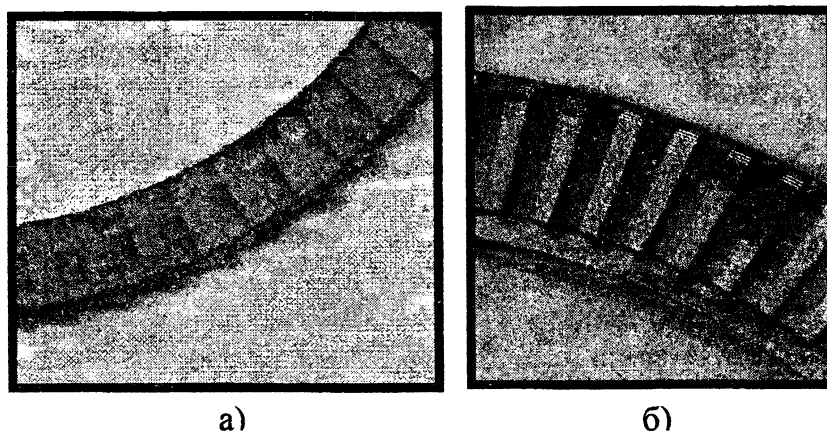


Рисунок 3 - Элемент обработанного торцового зубчатого контура:

- a* – при наличии колебаний;
- b* – при отсутствии заметных колебаний.

Поэтому кривая динамических перемещений во времени будет значительно отличаться от кривой изменения вызывающей его динамической силы (см. рис. 2), что в общем случае отражается на геометрии обработанной поверхности. Результатом поперечных колебаний инструмента при обработке пазов может быть, например, волнистость поверхности дна паза, что наглядно показано на рис. 3, *a* в виде расположенных на дне каждого паза двух выступов.

Анализ обработанной поверхности позволяет выявить взаимосвязь характеристик ее качества с изменением силы резания с учетом режима обработки, конструктивных параметров инструмента и станка и исключить недопустимое влияния колебаний в обрабатывающей системе на геометрию обработанной поверхности. Такой подход к определению параметров обрабатывающей системы был использован при проектировании специальных станков моделей ВС 50-9061 и ВС 30П-9253 производства Витебского станкостроительного завода «Вистан» для обработки деталей с торцовым зубчатым контуром, что обеспечило высокую виброустойчивость станков и требуемое качество обработки на них различных типоразмеров индукторов АБС автомобилей (см. рис. 3, *b*).

Кроме рассмотренных поперечных колебаний оправка с режущим инструментом подвержена также крутильным колебаниям. Частота собственных крутильных колебаний определяется по формуле [3]:

$$\omega_k = \frac{\beta}{l} \sqrt{\frac{Gg}{i}}, \quad (5)$$

где G – модуль упругости материала оправки при сдвиге;
 l – длина оправки;
 i – удельный вес материала стержня;
 β – корень уравнения частот.

Последствием действия крутильных колебаний в обрабатывающей системе являются увеличение ее кинематической погрешности и нагрузки на элементы передач.

Исходя из выше изложенного, актуален вопрос гашения колебаний в обрабатывающих системах. В частности, для гашения крутильных колебаний целесообразно применение демпферов (гасителей), основанных на введении сил трения в колебательную систему. Эффективность данного решения подтверждается опытом его применения в зубофрезерных станках. Например, в станке Lees-Bradner (США) применен демпфер сухого трения, состоящий из свободно вращающегося маховика, который поджимается с двух сторон фрикционными кольцами. Необходимо отметить, что применение демпферов такого типа (сухого трения) эффективно только при значительных амплитудах колебаний. Поэтому при выборе типа демпфера необходимо исходить из кинематических особенностей обрабатывающей системы и схемы формообразования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Данилов В.А., Киселев Р.А., Обеспечение динамической устойчивости процесса обработки пазов на торцах деталей по схеме с непрерывным делением // *Машиностроение: Республиканский межведомственный сборник научных трудов*. Вып. 20, в двух томах: Т. 2/ Под ред. И.П. Филонова – Мн.: УП “Технопринт” – 2004.- С. 22-28.
2. Данилов В.А., Киселев Р.А. Оценка динамики процессов обработки прерывистых поверхностей по схеме с непрерывным делением // *Научное издание: “Наука и технологии на рубеже XXI века”*: Материалы международной научно-технической конференции. – Минск, 2000. – С. 98 – 103.
3. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т./ Ред. В.Н. Челомей – М.: Машиностроение, 1980.

УДК 621.91.04

Данилов В. А., Селицкий А. Н.

АНАЛИЗ И РЕАЛИЗАЦИЯ СХЕМ ОБРАБОТКИ НЕКРУГЛЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

*Полоцкий государственный университет
 Новополоцк, Беларусь*

Профильные бесшпоночные соединения могут эффективно применяться вместо шлицевых и шпоночных в трансмиссиях машин и механизмов, а также режущих и вспомогательных инструментах благодаря следующим эксплуатационным и технологическим преимуществам [1]: соединение вала и ступицы сосны, так как некруглые профили обладают свойством самоцентрирования; выше усталостная прочность, меньше нагрев, износ и уровень шума; возможность осуществлять обработку более простыми по конструкции режущими инструментами, а также всеми видами механического упрочнения (обкатыванием, алмазным выглаживанием и др.); более низкая (на 40-50%) себестоимость.

Однако профильные соединения не нашли широкого применения в отечественном машиностроении, что обусловлено, в частности, недостаточной технологической отработкой про-

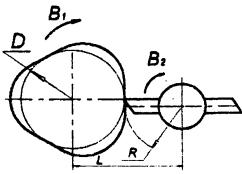
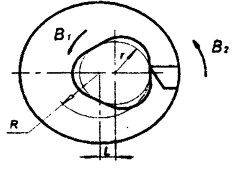
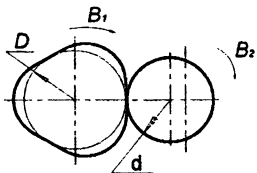
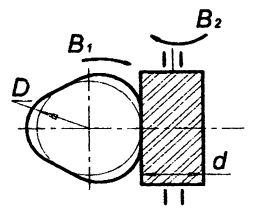
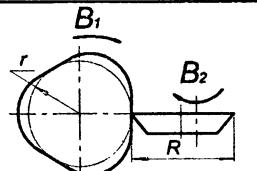
цессов формообразования профильных поверхностей, а также отсутствием специализированного отечественного металлорежущего оборудования, режущих инструментов и контрольно-измерительных средств, необходимых для изготовления профильных деталей.

В связи с этим актуальна разработка прогрессивных схем формообразования, реализуемых на универсальных станках простыми по конструкции режущими инструментами.

При механической обработке некруглый профиль образуется вследствие непрерывного периодического изменения расстояния между осью вращения обрабатываемой заготовки и формообразующим элементом режущего инструмента. Например, при точении это достигается сообщением резцу возвратно-поступательного движения, согласованного с вращением заготовки. При этом частота возвратно-поступательного движения резца задается в m раз больше частоты вращения заготовки (где m – число выступов некруглого профиля), что создает неудовлетворительные динамические условия работы станка, ограничивает частоту вращения шпинделя и, следовательно, производительность обработки. Заслуживают внимания схемы обработки некруглых профилей без возвратно-поступательных движений, например, вращающимися резцовыми головками, эксцентрично установленными дисковыми и цилиндрическими фрезами, а также ротационными инструментами [2].

Предпочтительные схемы обработки некруглых поверхностей представлены в таблице 1. На всех схемах обозначено: B_1 – вращение заготовки, B_2 – вращение инструмента.

Таблица 1. Параметры схем обработки профильных деталей

№ схемы	Кинематическая схема обработки	Частота вращения инструмента
1		$n_2 = \frac{v}{2\pi(Ri + r)}$
2		$n_2 = \frac{v}{2\pi(Ri - r)}$
3		$n_2 = \frac{v}{2\pi[m(R + l) + r]}$
4		$n_2 = \frac{v}{\pi \sqrt{\frac{D^2}{m^2} + d^2 \pm 2 \frac{Dd}{m} \sin \varphi}}$
5		$n_1 = \frac{v}{2\pi \sqrt{(R + l)^2 (m/c)^2 + r^2}}$

Обработка с образованием профиля по методу следа (схемы 1, 2).

Практическая реализация схемы формообразования данного типа возможна резцовой головкой внешнего касания (схема 1) или охватывающей заготовку (схема 2). В обоих случаях из возможных сочетаний направлений вращательных движений предпочтителен вариант с одинаково направленными движениями инструмента и заготовки, так как обеспечивает меньшее изменение рабочих углов режущих зубьев и лучшую динамику процесса резания [2]. Достоинством схемы 2 является возможность обработки как наружных, так и внутренних поверхностей.

Обработка с образованием профиля по методу касания (схема 3).

Данный метод реализуется эксцентрично установленным дисковым инструментом.

При использовании рассмотренных методов возможна обработка гладких и ступенчатых деталей с некруглым профилем.

Обработка по методу обката (схемы 4, 5).

Профилирование некруглых поверхностей этим методом осуществляется при обработке эксцентрично установленным цилиндрическим инструментом (схема 4) или ротационным резцом (схема 5). Ротационное точение некруглых поверхностей кроме дискового резца (схема 5) может осуществляться также резцом с винтовой режущей кромкой. Данные способы являются высокопроизводительными, но не позволяют обрабатывать детали с прямыми уступами. *Обработка с образованием профиля по методу следа (схемы 1, 2).*

Эффективным типом станочного оборудования для обработки непрерывных и прерывистых поверхностей с периодически повторяющимся профилем являются, как показывает опыт эксплуатации станков-профиляторов немецких фирм "Wera", "Fortuna" и др. [1], станки, работающие по методу кинематического профилирования. Однако высокая стоимость данного типа импортного оборудования ограничивает возможность его применения в отечественной промышленности, что обуславливает актуальность создания собственных аналогичных станков и их инструментального оснащения, реализующих прогрессивные процессы формообразования таких поверхностей.

В зависимости от реализуемых схем обработки известные станки для обработки некруглых поверхностей можно отнести к четырем типам [3]: с вращательным движением шпинделя изделия и осциллирующим или качательным движением инструмента; с планетарным движением изделия; с планетарным движением инструмента; с вращательными движениями инструмента и изделия. Станки последнего типа благодаря рациональной кинематике обладают широкими технологическими возможностями при высокой производительности обработки, поэтому промышленная реализация процессов формообразования некруглых и прерывистых поверхностей ориентирована на создание станков данного типа. Решение этой задачи возможно по следующим направлениям: проектирование специального оборудования с необходимым инструментальным оснащением; расширение технологических возможностей близких по кинематической структуре универсальных станков за счет обеспечения необходимых параметров настройки и оснащения их сменными обрабатывающими модулями; создание специальных станков на базе универсальных.

Для серийного производства деталей профильных моментопередающих соединений рекомендуется использовать схемы обработки некруглых поверхностей, реализуемые на универсальном станочном оборудовании и основанные на методе кинематического профилирования. Исходя из схем обработки некруглых поверхностей кинематическая структура станка с вращательными движениями инструмента и заготовки должна содержать сложную кинематическую группу движения резания, простую или сложную группу движения подачи, а также группы движений установки и вспомогательных перемещений исполнительных органов. Такую кинематическую структуру имеет широкоуниверсальный зубошлицефрезерный станок модели ВС-50 производства Витебского станкостроительного завода, созданный при участии Полоцкого государственного университета [4].

$$n_{об.эл.дв.} \cdot \frac{200}{250} \cdot \left[\frac{55}{35} \cdot \frac{18}{72} \right] \cdot \frac{24}{24} \cdot \frac{18}{72} = n_{фр.}, \quad \text{откуда} \quad n_{фр.} = n_{об.эл.дв.} \cdot 0.2 \cdot \left[\frac{55}{35} \cdot \frac{18}{72} \right].$$

Инструментальный шпиндель IV и шпиндель изделия X связаны между собой кинематической цепью согласно уравнению:

$$i_{об.фр.} = \frac{72}{18} \cdot \frac{24}{24} \cdot \frac{24}{24} \cdot \frac{24}{24} \cdot \frac{40}{a} \cdot i_{дел.} \cdot \frac{\frac{40}{40}}{\frac{24}{24} \cdot \frac{1}{60}} \cdot \frac{30}{30} = \frac{k}{z} = \frac{1}{m},$$

где: k – число заходов фрезы;
 z – число шлицев на валу;
 m – число выступов некруглого профиля;

Тогда формула настройки гитары сменных зубчатых колес $\frac{ac}{bd}$ (гитары деления):

$$\text{при обработке некруглых валов } i_{дел.} = \frac{a}{160m},$$

$$\text{при обработке шлицевых валов } i_{дел.} = \frac{8a \cdot k}{3z}.$$

Обработка некруглых поверхностей на этом станке по схеме 4 (см. таблицу) осуществляется эксцентрично установленной цилиндрической фрезой. На оправке 1 (рис. 2) последовательно расположены ведущая втулка 2, фреза 3, дистанционные 4 и направляющая 5 втулки. Изменение эксцентриситета e установки фрезы достигается заменой эксцентричной втулки 6. Передача крутящего момента от оправки 1 к фрезе 3 осуществляется через ведущую втулку 2 посредством торцового шпоночного соединения.

Таким образом, задача создания специального оборудования для обработки некруглых валов решается путём модернизации универсальных станков и применения простых по конструкции инструментов.

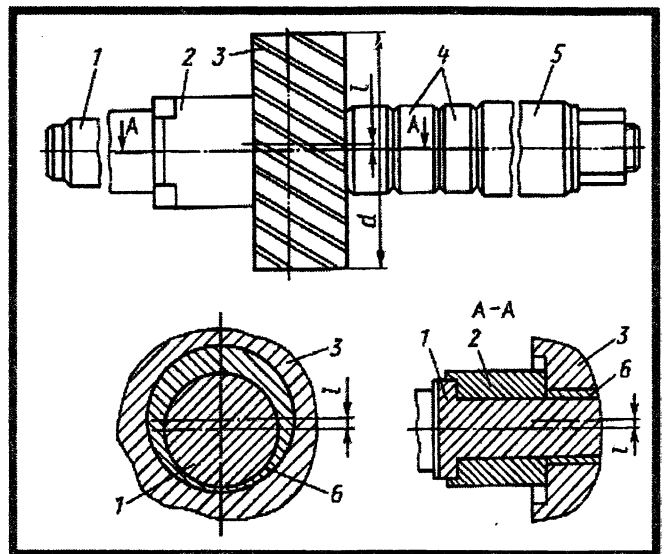


Рисунок 2 - Инструментальная наладка для обработки некруглых валов

ЛИТЕРАТУРА

1. Тимченко А.И. Процессы формообразования профильных поверхностей изделий с равноосным контуром: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.08 / Мосстанкин. – М., 1993. – 41 с.
2. Данилов В.А. Формообразующая обработка сложных поверхностей резанием. - Мн.: Навука і тэхніка, 1995.-264 с.
3. Данилов В.А. Станки для обработки профильных поверхностей, передающих момент // Техника машиностроения. – 1998. – № 4. – С.102–105.
4. Данилов В. А. Новые технологии формообразования профильных и прерывистых поверхностей резанием //Инженер-механик. – 2003. - №3. – С. 26-31.

АНАЛИЗ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ РОТАЦИОННОГО ТОКАРНОГО РЕЗЦА

*ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси»
Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

В любой технологической системе при ее функционировании генерируются высокочастотные волны упругой деформации (напряжений), которые распространяются по элементам системы и характеризуются высокой информативностью в отношении условий протекания рабочего процесса. Прием – преобразование – обработка и регистрация таких волн в совокупности составляет так называемый метод акустической эмиссии (АЭ).

В отличие от низкочастотных колебаний волны АЭ определяются доминирующими физическими процессами, которые при обработке резанием включают пластическую деформацию и разрушение обрабатываемого материала, трение и разрыв фрикционных связей на контактных поверхностях режущего лезвия инструмента.

Ранее выполненными исследованиями [1,2] установлена тесная корреляционная связь между параметрами АЭ, в первую очередь, амплитуды колебаний (энергетическая характеристика), их спектральной плотности и условиями резания обычным лезвийным инструментом. Это обеспечивает возможность оптимизации режимов резания, геометрических параметров инструмента и диагностики процесса на основе анализа АЭ.

Процесс ротационного резания отличается от традиционного дополнительным касательным движением режущего лезвия в процессе обработки и наличием подшипникового узла в конструкции ротационного резца. Исследования АЭ при ротационном резании [3, 4] также подтвердили зависимость параметров АЭ от условий резания. Необходимость изучения вибрации и АЭ, в частности, особенно важно для ротационного инструмента, так как для него характерны более высокие значения силы резания и относительно малая жесткость по сравнению с традиционными призматическими резцами.

В настоящей работе эксперименты выполнялись при ротационном точении по второй геометрической схеме установки резца, по прямой и обратной схемам резания [3]. Наружное точение образцов из стали 45, имеющих форму колец диаметром 77 мм и шириной 20 мм, производилось на токарно-винторезном станке модели 16К20 остро заточенным ротационным резцом с режущей конической чашкой диаметром 46 мм из твердого сплава Т15К6. Конструкция подшипникового узла включает по два радиальных №204 и упорных №8204 подшипников с посадочным диаметром 20 мм [4]. Радиус округления режущего лезвия составлял 25-40 мкм, передний угол заточки чашки $\gamma_3=30^\circ$, задний угол $\alpha_3=20^\circ$. Режимы резания: скорость главного движения $V=2-8,8$ м/с; глубина резания $t=0,1-0,5$ мм; продольная подача $S=0,28-0,57$ мм/об, обработка велась без охлаждения. Углы установки ротационного резца выбирались на основе ранее полученных данных и составляли $\varphi=18^\circ$, $\omega=26^\circ$.

Амплитуда АЭ фиксировалась трехканальным виброизмерителем SM231, получающим сигнал с пьезодатчиков КД35, установленных над передней опорой подшипникового узла ротационного резца. Колебания измерялись в радиальном направлении по отношению к круговой режущей кромке в вершине резца и в осевом направлении резца, перпендикулярном указанному выше. Путем сложения амплитуд определялся угол наименьшей жесткости резца, а также угол действия составляющей силы резания, действующей в плоскости режущего лезвия. Коэффициент передачи пьезодатчиков КД35 равнялся 5-5,03 мВ/мс⁻². Диапазон измеряемых частот колебаний 20-20000 Гц. С помощью октавного фильтра устанавливались области спектра с максимальным уровнем колебаний.

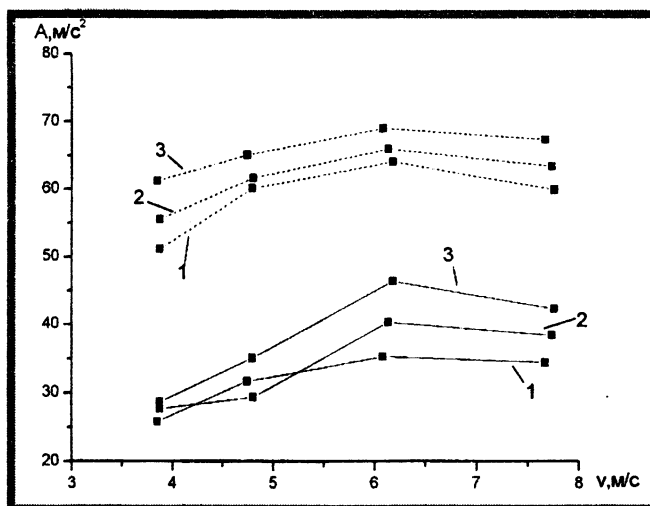


Рисунок 1 – Влияние скорости резания на уровень колебаний ротационного резца в направлениях: 1-радиальном; 2-осевом; 3- под углом 35° к радиальному при прямой (сплошные линии) и обратной (пунктирные линии) схемах резания.

Исследовалась зависимость амплитуды АЭ ротационного резца от режимов резания (V, S, t) и его геометрических параметров. Некоторые результаты экспериментов приведены на рисунках 1-2

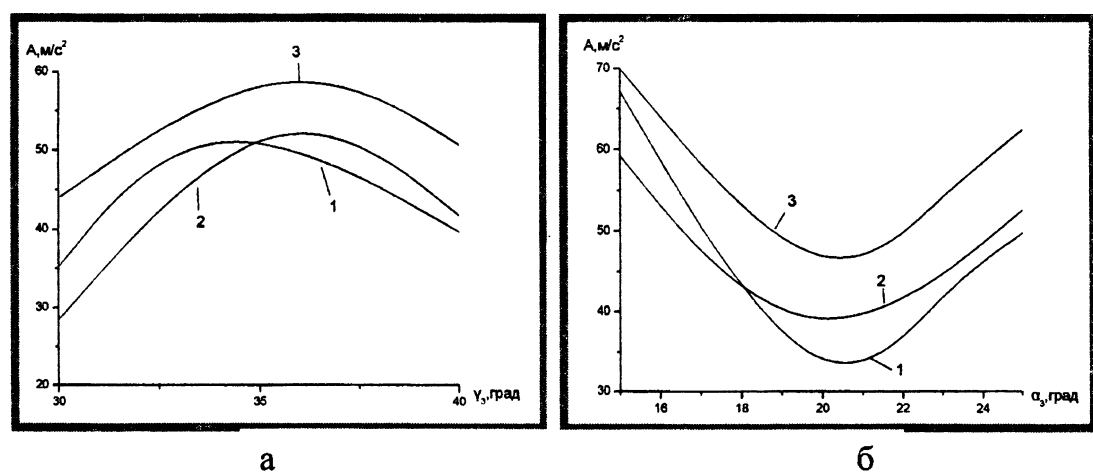


Рисунок 2 – Зависимость уровня колебаний ротационного резца от величины: а – переднего угла; б – заднего угла (номера кривых 1, 2, 3 соответствуют направлениям измерений по рисунку 1).

В результате обработки данных установлено, что наименьшую жесткость, равную 21 Н/мм, ротационный резец имеет в направлении около 35° по отношению к радиальному.

Анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы.

1. При прямой схеме резания интенсивность колебаний во всех выбранных направлениях меньше, чем при обратной схеме, что свидетельствует о большей устойчивости процесса прямой схемы резания (рис. 1). Зависимость амплитуды колебаний от скорости резания имеет экстремальный характер, который наиболее выражен для направления минимальной жесткости резца. Повышение устойчивости процесса при высоких скоростях резания объясняется повышением температуры резания, снижением сил резания и более стабильным и устойчивым процессом самовращения ротационного резца.

2. Увеличение глубины резания сопровождается возрастанием амплитуды колебаний для обеих схем резания и во всех фиксированных направлениях. Интенсивность роста ам-

плитуды для прямой схемы резания выше, чем для обратной. Так, для направления наименьшей жесткости с увеличением глубины резания от 0,25 мм до 0,6 мм для прямой схемы резания отмечено увеличение амплитуды от 38 до 80 м/с² (более чем в 2 раза) когда как для обратной схемы увеличение составило от 28 до 43 м/с² (в 1,5 раза). Это может быть объяснено уменьшением кинематического заднего угла для обратной схемы и соответственным повышением устойчивости процесса резания.

3. При анализе влияния подачи (диапазон 0,28-0,57 мм/об) установлено, что для обратной схемы амплитуда возрастает во всех направлениях измерения, например, с 40 до 60 м/с² для направления наименьшей жесткости. Для прямой схемы резания отмечен максимум значения A при подачах от 0,28 до 0,43 мм/об ($A=53$ м/с²). Дальнейшее увеличение подачи приводит к снижению интенсивности колебаний резца (при $S=0,57$ мм/об $A=48$ м/с²), т.е. увеличение подачи свыше 0,43 мм/об сопровождается повышением устойчивости процесса резания.

4. Для всех экспериментов характерна максимальная амплитуда колебаний в направлении наименьшей жесткости, а минимальная – в радиальном направлении.

5. Направление минимальной жесткости зависит от соотношения составляющих силы резания, что необходимо учитывать при конструировании ротационных резцов, обеспечивая угол оси жесткости около 35-45°. Это создает предпосылки для устойчивости процесса при низких и высоких скоростях резания (рис.1).

6. Зависимости интенсивности колебаний от углов заточки ротационного резца (рисунок 2) имеет ярко выраженный экстремальный характер, причем величина углов заточки, при которых наблюдаются экстремумы, примерно одинакова для всех измеряемых направлений. Эти величины для условий экспериментов близки к назначенным углам заточки ($\gamma_3=30^\circ$, $\alpha_3=20^\circ$), которые были ранее оптимизированы в отношении максимальной стойкости инструмента.

Указанные выводы обосновывают возможность оптимизации геометрии ротационного инструмента на основе использования метода АЭ, не проводя длительных испытаний на износ и сравнительной оценки режущих свойств инструментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коновалов Е.Г., Борисенко А.В. Исследование спектра колебаний резца в процессе устойчивого резания металлов // Докл. АН БССР, 1968, т. XII, № 9.
2. Подураев В.Н., Борзов А.А. Анализ и прогнозирование процесса резания методом акустической эмиссии. – В сб. Перспективы развития режущего инструмента. – М.: МДНТП, 1978.
3. Коновалов Е.Г., Сидоренко В.А., Соусь А.В. Прогрессивные схемы ротационного резания металлов. – Мн.: Наука и техника, 1972.
4. Ящерицын П.И., Борисенко А.В., Дривотин И.Г., Лебедев В.Я. Ротационное резание материалов. – Мн.: Наука и техника, 1987.

УДК 621.9.02-589.22

Лебедев В.Я., Сидоренко В.А.

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ И НАПРАВЛЕНИЯ КАСАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ПРИ РОТАЦИОННОМ ТОЧЕНИИ НА КАЧЕСТВО ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

*ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси»,
Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Известно, что в общем случае кинематическая реализация обработки резанием включает рабочие движения, сообщаемые инструменту или заготовке: главное движение, одно или несколько движений подачи и касательное движение. Последнее движение ис-

пользуется относительно реже и предназначено для смены контактирующих с заготовкой участков режущей кромки [1]. В технической литературе это движение иногда называют как «движение режущей кромки вдоль самой себя». Для ротационного резания [2, 3], когда режущая часть инструмента выполняется в виде тела вращения, касательное движение выражается как вращательное движение чаще всего круговой режущей кромки вокруг своей геометрической оси.

В настоящее время наиболее изучен принцип самовращения режущей части под действием возникающих сил трения от взаимодействия обрабатываемого материала и рабочих поверхностей инструмента. Вместе с тем несомненно, что использование в конструкции инструмента дополнительного привода принудительного вращения режущей части иногда просто необходимо вследствие, например, прерывистости процесса резания или неустойчивости самовращения. Кроме того, в изменении скорости, направления и периодичности вращения или дискретного поворота режущей части инструмента заложен большой и пока еще не в достаточной мере изученный, а потому и неиспользованный резерв управления процессом ротационного резания. На использовании этого эффекта в республике разработано «шаговое» резание [4], «бреющее» резание стеклопластиков [5].

Для изучения процесса ротационного резания с принудительным вращением режущей части ротационного инструмента разработано устройство, конструкция которого приведена на рис.1. На основании 8, устанавливаемым вместо суппорта токарного станка, крепится траверса 3 с вертикальными Т-образными пазами, относительно которых может перемещаться в вертикальном направлении инструментальная плита 10. На ней закреплены соосно резцедержатель 7 с ротационным узлом и реверсивный электродвигатель 1 постоянного тока. Вращательное движение от электродвигателя передается через полумуфты 2 и 9, закрепленные соответственно на валу электродвигателя и хвостовике ротационного резца. С помощью расположенных в круговых пазах двух шпилек 4 с гайками осуществляется поворот плиты 3 в вертикальной плоскости на центральный угол установки ω и закрепление плиты к траверсе. Путем перемещения инструментальной плиты 10 в вертикальных пазах стойки 3 обеспечивается установка вершины режущей части 6 (в точке ее касания с обрабатываемой заготовкой 5) строго на уровне оси центров станка.

Реверсивный электродвигатель постоянного тока позволяет обеспечивать бесступенчатое регулирование частоты вращения ротора от 0 до 2000 мин⁻¹ в обоих направлениях вращения. Контроль скорости вращения ротора, а следовательно, и режущей чашки ротационного резца осуществляется с использованием датчика, установленного на свободном конце вала электродвигателя, и записывающего прибора. Датчик имеет вид металлической втулки с участком из электроизолирующего материала (эбонита), контактирующей с упругим металлическим контактом, скользящим по периферии втулки.

Для осуществления прямой и обратной схем ротационного резания (рис.1) плита 8 может поворачиваться в горизонтальной плоскости на различные углы установки оси ротационного резца соответственно на $\varphi_{пр}$ и $\varphi_{обр}$.

Для кинематического анализа результатов использования ротационного резца с принудительным вращением режущей части важна не абсолютная величина ее вращения (касательного движения), а относительный параметр, называемый кинематическим коэффициентом K ротационного резания,

$$K = \frac{V_p}{V} = \frac{d \times n_p}{D \times n},$$

поэтому в последующем все результаты исследований будут связаны с коэффициентом $K_{пр}$ для принудительного вращения.

В данной работе приведены результаты исследования следующих показателей качества обработанной поверхности (шероховатость, волнистость, относительная опорная длина профиля, степень и глубина наклепа, текстура материала поверхностного слоя). Использовались образцы из стали 45 после отжига, диаметром $D=77$ мм, режущей чашки диаметром $d=31...37$ мм из твердого сплава ВК8 с углами заточки $\gamma_3=30^\circ$, $\alpha_3=20^\circ$. Частота

принудительного вращения режущей чашки ротационного резца $n_p = +2000 \dots -2000 \text{ мин}^{-1}$. Знак «плюс» соответствовал вращению в направлении самовращения режущей чашки, знак «минус» - во встречном направлении. Режим резания: частота вращения обрабатываемой заготовки $n = 630 \text{ мин}^{-1}$ (скорость главного движения $-V = 152,5 \text{ м/мин}$); глубина резания $t = 0,2 \text{ мм}$; подача $S = 0,3 \text{ мм/об}$. Углы установки резца относительно обрабатываемой поверхности $\omega = 30^\circ$, $\varphi = 30^\circ$. Резание без охлаждения.

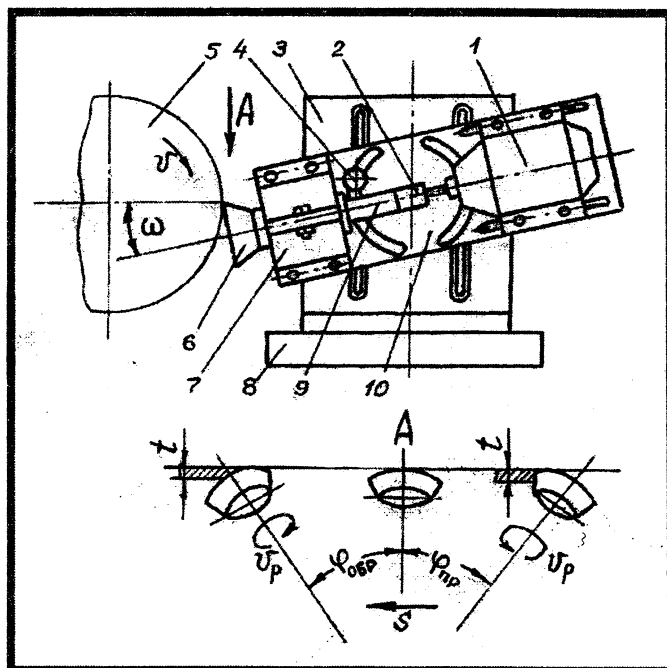


Рисунок 1 – Устройство для принудительного вращения режущей чашки ротационного резца. Вид А – установка по прямой ($\varphi_{пр}$) и обратной ($\varphi_{обр}$) схемам резания (t , s , v – параметры режима резания)

Шероховатость и волнистость обработанной поверхности

Анализ графиков 1-4 (обратная и прямая схемы) показывает:

1. Сообщение ротационному резцу касательного движения (изменение $K_{пр}$ от 0, т.е. от неподвижного или как принято говорить, заторможенного ротационного резца) в обоих направлениях для обеих схем резания приводит к плавному уменьшению высоты микронеровностей. Это объясняется тем, что с уменьшением абсолютной величины $K_{пр}$ (от 0,9...1,3) до нуля увеличивается скорость проскальзывания задней поверхности режущей чашки ротационного резца, увеличивается пластическая деформация слоя, растет высота микронеровностей.

2. Особенно характерна установленная зависимость для области отрицательных значений $K_{пр}$, вплоть до $K_{пр} = -1,3$, т.е. при «встречном» вращении режущей кромки резца уменьшение высоты микронеровностей более существенно.

3. При прямой схеме резания высота микронеровностей в зоне положительных значений $K_{пр}$ на 25-30% меньше, чем при обратной схеме. Вместе с тем в области отрицательных значений $K_{пр}$ разность между достигаемыми значениями параметра шероховатости R_a при различных схемах резания достигает 70%. Это объясняется тем, что уменьшается кинематический задний угол, и при прямой схеме рабочая задняя поверхность режущей чашки играет роль накатного ролика и заглаживает микронеровности обработанной поверхности до значений $R_a = 0,3 \text{ мкм}$ (в условиях опытов).

4. На обработанной ротационным резцом поверхности вследствие неизбежного радиального и осевого биений его режущей кромки образуется волнистость, причем по высоте и шагу волнистости более проявляется поперечная волнистость

5. Высота волнистости превышает высоту микронеровностей, а шаг волнистости значительно (в несколько раз) больше значения предельной подачи ротационного резца

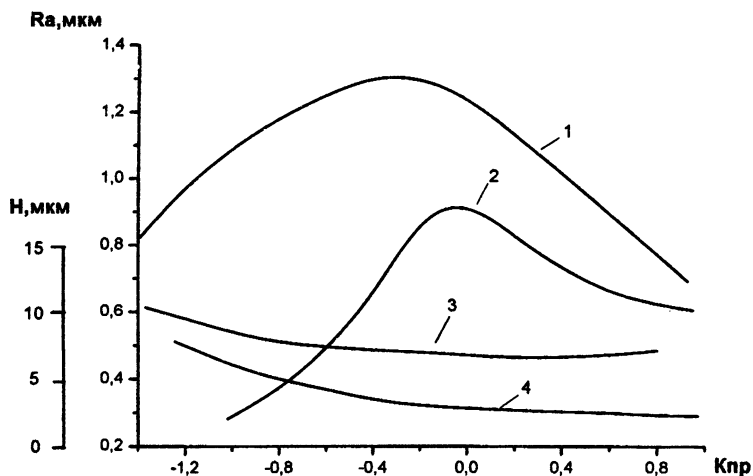


Рисунок 2 – Зависимость параметра шероховатости R_a (1, 2) и высоты волнистости H (3, 4) поверхности от кинематического коэффициента $K_{пр}$ по обратной (1, 3) и прямой (2, 4) схемам

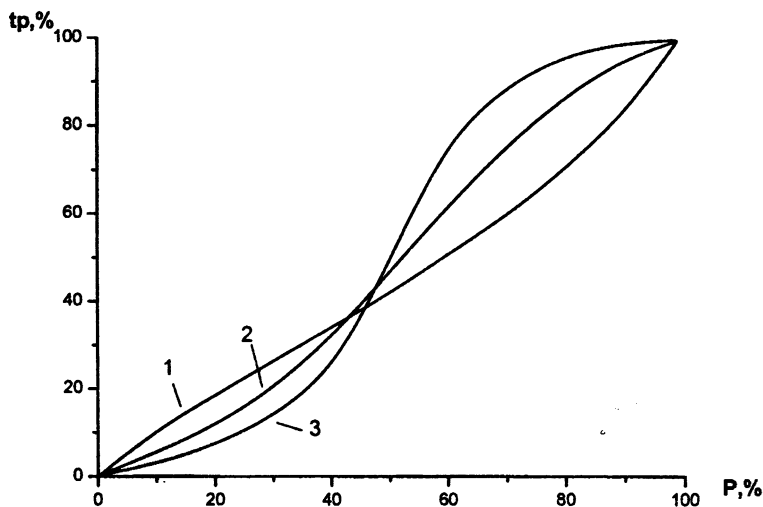


Рисунок 3 – Зависимость относительной опорной длины профиля t_r от уровня сечения профиля P при обработке резцом: 1 – призматическим; 2 и 3 – ротационным соответственно при $K_{пр} = 0,94$ и $K_{пр} = -1,1$

6. При прямой схеме резания высота и шаг волнистости соответственно в 2 и 1,6...1,8 раза меньше, чем при обратной схеме.

Относительная опорная длина профиля

Анализ полученных данных показывает, что обработанная поверхность после ротационного точения с принудительным вращением режущей чашки имеет характерный профиль, отличающийся от профиля, полученного обычным точением. На рис. 3 совмещены кривые относительной опорной длины профиля для следующих крайних случаев: для призматического резца и для ротационного резца при значениях $K_{пр} = 0,94$ и $K_{пр} = -1,1$.

Из графиков следует:

1. Для ротационных резцов по сравнению с призматическим зона линий выступов имеет небольшую относительную опорную длину, что способствует более быстрой приработке сопряженных деталей, работающих на трение скольжения. Эта особенность характерна примерно до значений $t_r = 50\%$.

2. На уровне сечений профиля, превышающем 50% и более, опорная поверхность для ротационных резцов значительно больше. Это свидетельствует о формировании щелей для

удержания смазки, способствует получению прочных прессовых соединений в связи с уменьшением смятия гребешков, возрастанию усилия запрессовывания, увеличению фактической поверхности контакта. Так же, как и в предыдущих случаях, «встречное» направление касательного движения (знак «минус») предпочтительнее.

Степень и глубина наклепа поверхностного слоя

Приведены результаты для обратной схемы резания, так как предварительные эксперименты показали, что при прямой схеме резания в условиях эксперимента степень $\Delta H\%$ и глубина h наклепа на 20...30% меньше. Для условий получения минимального наклепа обработанной поверхности прямая схема показала себя более предпочтительной.

При обратной схеме резания с уменьшением $K_{пр}$ от +0,8 до -0,2 (рис. 4, кривая 2) ΔH уменьшается с 30 до 16 %, т.е. в 1,9 раза, дальнейшее изменение $K_{пр}$ приводит к увеличению ΔH до 30%. Такой же экстремальный характер имеет и зависимость глубины наклепа h . Эти зависимости объясняются изменением направления силы резания, кинематических передних и задних углов режущей чашки и угла наклона лезвия. В области отрицательных значений $K_{пр}$ основное влияние на наклеп обработанной поверхности оказывает уменьшение кинематического заднего угла, вследствие чего возрастают нормальные силы и силы трения в контактной зоне, и увеличивается степень пластической деформации и объем деформируемого металла поверхностного слоя.

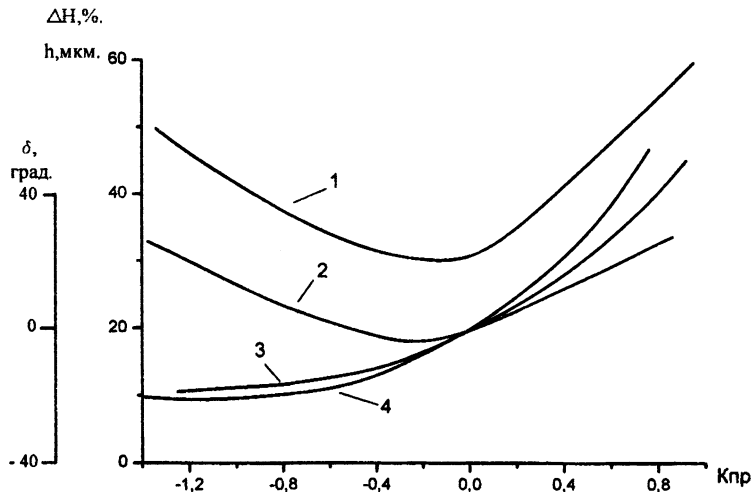


Рисунок 4 – Зависимость глубины h (1), степени наклепа ΔH (2) и угла наклона δ текстуры металла поверхности от кинематического коэффициента $K_{пр}$ (3 – прямая, 4 – обратная схемы резания)

Текстура поверхностного слоя

При обработке резанием в поверхностном слое обработанной детали формируется определенная текстура (вытянутость зерен металла), которая совпадает с направлением следов режущего лезвия резца по обработанной поверхности. От направления текстуры во многом зависят эксплуатационные свойства обработанных деталей. Ротационный резец, имеющий дополнительное касательное движение, формирует в отличие от призматического совершенно иной текстурированный слой, располагающийся под некоторым углом δ к направлению главного движения. Кинематический коэффициент $K_{пр}$ является надежным параметром, регулирующим угол наклона текстуры в широких пределах. При ротационном резании по обратной схеме угол наклона текстуры меняется в наибольшей степени при изменении $K_{пр}$. Так, уже при $K_{пр} = +0,8$ угол наклона текстуры достигает 60° , т.е. почти в 1,5 больше, чем для прямой схемы. В направлении противовращения возможности схем резания сближаются и при $K_{пр} = -1,2$ угол наклона текстуры приближается к 20° .

Полученная при ротационном резании картина текстуры благоприятно влияет на прочность и надежность соединяемых прессованием сборных деталей, способствует захвату смазки у торца и продвижению ее по всей поверхности трения наподобие винтового насоса.

При осуществлении способа по авт. свид. № 416162 [6] возможно регулировать микрорельеф поверхности, вплоть до получения квазихонингованной структуры поверхностного слоя.

Таким образом, проведенные исследования и производственные испытания подтвердили эффективность процесса ротационного резания с принудительным вращением режущей чашки. Особенно это касается, как показали эксперименты, прямой схемы резания по 2-ой геометрической схеме установки резца с принудительным его вращением в сторону «встречного» вращения.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 25762-83. Обработка резанием. Термины определения и обозначения общих понятий. 2. Коновалов Е.Г., Сидоренко В.А., Соусь А.В. Прогрессивные схемы ротационного резания металлов. – Мн.: Наука и техника, 1972. 3. Ящерицын П.И., Борисенко А.В., Дриготин И.Г., Лебедев В.Я. Ротационное резание материалов. – Мн.: Наука и техника, 1987. 4. Шатуров Г.Ф., Мрочек Ж.А. Прогрессивные процессы механической обработки поверхностей. – Мн.: УП «Технопринт», 2001. 5. Филиппов М.Н. Технологическое обеспечение качества обработанных поверхностей деталей из стеклопластиков на тканой основе при точении способом бреющего резания. Автореф. дисс. канд. техн. наук. Мн.: БПИ, 1988. 6. А.с. 416162. Способ резания принудительно вращаемым чашечным резцом / Коновалов Е.Г., Сидоренко В.А. – Опубл. БИ, 1974. № 7.

Ивашин А.В., Лебедев В.Я., Туромша В.И.

РАБОТОСПОСОБНОСТЬ АЛМАЗНЫХ КРУГОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ СТЕКЛА

Белорусский национальный технический университет
ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси»
Минск, Беларусь

Введение. Значительная часть (70 – 80 %) алмазного инструмента, применяемого на предприятиях РБ для обработки стекла, приходится на инструмент, поставляемый из РФ и Украины. В основном используется инструмент на алмазоабразивных композиционных материалах на металлической основе (металлические связки М1-01, М2-01, М3-01, М6-14, М1-04, М1-05 и др.). Реже применяется инструмент на органических связках (В2-01, В1-02 и др.) и керамических связках (К2-01, К3-01). Для изготовления алмазного инструмента обычно применяют шлифпорошки из синтетических алмазов АС6 – АС15 узких фракций. Концентрация алмазов в инструменте для грубых операций составляет 25 – 100 %. В зависимости от требований производства применяются круги с нестандартной концентрацией 30, 35 % и др. Особое внимание уделяется рассеvu порошков, так как наличие закрупненных фракций в таком инструменте резко ухудшает качество обработки. Характеристики алмазоносного слоя и работоспособность инструмента определяются маркой, зернистостью и концентрацией алмазного порошка, а также связкой. Связка часто определяет работоспособность, режущую способность круга и удельный расход алмазов [1].

Основные формы применяемого инструмента регламентируются ГОСТ 16167—70 — ГОСТ 16181—70. Диаметр кругов достигает 250 мм. Требования к кругам для стеклообработки определяются ГОСТ 30352. Ряд предприятий, в том числе и ПРУП «Борисовский хрустальный завод» применяют круги нестандартных типоразмеров и параметров алмазоносного слоя.

Создание высокоэффективного алмазного инструмента для обработки стекла на металлических связках с высокими эксплуатационными характеристиками, превышающими характеристики аналогичного инструмента, выпускаемого зарубежными производителями

(по производительности обработки и удельному расходу алмазов), является для республики актуальной задачей. Для решения данной проблемы требуется создание методической и нормативной базы, а также техническое обеспечение сравнительных испытаний инструментов с минимальным влиянием субъективного человеческого фактора.

Существующий уровень использования режущих свойств алмазных зерен может быть повышен прежде всего за счет увеличения прочности адгезионного удержания зерен связкой на границе их раздела и обеспечения величины выступания зерен из связки для образования необходимого пространства, в котором распределяется обрабатываемый материал и размещаются продукты диспергирования, шлам и смазочно-охлаждающая среда и, таким образом, обеспечиваются обязательные условия для осуществления процесса шлифования.

В настоящей работе представлены результаты сравнительных испытаний по определению эксплуатационных показателей алмазных кругов при шлифовании стекла, рассмотрены кинетика и механика процесса изнашивания рабочих поверхностей алмазного круга.

Методика проведения испытаний. Испытаниям подвергались алмазные круги формы 14EE1 250×8×10×32 с углом при вершине 110°. Характеристики инструментов представлены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики алмазных кругов

№ круга	Характеристика круга	Производитель
648	АС6 80/63 50% М2-01 С1	ООО «Геотехнология» (РФ)
044	АС6 80/63 50% М2-01 С1	РАУП Гомельское ПО «Кристалл»
043	АС6 80/63 50% М2-01 М3	РАУП Гомельское ПО «Кристалл»

Данными инструментами проводилось шлифование хрустальных брусков размером 200×100×20 мм с содержанием PbO = 24 % .

Испытания производились на универсально-заточном станке 3Е642. ГОСТ 30352 предусматривает проведение испытаний по критериям работоспособности, режущей способности и удельного расхода алмаза при работе алмазных кругов с постоянным усилием прижима круга к заготовке. Разработанная наладка позволяет обеспечить постоянное усилие на круг и компенсирует потери на сопротивление движению в направляющих станка. Схема наладки приведена на рис. 1.

Масса уравновешивающего груза (поз.7) подбиралась из условия обеспечения перемещения стола без действия на испытываемый образец сил резания.

Величина рабочей нагрузки (поз.8), создающей необходимое тяговое усилие стола под действием сил резания, составляла 4 кг. Обрабатываемая поверхность образца устанавливалась параллельно движению стола станка. Круги испытывали с охлаждением. В качестве охлаждающей жидкости применялась вода, подаваемая в зону резания непрерывно с расходом 2 — 3 л/мин

Для каждого круга определялись производительность шлифования Q (см³/мин), удельный расход алмазов q (мг/см³) и время шлифования.

Удельный расход алмазов определялся методом взвешивания. Определение износа алмазоносного слоя по массе проводилось взвешиванием кругов до и после испытания. Масса материала образца, снимаемая за испытание, составляла не менее 200 г и определялась взвешиванием образцов до и после испытания. Материал образцов удалялся по схеме показанной на рис. 2. Глубина шлифования t для каждого прохода составляла 2 мм. Длительность обработки контролировалась секундомером. Рабочая скорость круга составляла 21 м/с.

На первом этапе испытывались все три круга. На втором этапе продолжались испытания кругов с лучшими показателями.

Результаты и их обсуждение. Удаление обрабатываемого материала при шлифовании стекла определяется процессами хрупкого отрыва, обусловленными периодическим процессом развития опережающей трещины. Это подтверждают экспериментальные данные, полученные многими исследователями [2 – 7]. Формирование в обрабатываемом материале так называемого поверхностного слоя в общем случае является следствием нарушения сплошности материала при резании, развития и пересечения микротрещин. Исходя из основных положений теории разрушения, глубина распространения этих трещин зависит от степени напряженного деформируемого состояния в обрабатываемом теле, определяемой энергетическими условиями процесса обработки.

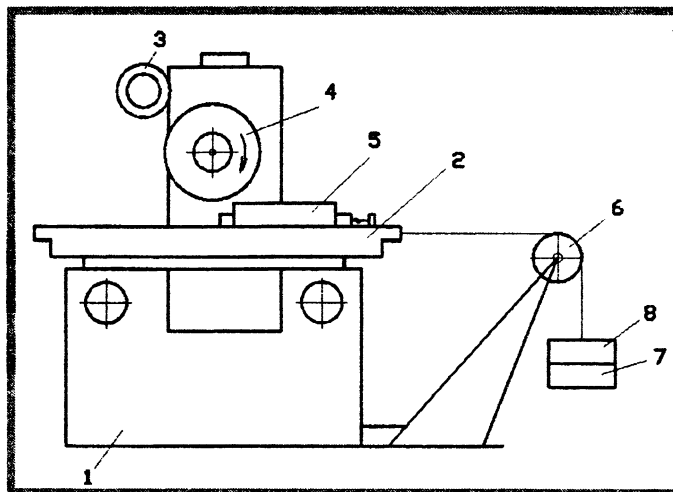


Рисунок 1 – Схема наладки станка 3Е642 для проведения испытаний: 1 – станок; 2 – стол продольный; 3 – привод; 4 – испытываемый круг; 5 – образец из хрусталя; 6 – блок; 7 – уравнивающий груз; 8 – рабочая нагрузка

Разрушение тела является сложным процессом, развитие которого зависит от температуры, скорости нагружения, характера напряженного состояния, структуры тела, свойств окружающей среды и т.д.

Процесс разрушения состоит из следующих стадий:

- а) возбуждение межатомных связей;
- б) разрыв этих связей под действием тепловых колебаний;
- в) образование субмикроскопических трещин;
- г) возникновение ведущей трещины под действием механической силы и разрыв образца.

При шлифовании разрушение обрабатываемого материала осуществляется при взаимодействии значительного количества абразивных зерен. При этом под воздействием участка передней поверхности зерна, расположенного непосредственно у режущей кромки, образуется система трещин, распределяющаяся в направлении движения резания. На этом этапе происходит непрерывное увеличение силы резания, обеспечивающее развитие ведущей трещины. Скорость ее роста зависит от того, насколько величина напряжений растяжения больше величины безопасного напряжения (при котором вероятности разрыва и восстановления связей равны). Развитие

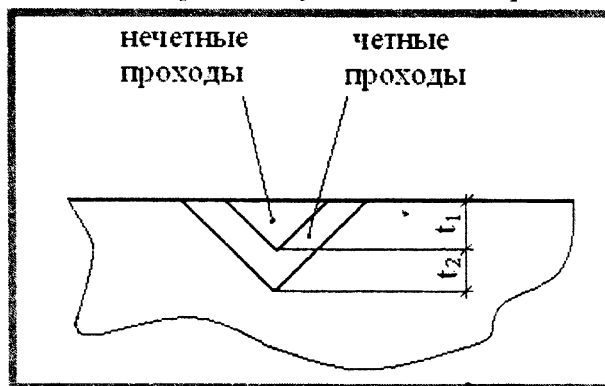


Рисунок 2 – Схема удаления материала при испытании алмазных кругов

трещины продолжается до тех пор, пока эти напряжения не превысят предела прочности материала, что вызывает быстрое падение силы резания вследствие отделения элемента стружки по поверхности. На этом заканчивается первый основной этап хрупкого разрушения. На втором этапе происходит зачистка поверхности резания, которая характеризуется отделением мелких элементов по той же схеме. На ряде участков поверхности резания этот этап отсутствует вследствие развития основной трещины ниже поверхности резания.

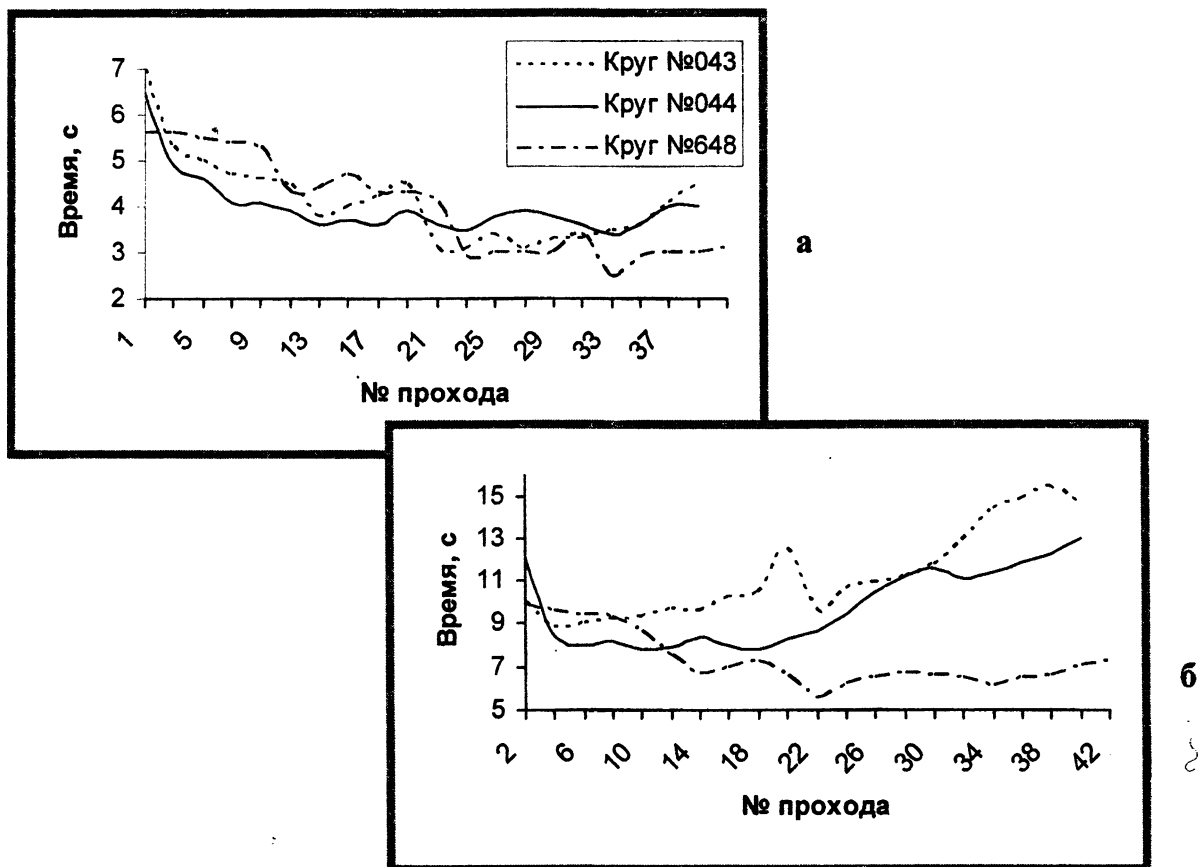


Рисунок 3 - Зависимость времени шлифования от количества проходов (этап 1): а) нечетные проходы; б) четные проходы

Повышенная хрупкость стекол и других хрупких неметаллических материалов характеризуется большой разностью пределов прочности при растяжении и сжатии ($\sigma_{\text{в}}/\sigma_{\text{сж}} \approx 0,04 - 0,05$). В то же время указанные материалы обладают практически идеальной упругостью при значении $\sigma_{\text{сж}}$, достигающем 2450 МПа. Аналогичным образом может быть охарактеризована также оксидная керамика ($\sigma_{\text{в}}/\sigma_{\text{сж}} \approx 0,08$), лейкосапфир ($\sigma_{\text{в}}/\sigma_{\text{сж}} \approx 0,035$). При двухосном сжатии стекол и ситаллов, несмотря на существенное различие в их физическом строении, присущее аморфным и поликристаллическим телам, соблюдается линейная зависимость между напряжениями и деформациями вплоть до разрушения, а значения деформаций подчиняются обобщенному закону Гука. При деформировании неметаллических тел, по данным [8], развиваются два конкурирующих процесса - микроскопическое разрушение и упрочнение структуры.

В процессе абразивной обработки стекла при микроскопическом разрушении его поверхностного слоя вершинами абразивных зерен под ними возникают области напряжения сжатия $\sigma_{\text{сж}}$, а ниже - растяжения $\sigma_{\text{в}}$ [9]. При $\sigma_{\text{сж}} = 1000 - 2000$ МПа возникает только упругая деформация. Когда значение $\sigma_{\text{в}}$ под острием зерна достигает предела текучести стекла $\sigma_{\text{т}}$, в макрообластях более 100 мкм имеет место хрупкое разрушение с одновременным проявлением в микрообластях пластических явлений. Таким образом, проникающее действие твердого острого зерна вызывает пластическую деформацию, а внутренние

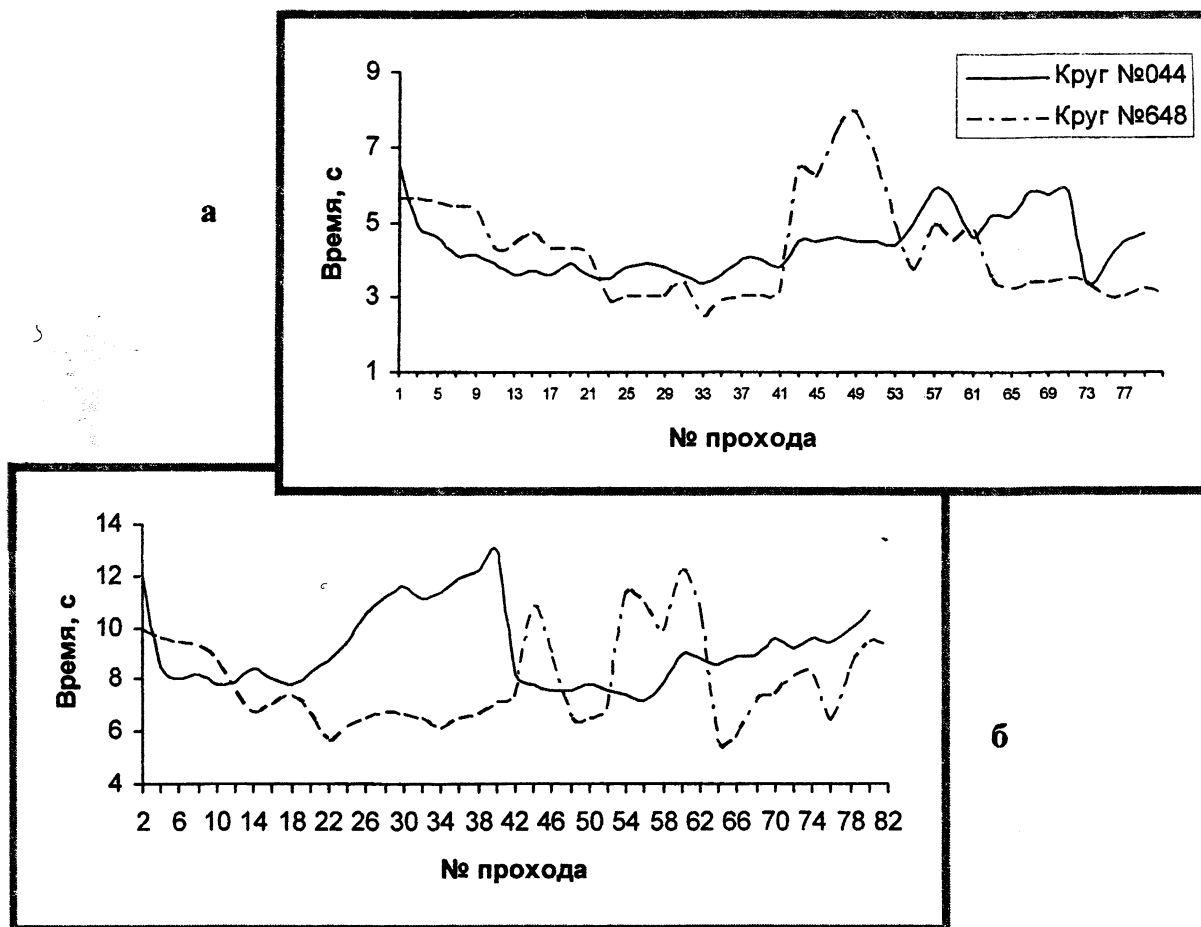


Рисунок 4 - Зависимость времени шлифования от количества проходов (этап 2):
а) нечетные проходы; б) четные проходы

напряжения растяжения являются причиной деструкционных явлений. При $\sigma_{сж} = 5000 - 6000$ МПа возникают вязкое течение стекла и пластическая деформация в областях менее 100 мкм. Хрупкое разрушение под вершинами зерен определяет технологическую эффективность снятия припуска при шлифовании стекла, в то время как микродеформации являются лишь сопутствующими.

Таблица 2. Эксплуатационные характеристики кругов

№ круга	$q, \text{ мг/см}^3$		$Q, \text{ см}^3/\text{мин}$	
	Этап 1	Этап 2	Этап 1	Этап 2
648	0,285	0,064	18,9	18,1
044	0,306	0,029	16,3	17,0
043	0,346	-	16,4	-

Полученные на двух этапах данные эксплуатационных характеристик представлены в табл. 2, а данные по времени шлифования на рис. 3 и 4.

На первом этапе у всех кругов удельный расход алмазов превышает уровень установленный в нормативных документах. Наибольший расход оказался у круга № 043, изготовленного на мягкой связке. Производительность шлифования кругов превышает рекомендуемый уровень: для кругов № 043 – 044 практически одинакова и несколько выше для круга № 648. Время шлифования при нечетных проходах для всех кругов имеет тенденцию к снижению (рис. 3, а). На данном этапе происходит интенсивное обнажение новых алмазных зерен и разрушение уже работающих. Наличие большого числа активных режущих кромок способствует более легкому и быстрому удалению материала.

При выполнении четных проходов, когда объем удаляемого материала и площадь контакта круга и обрабатываемого образца больше, время шлифования увеличивается в 2 – 3 раза. Кривые времени для кругов № 043 – 044 возрастают. Для круга № 648 наблюдается незначительное снижение времени шлифования. Данные различия в работе кругов объяснить трудно, так как производители испытываемого инструмента не раскрывают особенности и уровень модифицирования стандартной связки М2-01 в представленном инструменте. Наличие модификаторов изменяет уровень сил резания и трения, оказывает влияние на интенсивность изнашивания указанных алмазных кругов.

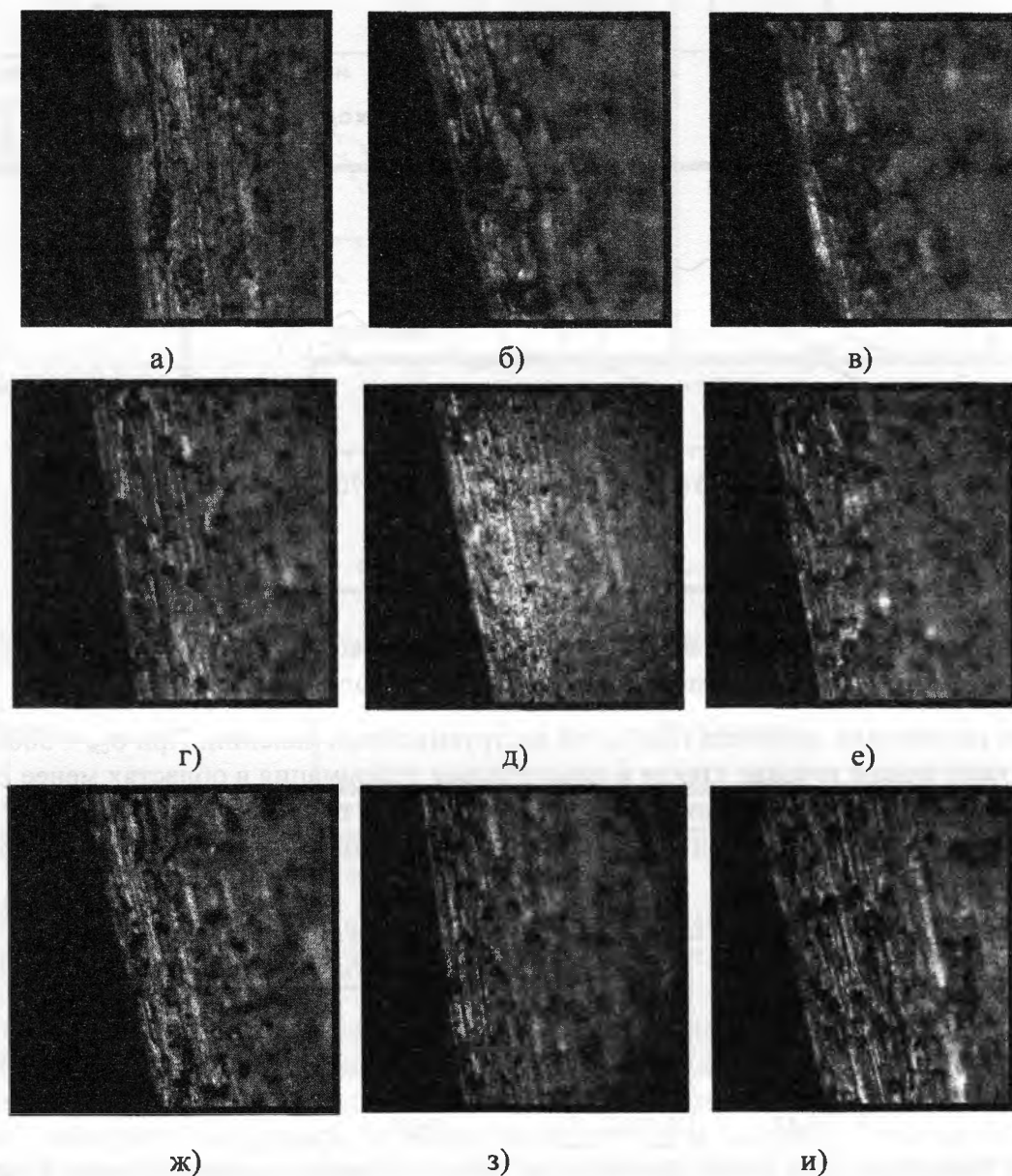


Рисунок 5 - Характер и морфология износа алмазных кругов при обработке хрусталя : круг № 043 (а, б, в); круг № 044 (г, д, е); круг № 648 (ж, з, и)

Дальнейшим испытаниям подвергались круги № 044 и 648. Производительность данных кругов осталась практически на прежнем уровне. Удельный расход алмазов снизился для круга № 648 приблизительно в 4 раза, для круга № 044 – в 10 раз. Это свидетельствует о наличии периода приработки с повышенным расходом алмазов. Волнообразный характер графиков (рис. 4), построенных с учетом данных первого этапа, указывает на наличие эффекта самозатачивания для данных кругов. Особенно отчетливо это прослеживается для круга № 044 (рис. 4б).

На рис. 5 представлены картины изношенных рабочих поверхностей алмазных испытанных кругов, не достигших критического износа (на уровне 60–70% периода стойкости). Во всех случаях изнашивание испытываемых кругов происходило наиболее интенсивно по вершине ввиду максимальной нагрузки и наличия минимального объема связки, удерживающей зерно. Вдоль вершины круга располагаются дорожки трения, имеющие как кольцевой вид, так и вид отдельных спиралей с малым закруглением. Короткие спиральные канавки вызываются прокатыванием мало разрушенных алмазных зерен со шламом в зоне резания. Также характерно наличие площадок с вырванными алмазными зернами.

Заключение. В результате исследований установлено, что износ профиля круга происходит неравномерно. Для повышения износостойкости кругов целесообразно использовать многослойные круги, в которых упрочнены наиболее нагруженные участки круга. Это позволит значительно уменьшить искажение профиля круга в процессе эксплуатации.

Проведенные испытания алмазных кругов различных производителей позволили определить инструмент, позволяющий достичь наилучших эксплуатационных показателей при обработке стекла (круг производства РАУП Гомельское ПО «Кристалл»).

ЛИТЕРАТУРА

1. Перерозин М.А. Справочник по алмазной обработке стекла. М.: Машиностроение, 1987. – 224 с.
2. Newton I., Opticks, 1666, from Holland, L., The Properties of Glass Surfaces, Chapman and Hall, London, 1964, p. 16.
3. Hooke R., Micrographia, 1665, from Holland L., The Properties of Glass Surfaces, Chapman and Hall, London, 1964, p. 16.
4. Fielden J. H., Rubenstein C., «The Grinding of Glass by a Fixed Abrasive», Glass Technology, Vol. 10, No. 3, 1969, p. 73.
5. Vaidyanathan S., Finnie L., «Grinding of Brittle Solids», New Developments in Grinding, Proceedings of the International Grinding Conference, Carnegie Press, 1972, p. 813.
6. Подураев В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов. Учеб. Пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1974. – 587 с.
7. Pahlitzsch E., «Recent Results of Research into the Sawing of Glass», Proceedings of the Industrial Diamond Conference, Oxford, England, 1966, p. 221.
8. Литов Ю. Н. Кинетика разрушения и упрочнения деформируемых твердых тел. – Докл. АН УССР, 1979, 245, №4, с. 809 – 811.
9. Minář S. Základní poznatky určující směry řešení, intenzifikace presheho abrábení optického skla. – Jemna mech. A opt. 1974, N10/12, S. 280 – 283, 311 – 316, 340 – 343.

УДК 621.762.

Дудяк А.И., Сахнович Т.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖУЩИХ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ЭЛЬБОРА С ЦЕЛЬЮ ОПТИМИЗАЦИИ ЕГО ФАЗОВОГО СОСТАВА

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

В машиностроении получили широкое применение поликристаллические инструментальные материалы на основе эльбора для резания высокотвердых сплавов и закаленных сталей. Отличаются друг от друга условиями получения, фазовому составу, свойствами и областями их применения [1]. По этим признакам их можно разделить на две группы. Первая из них представляет поликристаллы, полученные путем прямого полиморфного превращения гексагонального нитрида бора (BN) в кубическую модификацию (эльбор). Полиморфные

превращения протекают при давлениях выше 7,0 ГПа и температурах около 2200°C, что обуславливает сравнительно малые размеры заготовок диаметром 4÷6 мм и высотой 4÷5 мм [2]. Ко второй группе можно отнести поликристаллические материалы, получаемые спеканием малых фракций порошков эльбора со связующим материалом. Материалы этой группы получили название композиционных. Их можно получать в более широком диапазоне давлений 4,0÷8,0 ГПа и температур 1600÷2000°C.

В проводимых исследованиях использовали метод спекания мелких фракций порошков эльбора со связующим материалом, который представляет собой смесь порошков состава 35 масс.% ZeB_2 и 65масс.%Cr. Размеры зерен связующего отбирались величиной менее 20 мкм, а зерновой состав эльбора находился в пределах 3÷10 мкм. Спекание композиционных материалов производили при давлении 7,7 ГПа и температуре 1800°C в течение 15 секунд. Для сравнительных испытаний использовали поликристаллический материал известный под торговой маркой «Эльбор РМ», который получали при давлении 7,7 ГПа и температуре 2200°C в течение 15 секунд.

Режущие свойства определяем по износу режущей кромки поликристаллов при скорости резания 160 м/мин с продольной подачей 0,075 мм/об и при глубине резания 0,5 мм в течение одной минуты.

Физико-механические и режущие свойства исследуемых композиционных материалов и эльбора РМ сведены в таблицу.

Содержание связующего материала, масс.%	10	20	30	40	эльбор РМ
износ поверхности (h_3), мм	0,085	0,06	0,07	0,075	0,06
Предел прочности при сжатии, МПа	2050	2320	2410	2490	4000
Модуль упругости, МПа	$55 \cdot 10^5$	$70 \cdot 10^5$	$77 \cdot 10^5$	$68 \cdot 10^5$	$90 \cdot 10^5$

Исследования показывают, что спекание композиционных материалов при давлении 7,7 ГПа и температуре 1800°C позволяет получить материалы с высокими физико-механическими и режущими свойствами в широком интервале концентраций связующего материала. Во всех случаях износ режущего инструмента, оснащенного полученными композиционными материалами, был ниже критического, который составляет 0,12 мм. Композиционные материалы этих составов по своим режущим свойствам практически не уступают эльбору РМ. Получение поликристаллов из эльбора РМ требует более высоких температурных режимов, что ведет к заметному снижению стойкости агрегатов высокого давления и, как следствие, к увеличению себестоимости эльбора РМ.

Результаты исследований прочностных, упругих и режущих свойств композиционных инструментальных материалов на основе эльбора и связующего системы $\text{ZeB}_2 - \text{Cr}$ показывают, что наиболее оптимальное содержание связующего должно находиться в пределах 20-30 масс.%. Добавление к микропорошкам эльбора связующего материала системы $\text{ZeB}_2 - \text{Cr}$ позволяет за счет реакционного взаимодействия между исходными компонентами шахты снизить температуру спекания.

Наличие реакционного взаимодействия между компонентами шахты устанавливалось исследованием фазового состава спеченного композиционного материала. Фазовый анализ проводили с использованием рентгеновского дифрактометра «Дрон-3,0». В результате проведенного анализа был установлен состав материала, состоящий из эльбора, ZeB_2 , CrB_2 , Cr_2N . Отсутствие хрома в чистом виде указывает на реакционное взаимодействие между компонентами шахты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лысанов В.С. Эльбор в машиностроении. – Ленинград: Машиностроение, 1978. – 280с.
2. Францевич И.Н. Сверхтвердые материалы. – Киев: Наукова думка, 1980. – 296с.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОНСТРУКЦИИ МЕТЧИКА НА ОТКЛОНЕНИЯ ПОЛОВИНЫ УГЛА ПРОФИЛЯ РЕЗЬБЫ В ЧУГУНЕ

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

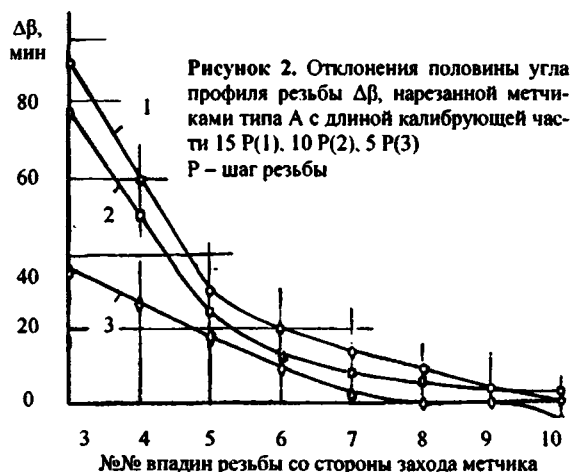
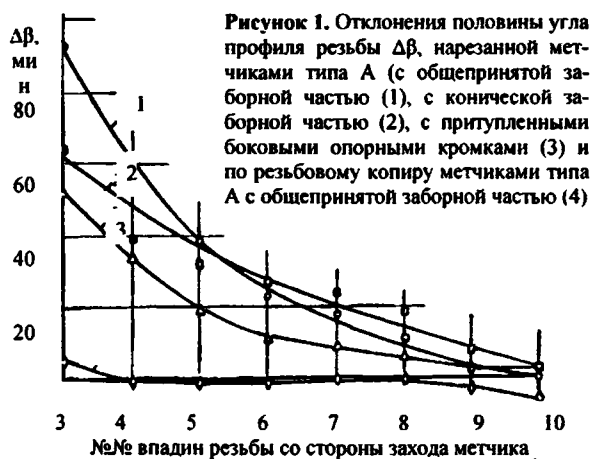
Свыше 60% деталей машин имеют резьбы, от точности параметров которых, главным образом от точности шага и половины угла профиля, в сильной степени зависит прочность резьбовых соединений [1]. Поэтому повышение точности резьбы по указанным параметрам актуально, но для этого надо знать значения погрешностей и причины их возникновения.

Трудности решения этой задачи состоят прежде всего в том, что нет средств и методов непосредственного контроля шага и половины угла профиля внутренних резьб малого диаметра. Необходимо искать другие методы оценки точности.

Несомненно, что погрешности резьбы возникают от нарушения закона винтового движения метчика в процессе его работы. Серия экспериментов, выполненных в Белорусском национальном техническом университете, позволила установить, что нарушение этого закона происходит от воздействия на метчик осевых и радиальных сил резания, а также внешних сил. В результате оказалось возможным четко представить схему формообразования резьбы на базе которой разработать методику оценки отклонений шага [2] и половины угла профиля [3] по результатам измерения специальным прибором [4] собственно среднего диаметра резьбы на каждом витке.

Вероятно, что силовой фактор по-разному сказывается на размерах резьбы, нарезанной метчиками с разными значениями параметров его конструкции. Изучение причин и степени их влияния необходимо для разработки рекомендаций по повышению точности нарезаемых резьб за счет оптимизации конструкции метчика. С этой целью были выполнены эксперименты по нарезанию резьбы М16 методом самозатягивания на вертикально-сверлильном станке с тщательно уравновешенным шпинделем и стабилизацией усилия врезания. Скорость резания составляла 10 м/мин. В качестве смазывающе-охлаждающей жидкости использовали керосин поливом с расходом 10 л/мин.

Метчики-четырёхперовые, двух типов: тип А – затылованы по профилю на всей ширине пера; тип Б – затылованы по профилю на 2/3 ширины пера. Исходные параметры метчиков: длина калибрующей части 30 мм; ширина пера 4,4 мм; передний угол $\gamma = 10^\circ$; задний угол $\alpha = 5^\circ$; угол заборной (режущей) части $\varphi = 14^\circ 50'$; обратная конусность по наружному и среднему диаметрам резьбы $\Delta d = 0,001$; величина затылования по профилю на угловом шаге перьев $K_1 = 0,135$ мм для метчиков типа А и 0,4 мм для метчиков типа Б.



Образцы для испытаний – втулки из чугуна Сч18 твердостью НВ 1800 мПа. Длина образца – 25 мм, диаметр – 40 мм. Диаметр отверстия под резьбу – $14^{+0,05}$ мм.

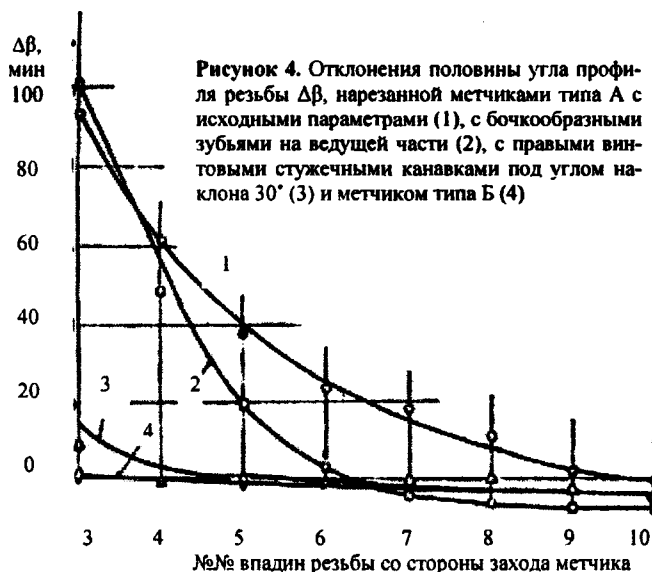
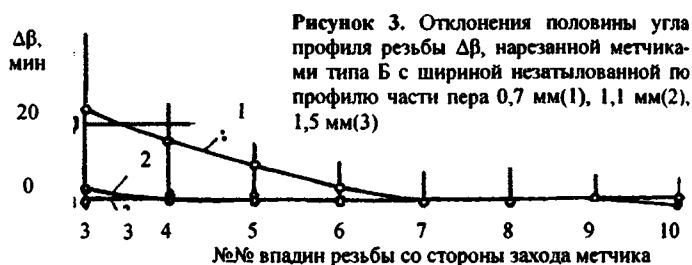
Исследования выполнялись методом однофакторного эксперимента, изучалось влияние каждого параметра отдельно при сохранении постоянными остальных, равных исходным. Поэтому с целью повышения разрешающей способности эксперимента, уменьшения «шумовых» эффектов от влияния неучтенных факторов, условия эксперимента поддерживались с максимально достижимой точностью. Так, метчики выполнялись с точностью резьбовых калибров, отклонения геометрических параметров не превышали $\pm 10'$, а радиальное биение заборной части и несоосность осей нарезаемых отверстий и оси вращения шпинделя станка – 0,01 мм. Положение основания заборного конуса метчика относительно первого полнопрофильного зуба его резьбы выдерживалось с точностью до 0,1 мм по оси метчика. Крепились метчики в плавающем патроне, а при нарезании резьбы по резьбовому копиру, обеспечивающему осевую подачу метчика, строго соответствующую шагу резьбы за каждый оборот метчика – в жестком патроне. При этом смещение оси метчика с оси вращения шпинделя станка не превышало 0,005 мм

Эксперименты не выявили влияния на отклонения половины угла профиля резьбы длины калибрующей части метчиков типа Б и ширины пера метчиков типа А. Влияние остальных исследованных параметров показано на рисунках 1...4.

Выявленные закономерности объясняются влиянием осевых сил резания и внешних осевых – сил перемещения шпинделя станка. Эти силы направлены против осевой подачи метчика и вытягивают (вытягивают) метчик из нарезаемого отверстия. Боковые режущие кромки резьбы метчика, воспринимающие эти силы (опорные кромки), подрезают резьбу, снимают стружку с уже сформированных сторон витков нарезаемой резьбы, расширяя впадины резьбы. В своем движении метчик постоянно отстает по шагу. За каждый оборот перемещается на величину, меньшую шага. В результате на опорных сторонах резьбы половина угла профиля равна половине угла профиля резьбы метчика, а на противоположных – больше, так как впадина резьбы расширяется от основания к вершине постепенно каждым режущим зубом метчика. Чем больше удельные осевые силы (осевые силы, отнесенные к единице длины одновременно режущих боковых опорных кромок метчика) и выше режущая способность опорных кромок, тем больше подрезание резьбы, больше отставание метчика по шагу, больше отклонения половины угла профиля нарезаемой резьбы.

По мере захода метчика в нарезаемое отверстие увеличивается число одновременно режущих опорных кромок метчика. Поэтому уменьшаются удельные осевые силы, что приводит к уменьшению отклонений половины угла профиля нарезаемой резьбы от первого к последнему витку со стороны захода метчика (рис.1...4).

Метчики типа Б практически не чувствительны к воздействию осевых сил, так как опираются на резьбу не боковыми кромками, а незатылованными площадками. Только со-



сращение их ширины от 1,5 до 0,7 мм увеличивает подрезание резьбы и отклонений половины угла профиля (рис.3).

Уменьшение режущей способности боковых опорных кромок резьбы метчика типа А путем их притупления почти в два раза уменьшает погрешности половины угла профиля нарезаемой резьбы (рис.1). У метчиков типа А с бочкообразными зубьями на ведущей части зубья затылованы от середины пера в сторону спинки и передней поверхности) режущей способностью обладают только боковые кромки режущей части метчика и двух-трех калибрующих зубьев. Поэтому дополнительное резание боковыми опорными кромками прекращается после захода в нарезаемое отверстие первого бочкообразного зуба, так как осевые силы воспринимаются не кромками, а выпуклыми площадками боковых опорных сторон бочкообразных зубьев. Ошибки шага, начиная с шестого витка резьбы, практически равны нулю (рис.4).

Уменьшение ошибок половины угла профиля при сокращении длины калибрующей части метчиков типа А – также следствие влияния осевых сил. Когда рабочая часть метчика короче нарезаемой резьбы, то после выхода из впадины резьбы последнюю калибрующего зуба метчика эта впадины и все предыдущие уже полностью сформированы. Подрезание опорных сторон витков резьбы в этих впадинах прекращается, прекращается искажение профиля резьбы, уменьшаются ошибки половины угла профиля по неопорным сторонам (рис.2).

Преобладающее влияние осевых сил на ошибки половины угла профиля подтверждается нарезанием резьбы по копиру. В этом случае осевая сила воспринималась копиром, обеспечивалось точное по шагу осевое перемещение метчика. Отсутствовало подрезание резьбы и появление ошибок профиля (рис.1).

На основании выполненных исследований для повышения точности профиля резьбы, нарезаемой самозатягиванием метчика (единичное и мелкосерийное производство), целесообразно использовать метчики невосприимчивые к воздействию осевых сил:

- а) незатылованные по профилю резьбы или затылованные на 2/3 ширины пера;
- б) с ведущими перьями, имеющими бочкообразные зубья на режущей и калибрующей части, например, у четырехперых метчиков два пера режущие и два ведущие.

В массовом и крупносерийном производстве точную резьбу выгоднее нарезать по резьбовому копиру, которым оснащают резьбонарезной шпиндель станка. При этом обязательно жесткое в осевом направлении закрепление метчика. Такой способ позволяет использовать метчики с параметрами, оптимальными по другим критериям, например, стойкости, технологичности и т.д.

ЛИТЕРАТУРА

1. Якушев А.И. Влияние технологии изготовления и основных параметров резьбы на прочность резьбовых соединений. Оборонгиз, 1956. 2. Шагун В.И., Кудрявцева Л.Т. Неразрушающий способ контроля отклонений шага внутренних резьб. В сб.: Машиностроение. Вып. 10. Мн.: Выш. школа, 1985. – С.50-53. 3. Шагун В.И., Чарторийский А.В. Неразрушающий метод контроля отклонений половины угла профиля внутренних резьб малого диаметра. В сб.: Машиностроение. Вып. ___ а Мн.: 4. Шагун В.И., Фельдштейн Э.И. Прибор для измерения внутренних резьб //Измерительная техника.- 1963,- №3. – С.7–10.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОНСТРУКЦИИ МЕТЧИКА НА ОТКЛОНЕНИЯ ПОЛОВИНЫ УГЛА ПРОФИЛЯ РЕЗЬБЫ В СТАЛИ

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Известно, что метчики предназначены для нарезания резьбы в различных материалах, в основном в стали и чугуне. По конструкции и применению номенклатура метчиков достаточно разнообразна. Требуемая точность во многих случаях высокая. Проблема точности резьбы актуальна и по сей день.

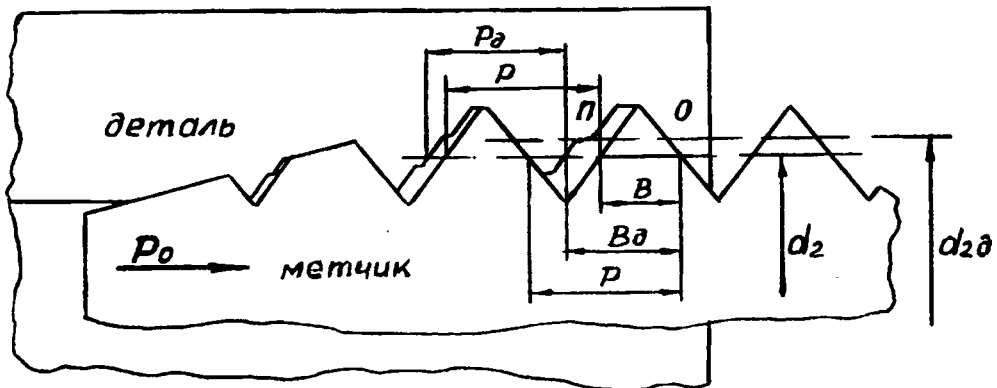


Рисунок 1. Положение метчика в отверстии при нарезании резьбы методом самозатягивания

На точность резьбы влияют различные факторы, о которых пишут во многих специализированных литературных источниках. В частности, на разбивание резьбы, и соответственно, на ухудшение качества резьбового сопряжения, влияют осевые и радиальные силы [1], которые по-разному воздействуют на нарезаемую резьбу в зависимости от конструкции метчика.

В процессе резбобработки на метчик воздействуют осевая сила резания и внешняя осевая сила перемещения шпинделя станка при нарезании резьбы методом самозатягивания. На рис.1 – сила P_0 . Она выталкивает метчик из нарезаемого отверстия. Метчик сопротивляется, опираясь своими боковыми кромками O на уже образованные поверхности резьбы (рис.1). Эти силы достаточно большие и опорные кромки метчика O внедряются в тело уже образованных витков резьбы и снимают с них дополнительную стружку. Противоположные опорные кромки Π метчика отрываются от уже сформированных ими участков профиля, образуя на них ступеньки (рис.1). Впадина нарезаемой резьбы расширяется ($Bd > B$), сред-

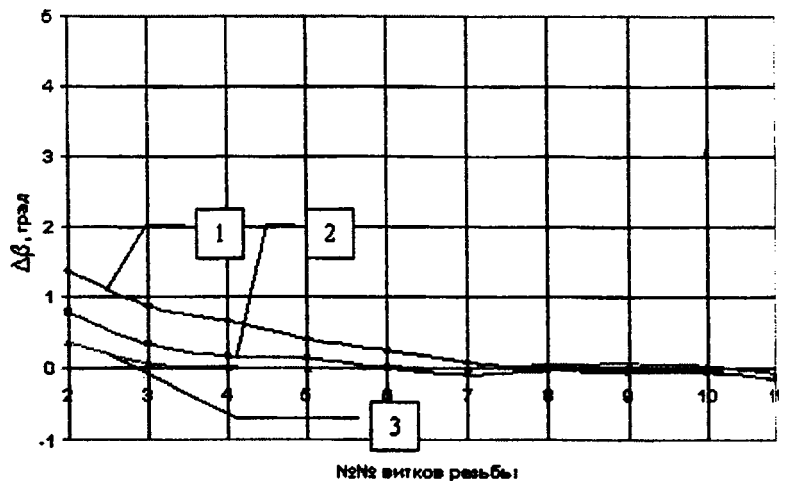


Рисунок 2. Отклонения половины угла профиля резьбы $\Delta\beta$, нарезанной метчиками типа Б методом самозатягивания плавающим патроном с шириной незатянутой части:

1 – 0,7мм, 2 – 1,1мм, 3 – 1,5мм

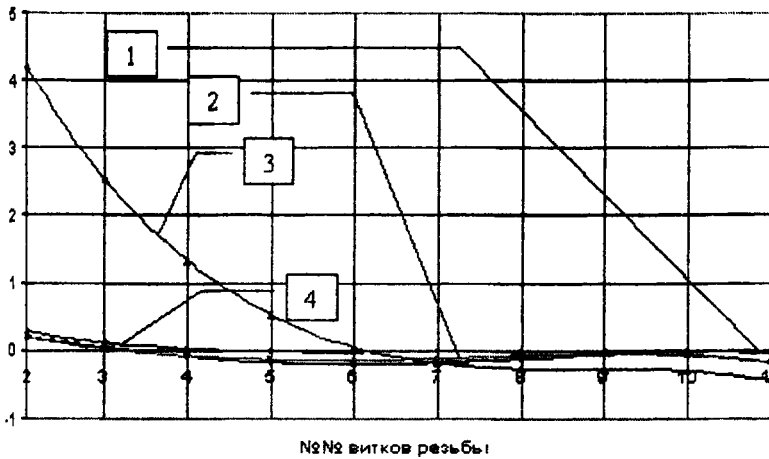


Рисунок 3. Отклонения половины угла профиля резьбы $\Delta\beta$, нарезанной метчиками типа А в жестком патроне (1,2), при этом резьба нарезана по копиру, и методом самозатягивания в плавающем патроне (3,4); с бочкообразными зубьями (1,3) и с правыми винтовыми стержневыми канавками с углом наклона к оси $\phi=30^\circ$ (2,4); кривые 2 и 4 получены с заваленными режущими кромками

ний диаметр резьбы увеличивается ($d_{20} > d_2$), искажается шаг ($P_0 < P$) и половина угла профиля по неопорным сторонам. Наступает так называемое разбивание резьбы. По опорным сторонам шаг и половина угла профиля резьбы соответствуют параметрам метчика по опорным кромкам [2]

При выполнении экспериментальных исследований использовали четырехперые метчики М 16×2 двух типов: тип А — затылованы по профилю

на всей ширине пера; тип Б — затылованы по профилю на 2/3 ширины пера.

Исходные параметры метчиков различны для каждой серии эксперимента. Исследования выполнялись методом однофакторного эксперимента, изучалось влияние каждого параметра метчика отдельно при сохранении постоянными остальных, равных исходным. Поэтому с целью повышения разрешающей способности эксперимента, уменьшения «шумовых» эффектов от влияния неучтенных факторов, условия эксперимента поддерживались с максимально достижимой точностью. Так, метчики выполнялись с точностью резьбовых калибров, отклонения геометрических параметров не превышали $\pm 10'$, а радиальное биение заборной части и несоосность осей нарезаемых отверстий и оси вращения шпинделя станка — 0,01 мм. Положение основания заборного конуса метчика относительно первого полнопрофильного зуба его резьбы выдерживалось с точностью до 0,1 мм по оси метчика. Крепились метчики в плавающем патроне, а при нарезании резьбы по резьбовому копиру, обеспечивающему осевую подачу метчика, строго соответствующую шагу резьбы за каждый оборот метчика, в жестком пат-

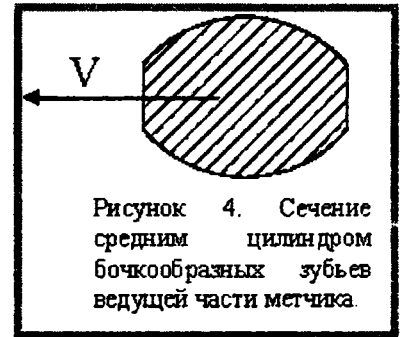


Рисунок 4. Сечение средним цилиндром бочкообразных зубьев ведущей части метчика.

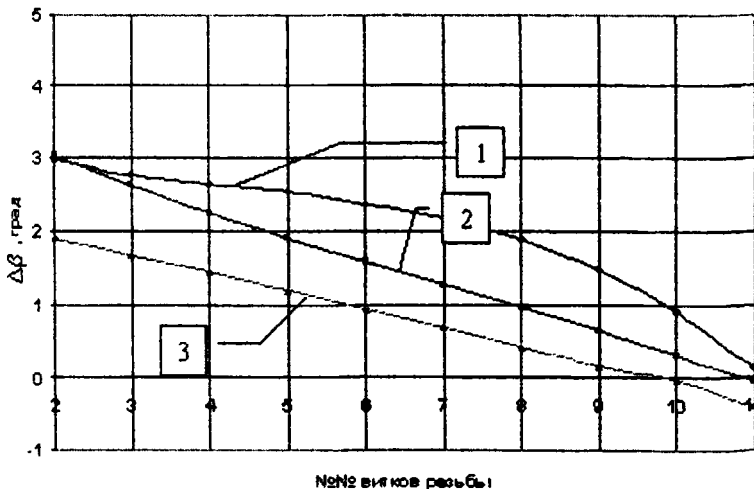


Рисунок 5. Отклонения половины угла профиля резьбы $\Delta\beta$, нарезанной метчиками типа А методом самозатягивания в плавающем патроне с длиной калибрующей части: 1 — 15P, 2 — 10P, 3 — 5P

троне. При этом смещение оси метчика с оси вращения шпинделя станка не превышало 0,005 мм.

ли $\pm 10'$, а радиальное биение заборной части и несоосность осей нарезаемых отверстий и оси вращения шпинделя станка — 0,01 мм. Положение основания заборного конуса метчика относительно первого полнопрофильного зуба его резьбы выдерживалось с точностью до 0,1 мм по оси метчика. Крепились метчики в плавающем патроне, а при нарезании резьбы по резьбовому копиру, обеспечивающему осевую подачу метчика, строго соответствующую шагу резьбы за каждый оборот метчика, в жестком пат-

Было выявлено, что самое большое отклонение половины угла профиля у внутренних резьб возникает при нарезании методом самозатягивания типа А с исходными параметрами: передний угол $\gamma = 10^\circ$; задний угол $\alpha = 5^\circ$; угол заборной (режущей) части $\varphi = 14^\circ 50'$; величина затылования по профилю резьбы – 0,135 мм на вом шаге перьев. Точность параметров метчика изложена выше. Отклонение половины угла профиля достигает $4,5^\circ$ на первых со стороны захода метчика витках нарезанной резьбы (рис.3). Самое маленькое отклонение обеспечивается метчиками после притупления опорных кромок, кроме режущих и четырех калибрующих при нарезании резьбы методом самозатягивания (рис.3).

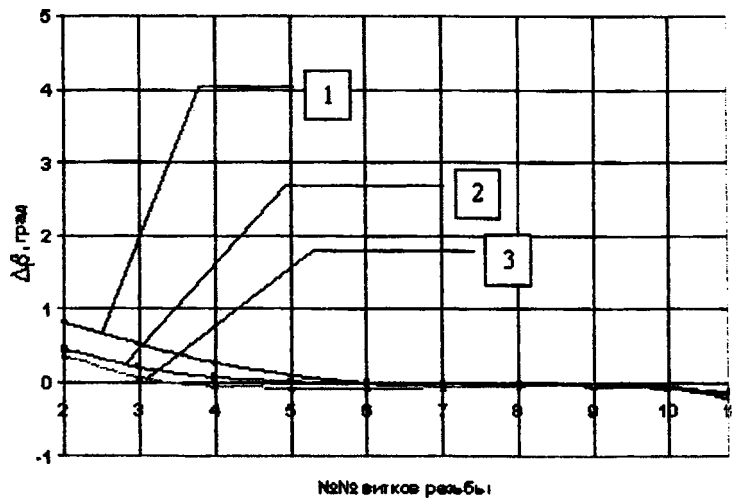


Рисунок 6. Отклонения половины угла профиля резьбы $\Delta\beta$, нарезанной метчиками типа Б методом самозатягивания в жестком патроне с длиной калибрующей части: 1 – 15Р, 2 – 10Р, 3 – 5Р

При нарезании резьбы по резьбовому копиру метчики с острыми и заваленными боковыми опорными режущими кромками обеспечивают одинаковую и самую высокую точность (рис.3). Это еще раз доказывает, что нарезание резьбы с принудительной осевой подачей по резьбовому копиру, воспринимающему осевую силу на себя и исключая ее разбивание резьбы под действием этой силы, является самым точным методом нарезания резьбы.

Чем больше удельные осевые силы (осевые силы, отнесенные к единице длины одновременно режущих боковых опорных кромок метчика) и выше режущая способность опорных кромок, тем больше подрезание резьбы, больше отставание метчика по шагу, больше отклонения половины угла профиля резьбы, нарезаемой методом самозатягивания.

По мере захода метчика в нарезаемое отверстие увеличивается число одновременно режущих опорных кромок метчика. Поэтому уменьшаются удельные осевые силы, что приводит к уменьшению отклонений половины угла профиля нарезаемой резьбы от первого к последнему витку со стороны захода метчика.

Метчики типа Б практически не чувствительны к воздействию осевых сил, так как опираются на резьбу не боковыми кромками, а незатылованными площадками. Только сокращение их ширины от 1,5 до 0,7 мм увеличивает подрезание резьбы и отклонений половины угла профиля (рис.2).

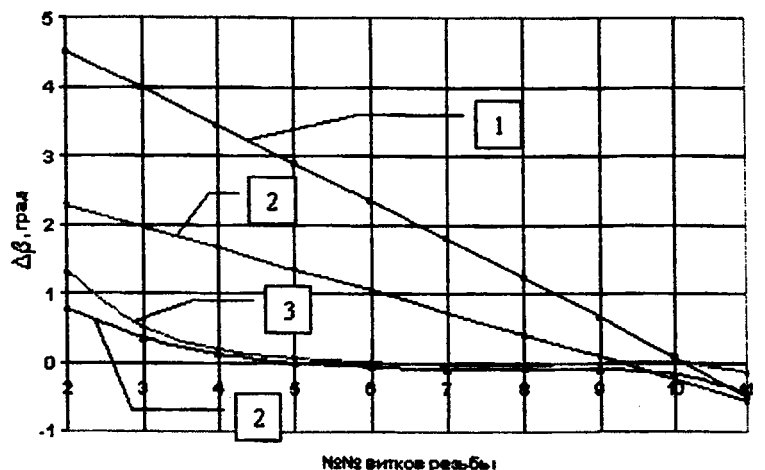


Рисунок 7. Отклонения половины угла профиля резьбы $\Delta\beta$, нарезанной метчиками типа А (1,2) и типа Б (3,4) методом самозатягивания в плавающем патроне с исходной формой заборной части (1,3) и конической (2,4)

Уменьшение режущей способности боковых опорных кромок резьбы метчика типа А путем их притупления почти в два раза уменьшает погрешности половины угла профиля нарезаемой резьбы (рис.3). У метчиков типа А с бочкообразными зубьями на ведущей части (зубья затылованы от середины пера в сторону спинки и передней поверхности) режущей способностью обладают только боковые кромки режущей части метчика и двух-трех калиб-

рующих витков резьбы. Поэтому дополнительное резание боковыми опорными кромками прекращается после захода в нарезаемое отверстие первого бочкообразного зуба, так как осевые силы воспринимаются не кромками, а выпуклыми площадками боковых опорных сторон бочкообразных зубьев (рис.4). Ошибки половины угла профиля, начиная с шестого витка резьбы, практически равны нулю (рис.3).

Уменьшение ошибок половины угла профиля при сокращении длины калибрующей части метчиков типа А (рис.5) – также следствие влияния осевых сил. Когда рабочая часть метчика короче нарезаемой резьбы, то после выхода из впадины резьбы последнюю калибрующего зуба метчика эта впадины и все предыдущие уже полностью сформированы. Подрезание опорных сторон витков резьбы в этих впадинах прекращается, прекращается искажение профиля резьбы, уменьшаются ошибки половины угла профиля по неопорным сторонам. В качестве сравнения приведены ошибки половины угла профиля при сокращении длины калибрующей части метчика типа Б (рис.6).

При изменении формы заборной части метчика типа А, а также и типа Б можно уменьшить отклонение половины угла профиля (рис.7), т.к. коническая резьба на заборной части метчика, в отличие от исходной, обеспечивает утолщение каждого последующего режущего зуба. Если угол конуса выбран правильно, то все зубья заборной части метчика режут обеими боковыми кромками, уменьшая разбивание.

Преобладающее влияние осевых сил на ошибки половины угла профиля подтверждается нарезанием резьбы по копиру. В этом случае осевая сила воспринималась копиром, обеспечивалось точное по шагу осевое перемещение метчика. Отсутствовало подрезание резьбы и появление ошибок профиля (рис.3, кривые 1 и 2).

На современных предприятиях резьба нарезается с принудительной подачей инструмента на станках с ЧПУ, и при правильном выборе конструкции метчика можно повысить точность нарезаемых резьб.

ЛИТЕРАТУРА

1.Шагун В.И. Влияние геометрических и конструктивных параметров машинных метчиков на размеры резьбы, нарезаемой в стали. В сб.: Резьбообразующий инструмент. – М.: НИИМаш, 1968. – с.229 – 241. 2.Шагун В.И., Чарторийский А.В. Неразрушающий метод контроля отклонений половины угла профиля внутренних резьб малого диаметра. В сб.: Машиностроение. Вып 22. – Мн.: «Технопринт», 2006. – С.

Чарторийский А. В.

КОНСТРУКЦИЯ МЕТЧИКА ДЛЯ СКВОЗНЫХ ОТВЕРСТИЙ

*Белорусский национальный технический университет
г. Минск, республика Беларусь*

Резьбы нашли широкое применение в деталях машин и приборов в качестве присоединительных элементов для обеспечения разъемных соединений. Во всех отраслях машино- и приборостроении наиболее широко используются цилиндрические метрические резьбы диаметрами от 1 до 600 мм. Для их изготовления применяют различные резьбообразующие инструменты. Например, для нарезания внутренней резьбы диаметром 2...50 мм часто используют метчики.



Рисунок 1

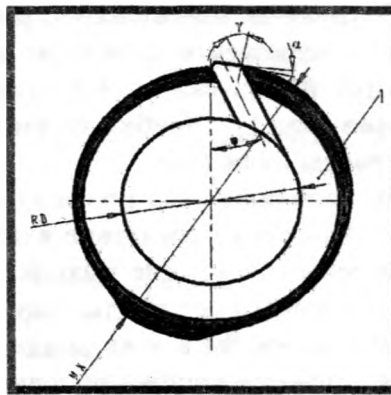


Рисунок 2

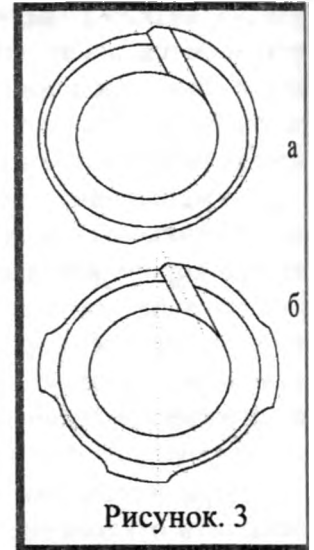


Рисунок 3

По конструкции и применению номенклатура метчиков достаточно разнообразна: машинно-ручные, гаечные, конические, сборные, циальные и др., однако у каждой существуют свои положительные особенности и недостатки. Главным недостатком является невозможность точного нарезания резьбы без специальных дополнительных приспособлений. Этот минус стараются устранить различной заточкой либо усовершенствованием уже существующих метчиков. Например, метчик с передней или задней цилиндрической направляющей. Однако решить эту задачу возможно и иным путем – путем новой конструкции метчика, предложенного ниже (рис.1).

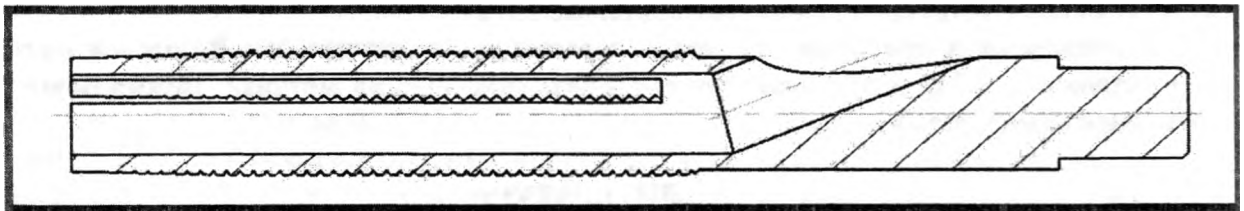


Рисунок 4

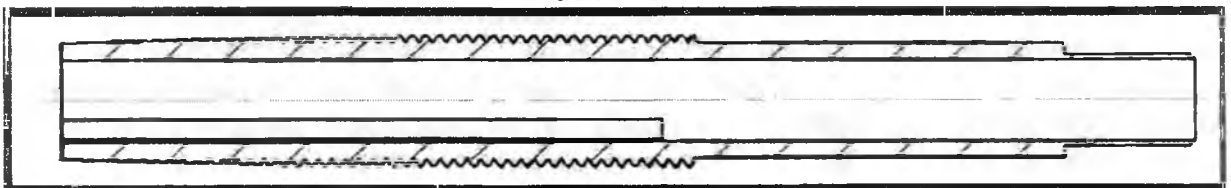


Рисунок 5

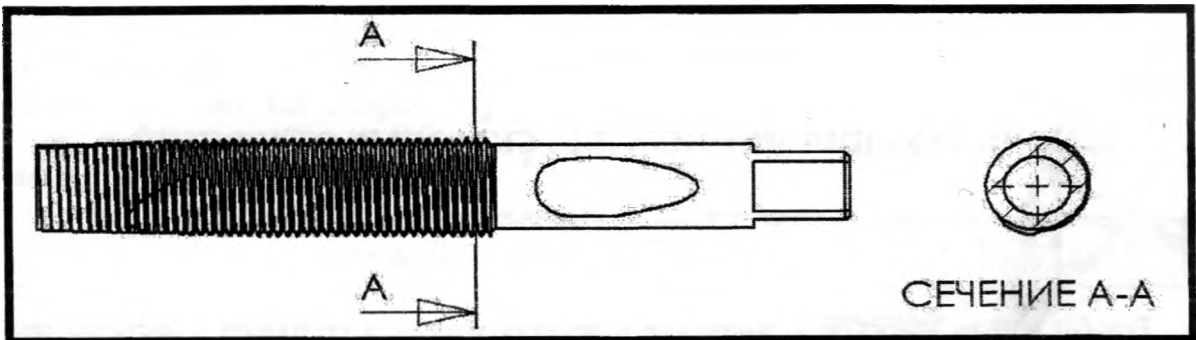


Рисунок 6

Инструмент 1 (рис.2), для нарезания резьбы в сквозных отверстиях диаметров от 16 мм, содержит одно перо. Рабочая часть метчика является своего рода труба с прорезью под углом ψ , где MX – диаметр резьбы, RD – диаметр внутреннего отверстия инструмента. Данное отверстие служит для отвода стружки и имеет боковой выход на хвостовике метчика (рис.4), либо при применении специальной оснастки отверстие в торец хвостовика (рис.5).

Перо метчика имеет затылование с одной опорной спинкой (рис.3,а), либо тремя (рис.3,б), для устойчивого положения инструмента в отверстии, для точного нарезания резьбы.

Хвостовик – стандартный (ГОСТ 9523-67) и устанавливается во все существующие патроны, предназначенные для него, кроме применения метчика с отверстием выходящим в торец хвостовика (рис.5).

При работе инструмент отводит стружку от резьбы, тем самым не портит ее профиль.

Калибрующие зубья (2-3 последних витка) в сечении не имеют канавок (рис.6) для выхода стружки, тем самым полностью формируют зубья нарезаемой резьбы путем деформации металла.

Технико-экономические преимущества предлагаемой конструкции метчика заключаются в повышенной точности резьбы и производительности, если точность обеспечивается многопроходной нарезкой (комплект метчиков).

УДК 621.941.025

Барановский В.В., Якимович А.М.

РЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ БЕЗОТХОДНОГО ПОЛУЧЕНИЯ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЕПЛООБМЕНА РЕЗАНИЕМ

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Сегодня во всех отраслях промышленности, равно как и в машиностроении, остро стоит вопрос экономии тепло- и электроэнергии, уменьшения производственных затрат, энергоемкости и материалоемкости продукции. Это неизбежно подталкивает производителей к переоснащению и модернизации оборудования, поиску оптимальных технологических процессов производства, разработке новых экономичных технологий. Следует иметь в виду, что в погоне за этим качеством производимой продукции не должно ухудшаться.

При рассмотрении существующих методов получения оребрения на рабочих поверхностях теплообменных аппаратов: соединения ребер с трубкой механическим креплением, получение ребер наплавкой жидкого металла или навивкой стальных лент с натягом на исходную трубку, выдавливания из алюминиевых сплавов высокой пластичности, пайки или сварки ребер, замечено, что все эти традиционные методы имеют достаточно длинный технологический процесс. Они требуют значительных затрат при подготовке производства, подвержены электрохимической коррозии в местах контакта оребрения с поверхностью основы. В ходе эксплуатации в условиях вибрационного воздействия в сборных теплообменных аппаратах происходит нарушение контактов, что на треть снижает их теплотехнические свойства уже после 3-5 лет эксплуатации.

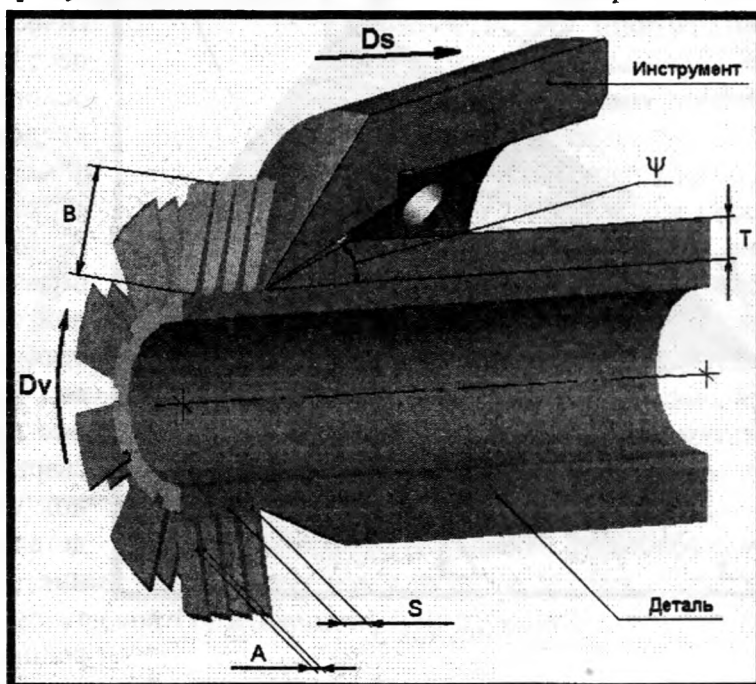


Рисунок 1

На кафедре «Металлорежущие станки и инструменты» БПИ еще двадцать лет назад был предложен и разработан метод механической обработки развитых теплообменных поверхностей, при котором процесс резания происходит, а образующая стружка остается в виде лепестков, прочно прикрепленных к поверхности заготовки теплообменника.

В результате на заготовке-трубе образуются ребра, расположенные по винтовой линии на наружной цилиндрической поверхности с постоянным шагом от 0,03 до 3 мм, шириной канавки от 0,01 до 1,6 мм. После данной обработки эффективная площадь поверхности теплообменника увеличивается в 5..15 раз. Ребра имеют заданные параметры: шаг S , среднюю толщину A , высоту H , средний угол наклона к поверхности заготовки Ψ , глубину среза T (рис. 1), которые обеспечиваются за счет изменения технологических параметров процесса реброобразования и параметров установки инструмента.

Данный метод может быть реализован как на универсальных, так и на специальных токарных станках с применением несложной технологической оснастки и оригинального режущего инструмента, и не требует больших производственных затрат. Является экологически чистым и экономичным, т. к. процесс происходит без отделения стружки от основы, и она не нуждается в утилизации, а представляет собой готовое ребро теплообменного аппарата с лучшими характеристиками теплопередачи.

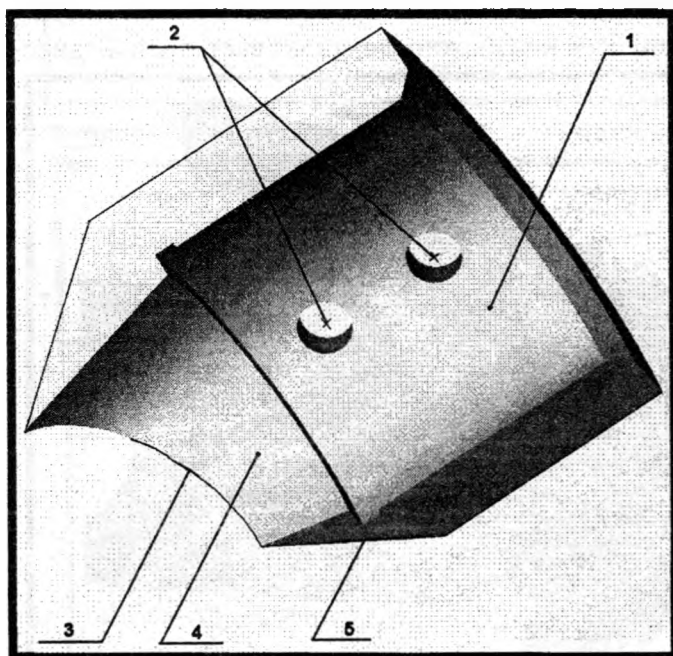


Рисунок 3

Это стало возможно благодаря разработке специальной конструкции режущего инструмента со сложной режущей кромкой. Рабочая часть данного инструмента может быть образована пересечением двух соосных поверхностей: двумя геликоидами с одинаковым шагом винтовой линии, с разным шагом винтовой линии, или конусом и геликоидом.

На рисунке 2 представлена схема формообразования инструмента пересечением двух соосных поверхностей: передней (2) – геликоида и задней (1) – конуса. Для обеспечения работоспособности такого инструмента необходимо произвести смещение оси режущей кромки относительно заготовки для обеспечения положительных задних углов резания.

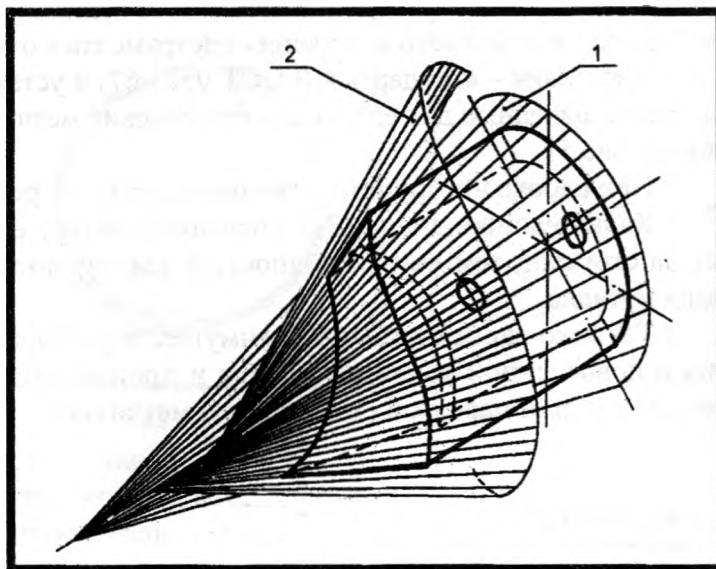


Рисунок 2

Технология также может быть использована для образования макрорельефной основы на цилиндрических поверхностях из алюминия или близких по свойствам материалов под последующее нанесение износостойких покрытий, склеивание, сварку, пайку. Для создания макрорельефной основы на поверхностях изношенных деталей под последующее их восстановление. Для создания фильтров из тонких металлических или полимерных труб с внутренними продольными канавками.

Инструмент изготавливается из инструментальной стали сортового проката, наиболее экономичным является использование заготовки трубчатого профиля. Инструмент (Рис. 3) имеет вид сегмента трубчатой формы с базовой цилиндрической частью 1, крепежными отверстиями 2 и режущей частью 3, режущая кромка которой получена пересечением задней 4 и передней 5 рабочими поверхностями. В данном варианте инструмента задняя поверхность - конус, а передняя поверхность - геликоид [3].

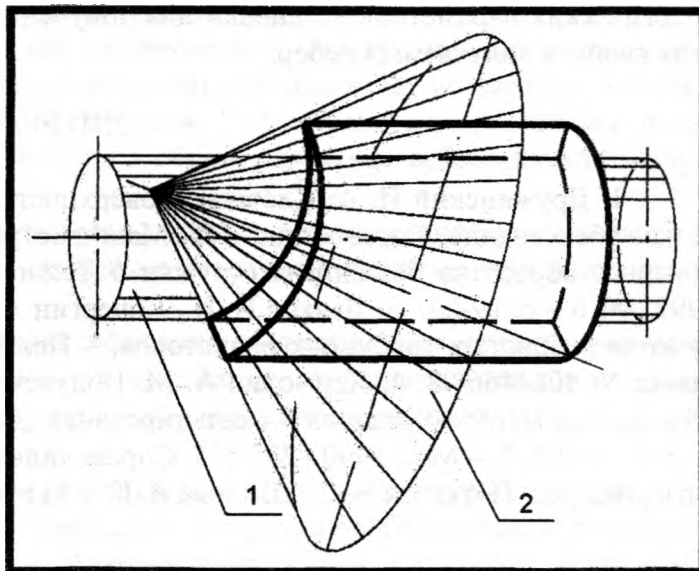


Рисунок 4

Изготовление ребристых трубчатых радиаторов на токарном станке заключается в получении ребер на вращающейся трубе с выступами путем подрезания и отгиба тонких слоев металла поступательно движущимся вдоль оси трубы инструментом. Также возможен вариант, при котором труба-заготовка неподвижна, а инструмент одновременно совершает вращательное и поступательное движение вдоль её.

При этом можно использовать сразу несколько резцов, расположенных диаметрально на вращающейся оправке, что значительно увеличивает производительность процесса. Такой вариант реброобразования на круглых теплообменниках получил название «вихревое резание».

Однако недостатком такого инструмента является сложность изготовления и, что наиболее существенно, невозможность его многократной переточки без изменения параметров исходного профиля режущей кромки.

В настоящее время на кафедре «Металлорежущие станки и инструменты» разработана конструкция инструмента лишенного основного недостатка предыдущей конструкции: обладающего возможностью многократной переточки с сохранением параметров режущей части.

В настоящее время на кафедре «Металлорежущие станки и инструменты» разработана конструкция инструмента лишенного основного недостатка предыдущей конструкции: обладающего возможностью многократной переточки с сохранением параметров режущей части.

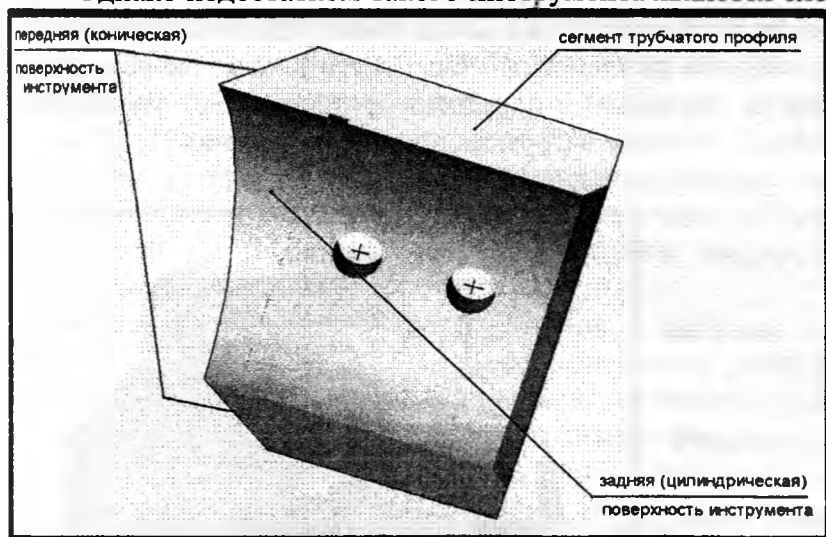


Рисунок 5

Схема формообразования такого инструмента (рис. 4) представляет собой пересечение двух несоосных поверхностей: внутренней или задней – цилиндрической (1) и внешней или передней – конической (2).

В новом варианте исполнения (рис. 5) возможна многократная переточка инструмента по передней конической поверхности.

Применение этой предложенной конструкции стало возможно благодаря новой схеме его установки относительно оси заготовки. Ось формообразующей цилиндрической поверхности инструмента находится под углом к оси заготовки, таким образом убирается затирание по задней поверхности.

На данный момент ведутся работы в области математического моделирования процесса резания с целью усовершенствования геометрических параметров инструмента и тех-

нологических параметров установки для получения наиболее благоприятных теплотехнических свойств получаемых ребер.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дружинский И. А. Сложные поверхности: Математическое описание и технологическое обеспечение: Справочник. – Л.: Машиностроение, 1985. – 263 с. 2. Зубков Н. Н. и др. Токарная обработка без снятия стружки // Технологическое оборудование и материалы. – 1997. -№ 6 – с. 19-26. 3. Дьяков И. И., Кочергин А. И., Якимович А. М. Инструмент для получения ребристых трубчатых радиаторов. – Положительное решение от 21. 01. 1987 г. по заявке № 4084466/08. 4. Якимович А. М. Получение круглых оребренных элементов теплообменников методом резания – скальпирования: Диссертация на соискание уч. степени к. т. н.: 621. 1. 002. 5. – Мн., 1990 –238 с. 5. Справочник по теплообменникам. В 2-х т., т. 1 / Пер. с англ., под ред. Петухова Б. С., Шинова В. К. – М.: Энергоатомиздат, 1987. –560 с.

УДК 621.9

Ажар А.В.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ СБОРНЫХ ТОРЦОВЫХ ФРЕЗ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

До настоящего времени режущий инструмент независимо от степени его конструктивной и функциональной сложности рассматривался с точки зрения свойств и показателей надежности, как одно целое без разбиения на элементы. Чаще всего в качестве условия выхода из строя принимались внезапные (поломки) и постепенные (износные) отказы режущей части, как наиболее подверженной внешним нагрузкам в процессе резания [1, 2].

В настоящее время широкое распространение получили многолезвийные инструменты, как более производительные, но в тоже время более сложные по конструкции и стоимости эксплуатации.

Еще одним направлением развития инструментального хозяйства является построение инструментов на базе модулей, состоящих из унифицированных элементов. Данный подход позволяет проектировать сложные высокопроизводительные специальные инструменты с минимальными затратами. При этом одни и те же элементы могут быть использованы в различных конструкциях инструментов. Модульный подход позволяет сократить расходы на восстановление инструмента после отказа и упростить систему его обслуживания.

В свою очередь торцовые фрезы – это высокопроизводительные многолезвийные инструменты, применяемые при обработке плоских поверхностей (рис. 1). Современные конструкции этих инструментов имеют блочно-модульную структуру с ре-

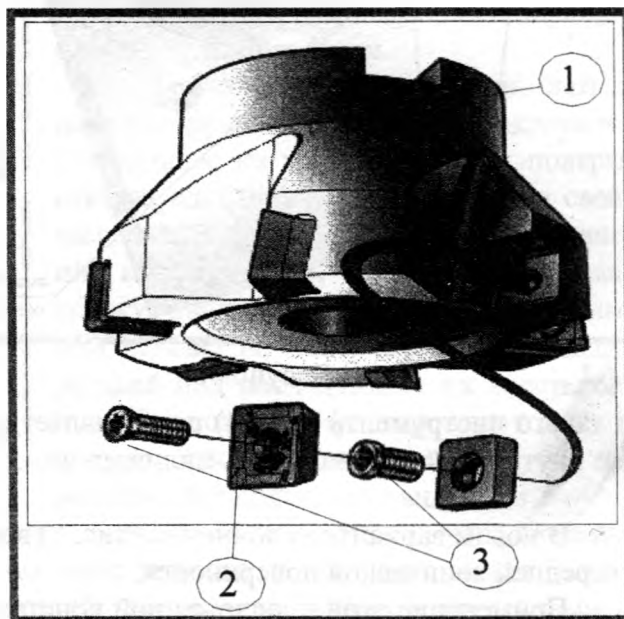


Рисунок 1 – Торцовая фреза, как сложная многоэлементная техническая система:
1 – корпус; 2 – режущий элемент (пластина); 3 – механизм крепления (винт)

жущей частью в виде сменных неперетачиваемых пластин [3].

С усложнением конструкций режущих инструментов, эксплуатируемых в условиях автоматизированных производств машиностроительных предприятий, возрастают требования к обеспечению и прогнозированию их надежности. Это связано с возрастающей долей расходов на сам инструмент и его эксплуатацию в общей структуре себестоимости выпускаемой продукции

Таким образом, с точки зрения надежности сборные режущие инструменты необходимо рассматривать как многоэлементные системы с различной степенью их функциональной зависимости.

В работах [4, 5] приведена общая классификация существующих структурных схем надежности технических систем и методов резервирования на основе, которой торцовые фрезы можно представить в виде структурной модели надежности параллельно-последовательной типа с резервированием.

В большинство конструкций торцовых фрез присутствует структурное резервирование. Часто это вызвано не преднамеренным введением резерва, а особенностью конструкций инструментов и режимами их эксплуатации. Поэтому очень важным является задаться минимально необходимыми условиями функционирования этих инструментов. Одним из таких условий может стать нагрузочная способность зуба инструмента, определяемая «ломающей» подачей. Отказы в связи с поломкой режущей части наиболее часто проявляют себя при черновой обработке поверхностей резанием твердосплавными инструментами. При чистовом фрезеровании работу инструмента определяют критерии точности обработки и здесь преобладают отказы, определяемые величиной допустимого износа режущей части.

Временное резервирование тесно переплетается со структурным, т.к. при эксплуатации инструмента увеличение времени обработки напрямую связано с занижением режимов резания и приводит к уменьшению нагрузки на режущую часть.

В пределах функционирования одного режущего элемента добиться нагрузочного резервирования возможно путем увеличения размеров, прочности, износостойкости режущего элемента. По другому, нагрузочного резервирования можно добиться использованием защитных и разгружающих элементов: перераспределение нагрузки за счет рациональных схем резания (групповых); компенсация сил резания (расположение зубьев напротив друг друга); гашение вибраций (расположение зубьев со смещенным шагом и устранение дисбаланса). Нагрузочное резервирование еще в большей степени характерно корпусной (державочной) части инструмента и проявляет себя в запасе прочности, который в несколько раз превышает допустимый при расчете.

Перечисленные виды резервирования могут быть применены либо к инструменту (инструментальной системе) в целом, либо к отдельным элементам системы или к их группам. Таким образом, инструменту присуще общее, отдельное и смешанное резервирование.

Что касается способа включения резерва, то при непрерывной эксплуатации инструмента в пределах периода обработки одной детали допустимо использование только постоянного резервирования за счет структурной избыточности многолезвийного режущего инструмента. Для постоянного резервирования существенно, что в случае отказа основного элемента не требуется специальных устройств, вводящих в действие резервный элемент, а также отсутствует перерыв в работе.

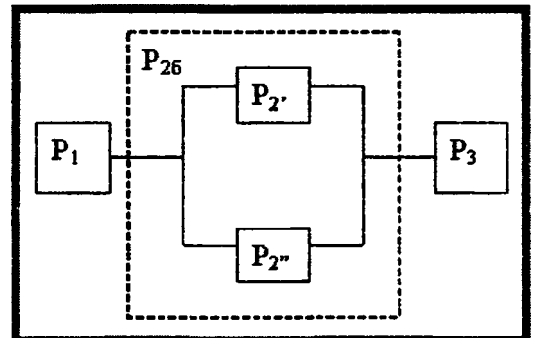


Рисунок 2 – Структурная схема надежности торцовой фрезы с точки зрения безотказности работы:

P1 – вероятность безотказной работы корпуса;

P2 – вероятность безотказной работы режущего элемента – пластины;

P2' – основные пластины,

P2'' – активный резерв;

P3 – вероятность безотказной работы механизма крепления

Скольльзящее резервирование применяется в конструкциях сборных торцовых фрез со сменными неперетачиваемыми пластинами. Это резервирование замещением, при котором группа основных элементов, чаще всего режущих пластин, резервируется дополнительными элементами, 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. Здесь необходимо учитывать время восстановления и разброс его значений при определении показателей надежности инструмента в целом. Такой подход значительно увеличивает долговечность инструмента и улучшает показатели ремонтпригодности в связи с уменьшением расходов на обнаружение отказа и сам процесс восстановления работоспособности инструментов. При этом возможна выборочная замена отказавших элементов, что еще больше удешевляет сам процесс восстановления.

Восстанавливаемость резерва можно оценить по способам восстановления режущей части, то есть по возможности ее переточки после отказа. В современном инструментальном производстве наметилась тенденция использования резервирования без восстановления работоспособности отказавших резервных элементов. Это связано с широким внедрением сборных конструкций инструментов со сменными неперетачиваемыми пластинами. Режущая часть таких инструментов не подлежит восстановлению, после отказа она утилизируется и полностью идет на переработку.

С точки зрения безотказности работы торцовая фреза имеет структурную схему надежности, представленную на рис. 2.

Т.к. корпус фрезы и механизм крепления режущей части инструмента в некотором приближении можно отнести к высоконадежным элементам системы, имеющим вероятность безотказной работы P_1 и P_3 близкими по значению к единице в промежутке времени до отказа инструмента, то надежность фрезы можно оценивать по надежности ее режущей части.

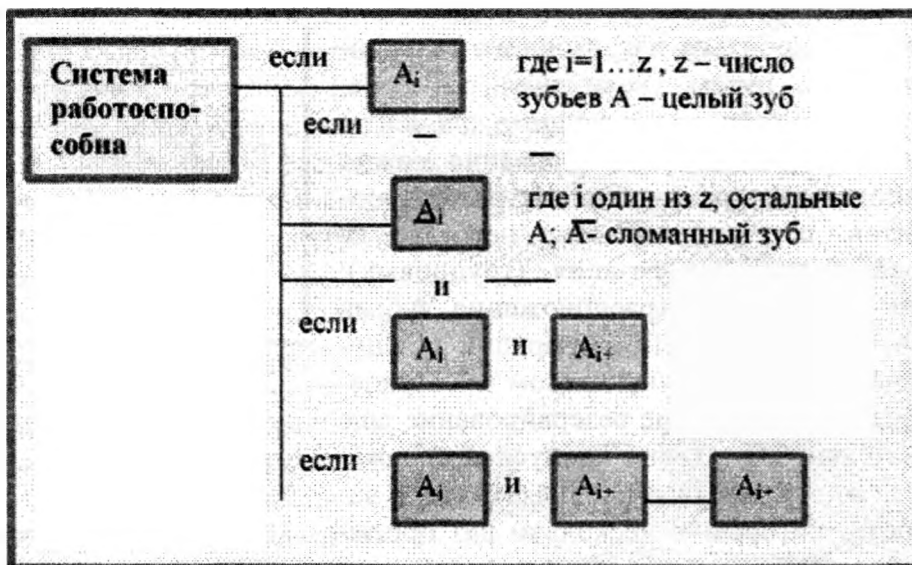


Рисунок 3 – Логическая схема торцовой фрезы с точки зрения безотказности работы

Для оценки надежности режущих пластин фрезы воспользуемся методом логических схем [4]. Если в качестве критерия отказа фрезы принять выход из строя (поломку) двух последовательно идущих друг за другом зубьев, то структура работоспособности режущих элементов инструмента будет иметь вид (рис. 3).

Для примера рассчитаем вероятность безотказной работы торцовой фрезы с числом зубьев $z=6$, материал режущей пластины твердый сплав марки Т15К6, ведущей обработку стали 45, глубина фрезерования $t=3,5$ мм; подача на зуб $S_z=0,1$ мм/зуб [6]. В качестве количественного критерия работоспособности зуба фрезы примем величину «ломающей» подачи S_p , приводящей к поломке режущего элемента. По графику [1, рис. 116, кривая 4] величина

$S_p=1,4$ мм/об, тогда $S_{zp}= S_p/z= 0,23$ мм/зуб. Исходя из принятых значений, условие отказа фрезы - это когда два последовательно идущих друг за другом зуба фрезы выйдут из строя, при этом на третий зуб придётся подача $S_z=0,3$ мм/зуб $> S_{zp}$.

Для примера рассмотрим случай, когда вероятность безотказной работы каждой пластины равна 0,9 при заданной стойкости $T=30$ минут. В соответствии с принятой моделью надёжности вероятность безотказной работы режущих элементов фрезы будет равна:

$$P(t)=P_1P_2P_3P_4P_5P_6 + (1-P_1) P_2P_3P_4P_5P_6 + (1-P_1) (1-P_3) P_2P_4P_5P_6 + + (1-P_1) (1-P_3) (1-P_4)P_2P_5P_6 = 0,531+0,059+0,006561+0,000729= 0,597,$$

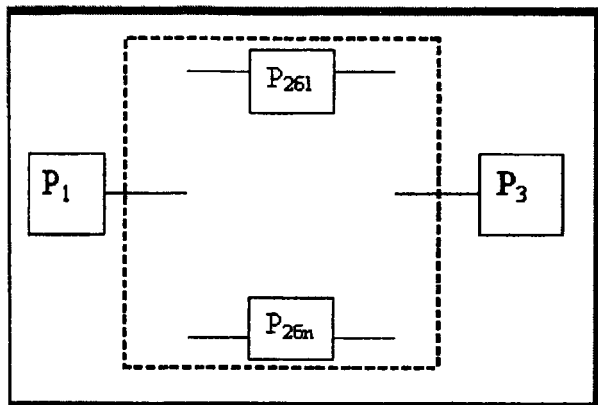


Рисунок 4 – Структурная схема надёжности торцевой фрезы с точки зрения использования суммарного ресурса пластин n – число рабочих граней пластин

где P_i – вероятность безотказной работы i -го зуба фрезы.

Модель надёжности торцевой фрезы с точки зрения использования суммарного ресурса сменных пластин представлена на рис. 4.

Для выше приведенного примера при учете использования суммарного ресурса пластин вероятность безотказной работы инструмента без учета времени восстановления работоспособности при $n=4$:

$$P_{2д} = 1 - (1 - P_{261}) (1 - P_{262}) (1 - P_{263}) (1 - P_{264});$$

$$P_{2д} = 1 - (1 - 0,597)^4 = 0,973.$$

ВЫВОДЫ

Сборная торцевая фреза с точки зрения надёжности может быть представлена в виде системы параллельно-последовательного типа с активным резервом. Этот резерв не преднамеренный, а вызван конструктивной избыточностью инструмента в связи с возрастающими требованиями к росту производительности при обработке.

Анализ предложенной модели надёжности 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 показателей надёжности ресурс этого инструмента будет недоиспользован.

В соответствии с принятой моделью надёжности критерий отказа торцевой фрезы будет зависеть от величины «ломающей подачи», приводящей к поломке режущего элемента. В зависимости от принятой подачи на зуб этот критерий может представлять собой выход из строя более одного последовательно идущего друг за другом зуба. При определении наиболее вероятной стойкости необходимо воспользоваться зависимостью по определению вероятности безотказной работы фрезы, полученной на основе логической схемы надёжности конкретного инструмента.

Как показывает анализ предложенной модели надёжности и практика эксплуатации торцевых фрез повысить их надёжность с точки зрения безотказности инструмента можно путём увеличения количества резервных элементов. Если мы хотим сохранить подачу на зуб, а следовательно и производительность при обработке необходимо увеличивать диаметр фрезы. Однако это приведёт к увеличению стоимости самого инструмента. С другой стороны можно увеличить количество режущих лезвий при сохранении диаметра фрезы, что приведет к уменьшению подачи и как следствие снижению производительности. Таким образом, изменение конструкции фрезы с целью увеличения ее надёжности должно быть обосновано с точки зрения технико-экономических показателей процесса механической обработки для конкретных условий.

ЛИТЕРАТУРА

1. ХаеГ Г.Л. Надежность режущего инструмента. Киев, 1968 - 31 с.;
2. Герцбах И.Б., Кордонский Х.Б. Модели отказов. М.: Советское радио, 1966.;
3. Технический справочник от Sandvik Coromant 2005.09;
4. Проников А.С. Надежность машин. – М.: Машиностроение, 1978. – 592 с.;
5. Острейковский В.А. Теория надежности. Учебник для технических ВУЗов – М.: Высш. шк., 2003. – 462 с.;
6. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. т.2. Под ред. А.Г.Косиловой и Р.К.Мещерякова - М.: Машиностроение, 1986. - 496 с.;

УДК 621.787

Ловшенко Ф.Г., Ловшенко Г.Ф., Хабибуллин А.И.

ГЛУБОКОЕ СВЕРЛЕНИЕ ОТВЕРСТИЙ В ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫХ МЕДНЫХ СПЛАВАХ

*Белорусско-Российский университет
Могилев, Беларусь*

В связи с развитием всех отраслей промышленности и необходимостью повышения качества выпускаемой продукции требуется создание новых конструкционных материалов.

Применение новых конструкционных материалов обусловлено их важными физико-механическими и эксплуатационными свойствами. Особая роль принадлежит композиционным порошковым материалам, обладающим высокими значениями жаропрочности. Дисперсно-упрочненные материалы на основе меди представляет собой порошковую композицию, состоящую из медной матрицы, в которой равномерно распределено до 10 % по объему дисперсных частиц упрочняющей фазы. В качестве последней применяются термодинамически стабильные соединения с высоким значением модуля сдвига, например, Al_2O_3 . Материал обладает структурой микрокристаллического типа с размерами зерен матрицы 0,2-0,5 мкм и величиной частиц упрочняющей фазы менее 0,05 мкм, что позволяет ему иметь высокие значения всего комплекса физико-механических свойств. Микрокристаллический тип структуры, характеризующийся развитой поверхностью границ зерен и субзерен, стабилизированных дисперсными включениями механически и термически стабильных фаз, обуславливающий низкую скорость протекания рекристаллизационных процессов, определяет высокие значения твердости и прочности не только при 20оС, но и при температурах, достигающих 600оС. Разработанные материалы по комплексу физико-механических свойств превосходят лучший классический электродный материал, которым является бронза БрХЦр.

При электропроводности 70-75 % от меди они обладают механическими свойствами характерными для нагартованной стали 50: твердостью 200-240 НВ, пределом прочности 700-900 МПа, относительным удлинением 2-4 %.

Одной из перспективных областей применения дисперсно-упрочненных материалов на основе меди является изготовление токоподводящих наконечников аппаратов для сварки электродной проволокой в среде защитных газов. Для получения полуфабриката – калиброванного прутка порошковая композиция определенного состава подвергается обработке в механореакторе, а затем, после компактирования, экструзии. Из экструдированных прутков изготавливают заготовки токоподводящих наконечников. В этих изделиях необходимо получить отверстие диаметром 0,8...2,0 мм глубиной 18...30 мм. В данной работе приведены результаты исследования процесса получения отверстия спиральным сверлом из быстрорежущей стали диаметром 0,9 мм на глубину 20 мм в заготовке из дисперсно-упрочненной меди. Сверление производилось со следующим режимом резания: $n = 1450$ об/мин, $s = 0,02$ мм/об при осевом перемещении сверла в процессе резания 0,5-0,9 мм. После сверления на эту глу-

бину, инструмент извлекался из канала с целью удаления стружки и подачи смазочно-охлаждающей жидкости на режущие лезвия.

Сверление глубоких отверстий сопряжено с рядом технологических трудностей: сложностью подвода смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) и отвода тепла и стружки из зоны резания; недопустимо большим отклонением сверла от оси вращения; низкой стойкостью инструмента; высокой вероятностью поломки инструмента; большой шероховатостью поверхности.

При сверлении дисперсно-упрочненных материалов на основе меди на первое место выступают проблемы быстрого изнашивания инструмента (т.к. материал заготовки имеет большую твердость и обладает повышенной абразивностью из-за наличия упрочняющих фаз) и его поломки.

Процесс отвода тепла из зоны резания является важным фактором повышения стойкости инструмента. Это связано с тем, что при перегреве наблюдаются следующие явления: интенсивное разупрочнение инструментального материала; повышается пластичность материала заготовки - вместо стружки надлома или скалывания образуется сливная, что затрудняет ее отвод из зоны резания.

При больших контактных давлениях и температурах начинают проявляться силы молекулярного сцепления – адгезия, заключающиеся в схватывании материала инструмента с материалом заготовки, что приводит к увеличению крутящего момента и поломке сверла. Для отвода тепла и стружки, а также подачи СОЖ, необходимо периодически (после осевого перемещения сверла в процессе резания на 0,3-0,5 мм) выводить инструмент из заготовки.

Повышенная абразивность композиционного материала приводит к интенсивному износу задних поверхностей инструмента, а значит, к возникновению адгезии и резкому возрастанию крутящего момента, что вызывает поломку сверла. С другой стороны, процесс адгезии на рабочих поверхностях инструмента отличается нестабильностью, обуславливающей "рыскание" сверла и увод его от оси вращения. Это явление вызывается не только адгезией, но и погрешностями при заточке спирального сверла и неравномерностью износа главных режущих лезвий.

Смазочно-охлаждающие вещества оказывают значительное влияние на процесс резания и качество обработки. В зависимости от технологического метода обработки, физико-механических свойств материала заготовки и инструмента, а также режима резания, применяют различные смазочно-охлаждающие вещества. Наибольшее применение при обработке резанием нашли СОЖ. Обладая смазывающими свойствами, жидкости снижают внешнее трение о поверхности инструмента и, одновременно, работу деформаций. Общее количество теплоты, выделяющееся при резании, уменьшается. Кроме того, они отводят теплоту от зоны резания, охлаждая режущий инструмент, деформируемый слой и обработанную поверхность заготовки. Смазывающее действие жидкости препятствует образованию нароста на рабочих поверхностях инструмента, в результате чего снижается шероховатость обработанных поверхностей заготовки.

При чистовой обработке, когда требуется получить высокое качество обработанной поверхности, широко используют различные масла. Для активизации смазок к ним добавляются активные вещества, содержащие фосфор, серу, хлор. Под влиянием высоких температур и давлений эти вещества образуют с материалом контактных поверхностей соединения, снижающие трение – фосфиды, хлориды, сульфиды [1]. Применение СОЖ уменьшает крутящий момент и вероятность поломки инструмента, увеличивает производительность процесса, стойкость инструмента, улучшает качество поверхности.

Сверление производилось инструментом из стали Р6М5 диаметром 0,9мм на глубину 30мм. Скорость резания составляла 8,0м/мин, подача 0,01мм/об.

Материал заготовок из дисперсно-упрочненной меди обладал следующими характеристиками: электропроводность 65-70% от электропроводности меди, твердость – 200-220 НВ, предел прочности при растяжении – 700-900 МПа, длительная прочность – $[\sigma^{1q}] = 200 - 250$ МПа, температура рекристаллизации 800-8500С, относительное удлинение 2 %.

В таблице 1 приведены результаты исследования относительной стойкости сверл при использовании различных СОЖ. Несмотря на повышение стойкости сверла за счет применения различных СОЖ, этот технологический прием не решает проблемы увода сверла от оси

сверления (до 40 % отверстий диаметром 0,9 мм имеют отклонение 0,3-2,0 мм), что недопустимо при изготовлении токоподводящих наконечников.

Одним из наиболее результативных способов повышения эффективности процесса глубокого сверления является применение вибрации. В этом случае инструменту или заготовке сообщаются возвратно-поступательные движения определенной амплитуды и частоты. В процессе вибрации происходит принудительный скол сливной стружки, и она превращается в стружку надлома или скалывания. Вибрация снижает сопротивление материала деформированию, исключает образование нароста на режущем инструменте, а также облегчает перемещение стружки в канале отверстия, решая проблему отвода стружки и тепла из зоны резания.

Таблица 1 – Относительная стойкость сверл в зависимости от состава СОЖ

№	Наименование (состав) СОЖ	Количество просверленных заготовок	
		Без использования вибрации	С использованием вибрации
1	Масло индустриальное 12	7-8	18-20
2	Масло индустриальное 20	8-10	20-22
3	СОЖ В-31	7-8	17-20
4	СОЖ МР-29	7-8	17-20
5	Смесь 20% керосина и 80% сульфофрезола	7-8	15-18
6	5%-ная эмульсия из эмульсола НГЛ-205	7-9	13-17
7	5%-ная эмульсия из эмульсола Э-2 (ЭТ-2)	7-9	13-16
8	10 % эмульсия из эмульсола Э-2 (ЭТ-2)	7-9	15-18
9	Mobil 1 0W-30	10-13	26-30
10	Aral Super Tronic OW-40	11-13	27-33
11	R-COOL-S niron (фирмы RHENUS LUB 15-18)	15-18	40-45

При возникновении адгезии вибрация приводит к разрыву контакта, тем самым облегчает возможность возврата сверла к оси вращения и снижению крутящего момента, что предотвращает поломку сверла. Оптимальные амплитуда и частота колебаний зависят от режима резания, свойств материала заготовки и инструмента и должны рассчитываться из условий надежного образования стружки надлома и проверяться эмпирически.

Целями исследования являлись: технологические свойства новых материалов для токоподводящих наконечников; режимы резания для этих материалов; расчет основных параметров вибровозбудителя; проектирование и создание установки для вибрационного сверления, а также разработка технологии процесса сверления токоподводящих наконечников изготовленных из дисперсно-упрочненной меди.

Значения режимов резания [2] при сверлении стали 50 (как ближайшего аналога по комплексу механических свойств) явились основой для расчетов параметров вибровозбудителя установки для сверления [3]. Если принять, что для надежного надлома стружки возмущающая сила должна быть равна осевому усилию резания, то массу дебаланса можно определить из формулы:

$$F = P_o = a \cdot M_d,$$

где F – возмущающая сила вибратора, Н;
 P_o – осевое усилие резания, Н ($P_o = 9,8$ Н для сверления отверстий диаметром 0,9 мм);
 a – ускорение центра масс дебаланса, м · с⁻²;
 M_d – масса дебаланса, кг;
 $a = \omega^2 \cdot R_d$,
 где ω – круговая частота колебаний, с⁻¹;
 R_d – расстояние до центра масс дебаланса, м;

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}$$

где n – частота вращения дебаланса, мин-1 ($n = 2800$).

$$\omega = \frac{3,14 \cdot 2800}{30} = 293 \text{ с}^{-1}.$$

Для дебаланса полукруглой формы с наружным радиусом $R = 16 \cdot 10^{-3}$ м расстояние до центра масс определяется из выражения:

$$R_d = 0,316 \cdot 16 \cdot 10^{-3} = 5,06 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

Тогда

$$a = 2932 \cdot 5,06 \cdot 10^{-3} = 434 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2},$$

$$M_d = P_0/a = 9,8/434 = 22,6 \cdot 10^{-3} \text{ кг}.$$

Амплитуда колебаний виброузла находится из условия равновесия [3,с.215]:

$$M_d \cdot R_d = M \cdot A,$$

где: M – расчетная масса виброузла, кг ($M=287 \cdot 10^{-3}$ кг);

A – амплитуда колебаний виброузла, м;

M_d – масса дебаланса, кг.

Тогда амплитуда колебаний виброузла равна:

$$A = \frac{M_d \cdot R_d}{M} = \frac{22,6 \cdot 10^{-3} \cdot 5,06 \cdot 10^{-3}}{287 \cdot 10^{-3}} = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Результаты расчета основных параметров вибровозбудителя явились исходными данными для дальнейших инженерных расчетов и работ по проектированию установки.

Техническая характеристика установки для вибрационного сверления:

1 Диаметр устанавливаемых сверл, мм	0,5...3,0
2 Глубина сверления, мм	70
3 Ход суппорта, мм	100
4 Электродвигатель:	
Тип	ДК58-60-12, Тр3.129.000ТУ
Мощность, Вт	120
Частота вращения, мин-1	2800
5 Параметры вибровозбудителя:	
Тип возбудителя	инерционный
Тип двигателя	PRM-33-1,9
Мощность, Вт	3,0
Частота вращения, мин-1	0...2800
Амплитуда колебаний	$0,4 \cdot 10^{-3} - 0,4 \cdot 10^{-5}$
Частота колебаний, сек-1	0...293
6 Масса установки, кг	8,5

После расчета режимов резания и проведения общепринятых при проектировании динамических и кинематических расчетов, а также расчетов на прочность основных узлов были разработаны: общие компоновки установки для горизонтального сверления глубоких отверстий и оснастки для вибросверления на токарно-револьверном станке модели 1Е316П, а также их сборочные и рабочие чертежи. Эта документация была использована для создания оборудования и организации участка вибрационного сверления. После изготовления и наладки установок производилась отработка режимов сверления. Для созданных установок оптимальным режимом сверления отверстий диаметром 0,9мм в дисперсно-упрочненной меди являются: скорость резания 8,0м/мин; подача 0,01мм/об; амплитуда колебаний $0,4 \cdot 10^{-3}$ м; частота колебаний 293 сек-1 .

Применение данной установки позволило решить следующие задачи:

- 1) повысить производительность процесса сверления в 2...2,5 раза;
- 2) повысить стойкость сверл в 2,5...3 раза;
- 3) снизить величину увода сверла от его оси в 1,5...2,5 раза;

- 4) повысить чистоту обрабатываемой поверхности;
- 5) снизить вероятность поломки сверл в 3...5 раз.

Создание установки позволило наладить крупносерийное производство токоподводящих наконечников из дисперсно-упрочненной меди для сварки проволокой в среде защитных газов, обладающих стойкостью, превышающей стойкость изделий из Бр.ХЦр в 2,5-3,0 раза.

Разработанная установка дает возможность получать отверстия малого диаметра глубиной до 20-30 мм с удовлетворительными производительностью, стойкостью инструмента и допустимым уводом сверла (составляющим 0,05...0,2 мм).

Изготовление наконечников было налажено в условиях учебно-производственных лабораторий университета силами сотрудников и студентов.

В связи с возможностью изготовления токоподводящих наконечников из дисперсно-упрочненной меди, в Белорусско-Российском университете были разработаны технические условия на эту продукцию.

Производство наконечников, имеющих стойкость превышающую стойкость любых аналогов выпускаемых в странах СНГ, позволило ряду крупных предприятий РБ отказаться от импорта этих изделий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технология конструкционных материалов. Под ред. Дальского А.М. и др. М.: Машиностроение. 1985. - 548 с. 2. Режимы резания металлов: справочник. Под ред. А.М. Барановского М.: Машиностроение. 1972. - 408с. 3. Бурков С.Н. Расчет вибротрипсов и вибропробурителей. М.: Машиностроение, 1978. - 384с.

Дан краткий анализ проблем, возникающих при глубоком сверлении отверстий малого диаметра в дисперсно-упрочненных материалах на основе меди, предложены мероприятия по повышению эффективности процесса резания.

УДК 674.05.621.9.02.

Раповец В.В., Бурносов Н.В.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ПИЛОПРОДУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЩЕПЫ НА ФРЕЗЕРНО-БРУСУЮЩИХ СТАНКАХ

*Белорусский государственный технологический университет,
Минск, Беларусь*

Эффективная переработка на фрезерно-брусующих станках древесного сырья малых диаметров (тонкомера) играет немаловажную роль в плане расширения лесосырьевых ресурсов и возможности получения дополнительной качественной пилопродукции и технологической щепы.

Переработка круглого леса ведётся на линиях фрезерно-пильных (ФПЛ), фрезерно-брусующих (ФБЛ), агрегатной переработки бревен (ЛАПБ), Chip-N-Saw (Канада), Vance (США), фрезерно-брусующем оборудовании фирм Alstrem Machinery (Финляндия), EWD, Sodderhamns (Германия) и т.д. [1]. Аналогичного типа линия находится на д/о предприятии «Борисовский ДОК», закуплены современные линии для Шкловского целлюлозно-бумажного комбината.

Технологическая стружка, получаемая в процессе фрезерования на агрегатном оборудовании, может являться эквивалентом технологической щепы, если ее размеры, чистота срезов и углы перерезания волокон соответствуют требованиям ГОСТ 15815-83 «Щепа технологическая», который определяет требования к щепе, предназначенной для целлюлозно-бумажного, гидролизного производства, для изготовления древесно-стружечных и древесноволокнистых плит.

Стандарт устанавливает как фракционный состав щепы для различных видов производств, так и требования к качеству и параметрам среза щепы. Длина $l_{щ} = 25 \text{ мм}$, толщина $a = 5 \text{ мм}$, угол среза торца щепы должен находиться в пределах $30^\circ - 60^\circ$. Торцовый срез щепы, предназначенной для целлюлозно-бумажного и плитных производств, не должен иметь смятых и загнутых волокон.

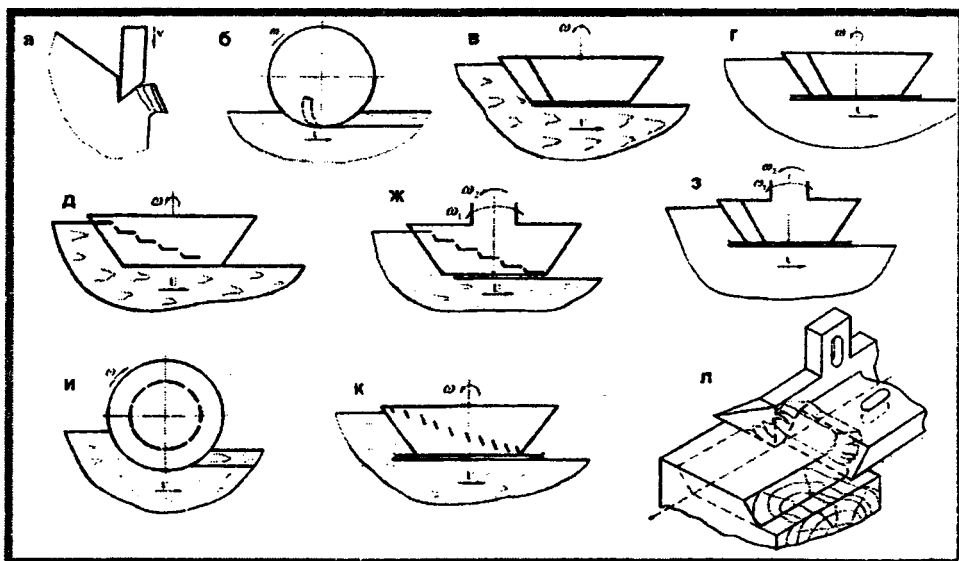


Рисунок 1 - Схемы формообразования пилопродукции при агрегатных способах переработки тонкомерной древесины.

Процесс переработки тонкомерной древесины на технологическую щепу и брус достаточно сложен: имеет свои особенности. При этом, как указывалось выше, используется фрезерно-брусующее оборудование различных конструкций. Следовательно, технологические схемы формообразования щепы и бруса на этом оборудовании также различны. Они представлены на (рис.1). Можно выделить некоторые особенности, преимущества и недостатки:

а) классическая схема формообразования в рубительной машине: элементы технологической щепы образуются путем скалывания древесины вдоль волокон. Толщина щепы зависит от угловых параметров резца и механических свойств перерабатываемой древесины;

б) схема обработки в линии ЛАПБ: попутное фрезерование, образуется мелкая фракция технологической щепы. Это является недостатком такой схемы;

в) фреза ф. Gillette (Франция): используется двухлезвийный резец, невысокое качество поверхности пласти бруса.

г) фреза ф. Linck (Германия): невысокое качество поверхности пласти бруса. Для повышения качества поверхность бруса формируется круглыми пилами, при этом до 10% самого качественного массива уходит в опилки, повышенные энергозатраты на обработку.

д) фреза конструкции Центрального научно-исследовательского института механической обработки древесины (ЦНИИМОД): заданные параметры щепы, ниже затрачиваемая мощность на обработку, плохое качество поверхности пласти бруса.

ж) фреза ф. Sodderhamns (Швеция): поверхность пласти бруса лучше за счет дополнительно установленных подчищающих ножей и разной частоты вращения инструмента.

з) вариант схемы: качество поверхности бруса хорошее, а щепы плохое из-за наличия мелкой фракции.

и) вариант схемы: получается также нежелательная мелкая фракция щепы.

к) вариант схемы: используются однолезвийные резцы, плохое качество технологической щепы (торцовый срез) и пласти бруса – малая скорость резания.

л) фреза конструкции Белорусского технологического института (БТИ), использующая цельные двухлезвийные разцы (БРМ-4). Преимуществами этой конструкции являются получение щепы заданных параметров, достаточно хорошее качество пласти бруса, малая мощность на обработку. К недостаткам можно отнести сложность переподготовки режущего инструмента.

Качество щепы от различных агрегатов различно. Наиболее высокие размерно-качественные характеристики имеет щепа, вырабатываемая во фрезерно-брусующих агрегатах с многолезцовым инструментом (расположенным по спирали на фрезе). Более подробно процесс формообразования технологической щепы и пласти бруса при описанных выше схемах показан на рис.2.

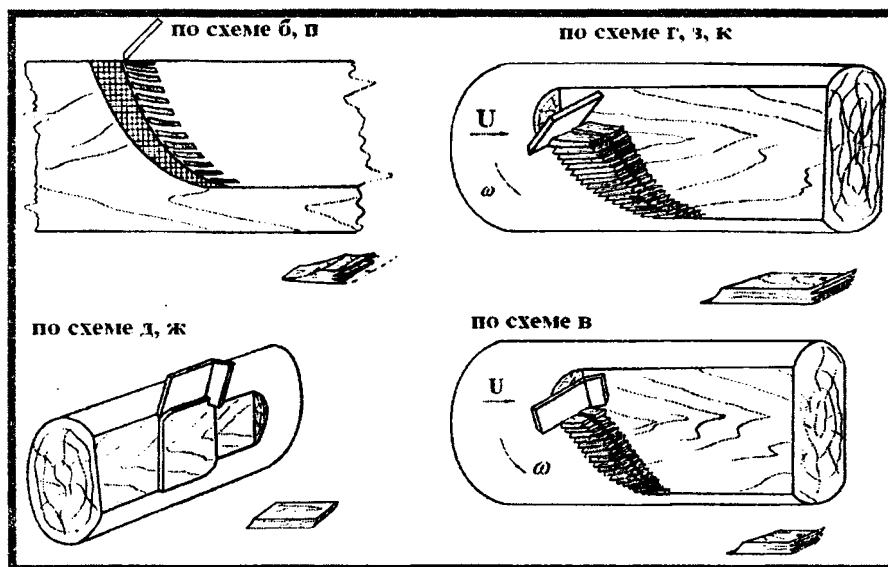


Рисунок 2 - Схемы формообразования пилопродукции

Для улучшения качества продукции, вырабатываемой на существующем фрезерно-пильном и фрезерно-брусующем оборудовании, необходимо дальнейшее его совершенствование. Процесс обработки достаточно сложный и требует исследований по установлению рациональных параметров фрез, резцов, режимов обработки, энергозатрат.

Кафедрой деревообрабатывающих станков и инструментов (ДОСИ) Белорусского государственного технологического университета разработано несколько вариантов фрезерно-брусующих станков (ФБС) типа БРМ для переработки тонкомерной древесины на двухкантный брус и технологическую щепу. Машины изготавливались серийно и прошли производственную проверку и показали практическую работоспособность с положительным экономическим эффектом.

Цель работы: разработка рациональной конструкции режущего инструмента с получением новых данных о силовых параметрах резания, размерно-качественных характеристиках получаемых поверхности пласти бруса и технологической щепы в БРМ. Наибольшее влияние оказывают силы резания – касательная для расчета мощности, затрачиваемой на резание, а также силы затягивания-отжима резца, которые влияют на качественные показатели продукции.

На процесс резания древесины оказывает очень много взаимовлияющих факторов, среди которых можно выделить три основные группы: 1) факторы, относящиеся к перерабатываемому материалу (физико-механические свойства породы древесины, влажность, анизотропия и др.); 2) факторы, относящиеся к режущему инструменту (геометрические и угловые параметры, углы резания, марка стали и пр.); 3) режимы резания или обработки (скорость резания, скорость подачи). Учесть все эти факторы при описании модели (математической, физической, механической и т.д.), применительно к конкретному процессу, крайне сложно. Поэтому исследователи, как правило, ограничиваются наиболее значимыми из них.

Для моделирования процесса резания древесины на ФБМ на кафедре деревообрабатывающих станков и инструментов имеется модернизированная экспериментальная установка УИР-1.

Установка экспериментальная УИР-1 предназначена для проведения лабораторных и технологических исследований режимов резания древесины при торцевом фрезеровании и после модернизации позволит моделировать процесс резания древесины на ФБС. Технические данные установки представлены в виде таблицы 1.

Таблица 1. Технические характеристики установки УИР-1

Наименование показателей	Пределы регулирования
Частота вращения рабочего органа (диска) механизма резания, мин ⁻¹	0÷3000
Скорость перемещения каретки с образцом (скорость подачи), м/с	0,08÷0,3
Измеряемые составляющие силы резания, Н	
горизонтальная	1200 (600)
вертикальная	1200 (600)
осевая	1000 (500)
Крутящий момент, Н·м	800

Общий вид установки с обозначением составных частей и элементов представлен на рис.3.

Установка состоит из двух приводов: механизма резания, приводимого в движение от электродвигателя постоянного тока, и механизма подачи, осуществляющего движение посредством гидравлической станции (рис.3, а).

Исследователь зачастую сталкивается с трудностями определения и регистрации силовых показателей, которые могут достигать достаточно больших величин. В связи с этим для придания жёсткости самой конструкции станина установки выполнена литой из чугуна и качественной литейной стали.

На станине 5 механизма подачи посредством кронштейна из толстолистовой стали на подшипниковой опоре закреплён вал с несущим диском (фрезой) 1, плоскость которого перпендикулярна оси этого вала. В качестве режущих элементов фрезы используются двухлезвийные резцы [2]. Привод вала осуществлён от электропривода постоянного тока типа ЭТ6Р с электродвигателем ПБСТ через клиноременную передачу. На каретке 4 посредством кронштейна 2 закреплён динамометр 6 измерительного комплекса УДМ. В качестве привода каретки 6 используется гидроцилиндр с приводом от гидронасоса (на рисунке не показано).

При исследовании режимов резания образец крепится в динамометре 6. Резцом, установленном на резцедержателе несущего диска 1, при включенном приводе резания и подачи (гидропривод) осуществляется фрезерование образца и регистрация трёх перпендикулярных составляющих общей силы резания и крутящего момента (F_x , F_y , F_z , $M_{кр}$).

Методикой проведения экспериментальных работ предусматривается установление рациональных параметров новых конструкций режущих инструментов с регистрацией энергетических параметров: трёх взаимоперпендикулярных составляющих усилия резания, а также крутящего момента [3].

В комплект набора УДМ входят динамометр-датчик, тензометрический усилитель 7 УТ4-1, блок милливольтметров 8, осциллограф 9 и соединительные провода.

Схема соединений устройств измерительной системы представлена на рис.3, б. Работа схемы осуществляется следующим образом. При действии сил резания на образец древесины 3, закреплённый в динамометре-датчике 6, деформируются чувствительные элементы динамометра (опоры) с наклеенными на них проволочными датчиками, сопротивление которых изменяется пропорционально прикладываемым усилиям и моменту, чем и определяется пропорциональное изменение сигнала измерительной схемы. Сигнал измерительной схемы поступает далее на вход усилителя 7 и затем передаётся на параллельно соединённые микроамперметр, находящийся на приборном щите 8, и вибратор осциллографа 9, с помощью которых регистрируются показания динамометра.

На экспериментальной установке по исследованию процессов резания УИР-1 ранее были проведены специальные эксперименты, целью которых являлось уточнение временной стойкости резца, формирующего пластъ бруса в условиях поперечного резания. Критерием предела работоспособности определялась видимая потеря качества поверхности пласти бруса (ворс, мшистость, вырывы). Производились замеры радиуса скругления режущей кромки методом слепков с последующим контролем на металлографическом микроскопе. Осуществлялся замер времени процесса, который длился 30 часов. При этом установлено, что величина радиуса скругления составила величину порядка 90-92мкм. По известной зависимости были проведены перерасчет величины приращения затупления резца на пути резания 1м. Таким образом, был выявлен дополнительный резерв повышения эффективности использования ФБС.

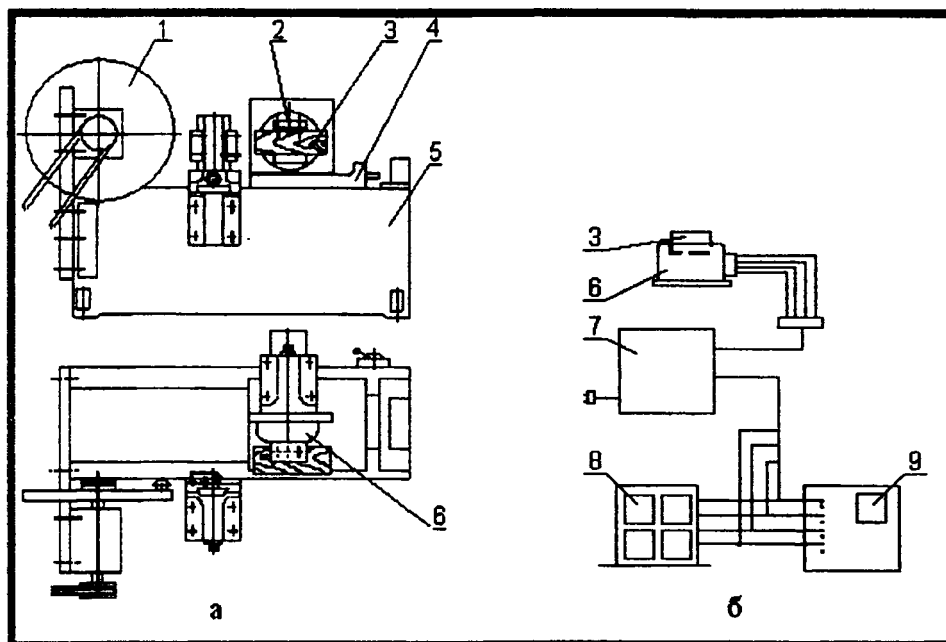


Рисунок 3 - Схема экспериментальной установки УИР-1:

а – экспериментальная установка УИР-1,

б – схема соединений измерительной системы:

1 – несущий диск (фреза), 2 – кронштейн, 3 – образец древесины, 4 – каретка механизма подачи, 5 – станина, 6 – динамометр, 7 – усилитель, 8 – блок милливольтметров (приборный щит), 9 – осциллограф.

Предварительно проведенные эксперименты [4] показали, что существующая измерительная система (ИС) УИР-1 не в полной мере позволяет фиксировать значения интересующих физических величин. В связи с этим для проведения дальнейших исследований необходима модернизация ИС и оснащение экспериментальной установки современными средствами измерений и программным обеспечением с возможностью вывода и последующей обработкой данных на ПК. Это позволит глубже (детально) исследовать физические процессы и явления при изучении резания древесины на фрезерно-брусующих станках.

ЛИТЕРАТУРА

1. Боровиков Е.М., Сумароков А.М. Фрезерно-пильное оборудование в странах-членах СЭВ. ВНИИПИЭИ леспром, вып.4-78. 2. Раповец В.В., Бурносов Н.В. Определение влияющих на силовые показатели основных параметров процесса резания на фрезерно-брусующих станках // Труды БГТУ. Сер. II. Лесная и деревообаб. пром-сть. -

2005. – Вып. XIII. – С. 182-185. 3. Раповец В.В., Бурносов Н.В. Методика проведения экспериментальных исследований процесса резания древесины на фрезерно-брусующих станках. – Мн.: БГТУ, 2006. 4. Раповец В.В., Бурносов Н.В., Станкевич А.А. Повышение эффективности эксплуатации фрезерно-брусующих машин с фрезами со спиральным расположением резцов. Материалы международной НПК «Устойчивое развитие лесов и рациональное использование лесных ресурсов», Мн., БГТУ, 2005.

УДК 621.793

Фельдштейн Е.Э.

РАЗНОВИДНОСТИ И ВОЗМОЖНОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

*Зеленогурский университет
Зелена Гура, Польша*

Использование тонкопленочных покрытий является в настоящее время наиболее эффективным способом повышения стойкости режущих инструментов и производительности обработки. Такие покрытия, независимо от технологии нанесения, имеют высокую твердость, износостойкость и низкий коэффициент трения, а также низкую теплопроводность. Как следствие, на контактных площадках режущего инструмента силы трения снижаются на 25 – 40%, контактные напряжения на 20 – 30%, температура в зоне резания меньше на 90 – 120°C [1]. Обработка в таких условиях характеризуется 2 – 5-кратным повышением скорости резания и сокращением расхода энергии на 60 – 80%.

Воздействие пленки на эффективность обработки продолжается даже после ее истирания, поскольку микрочастицы ее материала благодаря процессам диффузии остаются в приповерхностных слоях инструмента.

В настоящее время в промышленности используются следующие разновидности покрытий [2]:

- однослойные, толщиной 0,5...50 мкм. Наиболее характерными являются покрытия TiC и TiN. Покрытие TiC отличается высокой твердостью (до 3000 HV), хорошим сцеплением покрытия с основой, стойкостью к окислению и повышает износостойкость прежде всего задней поверхности инструмента. Покрытия TiC непригодны для обработки легких сплавов, поскольку на стойкость инструмента неблагоприятно сказывается химическое сродство алюминия, титана, входящих в состав обрабатываемого материала, и карбида титана, находящегося в твердом сплаве. Покрытие TiN характеризуется практически полной инертностью к адгезии и высоким сопротивлением лункообразованию. В связи с технологическими особенностями нанесения это покрытие единственное, применяемое для быстрорежущих сталей. Другие виды покрытий используются для нанесения их на твердосплавные пластины;
- традиционные многослойные с толщиной отдельных функциональных слоев 0,5...10 мкм. При этом внутри каждого слоя формируются одиночные слои толщиной 5, 10, 20, 50, 500 и 5000 нм общим количеством 1, 10, 100, 250, 500 и 1000. Наиболее характерные покрытия – TiC-TiB₂, TiN-TiB₂ и TiC-TiN;
- многослойные с так называемой наноструктурой и толщиной отдельных слоев от нескольких до 100 нм;
- градиентные, с градиентом свойств (твердости) и химического состава. У таких покрытий слой, прилегающий к основному материалу имеет к нему весьма близкое сродство, которое постоянно изменяется по мере приближения к наружному слою, имеющему высокую стабильность и низкую химическую активность. Примерами таких покры-

тий являются TiC-Ti(CN)-TiN, TiC-Al₂O₃-TiN или TiC-NbC-TaC;

- композиционные, основанные на использовании интерметаллидных твердых растворов переходных металлов. В частности, используются твердые растворы (Ti,V)C, (Ti,Zr)C, (Ti,Nb)C, (Ti,Hf)C и (Ti,Ta)C, а также (Ti,V)N, (Ti,Zr)N, (Ti,Nb)N, (Ti,Hf)N, Ti(C,N), Hf(C,N) и многие другие. Наиболее эффективны среди них – Ti(C,N), (Ti,Al)N и (Ti,W)C;
- метастабильные. Это покрытия типа упрочненных твердых растворов (Ti,Al)N, (Hf,Al)N или (Ti,Si)C, образующиеся вследствие весьма значительного градиента температур между газовой фазой и материалом основы. Объединяют в себе достоинства ковалентных (например, SiC, AlN) и металлических (TiC, TiN) соединений. Метастабильные покрытия характеризуются повышенной твердостью, повышенным сопротивлением окислению и химическому изнашиванию и эффективно работают при температурах выше 1000°C;
- многофазные. Такие покрытия формируются путем модификации термодинамических условий осаждения и кристаллизации одиночных слоев, приводящих к диффузии микрокристаллов в аморфную основу либо аморфных частиц в кристаллическую основу. Примером многофазных покрытий являются слои TiC, модифицированные TiB₂ - TiC-TiB₂.
- сверхтвердые, на базе поликристаллических искусственных алмазов или композитов на основе нитрида бора;
- твердые смазки типа MoS₂, графита и т.д.;
- двухслойные типа „твердая смазка Me-C:H + слой твердого материала”.

Существуют различные формы производства инструментов с покрытиями:

- 1) покрытия на цельные инструменты или сменные пластины из твердого сплава наносятся непосредственно в ходе централизованного изготовления инструментов;
- 2) покрытия наносятся в инструментальном цехе машиностроительного предприятия – потребителя инструментов (как на покупные, так и на специальные инструменты);
- 3) покрытия на любые инструменты и пластины наносятся специализированными фирмами, получающими заказы от предприятий – потребителей инструментов.

Некоторые виды покрытий, используемых для нанесения на режущие инструменты, приведены в таб. 1

Покрытие BALINIT	Материал	Микро- твердость	Кoeffици-ент трения	Структура	Рабочая тем- пература
A	TiN	2300	0,4	Однослойное	600°C
ALCRONA	AlCrN	3200	0,35	Однослойное	1100°C
B	TiCN	3000	0,4	Градиентное многослойное	400°C
DIAMOND	Поликристал- лический алмаз	8000 – 10000	0,15 – 0,2	Однослойное	600°C
FUTURA NANO	TiAlN	3300	0,3 – 0,35	Наноструктура	900°C
FUTURA TOP	TiAlN	3300	0,25	Наноструктура	900°C
HARDLUBE	TiAlN + WC/C	3000	0,15 – 0,2	Двухслойное с подслоями	800°C
HELICA	На базе Al-Cr	3000	0,25	Несколько слоев постоянного состава	1100°C
TRITON	Me-C:H	2500	0,1 – 0,2	Однослойное	350°C

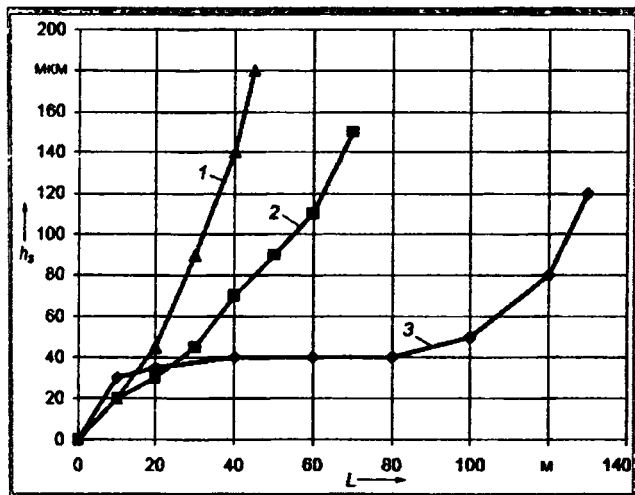


Рисунок 1- Характер изнашивания твердосплавных пальцевых фрез $D = 8$ мм в зависимости от общей длины обработки:
 1 – покрытие TiCN; 2 – покрытие TiAlN;
 3 – покрытие BALNIT@ALCRONA;
 $v = 400$ м/мин; сталь AISI 1045*

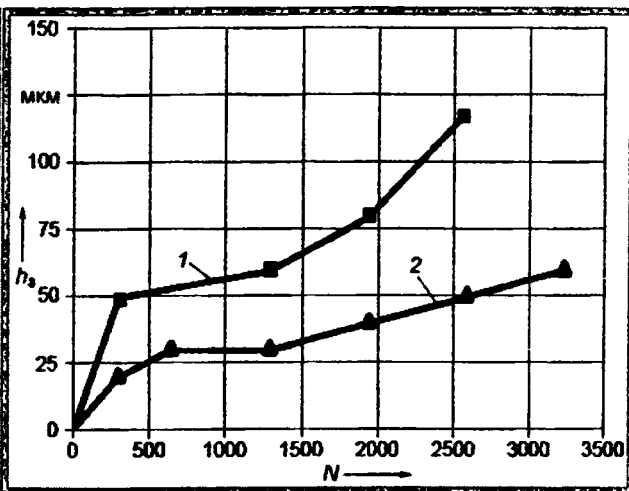


Рисунок 2- Характер изнашивания твердосплавных сверл $D = 6,8$ мм:
 1 – покрытие TiAlN;
 2 – покрытие BALNIT@HELICA; $v = 120$ м/мин; $f = 0,2$ мм/об; сталь AISI 1045; N – количество просверленных отверстий

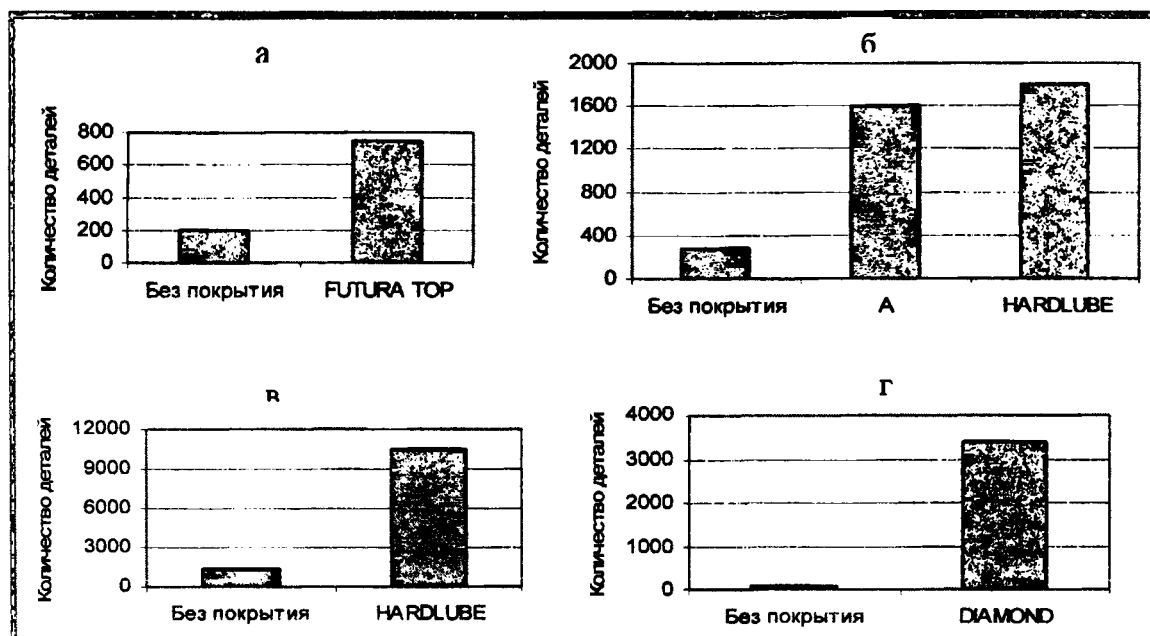


Рисунок 3- Эффективность покрытий BALNIT при сверлении: а – серого чугуна; б – стали 45; в – нержавеющей стали AISI 316; г – армированного фиберпластика*

Одной из таких фирм является фирма «Oerlikon Balzers Coating» наносящая различные виды покрытий на быстрорежущие инструменты и твердосплавные пластины методом PVD. Имея более, чем 50-летнюю историю, фирма в настоящее время специализируется в разработке установок, новых технологий и непосредственно в нанесении покрытий на режущие инструменты, штампы и прессформы и на быстроизнашивающиеся детали машин. Все процессы, начиная от предварительной очистки и кончая контролем качества покрытия, автоматизированы и полностью компьютеризированы. Вся номенклатура покрытий имеет торговую марку BALNIT®.

Каждое их покрытий имеет свое назначение. Его правильный выбор обеспечивает существенное повышение периодов стойкости инструмента (рис. 1), повышение скорости резания и снижение стоимости обработки.

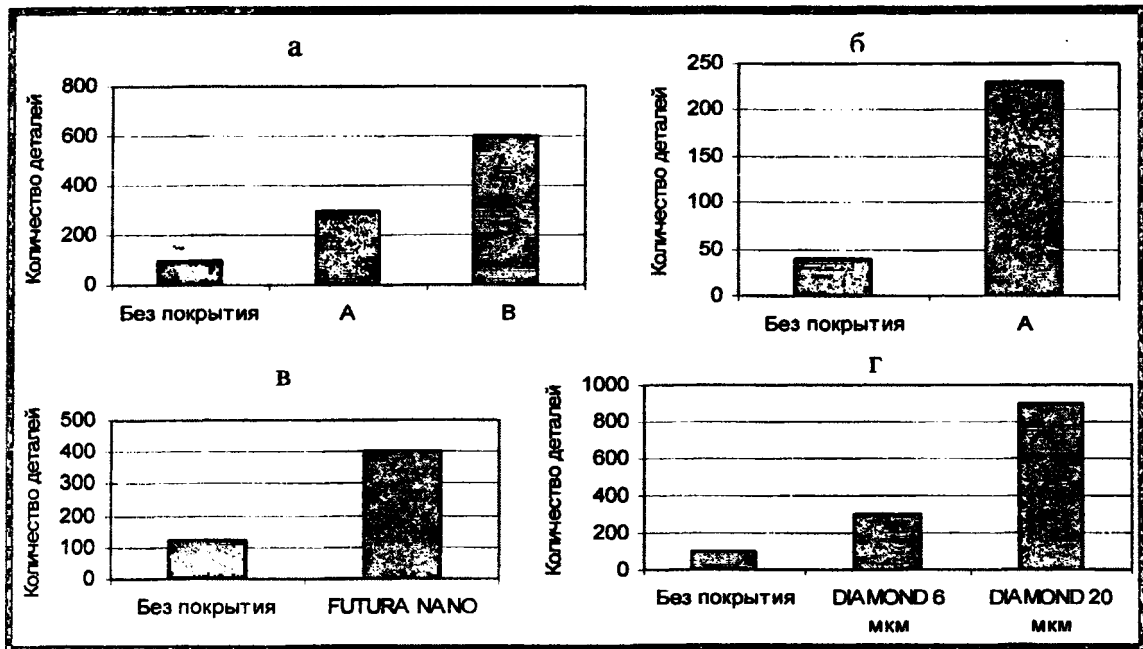


Рисунок 4 - Эффективность покрытий BALINIT при токарной обработке:
 а – прорезка канавок, сталь 20MnCr5; б – отрезка, сталь 42CrMo4;
 в – точение, сталь 25CrMo4; г – растачивание, армированный углепластик

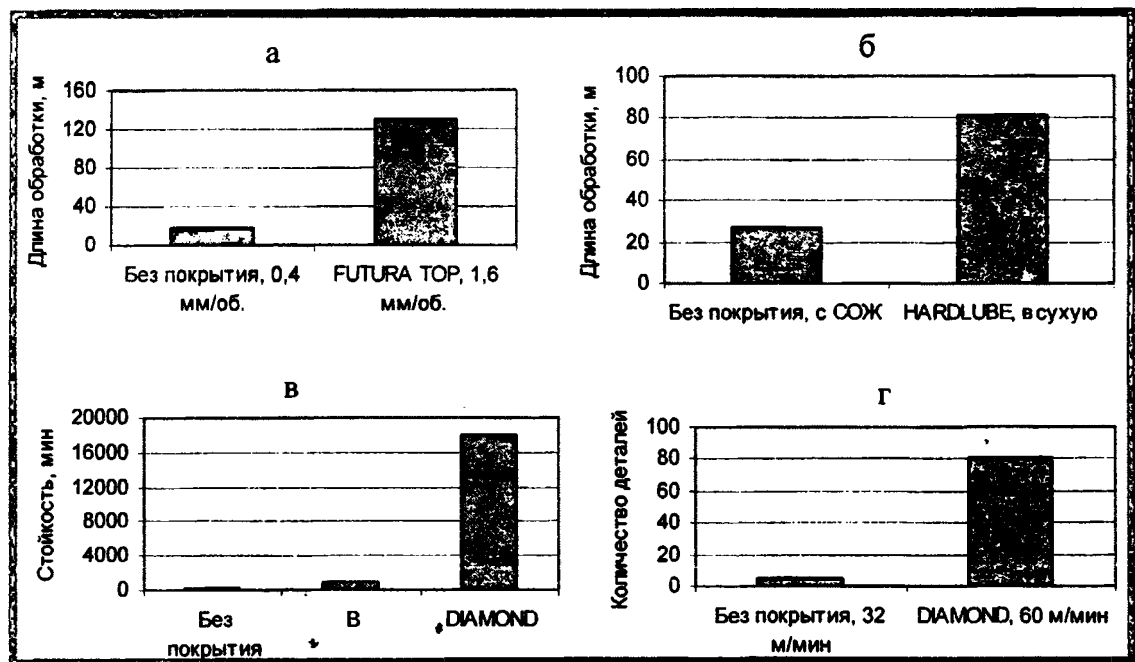


Рис. 5. Эффективность покрытий BALINIT при фрезеровании:
 а – сталь HRC 40; б – силумин AlZnMgCu1,5; в – графит; г – эпоксидная смола

На рис. 3 – 6 показана эффективность использования покрытий при обработке различных материалов и в различных условиях. Легко заметить, что правильный выбор покрытия позволяет повысить стойкость инструмента в 3 – 8 раз при обработке металлов точением, сверление, фрезерованием, в 10 – 20 и более раз при протягивании, резбо- и зубонарезании и в 9 – 75 раз при обработке неметаллических материалов. При этом одновременно возможно значительное, иногда в 6 раз, увеличение скорости резания и подачи, т.е. производительности обработки. Соответственно стоимость обработки детали снижается до 2 раз

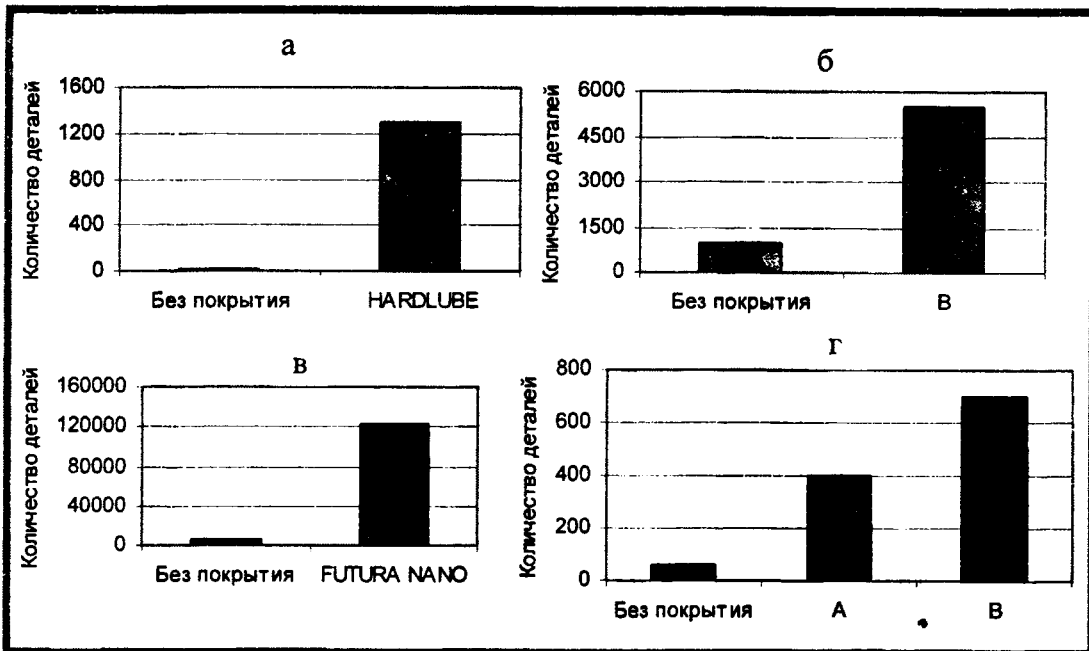


Рис. 6. Эффективность покрытий BALINIT при: а – нарезании резьбы метчиком, сталь 47MnCr4; б – развертывании, серый чугуи; в – протягивании, спеченный материал; г – нарезание зубьев червячной фрезой, сталь 28Cr4

ЛИТЕРАТУРА

1. Wysięcki M. Nowoczesne materiały narzędziowe. – Warszawa: WNT, 1997. – 172 s. 2. Klocke F., Kreig T. Coated Tools for Metal Cutting – Features and Applications// Annals of CIRP. – 1999. – Vol. 48. – № 2. – P. 515 – 525.

УДК 621.9.

Бачанцев А.И., Туромша В.И.

НАЗНАЧЕННАЯ СТОЙКОСТЬ ИНСТРУМЕНТА И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ПРИ ВЫБОРЕ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ НА ТОКАРНЫХ СТАНКАХ

*Белорусская государственная политехническая академия.
Минск, Беларусь.*

При назначении режимов обработки одним из важных показателей и наиболее часто ограничивающих увеличение параметров режима резания является стойкость - время работы инструмента (машинное время) до достижения предельно-допустимого износа [1].

Однако величина машинного времени не совсем точно отражает фактически выполненную работу для данного инструмента с точки зрения производительности.

Производительность при обработке резанием может определяться различными показателями [7] (длиной пути, пройденного инструментом за единицу времени, площадью обработанной поверхности, объемом снятого материала, машинным временем на операцию, количество одинаковых обработанных деталей за определенный промежуток времени и др.). Этими же показателями можно оценивать и стойкость инструмента.

Как известно зависимость стойкости T от параметров режима резания выражается следующей формулой:

$$T = \frac{C}{V^m * s^x * t^y} \quad (1)$$

Из теории резания [2], [3], для точения сталей средней твёрдости (45, 40 и др.), резцами с пластинами из твёрдого сплава, показатели степени будут следующие: $m=5 \div 3,3$; $x = 1$; $y=0,3 \div 0,5$;

Если учесть соотношения между данными показателями степени, то приближённо можно принять $y = 1$, $x \approx 2$, $m \approx 4$.

Следовательно, формула 2 будет выглядеть следующим образом:

$$T \approx \frac{C}{V^4 * s^2 * t^1} \quad (2)$$

Из формулы (4) следует, что на стойкость инструмента параметры режима резания действуют совершенно по-разному. Таким образом, при назначении режимов резания, для наименьшего влияния на стойкость, необходимо сначала увеличивать глубину резания, затем подачу и в последнюю очередь скорость или, говоря иначе, более всего на стойкость инструмента влияет увеличение скорости резания.

Если рассматривать черновую токарную обработку, то показателем производительности и стойкости можно принять объемом снятого материала в единицу времени.

Зависимость производительности, скорости резания и стойкости инструмента заставляет искать оптимальное их соотношение. Например, в работах [1-3] критерий производительности увязывают с периодом стойкости инструмента, как одним из факторов, влияющим на эффективность процесса резания.

$$T_Q = ((1-m)t_{cm})/m, \quad (3)$$

где T_Q – стойкость наибольшей производительности; t_{cm} – время смены инструмента; m – показатель относительной стойкости (для твердосплавных инструментов - $m = 0,2$ [1]).

Подразумевается, что, назначив период стойкости инструмента в соответствии с (3), при ранее выбранной максимальной глубине резания t и максимально-допустимой подаче s , мы получим скорость резания v , обеспечивающую наибольшую производительность обработки.

Снижать стойкость инструмента до минимума не рекомендуется, т.к. при низкой стойкости, преимущества, получаемые за счет уменьшения основного времени приводят к обратному результату в связи с простоями для смены инструмента. Поэтому вводится экономический критерий [2] оптимальности стойкости – стойкость, которая обеспечивает наибольшую производительность при заданных условиях обработки и наименьшую себестоимость обработки.

$$T_{\text{э}} = \left(\frac{1}{m} - 1 \right) \left(t_{cm} + \frac{Q_t + Q_n}{E} \right), \quad (4)$$

где Q_t - затраты, связанные с работой инструмента в течение одного периода стойкости (коп.); Q_n - Затраты, связанные с переточкой инструмента; E - стоимость одной станкоминуты, включая заработную плату рабочего; S_T - затраты, связанные с изготовлением и эксплуатацией режущих инструментов за период его стойкости.

На станках с ЧПУ с автоматической заменой инструментов $T_{\text{э}}$ рекомендуется назначать 15-25 мин [2; 3].

Современные производители инструмента, например, Sandvik Coromant, в своих каталогах по выбору режимов резания приводят значения скорости резания исходя из стойкости 15 мин.

Исходя из сказанного, при назначении режимов резания, сложилась существующая традиционная методика: учитывают характер обработки, тип и размеры инструмента, материал его режущей части, материал и состояние заготовки, тип и состояние оборудования и

затем назначают элементы режима резания. Для черновой обработки их обычно устанавливают в следующем порядке:

- ✓ назначают по возможности максимальную глубину резания t , равную всему припуску на обработку или большей части его;
- ✓ выбирают максимально возможную подачу s , исходя из жесткости и прочности системы СПИД, мощности привода станка, прочности твердосплавной пластинки и других ограничивающих факторов;
- ✓ скорость резания V рассчитывают по эмпирическим формулам;
- ✓ мощность резания, сравнивают с мощностью станка.

Между тем, при выбранных максимальными глубине резания и подаче, почти всегда встает вопрос о корректировке режимов, так как мощность резания превышает мощность станка. Возникает вопрос: останется ли период стойкости инструмента после корректировки режимов резания, равный выбранному?

Для того чтобы дать ответ на этот вопрос, выполним расчет режима резания при обработке поверхности $\varnothing 150$ мм с припуском на обработку $\delta=7$ мм для различных материалов и вычислим период стойкости инструмента. Рассмотрим случай, когда обрабатываемым материалом является углеродистая конструкционная сталь. Режущая часть - пластина с механическим креплением из твердого сплава Т15К6. Главный угол в плане $\varphi=93^\circ$. Глубина резания $t=6$ мм. По [1] подача $S=0,6...1,0$ мм/об. Принимаем $S = 0,8$ мм/об

◆ Скорость резания:

$$V = C_v K_v / (T^{m_v} t^{x_v} S^{y_v}) = 340 * 0,9 / T^{0,2} * 6^{0,15} * 0,8^{0,45}, \quad (5)$$

◆ Зададимся рядом значений периода стойкости, которые рекомендованы выше: $T=10; 20; 30; 60; 120; 240$ мин. Для них рассчитаем скорость резания (5) и сведем результаты в таблицу 1

◆ Мощность резания:

$$N_z = P_z V / (1020 * 60) = 10 C_{pz} t^{x_z} S^{y_z} V^{z_z} K_p / (1020 * 60), \quad (6)$$

При превышении мощностью резания мощностью привода главного движения ($N_p=8$ кВт) справочные пособия рекомендуют ограничить скорость резания, т.е. решить неравенство:

$$N_z \leq N_p, \quad (7)$$

где N_z – мощность резания, кВт;

N_p – мощность привода главного движения, кВт.

Подставив в (5) уравнение (6) можно выразить скорость резания для конкретной мощности оборудования:

$$V \leq (n_z + 1) \sqrt{\frac{61200 N}{C_{pz} \times t^{x_z} \times S^{y_z} \times K_p}}. \quad (8)$$

Рассчитаем мощность резания по формуле (6) и сведем результаты в таблицу 1.

Таблица 1. Обработка углеродистой стали

Заданный период стойкости T , мин	V , м/мин (5)	N_z , кВт (6)	ПЕРЕСЧИТАННЫЕ ДАННЫЕ		
			Произв. $Q_{теор}$, см ³ /мин	Скорость резания V , м/мин (8)	Фактическая стойкость T_f , мин (9)
10	163,2	18,90	783,2	59,3	1573,5
20	142,0	16,80	681,8	59,3	1573,5
30	131,0	15,68	628,7	59,3	1573,5
60	114,0	13,94	547,3	59,3	1573,5
120	99,3	12,39	476,4	59,3	1573,5
240	86,4	11,01	414,8	59,3	1573,5

Из таблицы видно, что с увеличением стойкости уменьшается скорость резания V и, как следствие, мощность. Но во всех случаях мощность резания превышает мощность привода станка. Из этого следует, что необходимо корректировать режимы резания и в первую очередь скорость. Пересчитаем скорость по формуле (8)

Используя полученную скорость резания (8), рассчитаем, период стойкости инструмента, который будет соответствовать полученным скоростям. Для этого используем выражение для стойкости, полученное из уравнения (5):

$$T = m_v \sqrt{\frac{C_v \times K_v}{V \times t^{x_v} \times s^{y_v}}} \quad (9)$$

Подставляя в (9) пересчитанные по формуле (8) значения скорости резания, получим значения фактической стойкости. Результаты заносим в таблицу 1.

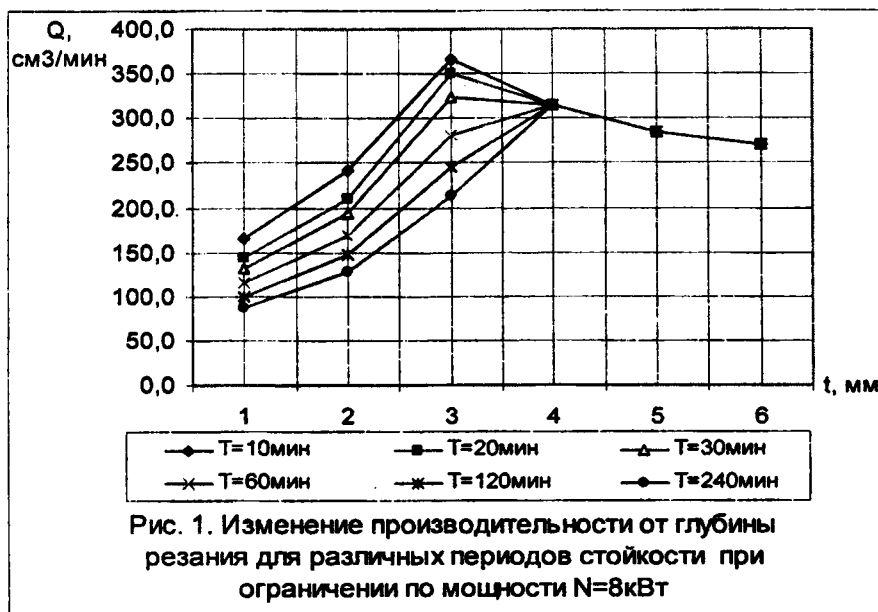


Рис. 1. Изменение производительности от глубины резания для различных периодов стойкости при ограничении по мощности $N=8\text{кВт}$

Для того чтобы проследить влияние стойкости на производительность рассмотрим зависимость производительности от глубины резания. Используя все вышеупомянутые формулы, заполняются таблицы 2 и 3, строится график (Рис. 1)

Таблица 2. Производительность при различной стойкости инструмента

Глубина резания t, мм	Производительность Q, см3/мин, при N=8кВт					
	T=10мин	T=20мин	T=30мин	T=60мин	T=120мин	T=240мин
0,5	164,8	143,5	132,3	115,2	100,3	87,3
1	241,3	210,1	193,7	168,6	146,8	127,8
2	366,0	350,0	322,7	281,0	244,6	212,9
4	314,0	314,0	314,0	314,0	314,0	314,0
6	284,8	284,8	284,8	284,8	284,8	284,8
8	270,7	270,7	270,7	270,7	270,7	270,7

Анализируя результаты таблиц 1 и 3 можно отметить, что заданный и фактический периоды стойкости совпадают лишь в том случае, когда режимы обработки не подвергаются корректировке, то есть мощность резания не превышает мощности оборудования. Для назначения режимов при ограничении по мощности уменьшение стойкости до "стойкости наибольшей производительности" эффективно лишь для малых глубин резания (до 2мм, смотри таблицу 3). Но данные величины глубины резания не характерны для черновой обработки.

Таблица 3. Фактическая стойкость после корректировки скорости

Глубина резания t , мм	Назначенная стойкость T , мин					
	$T=10$ мин	$T=20$ мин	$T=30$ мин	$T=60$ мин	$T=120$ мин	$T=240$ мин
	Фактическая стойкость, после корректировки					
0,5	10,0	20,0	30,0	60,0	120,0	240,0
1	10,0	20,0	30,0	60,0	120,0	240,0
2	16,0	20,0	30,0	60,0	120,0	240,0
4	318,1	318,1	318,1	318,1	318,1	318,1
6	1573,5	1573,5	1573,5	1573,5	1573,5	1573,5

На рисунке 2 видно, что теоретически термин “стойкость наибольшей производительности” оправдывает себя, так как меньшей назначенной стойкости соответствует наибольшая производительность в случае, если мощность не ограничена. Однако если имеется ограничение по мощности, то после корректировки скорости резания, производительность резко падает и фактическая стойкость далеко не соответствует назначенной. Кроме этого можно заметить, что, уменьшив стойкость в 24 раза (с 240 мин до 10 мин) производительность, увеличились только менее чем в два раза (с 414,8 см³/мин до 783,2 см³/мин) и только если нет ограничения по мощности. Когда вводятся ограничения по мощности (в нашем случае $N=8$ кВт) теряется весь смысл в данном подходе, так как после корректировки скорости резания скорость и производительность будут одинаковы как для назначенной стойкости 240 минут, так и для 10 мин.



Рис. 2. Изменения скорости и производительности от назначенного периода стойкости

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. – Т 1. Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. - 4-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1985. – 656с.
2. Ящерицын П.И. Еременко М.Л. Фельдштейн Е.Э. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах: Учеб. Для вузов. - Мн.: Выш. Шк., 1990. – 512с.
3. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов: Учебник для машиностр. и приборостр. Спец. вузов. - М.: Выш. Шк. 1985. - 304с.
4. Общемашиностроительные нормативы режимов резания: Справочник: в 2-х т.: Т. 1/ А.Д. Локтев, И.Ф. Гушин и др. - М.: Машиностроение, 1991. – 640с.
5. CoroSecy . Руководство по повышению производительности. Точение – фрезерование - сверление., Каталог SANDVIK COROMANT, 6-е издание 2000. – 216 с.
6. Общемашиностроительные нормативы режимов резания резцами с механическим креплением многогранных твердосплавных пластин. Обработка на станках с ЧПУ. Серийное и мелкосерийное производство - М.: НИИМаш, 1978. – 56с.
7. Шарин Ю.С. Технологическое обеспечение станков с ЧПУ. – М.: Машиностроение, 1986. – 176 с.

ПРОЧНОСТЬ РАСТЯНУТЫХ БОЛТОВ СОЕДИНЕНИЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Болтовые соединения строительных конструкций, воспринимающие продольные растягивающие усилия, рассчитываются в предположении их центрального растяжения [1,2]. Опыт эксплуатации болтовых соединений показывает, что опорные участки болтов таких соединений часто работают на растяжение с изгибом. При этом к возникновению деформаций изгиба приводят как неточности изготовления головки болта, гайки и корпусной детали (стержня) относительно оси резьбы, так и небольшие взаимные перемещения соединяемых элементов (фланцев и т.д.). В работе [3] показано, что вследствие технологических факторов (односторонняя неполная формовка опорной поверхности головки в процессе горячей высадки, перекося смежной опорной поверхности, несоосность элементов соединения и т.д.) угол перекося поверхности опирания головки узловых болтов структурных конструкций типа «МарХИ» изменяется от 0 до 5°. Смещения элементов фланцевого соединения строительных конструкций приводят к появлению дополнительных изгибающих напряжений в опорных участках болта и могут вызывать обрыв болта [4]. Различные исследователи показали, что реальные условия работы резьбовых соединений наиболее близко к действительности отображает их расчетно-экспериментальная модель как растянуто-изогнутого элемента [5-7,11]. Было установлено, что определять конструктивную прочность болтов только с использованием стандартных механических характеристик материала (предел текучести, временное сопротивление) болта явно недостаточно. Для этого необходимо учитывать комплексное действие его формы, особенностей материала, условий нагружения, чувствительность к надрезу и другие технологические и эксплуатационные факторы. Испытания болтов на растяжение с перекосям (внецентренное растяжение) впервые были предложены Маттесом в 1938г. [5]. Последующие испытания болтов из различных материалов выявили особенности проявления конструктивной прочности внецентренно растянутых болтов, применяемых в основном для машиностроительных конструкций [8]. Отдельные исследования работоспособности растянутых болтов строительных конструкций также показали сложный характер проявления конструктивной прочности этих болтов [3,9]. Исследования ЦНИИСК им.Кучеренко [9] позволили сформулировать одно из основных условий надежной работы болта в строительной конструкции, а именно: наличие достаточной пластичности болта, работающего на растяжение, особенно при низких температурах или динамических воздействиях. При этом было показано, что пластичность болта в основном определяется технологией его изготовления и последующей термообработкой. Существующая практика определения механических свойств болтов и их испытаний регламентируется ГОСТ 1759.4-87, согласно которому контроль механических свойств болтов следует проводить по программам А или В. Программа А применяется для испытания болтов со специальной конструкцией головки или стержня, менее прочной, чем резьбовой участок, а также образцов, полученных механической обработкой, и изделий, площадь сечения стержня которых меньше номинальной площади сечения резьбового участка (т.е. в основном для образцов, вырезанных из болтов). Программа В применяется для испытаний болтов, винтов и шпилек с диаметром резьбы более 4 мм и длиной

резьбы не менее 2,5 номинального диаметра резьбы и является предпочтительной для всех изделий и обязательной для изделий с разрывной нагрузкой менее 500кН (50тс). По программе В проводят следующие виды испытаний болтов: на растяжение; измерения твердости; испытания пробной нагрузкой; на разрыв на косо́й шайбе; на прочность соединения головки со стержнем; на обезуглероживание; на повторный отпуск; контроль качества поверхности. Пластичность болта по ГОСТ 1759.4-87 можно оценивать по данным определения относительного удлинения δ_5 на растягиваемых цилиндрических пятикратных образцах, выточенных из исследуемых болтов. В статье [9] показано, что такой способ оценки пластичности болта не дает удовлетворительных результатов, так как при токарном изготовлении образца из болта устраняется влияние конструктивных и технологических факторов, существенно сказывающихся на пластичности болта.

Однако, анализ существующей практики определения механических характеристик болтов строительных конструкций показывает, что до сих пор встречаются случаи отклонения от требований ГОСТ 1759.4-87, особенно на стадиях проектирования и изготовления новых конструкций, расследования аварий с разрывом болтов, проектирования и изготовления конструкций усиления зданий и сооружений с использованием резьбовых соединений. Так, при анализе аварий с разрывом болтов, вместо испытаний по ГОСТ 1759.4-87 иногда пытаются ограничиться лишь металловедческими исследованиями материала болтов (анализ элементного состава, исследование структуры материала; испытания на растяжение по ГОСТ 1497-84 и т.д.). Такие исследования являются несомненно полезными при металловедческом анализе материала болтов, выяснении технологических особенностей его изготовления и обработки, макро- и микроскопическом исследовании дефектности материала в областях, примыкающих к излому, но эти исследования не позволяют, как правило, рассчитать или определить сопротивляемость болта (резьбового соединения) как изделия конкретным воздействиям и нагрузкам. Поэтому для работающих на растяжение болтов для строительных конструкций испытания по программе В согласно ГОСТ 1759.4-87 являются решающими.

Целью настоящего исследования является получение и анализ экспериментальных данных по прочностным характеристикам работающих на растяжение болтов строительных конструкций, их составу и анализ полученных данных для выработки рекомендаций по их изготовлению, расчету, эксплуатации и анализу их работоспособности.

Для экспериментальных исследований принимались болты, удовлетворяющие требованиям СНиП II-23-81* и СНиП 2.05.03-84, и наиболее часто применяемые в работающих на растяжение болтовых соединениях элементов конструкций зданий и сооружений. Часть исследуемых болтов (серия 1) изготавливались в процессе токарной обработки заготовок, другие болты (серия 2) испытывались в состоянии поставки (болты изготавливались по технологии фирмы «Peiner»). Химсостав и механические характеристики материалов экспериментальных болтов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики материала экспериментальных образцов №№ 2,8,13

№ п.п	Диаметр стержня (резьбы) болта, мм	Способ изготовления	Химический*) состав, %					Механические**) свойства		
			С ***)	Si ***)	Mn ***)	Cr ***)	Ni ***)	$\sigma_{0,2}$ МПа	σ_b , МПа	δ , %
2	20,1 (17,5)	«Peiner»	32	9	89	135	До 20	866,1	1048, 6	6
8	19,7 (18,0)	Резание	43	30	66	10	До 20	497,5	604,4	7
13	19,8 (17,3)	Резание	49	35	60	13	До 20	571,4	682,6	6

Примечания. *)- элементный состав исследовался на атомно-эмиссионном спектрометре «ЭМАС-200Д»; **) – испытание на растяжение проводилось по ГОСТ 1497-84 на универсальной испытательной машине «Instron 1195(Англия)»; ***) – увеличенное в 100раз;

Испытания обеих серий болтов проводились на машине EU-100 с использованием специально разработанных захватов. Болты испытывались с обеспечением трех типов опирания гаек на плоскость нагружения: 0;6;10 градусов и с различными скоростями нагружения. Нагружение при 6 и 10 градусах осуществлялось через косые шайбы. Измерения геометрических параметров образцов до и после испытания проводились штангенциркулем. Для измерения температурного поля поверхности болтов в стадии предразрушения и в момент разрыва использовался термограф «Иртис-200И».

Данные механических испытаний болтов сведены в таблицу 2, изломы образцов показаны на рис.1.

Таблица 2. Характеристики испытанных болтов

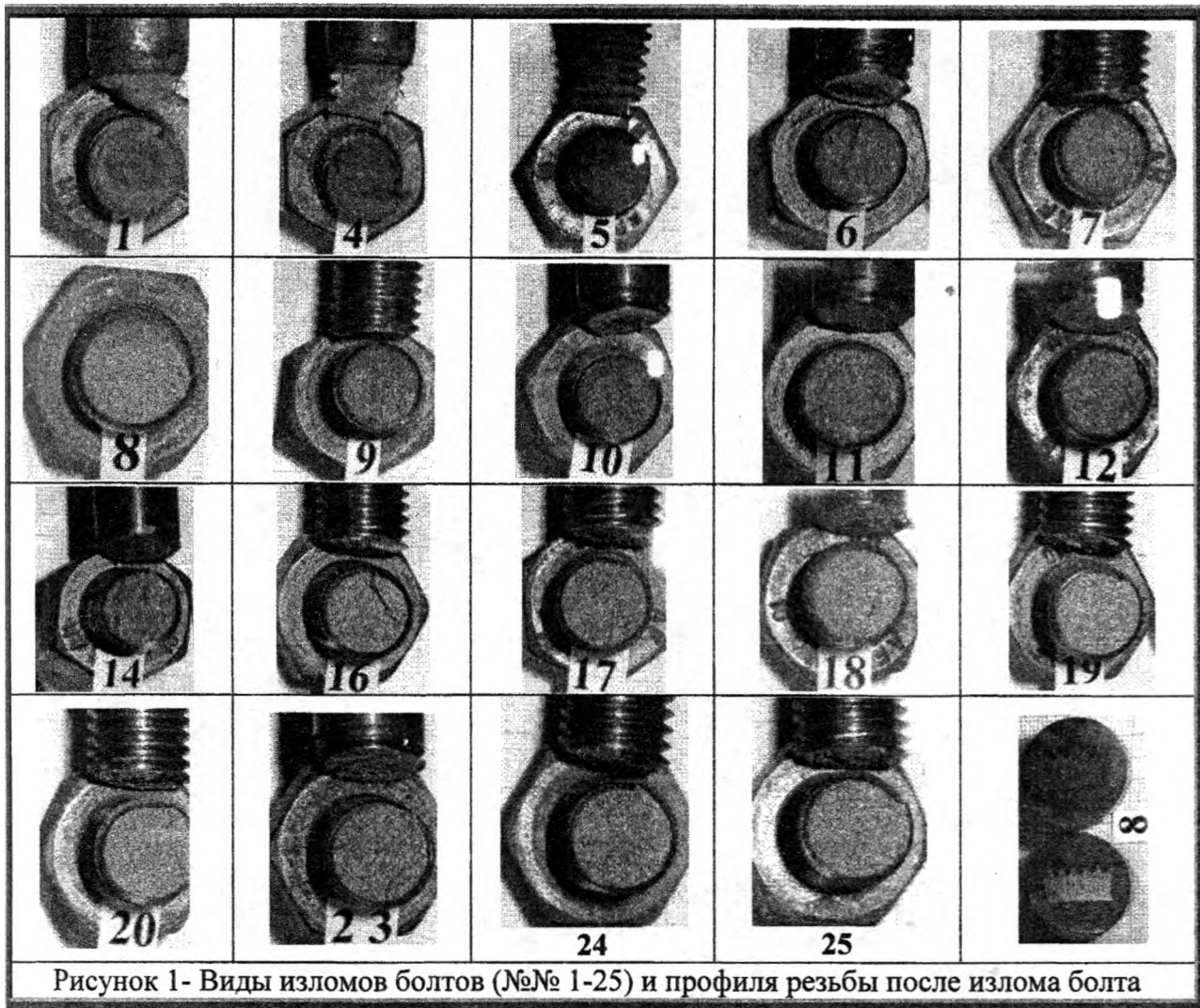
№ серии-болта	Диаметр, мм		Скорость нагружения болта, кН/сек	Разрушающая нагрузка, кН	Временное сопротивление, σ_b , МПа	Относительное удлинение стержня болта/сужение резьбы, %	Примечания (угол, очаг зарождения трещины)
	стержня	резьбы					
1-1	19,4	17,2	100	281	1210,0	0,7/2,6	0°, резьба
1-2	18,9	17,0	-	274 ^{*)}	1207,8	-/-	0°, резьба
1-3	19,0	17,5	-	212 ^{**)}	881,8	-/-	10°, резьба
1-4	19,3	17,0	300	279	1229,8	0,4/11,8	0°, резьба
1-5	20,0	17,0	-	274	1207,8	0,4/10,6	0°, резьба
2-6	19,8	17,4	0,2	172	757,5	3,0/9,2	0°, резьба
2-7	20,1	17,5	0,2	154	670,5	-/9,4	6°, резьба
2-8	19,5	17,4	0,2	154	678,2	-/7,5	10°, резьба
2-9	20,0	17,5	0,2	144	626,9	-/7,7	10°, резьба
2-10	19,9	17,0	10	156	719,7	-/4,1	0°, резьба
2-11	19,8	17,5	100	164	714,0	-/0,9	0°, резьба
2-12	19,8	17,3	50	175	779,6	-/4,0	0°, резьба
2-13	19,7	18,0	10	170	699,6	-/-	0°, резьба
2-14	19,7	17,5	8,5	162	705,3	-/3,7	6°, резьба
2-15	19,4	17,0	0,1	164	756,6	0,7/3,8	0°, резьба
2-16	19,6	17,2	1	156	703,1	2,5/4,7	10°, резьба
2-17	19,8	17,5	1	151	657,4	1,5/7,7	6°, резьба
2-18	19,8	17,3	50	145	646,0	1,4/5,5	10°, резьба
2-19	19,7	17,5	10	151	657,4	3,8/5,3	10°, резьба
2-20	19,9	17,8	30	171	719,6	2,9/8,7	6°, резьба
2-21	19,7	17,7	90	124	527,7	-/-	10°, резьба
2-22	19,7	17,5	9	176	766,3	-/-	6°, резьба
2-23	19,5	17,3	0,2	174	775,2	-/5,2	0°, резьба
2-24	19,8	17,7	20	172	732,0	-/8,2	10°, резьба
2-25	19,0	16,4	0,2	157	778,3	-/0,6	10°, резьба

Примечания . ^{*)}-срез резьбы; ^{**)}-срыв резьбы.

Из таблицы 2 следует, что временное сопротивление болтов существенно зависит от величины угла между плоскостью опорной поверхности гайки и плоскостью нагружения и от величин скоростей нагружения. Так, при статическом нагружении применение косых шайб со скосом в (6-10)⁰ приводит к уменьшению временного сопротивления на (12,5-9)% (здесь и далее сравнение ведется с данными испытаний при статическом нагружении и 0-вом угле). Увеличение скорости нагружения до 10кН/сек приводит к снижению временного сопротивления на (3,6-9)%. При росте скорости нагружения до 50 кН/сек временное сопротивление при 0-м угле возрастает на 2%, а при 10⁰-на 15% уменьшается. При испытании со скоростью

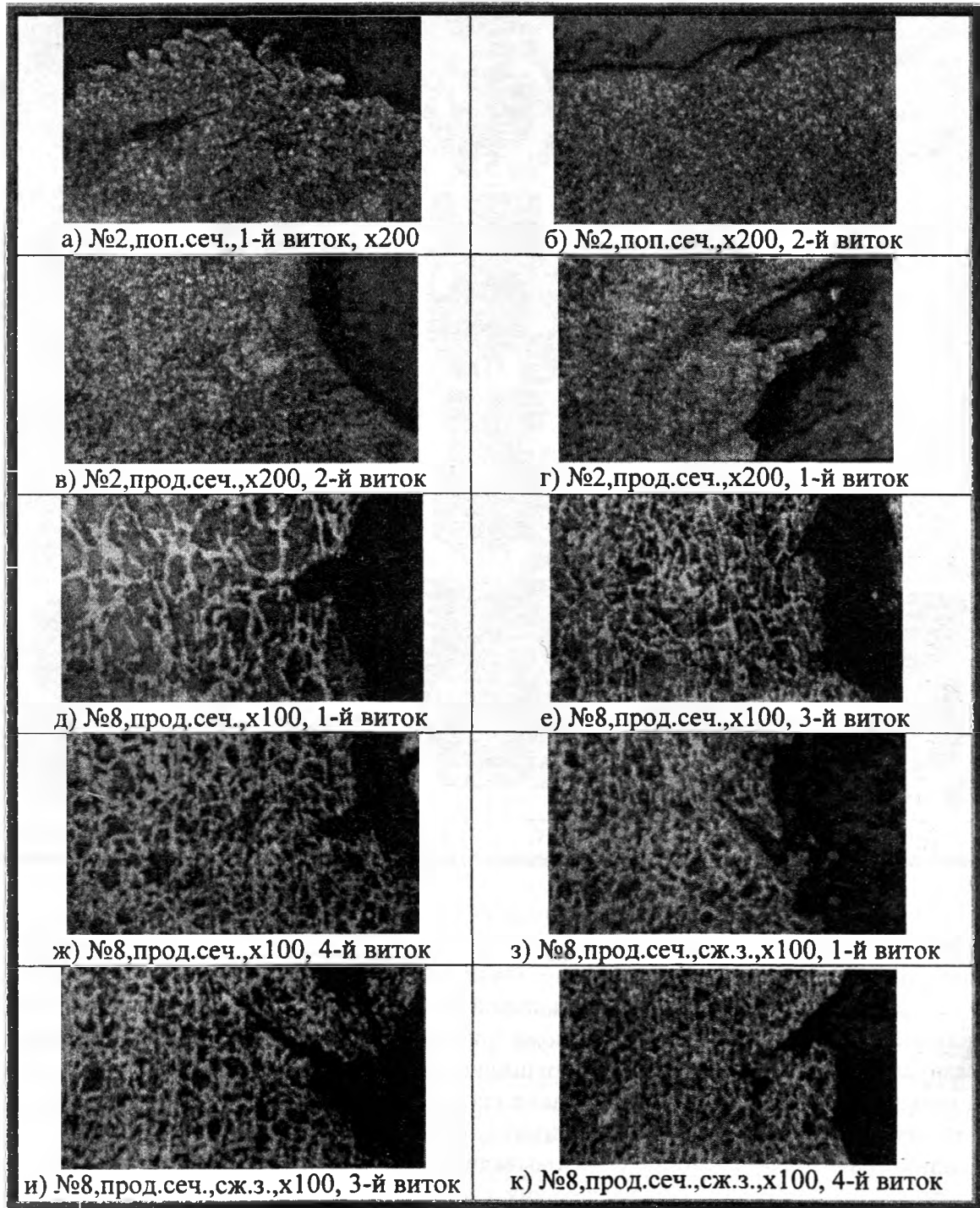
нагрузки 100кН/сек происходит уменьшение прочности: при 0-м угле - на 6%; при 10° - на 31%.

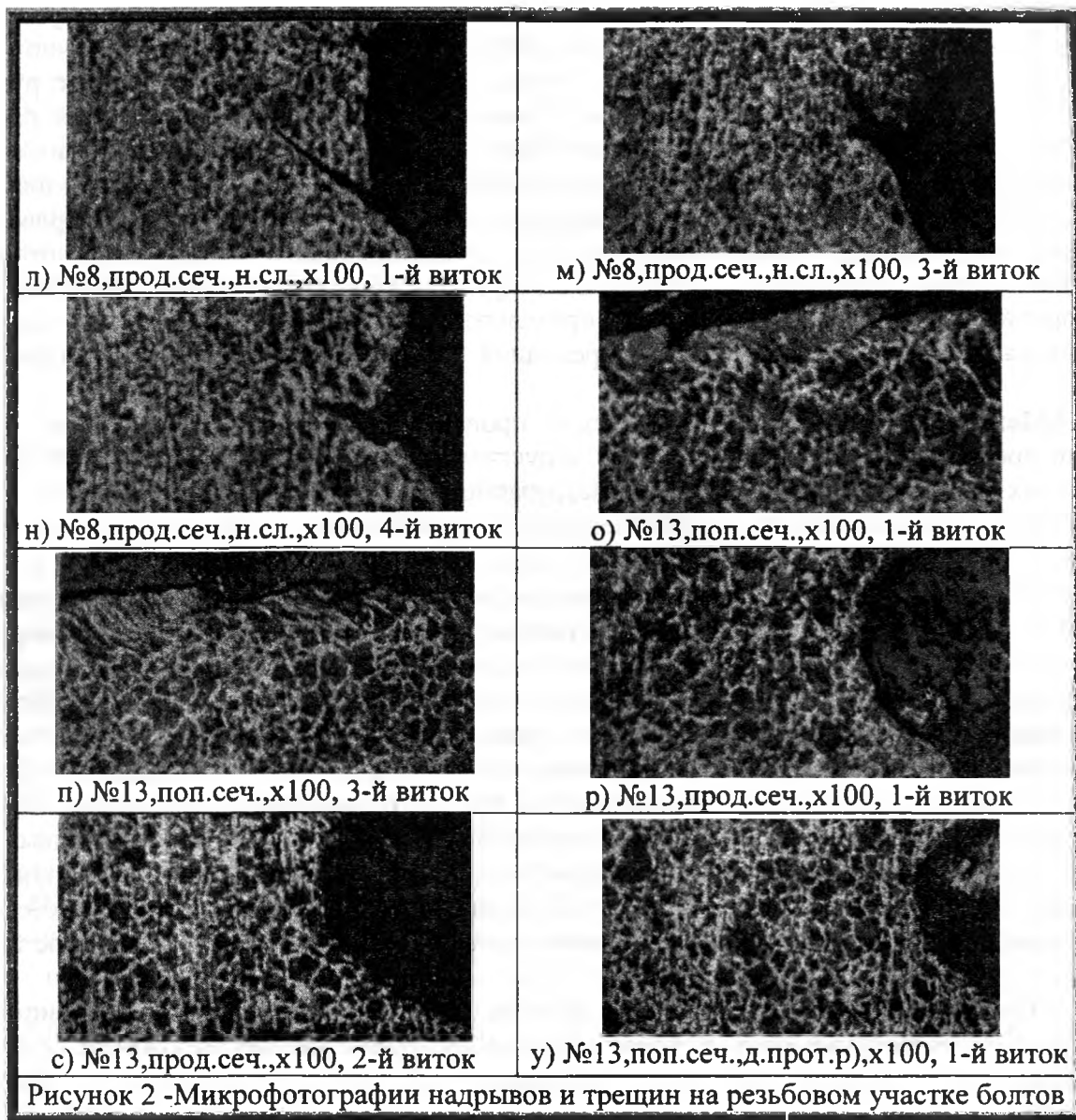
Остаточное удлинение стержня болта (от головки до начала резьбовой части) небольшое. В стадии предразрушения и разрыва все удлинение стержня обеспечивалось участком резьбы между гайкой и началом нарезки резьбы. Наибольшее удлинение резьбовой части наблюдалось у образцов 1-й серии. Образцы 2-й серии разрушались хрупко с незначительным удлинением резьбовой части. Более чувствительной к действию скорости нагружения и перекоксу является относительное сужение в месте излома.



Изломы болтов 1-й серии происходили сколом, а изломы болтов 2-й серии имеют все признаки хрупкого разрушения. Макроскопически изломы образцов 1-й серии характеризуются матовой, шероховатой поверхностью. На изломах образцов №№ 6-10 хорошо просматриваются две зоны: зародившиеся в начальной стадии нагружения серповидные трещины (вида «луны» в разных фазах) и зоны долома (рис.1). Долом происходил по механизму хрупкого разрушения. Остальные болты разрушились хрупко с неразличимой невооруженным глазом серповидной трещиной. При больших скоростях нагружения «луна» была молодой, а при статическом нагружении «луна» на изломе образцов становилась более полной (рис.1). Серповидные начальные трещины образовывались только в образцах нагружаемых статически (образцы 6-10 и другие). При маленьких скоростях нагружения серповидные трещины охватывали значительную часть площади поперечного сечения прежде чем их длина становилась критической. При действии статической нагрузки они развивались с равномерной скоростью. Видимо, со снижением скорости приложения нагрузки время их роста будет воз-

растать, а процесс разрушения будет замедленным. Природа такого разрушения недостаточно изучена [6,10,11]. В работе [10] отмечается, что возникновению такого замедленного разрушения способствуют факторы, вызывающие неоднородное развитие деформации и уменьшающие пластическую энергоёмкость (хрупкий слой на поверхности изделия, остаточные напряжения, риски от механической обработки, дефекты поверхности, маленькие радиусы закруглений и др.). Вероятность замедленного разрушения болтов возрастает с увеличением диаметра болта, особенно при постановке болта с перекосом [10]. Все очаги зарождения разрушения располагались во впадинах резьбы. Образующиеся серповидные трещины не имеют усталостных признаков.





Микрофотографии резьбовых участков болтов №№2,8,13 приведены на рис.2. Сопоставление изображений между собой показывает, что в более пластичном металле болта №2 при растяжении образуются мелкие надрывы незначительной протяженности. Для менее пластичного материала болтов №№8,13 во впадинах резьбы образуются единичные трещины, идущие в центральную часть стержня.

Весьма показательными являются данные замеров температуры поверхности образцов у изломов. Так, средняя температура в месте излома образцов 1-й серии достигала 40-50°C. Причем такая температура фиксировалась не только по поверхности излома, а по всей области пластического течения металла, где происходило заметное сужение поперечного сечения. Для образцов 2-й серии среднюю температуру у излома было сложно фиксировать из-за ее быстрого уменьшения во времени. Всплеск температуры у этих образцов наблюдался только непосредственно в плоскости излома (до 10-15°C), сталь смежных сечений практически не изменяла температуры. С повышением скорости нагружения температура поверхности излома образцов обеих серий заметно увеличивалась.

ВЫВОДЫ.

1. При проектировании и изготовлении болтовых соединений строительных конструкций, работающих в растянутых зонах, следует особое внимание уделять назначению материала болтов, технологии их изготовления, технологии последующей термообработки и

установки в проектное положение. Пригодность болтов для таких соединений следует определять по данным их испытаний по программе «В» ГОСТ 1759.4-87 в аккредитованном подразделении. При проектировании и изготовлении болтовых соединений следует руководствоваться принципом: болты в соединениях конструкций должны быть не менее работоспособны, чем другие элементы конструкций. При выборе материала болтов при одинаковых прочностных характеристиках предпочтение следует отдавать материалу с лучшей пластичностью. Изготовление резьбы следует производить методом накатки на специализированных производствах. Головку болта целесообразно образовывать горячей высадкой или штамповкой с обеспечением необходимой кривизны в закруглениях и обеспечением проектной формы опорной поверхности. Целесообразно применять мероприятия по уменьшению концентраторов напряжений и деформаций в переходной зоне между стержнем болта и началом резьбы.

2. Монтаж болтовых соединений следует производить в полном соответствии с требованиями проекта производства работ и не допускать дополнительных перекосов болта, динамических воздействий, неравномерного нагружения отдельных болтов соединения.

3. Для предотвращения неопределенностей в требованиях по проектированию растянутых болтов в действующие строительные нормы следует внести изменения. Так, в СНиП II-23/81*[1] п.11.6 целесообразно дополнить предложением: «Болты, нагруженные растягивающей эксцентричной нагрузкой, следует рассчитывать по формулам сложного сопротивления». В таблице 57*[1] примечания 2 и 3 необходимо объединить и изложить в следующей редакции: «В рабочих (КМ) и детализовочных (КМД) чертежах стальных конструкций и в документации на заказ следует указывать материал и дополнительные требования к испытаниям болтов всех классов прочности в соответствии с ГОСТ 1759.4-87». Пункт 1.4[1] целесообразно завершить фразой: «...эксплуатации и расчетных аварийных ситуациях, выявляемых в процессе анализа предельных состояний». Аналогичные уточнения необходимо внести и в соответствующие подпункты пунктов 1.1 и 4.2[12]. Требуется уточнения и пункт 1.2 СНиП III-18-75[13]. Первый абзац пункта 1.2[13] необходимо дополнить фразой: «Чертежи КМД разрабатывает предприятие-изготовитель или по согласованию с ним предоставляет заказчик».

4. Предотвращению аварийных ситуаций в строительных конструкциях, инициируемых разрывом растянутых болтов, послужит и повышение качества подготовки специалистов, участвующих в проектировании, изготовлении, монтаже, эксплуатации и устранении последствий аварий строительных конструкций. Для этого в учебных планах общетехнических дисциплин для студентов строительных специальностей следует предусмотреть часы на изучение соответствующих разделов механики разрушения, а при изучении дисциплины «Металлические конструкции» - анализировать на примерах аварий типичные предельные и аварийные состояния конструкций и сооружений.

ЛИТЕРАТУРА.

1. СНиП II-23/81*. Стальные конструкции/Госстрой России.-М.: ГУП ЦПП, 2003.-90с.
2. Металлические конструкции. В 3т. Т.1. Элементы стальных конструкций: Учебное пособие для строит. вузов/ В.В.Горев, Б.Ю.Уваров, В.В.Филиппов и др..-М.: Высш.шк., 1997.-527с.
3. А.В.Сильвестров, Г.Г.Чибряков, Е.А.Мойсейчик. Прочность болтов узловых соединений структурных конструкций типа «МарХИ» при низких температурах// Надежность конструкций в экстремальных условиях. Сб.статей.-Якутск: Изд-во ЯГУ.-1984. с.77-82.
4. Аугустин Я., Шледзевский Е. Аварии стальных конструкций. Пер. с польск. М.: Стройиздат, 1978.-183с.
5. С.Е.Беляев. Исследование прочности болтов при растяжении с перекосом// Заводская лаборатория. 1945. №6. с.604-614.
6. В.В.Петько. Лабораторные методы оценки склонности стальных болтов к хрупкому разрушению со временем// Заводская лаборатория. 1956. №2. с.218-225.
7. И.А.Биргер. Расчет резьбовых соединений. - М.:Гос.изд-во оборонной промышленности.-1959.-252с.
8. Якушев А.И., Мустаев Р.Х., Мав

лютов Р.Р. Повышение прочности и надежности резьбовых соединений.-М.: Машиностроение,1979.-215с. 9. Потапов В.Н., Мищик Б.С. Оценка работоспособности болтов, работающих на растяжение в стальных конструкциях// Промышленное строительство.-1982.- №5.- с.23-25. 10.Гордеева Т.А., Жегина И.П. Анализ изломов при оценке надежности материалов.-М.: Машиностроение,1978.-200с. 11. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. Ч.1. Механические испытания. Деформация и разрушение.-М.:Машиностроение,1974.-472с. 12. СНиП 2.05.03-84. Мосты и трубы / Госстрой СССР.-М.:ЦИТП Госстроя СССР, 1998. – 200с. 13. СНиП III-18-75. Правила производства и приемки работ. Металлические конструкции / Госстрой СССР.-М., 1976. -161с.

УДК 629.113-587

Дубовик Д.А.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КРИВОЛИНЕЙНОГО ДВИЖЕНИЯ КОЛЕСНЫХ МАШИН

*Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси
Минск, Беларусь*

Введение. Криволинейное движение колесной машины в общем случае реализуется в результате управляющего воздействия водителя на рулевое колесо. Моделирование криволинейного движения основывается на математическом описании процессов воздействия на рулевое колесо и связанного с этим поворота управляемых колес.

В теории колесных машин криволинейное движение представляется совокупностью поворотов, характеризующихся вероятной кривизной и длиной траектории [1].

Процесс отдельного поворота машины в общем случае рассматривается в виде трех последовательных этапов [2, 3, 4 и др.]. Первый этап связан с увеличением кривизны траектории – переходом от прямолинейного движения к криволинейному (вход в поворот), второй этап характеризуется движением машины с постоянной кривизной (равномерный поворот), третий этап заключается в уменьшении кривизны траектории – возвращении к прямолинейному движению (выход из поворота). В частном случае второй этап может отсутствовать.

При изучении неустановившегося поворота и динамической поворачиваемости машин процесс поворота рулевого и управляемых колес на характерных этапах обычно представляется с помощью линейных зависимостей [2, 4, 5, 6, 7 и др.]. Это при переходе от одного этапа к другому приводит к воспроизведению при моделировании управляющих воздействий скачкообразного изменения скорости поворота управляемых колес, недостижимого при реальном управлении водителем колесной машиной, а также к трудностям применения теории нелинейного бокового увода [8] при моделировании неустановившегося криволинейного движения.

Целью настоящей работы явилась разработка математической модели криволинейного движения колесных машин с нелинейным управляющим воздействием, обеспечивающей более высокую сходимость расчетных значений с экспериментальными данными, чем известные из научно-технической литературы.

Моделирование управляющего воздействия на рулевое колесо. Для моделирования блока управляющих воздействий на рулевое колесо проанализируем экспериментальные данные [9], полученные при выполнении входа в поворот и движения колесной машины по синусоидальной траектории со скоростью 8,9 м/с.

Анализ экспериментальных данных (рис. 1) показывает, что реализуемые в действительности законы управляющего воздействия носят непрерывный характер, исключая скачкообразное изменение скорости поворота рулевого колеса. Причем, максимальная ско-

рость поворота рулевого колеса, как правило, наблюдается на участках, равноудаленных от его крайних положений.

Результаты проведенного анализа позволили в качестве функциональной зависимости для моделирования численных значений углов α_d поворота рулевого колеса при криволинейном движении колесной машины предложить зависимость следующего вида:

$$\alpha_d = \alpha_{d \max} \sin^2(a_1 t + a_0), \quad (1)$$

где $\alpha_{d \max}$ – максимальное значение угла поворота рулевого колеса; a_1 и a_0 – коэффициенты нелинейного уравнения регрессии.

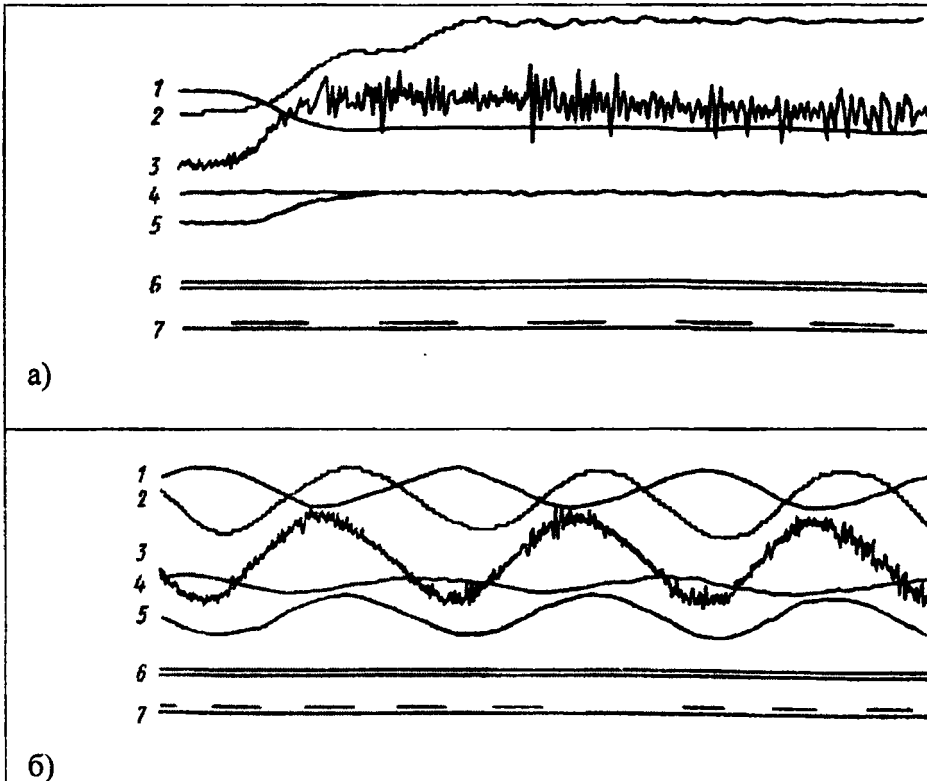


Рис. 1. Осциллограмма изменения параметров колесной машины при входе в поворот а) и движении по синусоидальной траектории б) со скоростью 8,9 м/с [9]: 1 – угол поворота рулевого колеса; 2 – угол крена; 3 – боковое ускорение; 4 – угловая скорость крена; 5 – угловая скорость поворота; 6 – поступательная скорость; 7 – время

Регрессионный анализ показал, что предложенная функциональная зависимость позволяет с коэффициентом корреляции не менее 0,99 описывать процесс поворота рулевого колеса при осуществлении моделирования вход в поворот или в другой маневр и выхода из них: В отличие от линейной зависимости, нелинейная зависимость (1) позволяет с более высоким на 0,02 коэффициентом корреляции рассчитывать значения углов поворота рулевого и управляемых колес и исключить недостижимое в действительности скачкообразное изменение скорости их поворота.

Таким образом, зависимости для расчета углов поворота рулевого колеса при моделировании движения колесной

машины при выполнении маневра "вход поворот" или входа в маневр с несколькими управляющими циклами и маневра "выход из поворота" или выхода из маневра с несколькими управляющими циклами окончательно принимают следующий вид: для маневра "вход в поворот" или входа в маневр с несколькими управляющими циклами

$$\alpha_d = \alpha_{d \max} \sin^2(Tt); \quad 0 < t < 0,5\pi/T, \quad (2)$$

для маневра "выход из поворота" или выхода из маневра с несколькими управляющими циклами

$$\alpha_d = \alpha_{d \max} \cos^2(Tt); \quad 0 < t < 0,5\pi/T, \quad (3)$$

Для составления зависимостей для расчета углов поворота рулевого колеса при моделировании маневра "переставка" и движения по синусоидальной траектории с несколькими управляющими циклами на различных участках с позиции обеспечения одинаковой интенсивности управления

необходимо координировать численные значения коэффициентов a_1 и a_0 зависимости (1) с численными значениями коэффициентов b_1 и b_0 зависимости следующего вида:

$$\alpha_d = \alpha_{d \max} \sin(b_1 t - b_0). \quad (4)$$

С этой целью численные значения коэффициентов a_i и b_i в уравнениях (1) и (4) определялись из условия обеспечения равенства скорости поворота рулевого колеса ($\dot{\alpha}_d = \text{const}$) в моменты времени, соответствующие углам поворота $\alpha_d = \pm 0,5\alpha_{d \max}$.

Выполненные в рамках настоящего раздела исследования позволили предложить следующие зависимости для расчета углов поворота рулевого и управляемых колес при моделировании криволинейного движения колесной машины при выполнении маневра "смена полосы движения" ("переставка") и маневра "змейка" (движении по синусоидальной траектории):

для маневра "смена полосы движения" ("переставка"):

$$\begin{cases} \alpha_d = \alpha_{d \max} \sin^2(Tt), & 0 < t < 0,5\pi/T ; \\ \alpha_d = \alpha_{d \max} \sin(1,3Tt - 0,6\pi), & 0,5\pi/T < t < 2,538\pi/T ; \\ \alpha_d = -\alpha_{d \max} \sin^2(Tt - 0,769\pi), & 2,538\pi/T < t < 3,538\pi/T . \end{cases} \quad (5)$$

для маневра "змейка" (движения по синусоидальной траектории):

$$\begin{cases} \alpha_d = \alpha_{d \max} \sin^2(Tt), & 0 < t < 0,5\pi/T ; \\ \alpha_d = \alpha_{d \max} \sin(1,3Tt - 0,6\pi), & 0,5\pi/T < t < (0,769m + 0,5)\pi/T ; \\ \alpha_d = -\alpha_{d \max} \sin^2(Tt - 0,769\pi m), & (0,769m + 0,5)\pi/T < t < (0,769m + 1)\pi/T . \end{cases} \quad (6)$$

где T – временной параметр моделируемого маневра (для маневров "вход в поворот", "выход из поворота" и "переставка" соответствует времени выполнения маневра); m – целое нечетное число, определяющее количество управляющих циклов маневра змейка: $0,5(m + 1)$. Для маневра "переставка" $m = 1$.

Таким образом, предложенные в настоящем разделе зависимости (2), (3), (5) и (6) позволяют рассчитать углы поворота рулевого и управляемых колес с более высокой сходимостью расчетных значений с экспериментальными данными и повысить адекватность математической модели при исследовании динамики криволинейного движения колесной машины.

В качестве примера использования полученных зависимостей для расчета углов поворота рулевого и управляемых колес рассмотрим результаты моделирования криволинейного движения внедорожной машины МЗКТ-79091 с колесной формулой 8x8 полной массой 43,5 т при выполнении маневра "смена полосы движения" на грунтовой опорной поверхности удовлетворительного состояния.

Результаты исследований. Для моделирования криволинейного движения внедорожной машины МЗКТ-79091 воспользуемся математической моделью [10], составленной на основе уравнений движения в форме Аппеля.

Для случая моделирования движения внедорожной машины с колесной формулой 8x8 и двумя передними управляемыми мостами уравнения криволинейного движения принимают следующий вид:

$$m_v(\delta, \ddot{\pi}_1 - \dot{\pi}_2 \dot{\pi}_3) = \sum_{i=1}^4 [(P'_{ki} - P'_{fi}) \cos \alpha'_j - P'_{li} \sin \alpha'_j + (P''_{ki} - P''_{fi}) \cos \alpha''_j - P''_{li} \sin \alpha''_j] - P ; \quad (7)$$

$$m_v(\ddot{\pi}_2 + \dot{\pi}_1 \dot{\pi}_3) = \sum_{i=1}^4 [(P'_{ki} - P'_{fi}) \sin \alpha'_j + P'_{li} \cos \alpha'_j + (P''_{ki} - P''_{fi}) \sin \alpha''_j + P''_{li} \cos \alpha''_j] ; \quad (8)$$

$$\begin{aligned} m_v \rho_v^2 \ddot{\pi}_3 = & \sum_{i=1}^4 [0,5B_i [(P'_{ki} - P'_{fi}) \cos \alpha'_j - (P''_{ki} - P''_{fi}) \cos \alpha''_j] + \\ & + (l_v - l_i) [(P'_{ki} - P'_{fi}) \sin \alpha'_j + (P''_{ki} - P''_{fi}) \sin \alpha''_j] - \\ & - 0,5B_i (P'_{li} \sin \alpha'_j - P''_{li} \sin \alpha''_j) + (l_v - l_i) (P'_{li} \cos \alpha'_j + P''_{li} \cos \alpha''_j)] - M, \end{aligned} \quad (9)$$

где δ_r – коэффициент учета вращающихся масс; $P_{ki}^{(//)}$ – тяговые усилия на ведущих колесах i -го моста (знаки / и // относятся к левому и правому колесу моста соответственно); $P_{fi}^{(//)}$ и $P_{li}^{(//)}$ – силы сопротивления качению и боковые реакции колес i -го моста; P_a – сила сопротивления воздушной среды; B_i – колея i -го моста; l_i – расстояние от первого до i -го моста;

l_v – расстояние от первого моста до центра масс машины; M_r – общий момент сопротивления повороту машины в контакте колес с опорной поверхностью; $i = 1 \dots 4$ – порядковый номер моста; $j = 1 \dots 2$ – порядковый номер управляемого моста.

Такие переменные, как масса машины m_v , коэффициент учета вращающихся масс δ_r , колея машины B_i , продольные координаты мостов l_i и центра масс машины l_v , определялись массо-геометрическими параметрами самой машины, ее узлов и агрегатов.

Такие переменные, как тяговые усилия колес $P_{ki}^{(//)}$, силы сопротивления качению колес $P_{fi}^{(//)}$, боковые реакции колес $P_{li}^{(//)}$, сила сопротивления движению воздушной среды P_a и момент сопротивления M_r , определялись по известным из теории движения колесных машин зависимостям.

Для решения системы уравнений криволинейного движения (7)–(9) необходимо уменьшить количество неизвестных. С этой целью при моделировании движения колесной машины при выполнении маневра "смена полосы движения" углы $\alpha_i^{(//)}$ поворота управляемых колес выражались как функция от времени и рассчитывались по зависимостям (5).

Результаты исследований представлены рис. 2 и 3.

На рис. 2 приведена зависимость отношения среднего угла α_1 поворота колес первого управляемого моста к максимальному значению среднего угла α_{1max} поворота от времени при выполнении маневра "смена полосы движения". Из рис. 2 видно, что зависимости (5) обеспечивают моделирование процесса поворота управляемых колес со скоростью без скачкообразных изменений с коэффициентом корреляции расчетных значений и экспериментальных данных не менее 0,99.

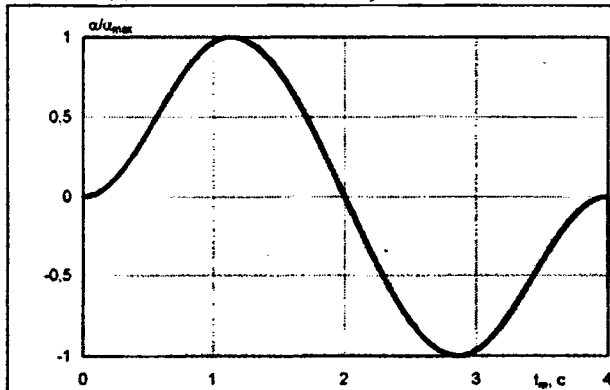


Рис. 2. Управляющее воздействие на рулевое колесо

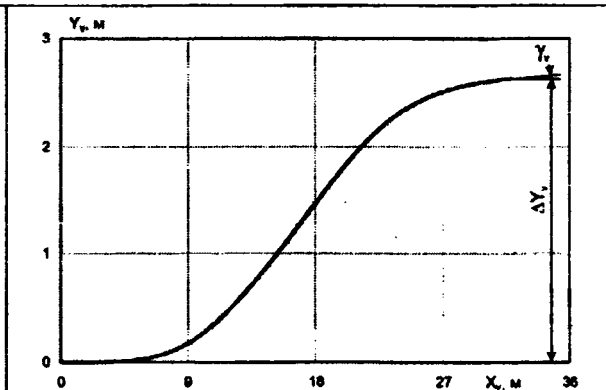


Рис. 3. Траектория движения внедорожной машины МЗКТ-79091

На рис. 3 представлена траектория движения внедорожной машины МЗКТ-79091 при выполнении маневра "смена полосы движения" в системе неподвижных координат XOY . Полученные данные позволяют оценивать отклонение ΔY_v траектории колесной машины от первоначального направления движения, значения курсового угла γ_v машины в конце объездного маневра и выполнять другие необходимые исследования криволинейного движения колесной машины.

Заключение. Предложенные функциональные зависимости для расчета углов поворота рулевого и управляемых колес позволяют осуществлять моделирование криволинейно-

го движения колесных машин с нелинейным управляющим воздействием, обеспечивающим более высокую сходимость расчетных значений с экспериментальными данными и значительно повышающим адекватность математической модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ванцевич В.В., Высоцкий М.С., Гилелес Л.Х. Мобильные транспортные машины: Взаимодействие со средой функционирования. – Мн.: Беларуская навука, 1998. – 303 с.
2. Брянский Ю.А. Управляемость большегрузных автомобилей. – М.: Машиностроение, 1983. – 176 с.
3. Смирнов Г.А. Теория движения колесных машин. – 2-е изд., переработ. и доп. – М.: Машиностроение, 1990. – 352 с.
4. Фаробин Я.Е. Теория поворота транспортных машин. – М.: Машиностроение, 1970. – 176 с.
5. Атаманов Ю.Е., Гуськов В.В., Масюк С.К. Тракторы. Ч. VII: Лаб. практикум для студентов вузов / Под общ. ред. В.В. Гуськова. – Мн.: Выш. школа, 1979. – 128 с.
6. Шалягин В.Н. Транспортные и транспортно-технологические средства повышенной проходимости. – М.: Агропромиздат, 1986. – 254 с.
7. Control of Vehicle Dynamics // Automotive Engineering. – 1995. – May. – P. 87-93.
8. Антонов Д.А. Теория устойчивости движения многоосных автомобилей. – М.: Машиностроение, 1978. – 216 с.
9. Эллис Д.Р. Управляемость автомобиля / Пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1975. – 216 с.
10. Ванцевич В.В., Высоцкий М.С., Дубовик Д.А. Управление динамикой криволинейного движения колесных машин // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-техн. навук. – 2001. – №3. – С. 123–128.

УДК 621.833.06

Лустенков М.Е.

РАЗРАБОТКА ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПЛАНЕТАРНОЙ ШАРИКОВОЙ ПЕРЕДАЧИ НА ОСНОВЕ СТРУКТУРНО-МАТРИЧНОГО МЕТОДА

*Белорусско-Российский университет
Могилев, Беларусь*

Введение. Передача движения и нагрузки посредством тел качения используется во многих механизмах и устройствах, например в подшипниках и направляющих качения, а также в механических передачах, некоторые типы из которых (шариковинтовые) изготавливаются серийно. Планетарные передачи с телами качения известны не так широко, однако имеют ряд преимуществ, позволяющих эффективно использовать их для решения некоторых инженерных задач. Одна из разновидностей такого рода передач – эллипсная шариковая передача (ЭШП) может применяться для создания компактных редуцирующих узлов с низкой себестоимостью изготовления, легко встраиваемых в различные устройства, средства малой механизации [1]. Редукторы аналогичного типа нашли применение для создания устройств работающих при бурении нефтяных и газовых скважин [2].

Принцип работы ЭШП основан на взаимодействии профильных рабочих поверхностей трех соосных цилиндрических деталей

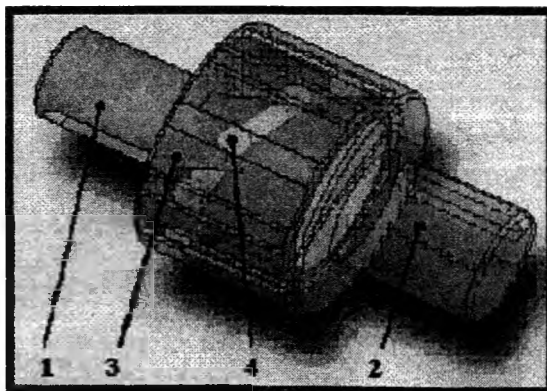


Рисунок 1 - Секция ЭШП в сборе (3D-модель)

- 1– ведущий вал (внутренний кулачок),
- 2– ведомый вал с пазми,
- 3– многопериодный кулачок,
- 4– система тел качения

посредством промежуточных тел – шариков (рис.1). Модель передачи представляет собой пересечение в пространстве двух периодических кривых (синусоид), замкнутых на цилиндре с радиусом образующей окружности R. Одна из кривых – однопериодная (эллипс, $Z_1=1$), другая многопериодная, с числом периодов Z_3 .

Синусоиды имеют одинаковые амплитуды A, средние линии кривых совпадают, точки их пересечения (центры тел качения) располагаются равномерно по окружности с равным полярным угловым шагом относительно оси цилиндра. При вращении одной кривой относительно неподвижной другой (скольжении вдоль оси абсцисс на плоской развертке) точки пересечения будут двигаться согласовано. Их абсолютное движение по неподвижной синусоиде можно разложить на два движения: относительное вдоль оси ординат и переносное вдоль оси абсцисс. Если рассмотреть точки пересечения первой группы [2], характеризующие пересечение разноименных ветвей кривых, (восходящих ветвей одной кривой и нисходящих другой, и наоборот), то вдоль оси абсцисс расстояние между ними в процессе движения не будет изменяться, что позволяет ввести в конструкцию передачи звено (вал с пазами), позволяющее воспринимать результирующее движение.

На базе ЭШП возможно изготовление многоступенчатых высокоскоростных передач путем последовательного соединения секций. На рис.2 приведен общий вид мотор-редуктора с двухступенчатой передачей.

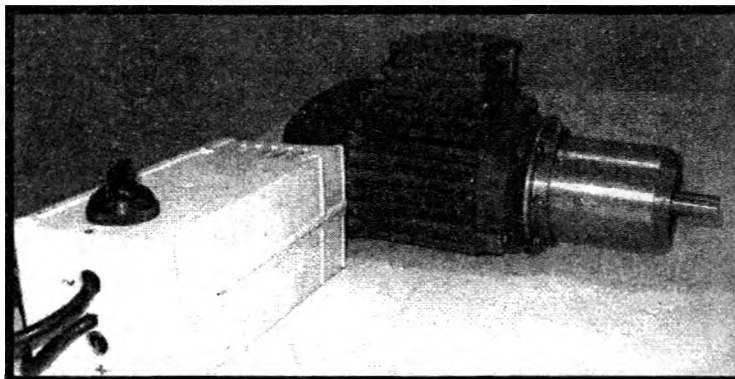


Рисунок 2- Планетарный шариковый мотор-редуктор с блоком управления

Блок управления служит для реверса мотор-редуктора. В кон-

струкции использовался асинхронный электродвигатель типа 4AA5682У3 мощностью 250Вт и частотой вращения 2760 об/мин. Редуцирующая часть имеет передаточное отношение, равное 72 (у первой ступени – 8, у второй ступени – 9), наружный диаметр корпуса редуктора равен 70 мм.

Исследование динамики передачи. При анализе передачи вводится индексация параметров звеньев, согласно обозначению, приведенному на рис.1. Направление сигналов соответствует первой кинематической схеме (аналог схемы 2К-Н для зубчатых передач, при которой звено 3 остановлено, звено 1 – ведущее, а звено 2 – ведомое). Кинетическая энергия ЭШП для 1-ой кинематической схемы:

$$T = T_1 + T_2 + \sum_{i=1}^n T_{4i}, \quad (1)$$

где T_1 – кинетическая энергия внутреннего кулачка; T_2 – кинетическая энергия вала с пазами; T_{4i} – кинетическая энергия i-го тела качения; n – количество тел качения в передаче.

Принимая угол поворота ведущего вала ϕ_1 в качестве обобщенной координаты, получим:

$$T_1 = \frac{J_1 \dot{\phi}_1^2}{2}; \quad T_2 = \frac{J_2 \dot{\phi}_1^2}{2u^2}; \quad T_4 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{m_4 v_{c4i}^2}{2} + \frac{J_4 \dot{\phi}_{4i}^2}{2} \right), \quad (2)$$

где J_1, J_2, J_4 – моменты инерции тел 1, 2 и 4 соответственно; ϕ_1 и $\dot{\phi}_1$ – угол поворота ведущего звена (внутреннего кулачка) и его угловая скорость соответственно; m_4 – масса шарика; v_{c4i} – скорость центра масс i-го шарика, $\dot{\phi}_{4i}$ – угловая скорость вращения i-го шарика вокруг оси проходящей через центр масс.

Скорость центра масс шарика определится [3]:

$$v_{c4i} = \frac{\dot{\varphi}_1}{u} \sqrt{R^2 + A^2 Z_3^2 \cos^2 \left(Z_3 \frac{\varphi_1}{u} \right)}. \quad (3)$$

Угловые скорости $\dot{\varphi}_4$ в первом приближении можно рассматривать как линейные функции угловой скорости входного вала, т.е. $\dot{\varphi}_4 = k \dot{\varphi}_1$, где k – коэффициент пропорциональности, и принять у всех тел качения равными. Тогда кинетическая энергия передачи:

$$T = \frac{\dot{\varphi}_1^2}{2} \left(J_1 + \frac{J_2}{u^2} + \sum_{i=0}^{n-1} \frac{m_4}{u^2} \left(R^2 + A^2 Z_3^2 \cos^2 \left(Z_3 \left(\frac{\varphi_1}{u} + \frac{2\pi}{n} i \right) \right) \right) + k^2 n J_4 \right). \quad (4)$$

В выражении (4) присутствует функция суммы квадратов косинусов. Для упрощения этого выражения и дальнейших расчетов выполним преобразования сумм некоторых тригонометрических функций.

$$\int_0^{2\pi R} \sin(ax + b) dx = (-\cos(2a\pi R + b) + \cos b) / a =$$

$$= -(\cos(2a\pi R) \cdot \cos b - \sin(2a\pi R) \cdot \sin b + \cos b) / a = (-\cos b + \cos b) / a = 0,$$

причем a – целое число (в рассматриваемой модели $a=Z_3$).

$$\int_0^{2\pi R} \cos(ax + b) dx = 0. \quad (7)$$

Последнее равенство следует из того, что интеграл в последнем преобразовании выражения (7) равен нулю согласно выражению (6).

Аналогично доказывается равенство

$$\int_0^{2\pi R} \cos^2(ax + b) dx = \pi R. \quad (8)$$

Выражения (7) и (8) характеризуют суммарную площадь, ограниченную функциями $\sin^2(ax + b)$, $\cos^2(ax + b)$ и осью абсцисс. Чтобы найти сумму ординат точек равномерно распределенных вдоль оси абсцисс необходимо разделить это выражение на длину интервала.

Таким образом

$$\sum_{i=0}^{n-1} \sin^2(ax + b) = \int_0^{2\pi R} \sin^2(ax + b) dx \cdot \frac{n}{l} = \frac{\pi R n}{l};$$

$$\sum_{i=0}^{n-1} \cos^2(ax + b) = \int_0^{2\pi R} \cos^2(ax + b) dx \cdot \frac{n}{l} = \frac{\pi R n}{l}, \quad (9)$$

где l – общая длина вдоль оси абсцисс, на которой вычисляется интеграл; n – количество интервалов.

Применительно к выражению (4), получим

$$\sum_{i=0}^{n-1} \cos^2 \left(Z_3 \frac{\varphi_1}{u} + \frac{2\pi}{n} i \right) = \frac{\pi R n}{2\pi R} = \frac{n}{2}. \quad (10)$$

Выполним преобразования, предусмотренные уравнениями Лагранжа II рода.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_1} \right) + \frac{\partial T}{\partial \varphi_1} = Q_{\varphi_1} = M_1 - M_2 / u - M_{\text{тр}}, \quad (11)$$

где Q_{φ_1} – обобщенная сила, соответствующая обобщенной координате φ_1 ; $M_{\text{тр}}$ – момент сил трения в передаче.

После преобразования с учетом формул (9), выражение (4) примет вид:

$$T = \frac{\dot{\varphi}_1^2}{2} \left(J_1 + \frac{J_2}{u^2} + n \left(\frac{m_4 R^2}{u^2} + \frac{m_4 A^2 Z_3^2}{2u^2} + k^2 J_4 \right) \right) = 0,5 \dot{\varphi}_1^2 J_{\text{п}}, \quad (12)$$

где J_{Π} – постоянный инерционный коэффициент, равный выражению в скобках в первой части формулы (13).

Таким образом, математически доказано, что несмотря на сложный характер взаимных перемещений тел качения относительно друг друга и неподвижной системы отсчета, всю эту систему можно рассматривать как единое тело, совершающее вращательное движение.

Разработка математической модели передачи. Далее рассматривается система с четырьмя степенями свободы, состоящая из четырех сосредоточенных масс (рис.3).

Сосредоточенные массы J_1, J_2, J_3 и J_4 отражают инерционные свойства объекта, фазовыми переменными типа потока являются угловые скорости, а типа потенциала – вращающие моменты. Матрицы инцидентий и трансформаторных элементов приведены в таблице 1.

Таблица 1 Матрицы инцидентий и трансформаторных элементов динамической модели

Узлы	Ветви									
	Источники потенциалов				Упругие и диссипативные			Трансформаторные элементы		
	M_{B1}	M_{B2}	M_{B3}	M_{Tp}	c_1 (μ_1)	c_2 (μ_2)	c_3 (μ_3)	c_1 (μ_1)	c_2 (μ_2)	c_3 (μ_3)
1	L_i	0	0	0	$-L_i$	0	0	1	0	0
2	0	L_i	0	0	0	$-L_i$	0	0	0	0
3	0	0	L_i	0	0	0	$-L_i$	0	0	1
4	0	0	0	-1	L_i	L_i	L_i	0	0	0
Подматрицы	A_B				A_y (A_D)			T_y (T_D)		

Движение системы с учетом малых колебаний будет описываться системой следующих уравнений, полученных на основе структурно-матричного метода [4].

$$d\omega_1 / dt = (M_{B1} - (M_{y1} + M_{D1}) / u_{12}) / J_1; \quad (13)$$

$$d\omega_2 / dt = (-M_{B2} + M_{y2} + M_{D2}) / J_2; \quad (14)$$

$$d\omega_4 / dt = (-M_{B4} + M_{y1} + M_{D1} - M_{y2} - M_{y3} - M_{D2} - M_{D3}) / J_1; \quad (15)$$

$$dM_{y1} / dt = c_1(\omega_1 / u_{12} - \omega_2); \quad (16)$$

$$dM_{y2} / dt = c_2(-\omega_2 + \omega_4); \quad (17)$$

$$dM_{y3} / dt = c_3(-\omega_3 u_{32} - \omega_4); \quad (18)$$

где $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ – угловые скорости входного, выходного звеньев и системы тел качения соответственно; M_{B1}, M_{B2}, M_{B3} – моменты, приложенные к основным звеньям передачи; M_{y1} и M_{D1} – потенциалы упругих и диссипативных элементов соответственно; u_{12} – передаточное число, определяемое при заторможенном 3-ем звене и передаче движения от входного звена 1 к выходному звену 2; u_{32} – передаточное число, определяемое при заторможенном звене 1 и передаче движения от входного звена 3 к выходному звену 2.

При этом моменты диссипативных элементов и момент внешних воздействий M_{B3} :

$$M_{D1} = \mu_1(\omega_1 / u_{12} - \omega_2); \quad M_{D2} = \mu_2(-\omega_2 + \omega_4); \quad M_{D3} = \mu_3(-\omega_3 u_{32} - \omega_4);$$

$$M_{B3} = (M_{y3} + M_{D3}) \mu_{32}, \quad (19)$$

где c_j – жесткости упругих элементов; μ_k – коэффициенты диссипации.

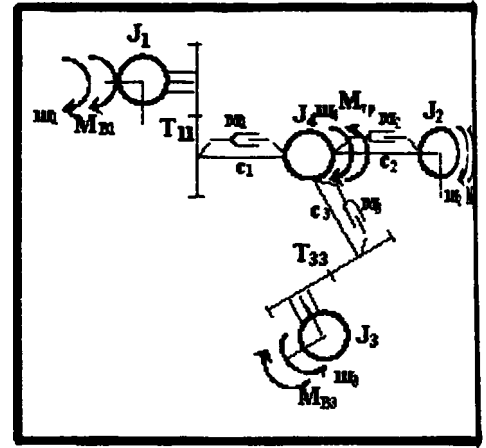


Рисунок 3 - Динамическая модель планетарной шариковой передачи

Передаточные числа u_{12} и u_{32} определяются исходя из известной формулы Виллиса для планетарных передач. В правой части этой формулы роль чисел зубьев выполняют числа периодов на кулачках передачи: $Z_1=1$ (однопериодная синусоида – эллипс) и Z_3 .

Для решения системы шести дифференциальных уравнений (13)-(18) необходимо задание начальных условий: ω_{10} , ω_{20} , ω_{40} , M_{y10} , M_{y20} , M_{y30} и времени интегрирования. И если начальные угловые скорости можно принять равными нулю: $\omega_{10}=0$, $\omega_{20}=0$, $\omega_{40}=0$, то моменты находятся во взаимосвязи и их значение необходимо находить из условий статического равновесия системы:

$$M_{y10} = M_{B1}, \quad M_{y20} = M_{B1}u_{12}, \quad M_{y3} = M_{B1}u_{13}. \quad (20)$$

Особо следует рассматривать вопрос об определении коэффициентов жесткости упругих элементов и коэффициентов диссипации. Коэффициенты c_1 и μ_1 характеризуют упругие и диссипативные свойства контакта внутреннего кулачка и тел качения, коэффициенты c_2 и μ_2 характеризуют упругие и диссипативные свойства контакта пазов вала с пазами и тел качения, а коэффициенты c_3 и μ_3 характеризуют упругие и диссипативные свойства контакта рабочих поверхностей наружного кулачка и тел качения, и все они являются, по сути, приведенными коэффициентами. Так как соединение элементов во всех случаях последовательное, то возможно воспользоваться следующим выражением:

$$c_i(\mu_i) = \sum_{j=1}^i c_{ij}(\mu_{ij}) \quad (21)$$

где i – номер звена, контактирующего с системой тел качения; j – номер тела качения, $j = 1 \dots t$. В программе динамического анализа MSC ADAMS® 2003, например, по умолчанию устанавливаются следующие параметры контакта стальных деталей: $c=10$ Н/мм, $\mu=10$ Нс/мм.

Выводы. Система тел качения в планетарной шариковой передаче в любой момент времени может рассматриваться как единое тело, совершающее вращательное движение и имеющее постоянный осевой и полярный (относительно центра масс) момент инерции.

Разработана математическая модель передачи, позволяющая анализировать переходные процессы при работе редуцирующих узлов. Данная математическая модель может быть применена не только для планетарных шариковых передач, но и для планетарных передач других типов, в том числе и зубчатых. Методика динамического анализа автоматизирована с помощью ЭВМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лустенков М.Е. Шариковые планетарные передачи для средств малой механизации // Вестник машиностроения. – 2004. - №6. – С.15-17.
2. Игнатищев Р.М. Синусошариковые редукторы.- Мн.: Выш. шк., 1983. - 107 с.: ил.
3. Лустенков М.Е. Планетарные шариковые передачи цилиндрического типа: монография / М.Е. Лустенков, Д.М. Макаревич. – Могилев: Бел.-Рос. ун-т, 2005. – 123 с.: ил.
4. Тарасик В.П. Математическое моделирование технических систем: Учебник для вузов. – Мн.: ДизайнПРО, 2004. – 640 с.: ил.

Бурейко В.В.

ИЗМЕНЕНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ТИТАНА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ДЕФОРМАЦИИ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Во время пластического деформирования процесс упрочнения и динамического старения металла, в основном связан с блокированием дислокаций примесными атомами или их атмосферами. Имеется предположение, что в местах максимальных сдвигов или других зонах

деформированного металла, возможно, образование некогерентных выделений в виде мелко-дисперсных частиц, которые можно наблюдать в электронном микроскопе. Предварительно деформируя титан в условиях схем напряженного состояния (растяжения, кручения и сжатия), можно получить неодинаковый эффект изменения сдвигающего напряжения с ростом степени деформации. При этом в каждом отдельном случае необходимо соблюдать условие первоначальной изотропности материала по структуре и механическим свойствам, иначе этот фактор неизбежно будет вносить соизмеримые погрешности в ожидаемые результаты дальнейших испытаний на усталостную прочность титана.

Деформация некоторых сплавов и чистых металлов при определенных температурно-скоростных условиях происходит с выделением мелкодисперсных частичек добавок или примесей, находящихся в состоянии твердых растворов с основной фазой. Выделяясь преимущественно в местах наибольших сдвигов, эти частички могут влиять на процесс пластического течения, вызывать аномальное изменение показателей прочности, пластичности и усталостной прочности. (1)

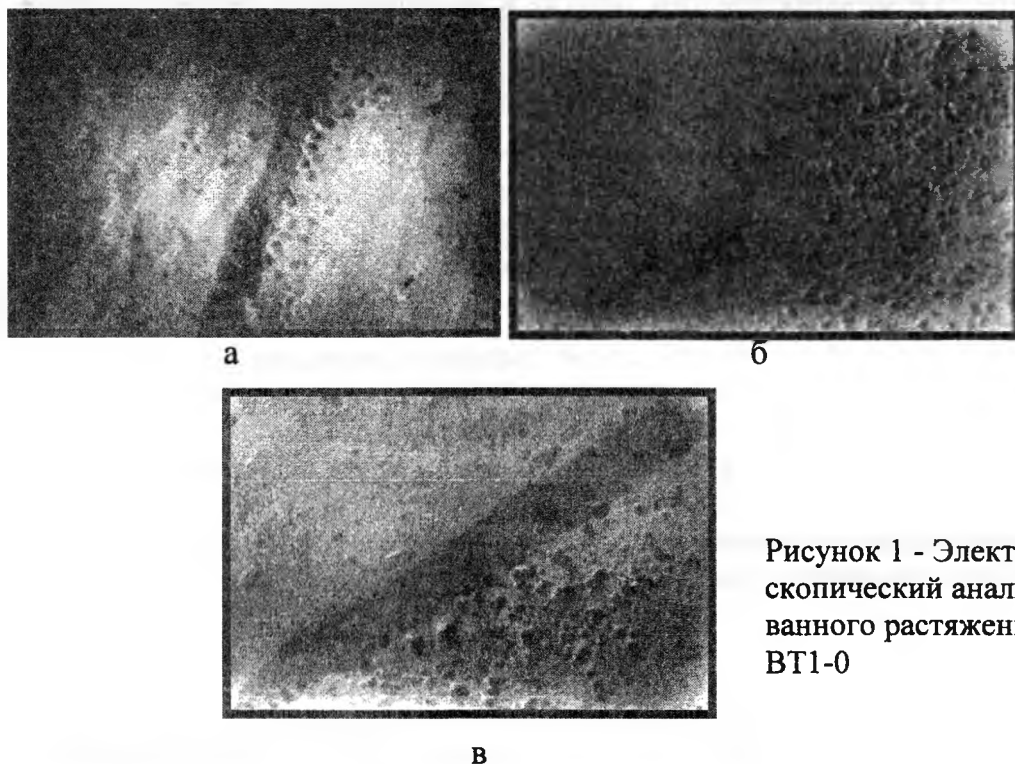


Рисунок 1 - Электронномикроскопический анализ деформированного растяжением титана VT1-0

Выделившиеся частички примесей и добавок определенным образом оказывают влияние на движение дислокаций, а также на величину общего сдвигающего напряжения или истинного сопротивления течению. Сопротивление движению дислокаций, в первую очередь, зависит от характеристик основного материала и примесей, в частности, от их модулей сдвига. (2) Однако, величина сдвигающего напряжения определяется не только указанными параметрами. Поскольку согласно современным представлениям необратимая деформация кристаллических тел осуществляется за счет последовательного движения дефектов решетки по определенным кристаллографическим плоскостям, то величина напряжения, заставляющего двигаться тот или иной дефект, будет также зависеть от энергетической характеристики дислокации и степени совершенства кристаллической решетки основного материала.

В технически чистом титане и в ряде других деформационно-старееющих металлов и сплавов после соответствующей обработки примеси других элементов находятся в растворенном состоянии и выпадают в виде дисперсных фаз во время пластической деформации. Обычно это выпадение происходит в местах наибольшего сдвига, по плоскостям скольжения, где происходит зарождение и движение дислокаций. Двигаясь в плоскости скольжения, дислокация встречает выделившиеся частицы и обволакивает их неподвижными дислокациями, в результате чего повышается сопротивление деформации, и металл упрочняется.

Выделения и твердого раствора α -титана дисперсных фаз различных примесей происходит в довольно широком температурном интервале (20-400°C). Безусловно, этот процесс в значительной степени зависит от содержания примесей в твердом растворе, в частности от содержания таких элементов, как азот и углерод.

Электронномикроскопический анализ деформированного растяжением титана BT1-0 при комнатной температуре (рис. 1а), подтверждает протекание физико-химического процесса выделения фаз примесей из твердого раствора.

Повышение температуры до 100°C при растяжении титана BT1-0 стимулирует реакции динамического деформационного старения. Просмотр угольных реплик в электронном микроскопе показал, что наряду с большим количеством зерен свободных от частиц или имеющих весьма незначительное число частиц, имеются зерна, где концентрация частиц фаз примесей увеличилась (рис. 1б, 1в).

В случае деформации сжатием при комнатной температуре в структуре титана увеличивается количество двойников. Процесс двойникования в значительной степени зависит от схемы напряженного состояния. Наиболее благоприятной схемой образования двойников является сжатие. Именно для этой схемы напряженного состояния деформированная структура титана и ряда других металлов содержит наибольшее число двойниковых образований.

Механизм двойникования у некоторых металлов может играть решающую роль в процессах пластического течения, влияя на сопротивление деформации, пластические, прочностные и усталостные свойства испытываемого металла.

ЛИТЕРАТУРА:

1. А.Х. Котрелл. Сб. Структура металлов и их свойства. М. 1984. 2. В.С. Иванова. Усталость и прочность металлических материалов. М. 1988.

УДК 621.793

Спиридонов Н.В., Соколов И.О., Коробейников В.В., Пилецкая Л.И.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОЙ УДЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ В ПАРЕ «ОПОРНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ ВАЛА – ВТУЛКА ПОДШИПНИКА»

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Рассмотрим сопряженную пару «опорная поверхность вала – втулка подшипника».

Для исследования кинетики изнашивания рассматриваемой трибопары необходимо оценить начальную удельную нагрузку $p_0(\alpha)$ и установить закон его перераспределения при изнашивании.

Данную задачу можно решить как плоскую задачу теории упругости [1]. При расчете принимаем форму опорной поверхности вала 1 и втулки подшипника (далее втулка) 2 круговой. Между валом и втулкой имеет место радиальный зазор $\delta=R_2-R_1$ (рисунок 1). В начальный момент времени радиальный зазор можно принять равным нулю, т.к. она устанавливается на вал с натягом. В процессе эксплуатации, вследствие износа, зазор между валом и втулкой увеличивается.

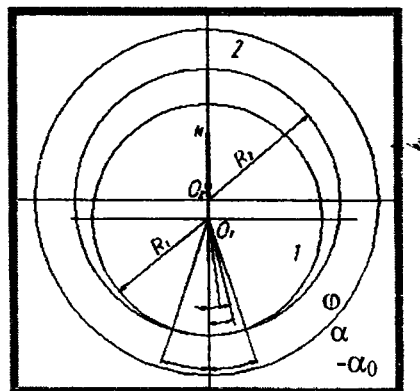


Рисунок 1 – Расчетная схема опоры

Уравнение задачи для рассматриваемого случая имеет

вид [2]:

$$\left(\frac{1 + \chi_1}{8\pi\mu_1} + \frac{1 + \chi_2}{8\pi\mu_2} \right) \cdot \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} p'(\varphi) \cdot \operatorname{ctg} \left(\frac{\alpha - \varphi}{2} \right) d\varphi = \left(\frac{\chi_1 - 1}{4\mu_1} - \frac{\chi_2 - 1}{4\mu_2} \right) p(\alpha) + \frac{N}{2\pi R_1 l} \cdot \frac{\mu_2 + \chi_2 \mu_1}{\mu_1 \mu_2} \cdot \cos \alpha + \frac{1 + \chi_2}{8\pi\mu_2} \cdot \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} p'(\varphi) d\varphi + \frac{\delta}{R_1}, \quad (1)$$

где p и p' - удельная нагрузка и ее дифференцирование по соответствующей переменной;

R_1 - радиус вала;

R_2 - радиус втулки;

α - угловая текущая координата;

α_0 - полуугол контакта;

δ - радиальный зазор;

φ - вспомогательная координата;

N - общая нагрузка;

l - длина втулки;

χ, μ - параметры, равные:

$$\chi_i = 3 - 4\nu_i, \quad (2)$$

$$\mu_i = \frac{E_i}{2(1 + \nu_i)}, \quad (3)$$

где $i=1$ (вал) $i=2$ (втулка), ν_i - коэффициент Пуансона, E_i - модуль упругости.

Условие равновесия цилиндра:

$$\int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} p(\alpha) \cos \alpha d\alpha. \quad (4)$$

После соответствующих преобразований исходных уравнений и численного их решения при условии $0 \leq \delta/R_2 \leq 0$ находится зависимость коэффициента нагруженности и удельной нагрузки в произвольной точке зоне контакта при заданном значении угла контакта.

Коэффициент нагруженности определяется по формулам [2]:

$$\beta = \frac{N}{8\pi\delta} \left(\frac{1 + \chi_1}{\mu_1} + \frac{1 + \chi_2}{\mu_2} \right) \text{ или } \beta = \frac{N}{\pi\delta} \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right). \quad (5)$$

Расчет параметров $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, b$ осуществляется по формулам:

$$\gamma_1 = \frac{(1 - \chi_2)\mu_1 - (1 - \chi_1)\mu_2}{(1 + \chi_2)\mu_1 + (1 + \chi_1)\mu_2}; \quad (6)$$

$$\gamma_2 = \frac{\mu_2 + \chi_2\mu_1}{(1 + \chi_2)\mu_1 + (1 + \chi_1)\mu_2}; \quad (7)$$

$$\gamma_3 = \frac{(1 + \chi_2)\mu_1}{(1 + \chi_2)\mu_1 + (1 + \chi_1)\mu_2}; \quad (8)$$

$$b = \operatorname{ctg} \frac{\alpha_0}{2}; \quad (9)$$

$$\frac{1}{Y_0} = 0,393 - 0,702 \gamma_1 - 0,04 \gamma_1^2 + (0,051 - 1,456 \gamma_1) \cdot b + b^2. \quad (10)$$

Определяем коэффициенты:

$$\frac{1}{Y_1} = \frac{1}{Y_2} = 1 - 2,162 \gamma_1 + 0,087 \gamma_1^2 - (0,893 \gamma_1 + 0,07 \gamma_1^2) \cdot b + b^2, \quad (11)$$

$$\frac{1}{Y_3} = 1,812 - 3,787 \gamma_1 - 0,034 \gamma_1^2 - (0,145 + 0,251 \gamma_1 - 0,014 \gamma_1^2) \cdot b + b^2. \quad (1)$$

Связь коэффициента нагруженности с полууглом контакта α_0 :

$$\beta = \frac{1}{\frac{(1 - Y_3 \gamma_2 Y_2)(1 - \gamma_3 Y_0)}{Y_2} - 4 \gamma_2 \gamma_3 Y_1}. \quad (2)$$

Зависимость нагрузки от коэффициента нагруженности:

$$N = 8 \pi \delta \beta \frac{\mu_1 \mu_2}{\mu_1 (1 + \chi_1) + \mu_2 (1 + \chi_2)}. \quad (3)$$

Построив зависимость $N=N(\alpha_0)$ по величине заданной нагрузки N , найдем половину угла контакта α_0 . Расчет α_0 полуугола контакта по формуле Герца таков:

$$\alpha_0 = \arcsin \sqrt{\frac{2N}{\pi \delta} \left(\frac{1 - \nu_1}{\mu_1} + \frac{1 - \nu_2}{\mu_2} \right)}. \quad (4)$$

По заданной величине нагрузки N и по углу контакта $2\alpha_0$ находим среднее по проекции площадки контакта давление в зоне контакта:

$$q = \frac{N}{2 R_1 l \sin \alpha_0}. \quad (16)$$

Максимальную удельную нагрузку можно выразить через среднюю:

$$p_{max} = k p, \quad (17)$$

$$k = 2 \left(\frac{b}{\beta} + \gamma_3 c_0 \right) \frac{0,318}{(0,106 - 1,8 \gamma_1 b + b^2)} + \frac{1,28 \gamma_2 b}{0,336 - 0,434 \gamma_1 - 0,176 \gamma_1^2 + (0,077 - 1,67 \gamma_1 + 0,125 \gamma_1^2) \cdot b + b^2}, \quad (18)$$

где p – средняя удельная нагрузка для прессовых валов бумагоделательных машин определяется по формуле:

$$p = \frac{R}{S} \quad \text{МПа}, \quad (19)$$

где R – реакция опоры вала, Н;

S – средняя площадь контакта, мм².

Реакция опоры вала определяется по формуле [3]

$$R = \frac{\sqrt{G_H^2 + Q_{Ц}^2 + 2 G_H \cdot Q_{Ц} \cdot \cos \gamma}}{2}, \quad (20)$$

где G_H – вес нижнего вала, Н;

$Q_{Ц}$ – давление между валами, направленное по линии соединения центров нижнего и верхнего валов, Н;

γ – угол между вертикальной и линией, соединяющей центры валов.

Средняя площадь контакта:

$$S = \pi \cdot R_1 \frac{n^\circ}{180^\circ} \cdot l, \quad (21)$$

где R_1 – радиус вала, мм;

l – длина контакта, мм;

n – угол контакта.

Тогда средняя удельная нагрузка:

$$p = \frac{\sqrt{G_H^2 + Q_{Ц}^2 + 2 G_H \cdot Q_{Ц} \cdot \cos \gamma}}{\pi \cdot r \cdot \frac{4 \alpha_0}{180^\circ} \cdot L}. \quad (22)$$

$$\text{Коэффициент } c_0 = \frac{Y_0}{Y_2} (1 - 4\gamma_2 Y_3) + 4\gamma_2 Y_1.$$

Коэффициент k учитывает отличие максимальной удельной нагрузки от ее среднего значения.

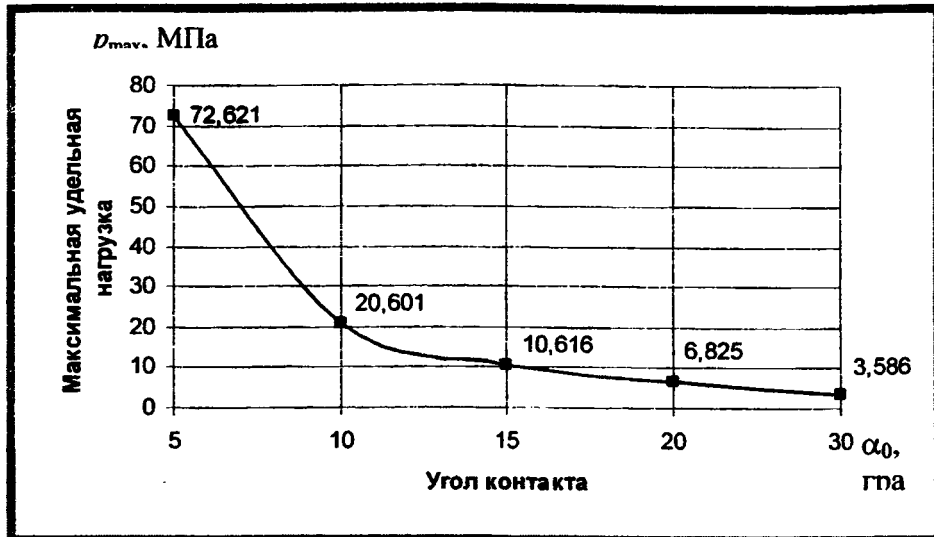


Рисунок 2 – Зависимость максимальной удельной нагрузки от угла контакта для вала массой 1,7 тонн

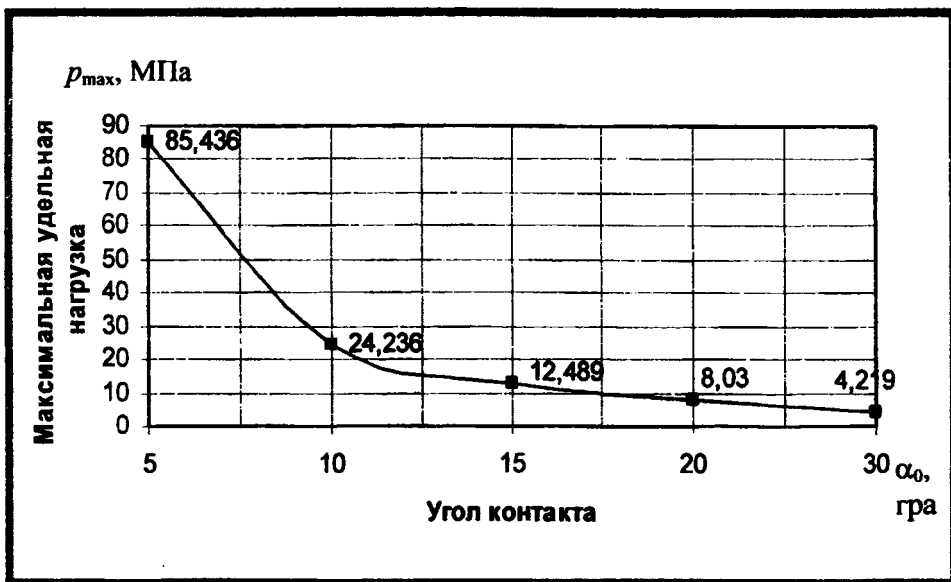


Рисунок 3 – Зависимость максимальной удельной нагрузки от угла-контакта для вала массой 2 тонны

В результате вычислений проведенных для валов массой от 1,7 до 4 тонн получен зависимость удельной нагрузки от угла контакта). Расчеты выполнялись с помощью пакета программ MathCAD.

Прочность сцепления газотермических покрытий должна превышать максимальную удельную нагрузку, т.е. $\sigma_{сц} > p_{max}$.

Из условий эксплуатации валов известно, что критическое значение угла контакта находится в районе 100, а прочность сцепления покрытий нанесенных газопламенным методом находится в пределах 30 МПа. При действии на опорную поверхность вала удельной нагрузки превышающей 30 МПа необходимо применение источников концентрированной энергии (плазменных, лазерных, микроплазменных), которые позволяют получить прочность сцепления на порядок выше, чем при напылении газопламенным методом.

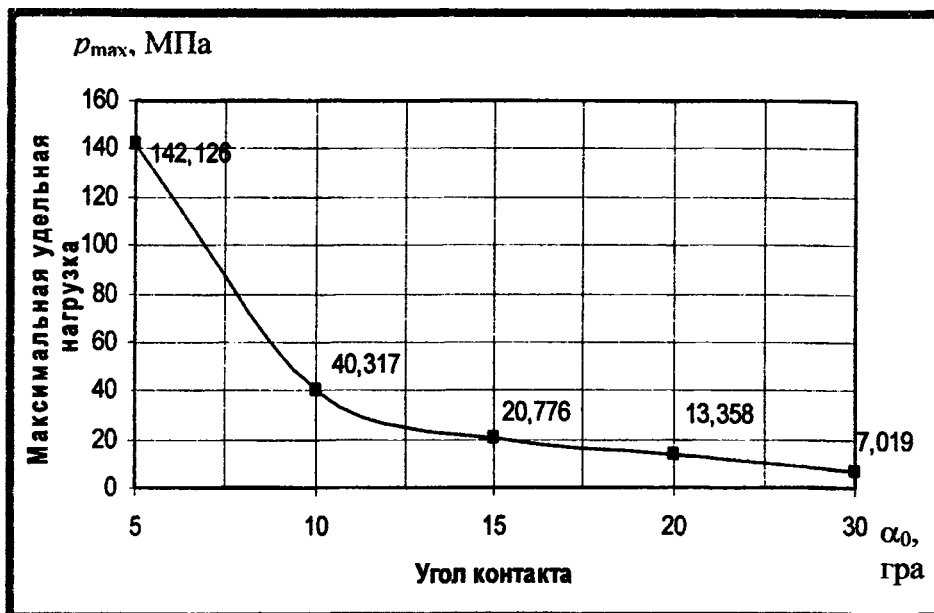


Рисунок 4 – Зависимость максимальной удельной нагрузки от угла контакта для вала массой 4 тонны

ЛИТЕРАТУРА

1. Голубец В.М., Чернец М.В. Метод расчета долговечности опор скольжения турбобура ЗТСШ1-195ТЛ // ФХММ, 1992, №2. – с.95-98.
2. Когаев В.П., Дроздов Ю.Н. Прочность и износостойкость деталей машин: Учеб. пособие для машиностр. спец. вузов. – М.: Высш. шк., 1991. – 319с.
3. Эйдлин И.Я. Бумагоделательные и отделочные машины. Изд 3-е испр. и доп. – М.: «Лесная промышленность», 1970. – с.624

УДК 621.833.62-192

*Жмайлик В.А., Захарик А.М., Захарик Ал.М., Гоман А.М.,
Солитерман Ю.Л., Комиссаров В.В., Сосновский Л.А.*

АНАЛИЗ ПРОЧНОСТНОЙ НАДЕЖНОСТИ ШЕСТЕРЕН ГЛАВНОЙ ПАРЫ ВЕДУЩЕГО МОСТА АВТОМОБИЛЕЙ СЕМЕЙСТВА МАЗ-5440

*ПО «ГОМСЕЛЬМАШ» Гомель, Беларусь,
РУП МАЗ, Минск, Беларусь
РНУ ОИМ НАН Б, Минск, Беларусь*

Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь

В рамках Государственной программы прикладных исследований (ГППИ) «Создание новых компонентов машин и оборудования для машиностроительного комплекса Республики Беларусь» в 2004 – 2005 гг. был выполнен комплекс теоретических и экспериментальных исследований, главной задачей которых являлось прогнозирование надежности и долговечности зубчатых зацеплений, а также определения сопротивления материалов зубчатых колес контактной и изгибной усталости. Решение поставленной задачи возможно с использованием (1) метода стендовых и натурных испытаний, (2) метода расчетно-экспериментальной оценки долговечности зубчатых зацеплений, (3) метода ускоренных испытаний малоразмерных моделей зубчатого зацепления. Разработка и апробация предложенных методов была выполнена применительно к шестерням главной пары ведущего моста МАЗ-5440.

Данная статья посвящена описанию результатов выполненных исследований.

1 Метод стендовых и натуральных испытаний

Испытания шестерен главной пары ведущего моста МАЗ-5440 с триботехнической обработкой зубьев были проведены на стенде С-315 (см. рисунок 1).

Конструкция стенда представляет собой замкнутый контур, образуемый двумя испытываемыми мостами, главным редуктором и боковыми редукторами, соединенными между собой валами. Привод стенда осуществляется от электродвигателя и коробки передач. Нагружение замкнутого контура производится специальным нагрузителем планетарного типа с передаточным числом $U_0 = 1000$. Нагрузитель позволяет изменить нагрузку в замкнутом контуре в процессе работы стенда.

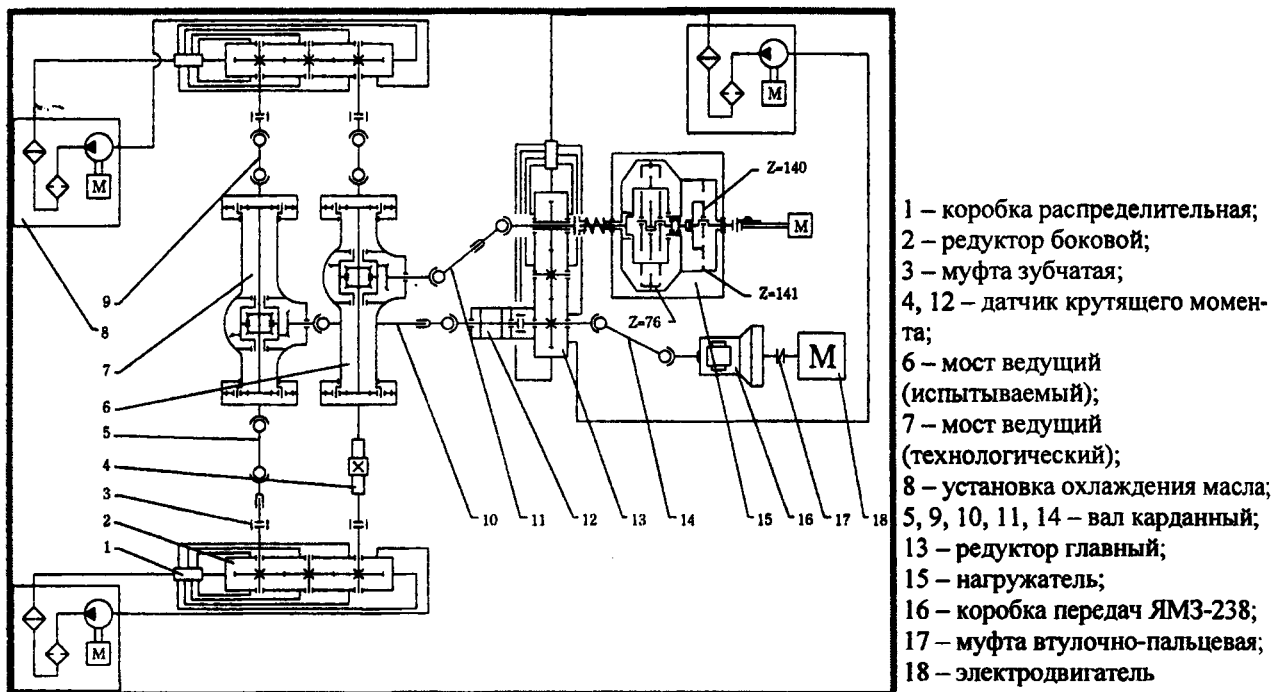


Рисунок 1 – Кинематическая схема стенда С-315:

Испытания проводились при нагружении постоянным крутящим моментом. Величина входного крутящего момента на карданном валу $M_c = 3200$ Н·м. Частота вращения входного вала моста $n_{cm} = 507$ мин⁻¹.

В результате проведенного испытания было установлено, что при наработке 970 часов работоспособность шестерен главной пары сохранилась.

Испытания мостов на стенде, как было отмечено, проводятся при постоянном крутящем моменте, поэтому для учета различия в нагруженности мостов в эксплуатации и на стенде определяется степень форсирования испытаний. С этой целью определяется величина постоянного крутящего момента, эквивалентного переменным крутящим моментам в реальных условиях эксплуатации.

$$M_{\text{эkv}} = m \sqrt{\frac{\sum M_{\text{KPI}}^m P_i}{\sum P_i}}, \quad (1)$$

Где P_i – разрядная частота; M_{KPI} – среднее значение крутящего момента в разряде, Н·м; m – показатель наклона левой ветви кривой контактной усталости ($m = 3$ [1]).

С целью определения эквивалентного крутящего момента были проведены натурные испытания, в процессе которых нагрузочный режим записывался по маршрутам движения в соответствии с рекомендациями, изложенными в программе-методике исследования эксплуатационной нагруженности ведущих мостов ГНТП И 05808729.84-02. Согласно данной методике запись нагрузочных режимов трансмиссии выполнялась при движении по «Минскому кольцу» (испытательный этап № 1; протяженность 29,8 км).

Согласно проведенному расчету значение эквивалентного крутящего момента на карданном валу составило $M_{экс} = 1086,9$ Н·м.

Тогда коэффициент форсирования испытаний будет

$$K_{\phi} = \left(\frac{M_c}{M_{экс}} \right)^m = \left(\frac{3200}{1086,9} \right)^3 = 25,52. \quad (2)$$

Расчетное значение соответствия одного часа испытаний моста на стенде эксплуатационному пробегу автомобиля в км определяется по формуле

$$L = \frac{0,377 \cdot r_k \cdot n_{см} \cdot K_{\phi}}{U_0} = \frac{0,377 \cdot 0,547 \cdot 507 \cdot 25,52}{3,45} = 773,4 \text{ км}, \quad (3)$$

где r_k – кинематический радиус колеса.

Таким образом, с учетом наработки моста на стенде 970 часов, эквивалентный пробег моста в эксплуатации составляет не менее 750 тыс. км.

2 Расчетный метод

Согласно разработанной в ОИМ НАН Б методике расчетного прогнозирования надежности зубчатых колес трансмиссий [1], по отношению к зубчатым колесам выполняются два вида проверочного расчета: на выносливость и на прочность. В каждом из этих расчетов рассматриваются два вида напряженного состояния зубьев: контактная напряженность активных поверхностей и напряженность при изгибе.

Общая последовательность расчета зубчатых колес состоит из трех этапов.

На первом этапе определяется расчетное контактное Π_H (изгибное σ_F) напряжение и предельное контактное Π_{HPO} (изгибное σ_{FPO}) напряжение при базовом числе циклов. Затем производят сопоставление этих величин. Если $\Pi_H \geq 0,9 \Pi_{HPO}$ ($\sigma_F \geq 0,9 \sigma_{FPO}$), то выполняются второй и третий этапы, а если $\Pi_H < 0,9 \Pi_{HPO}$ ($\sigma_F < 0,9 \sigma_{FPO}$), то расчет заканчивается первым этапом.

На втором этапе определяется требуемый ресурс контактной R_{1H} (изгибной R_{1F}) выносливости зубчатого колеса, т. е. ресурс, который расходуется за 1 ч работы машины или за 1 км пробега. Затем находят общий ресурс контактной R_{Hlim} (изгибной R_{Flim}) выносливости, которым располагает зубчатое колесо.

На третьем этапе определяется число часов работы H_H (H_F) или пробег L_H (L_F) машины до появления прогрессирующего выкрашивания активных поверхностей зубьев.

Расчет долговечности конической передачи заднего моста по разработанной в ОИМ НАН Б методике прогнозирования надежности был проведен по представленным РУП МАЗ результатам эксплуатационных испытаний автомобиля на асфальтовых дорогах. Основные результаты проведенного расчета представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты расчетного прогнозирования долговечности конической передачи

Прогнозируемые параметры	Шестерня	Колесо
Минимальный ресурс по изгибу, км	3 421 000	2 508 000
Минимальный ресурс по контакту, км	8 494 000	11 477 000
95% ресурс по изгибу, км	11 600 000	8 503 000
95% ресурс по контакту, км	15 009 000	19 657 000

Анализ полученных данных показывает, что минимальный ресурс, который может обеспечить зубчатое зацепление по критерию изгибной усталости, составляет $\approx 2 500$ тыс. км, а по критерию контактной усталости – $\approx 8 500$ тыс. км.

Таким образом, эксплуатационная долговечность, полученная при стендовых испытаниях, в 2,5 раза меньше минимально ресурса по критерию изгибной усталости, полученного по результатам расчета. Это связано с тем, что стендовые испытания были завершены при

наработке 970 часов (≈ 40 суток), при этом работоспособность шестерен главной пары сохранилась.

Результаты расчета долговечности конической передачи заднего моста в условиях стендовых испытаний представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты расчета конической передачи заднего моста в условиях стендовых испытаний

Характеристики	Обозначение	Шестерня	Колесо
Расчетное напряжение изгиба, МПа	Y_f	342	359
Расчетное контактное напряжение, МПа	P_H	13,54	
Ориентировочная долговечность, час	T	1000	
Число циклов нагружения зубьев	N_E	$30,42 \cdot 10^6$	$24,13 \cdot 10^6$
Предел ограниченной изгибной выносливости, МПа	Y_{FPO}	480	
Предел ограниченной контактной выносливости, МПа	Π_{HPO}	17,86	
Базовое число циклов по изгибной выносливости	N_{FO}	$4 \cdot 10^6$	
Базовое число циклов по контактной выносливости	N_{HO}	$1,2 \cdot 10^8$	

Расчетная долговечность в условиях стендовых испытаний определяется по формуле

$$T_p = T \cdot \left(\frac{\Pi_{HP}}{\Pi_H} \right)^{mH}, \quad (4)$$

где Π_{HP} – предел длительной контактной выносливости (допускаемое напряжение); mH – показатель наклона левой ветви кривой контактной усталости ($mH = 3$ [1]).

Предел длительной контактной выносливости, соответствующий числу циклов нагружения зубьев шестерни будет:

$$\Pi_{HP} = \Pi_{HPO} \cdot K_{HL} = \Pi_{HPO} \cdot mH \sqrt{\frac{N_{HO}}{N_{HE}}} = 17,86 \cdot 3 \sqrt{\frac{1,2 \cdot 10^8}{3042 \cdot 10^6}} = 2822 \text{ МПа}. \quad (5)$$

Тогда расчетная долговечность по контактной выносливости зубьев шестерни в условиях стендовых испытаний

$$T_p = 1000 \cdot \left(\frac{28,22}{13,54} \right)^3 \approx 9054 \text{ часа},$$

что в перерасчете на километры пробега будет примерно 7 000 тыс. км.

Как видно, различие долговечности, определенной по результатам стендовых и натурных испытаний, составляет примерно 20%.

3 Метод ускоренных испытаний малоразмерных моделей

Модель зубчатого зацепления и метод совмещенных испытаний зубчатых зацеплений описаны в работах [8, 9, 10]. Главная особенность данного подхода состоит в том, что для экспериментального определения сопротивления как изгибной, так и контактной усталости используется единая модель зубчатого зацепления (рисунок 2).

По разработанной методике были проведены испытания серии моделей зубчатого зацепления из стали 20ХН3А на механическую и контактную усталость. Испытания проводили на машине СИ-03М при частоте 50 Гц [2]. Смазка – редукторное масло ТИ5-2.

Для ускоренной экспериментальной оценки значений параметров функции распределения предела выносливости y и предела контактной выносливости p , исследуемой стали испытания осуществляли по методу «вверх – вниз» [4].

Сводка полученных результатов приведена в таблице 3.

Таблица 3 – Значения параметров функции распределения пределов изгибной и контактной усталости моделей зубчатого зацепления

Характеристика свойств	Изгибная усталость	Контактная усталость
Среднее значение пределов выносливости, МПа	$\bar{\sigma}_{-1} = 855$	$\bar{P}_f = 5140$
Среднее квадратическое отклонение, МПа	$S_{\bar{\sigma}_{-1}} = 70,554$	$S_{\bar{P}_f} = 61,236$
Коэффициент вариации, –	$X_{\sigma_{-1}} = 0,083$	$X_{P_f} = 0,012$

В первом приближении будем считать, что результаты стендовых испытаний зубчатых колес, изготовленных из стали 20ХН3А, могут быть использованы как типовые, которые в известной мере характеризуют работу зубчатых колес из этой стали. Для рассматриваемой марки стали [1]: медианный предел выносливости по изгибу $\sigma_{Flim} = 444$ МПа; медианный предел выносливости по контакту $\sigma_{Hlim} = 106$ МПа; коэффициент вариации предела выносливости по изгибу $v_F = 0,07\epsilon$; коэффициент вариации предела выносливости по контакту $v_H = 0,11$.

При переходе от характеристик сопротивления усталости моделей зубчатых зацеплений (см. таблицу 3) к оценке предела выносливости натуре (детали) (σ_{-1d}) возникает необходимость учета влияния таких важных факторов как уровень концентрации напряжений, размеры испытываемых объектов, шероховатость поверхности и др. Учитывая это, оценку предела выносливости натурной детали выполняют по эмпирическому соотношению [4]

$$\bar{\sigma}_{-1d} = \frac{\bar{\sigma}_{-1}}{K_0}, \text{ где } K_0 = \left(\frac{K_\sigma}{K_D} + \frac{1}{K_F} - 1 \right) \frac{1}{K_v K_A}. \quad (6)$$

Здесь σ_{-1} – предел выносливости при изгибе с вращением полированных образцов металла диаметром $d = 10$ мм; σ_{-1d} – предел выносливости натуре; $K_0 \geq 1$ – коэффициент снижения предела выносливости; K_σ – эффективный коэффициент концентрации напряжений; K_D – коэффициент влияния абсолютных размеров поперечного сечения; K_F – коэффициент влияния шероховатости поверхности; K_A – коэффициент влияния анизотропии свойств; K_v – коэффициент влияния поверхностного упрочнения.

Значения рассматриваемых коэффициентов определяли по справочным данным, приведенным в [4, 5, 6]. Тогда

$$K_0 = \left(\frac{1,95}{0,9} + \frac{1}{0,97} - 1 \right) \frac{1}{1,2 \cdot 0,9} = 1,88, \text{ а } \bar{\sigma}_{-1d} = \frac{855}{1,88} = 454,8 \text{ МПа}, \quad (7)$$

Принимая коэффициент вариации предела выносливости материала зубчатого колеса $v_\sigma = 0,083$ (такой же, как и у предела выносливости модели), можно построить эмпирическую функцию его распределения (рисунок 3). Сравнивая средние значения $\bar{\sigma}_{-1d}$ и $\bar{\sigma}_{Flim}$, устанавливаем, что они различаются примерно на 3%, что вполне приемлемо для практических целей. Таким образом, практически имеем равенство $\bar{\sigma}_{-1d} = \bar{\sigma}_{Flim}$.

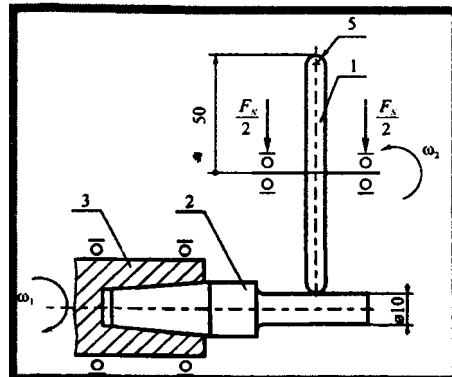


Рисунок 2 – Испытательная схема для модели зубчатых зацеплений: 1 – контрообразец, 2 – образец, 3 – шпиндель испытательной установки

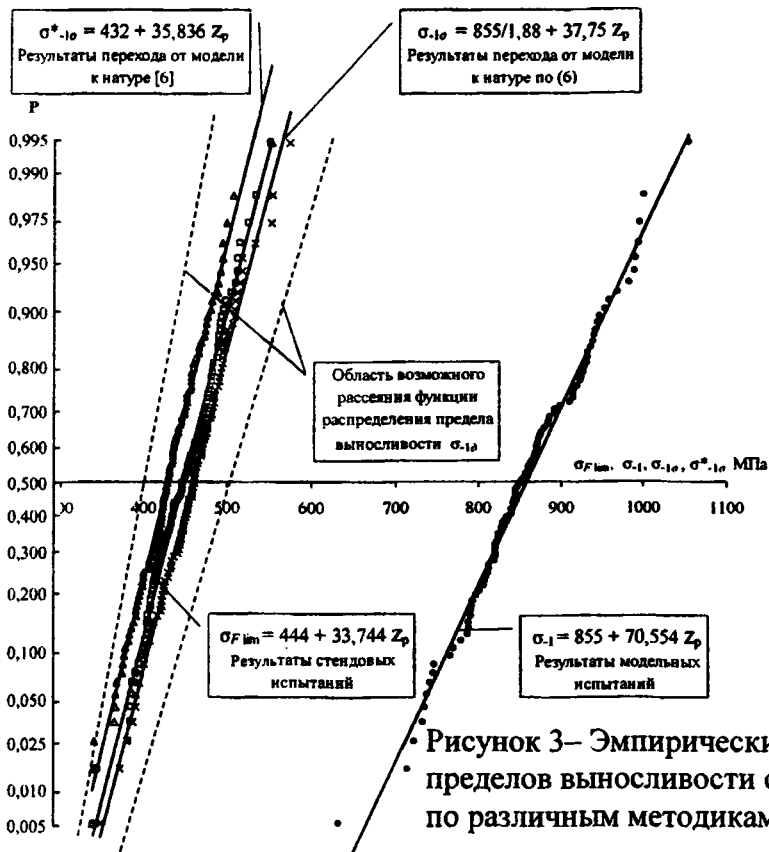


Рисунок 3— Эмпирические функции распределения пределов выносливости стали 20ХН3А полученные по различным методикам

Так как коэффициенты, входящие в формулу для определения K_0 , имеют рассеяние своих значений, то и определяемый по формуле (6) предел выносливости σ_{-10} обнаруживает рассеяние. Область возможного рассеяния его функции распределения изображена на рисунке 3 штриховыми линиями.

Переход от σ_{-1} к σ_{-Flim} можно выполнить также, используя один из статистических критериев подобия усталостного разрушения [6]. Расчеты показали, что с использованием данного критерия погрешность оценки предела выносливости составляет порядка 3 %. Задаясь коэффициентом вариации предела выносливости можно построить его функцию распределения (рисунок 3).

Особенность анализа сопротивления контактной усталости модели и природы состоит в том, что модельные испытания проведены на базе $2 \cdot 10^7$ циклов, тогда как испытания природы имеет базу $1,2 \cdot 10^8$ циклов ($\sigma_{Hlim} = 106$ МПа), т. е. практически на порядок выше [1]. Рисунок 4 иллюстрирует описанную ситуацию. Здесь приведена кривая контактной усталости, построенная по результатам форсированных испытаний, для которой за критерий предельного состояния принималась величина сближения осей образца и контробразца δ_c , равная 100 мкм. Видно, что предел контактной усталости ($p_f = 5140$ МПа), полученный при данных испытаниях, практически в 5 раз больше соответствующего значения, полученного при стендовых испытаниях.

Если на основании полученных данных провести экстраполяцию на базу $1,2 \cdot 10^8$ циклов, то значение предела контактной усталости будет порядка 4850 МПа (> в 4,5 раза). Аналогичную процедуру можно провести, приняв за критерий предельного состояния сближение осей образца и контробразца равное, соответственно, 50 и 30 мкм. Прогнозируемые результаты изображены соответствующими пунктирами. Согласно одному из прогнозов (а именно при $\delta_c = 30$ мкм) предел контактной выносливости модели оценивается величиной $p_f = 1900$ МПа, что в 1,8 раз отличается от результатов стендовых испытаний

$\sigma_{Hlim} = 1060$ МПа. В соответствии со вторым прогнозом ($\delta_c = 50$ мкм) предел контактной выносливости $p_f = 4200$ МПа, что в 4 раза больше σ_{Hlim} .

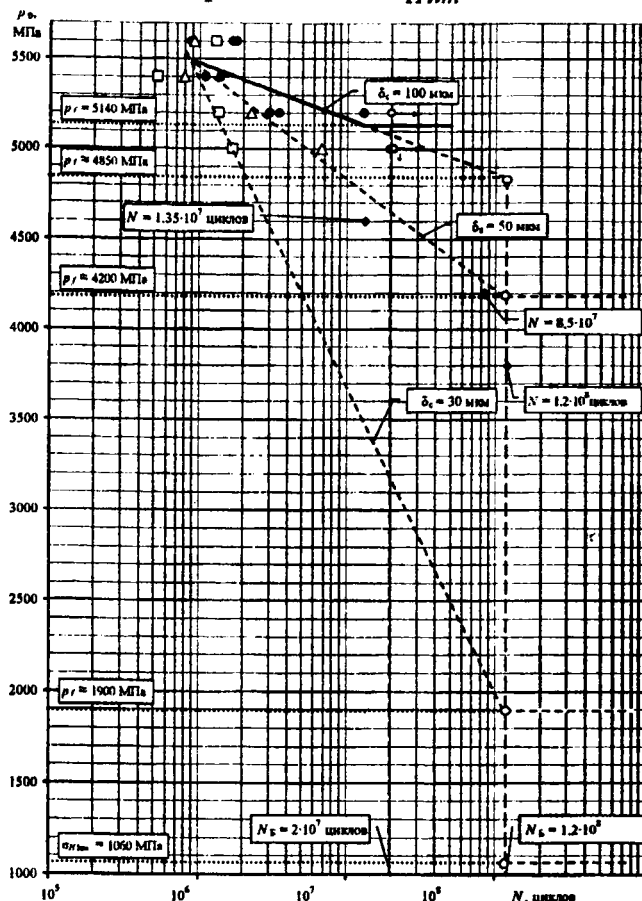


Рисунок 4 – Результаты стендовых и модельных испытаний на контактную усталость

Для перехода от модели к оценке предела контактной выносливости натуре требуется учесть влияние масштабного эффекта:

$$\bar{p}_{f\delta} = \frac{p_f}{K_M} \quad (8)$$

К сожалению, проблема оценки масштабного эффекта по (8) для случая контактнойсталости, по имеющимся данным, в литературе даже не поставлена. Поэтому в первом приближении примем, что $K_M = 1,5$. Если для зубчатого зацепления оправданным является прогноз при $\delta_c = 30$ мкм, согласно формуле (8) получим

$$\bar{p}_{f\delta} = \frac{1900}{1,5} = 1270 \text{ МПа.} \quad (9)$$

Естественно, что проблема прогнозирования сопротивления контактной усталости остается все еще не решенной. По-нашему мнению, необходимо выполнить специальные исследования по оценке влияния размеров на сопротивление контактной усталости.

Выводы

На основании изложенных материалов можно сделать следующие заключения.

1. Метод стендовых и натуральных испытаний позволяет достаточно корректно установить характеристики сопротивления деформации и разрушению шестерен главной пары ведущего моста МАЗ-5440, а также произвести прогнозирование их надежности и долговечности. Однако данные испытания весьма трудоемки, дороги, а также длительны по времени. Метод дает ограниченные результаты, пригодные лишь применительно, например, к исследованию

дованному узлу с деталями заданных типоразмеров. При переходе к другим типоразмерам испытуемых объектов все исследования приходится заново повторять

2. Расчетный метод позволяет с достаточной для инженерных целей точностью произвести оценку выносливости зубчатых колес (по сроку службы, допускаемому и эквивалентному напряжению), а также проверку их прочности. Метод базируется на результатах натуральных и стендовых испытаний, которые, как было отмечено в п.1, пригодны лишь применительно к исследованному узлу с деталями заданных типоразмеров.

3. Перспективным является метод ускоренных испытаний малоразмерных моделей зубчатого зацепления. С помощью данного метода получают результаты, удовлетворительно коррелирующие с результатами соответствующих стендовых испытаний и не противоречащие теоретическим расчетам. К основным достоинствам метода можно отнести: расширение возможностей испытаний по количеству испытуемых объектов и снижение затрат.

4. По нашему мнению, наиболее обоснованным для решения рассматриваемой проблемы является комплексный подход, который включает рациональное использование всех трех методов, что и представлено в данном докладе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цитович, И. С. Трансмиссии автомобилей / И.С. Цитович, И.В. Каноник, В.А. Вавуло – Мн.: «Наука и техника», 1979. – 256 с.
2. Трибофатика. Машины для износоусталостных испытаний. Общие технические требования: ГОСТ 30755-2001. – Введ. 01.07.02. – Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2002. – 8 с.
3. Трибофатика. Методы износоусталостных испытаний. Испытания на контактно-механическую усталость: ГОСТ 30754-2001. – Введ. 01.07.02. – Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2002. – 32 с.
4. Когаев В. П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: Справочник / В.П. Когаев, Н.А. Махутов, А.П. Гусенков – М.: Машиностроение, 1985. – 224 с.
5. Трощенко, В. Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов: Справочник / В.Т. Трощенко, Л.А. Сосновский – К.: Наукова думка, 1987. –Т.1. –514 с.
6. Когаев, В. П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени / В.П. Когаев – М.: Машиностроение, 1977. – 232 с.
7. Р 50-54-30-87 Расчеты и испытания на прочность. Методы испытаний на контактную усталость. – М.: Госстандарт СССР, ВНИИМАШ, 1988. –122 с.
8. Тюрин, С. А. Новый метод испытаний зубчатых колес на моделях / С. А. Тюрин, В. В. Комиссаров // Динамика, прочность и ресурс машин и конструкций (Тезисы докладов Международной научно-технической конференции). – Киев, 2005. Т.2. –С.347-348.
9. Жмайлик, В.А. Опыт обеспечения работоспособности зубчатых колес / В. А. Жмайлик, С. А. Тюрин, В. В. Комиссаров // Динаміка, міцність і надійність сільськогосподарських машин (Труди I Международной научно-технической конференции, 4-7 октября 2004 г., Тернополь, Украина). / Отв. Ред. В.Т. Трощенко. – Тернополь: Тернопольский государственный технический университет имени Ивана Пулюя, 2004. – С.337-342.
10. Махутов, Н. А. Метод совмещенных усталостных испытаний моделей зубчатых зацеплений / Н. А. Махутов, В. А. Жмайлик, С. А. Тюрин, В. В. Комиссаров // Заводская лаборатория. –2005. –Т.71. –№ 1. –С.55-57

НОВЫЕ МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ МОДЕЛЕЙ СИЛОВЫХ СИСТЕМ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ

Объединенный институт машиностроения НАНБ

Минск, Беларусь

РУП «Гомельтранснефть Дружба»

Гомель, Беларусь

РУП «Гомельский завод сельскохозяйственного машиностроения «Гомсельмаш»

Гомель, Беларусь

Белорусский государственный университет транспорта

Гомель, Беларусь

Для экспериментальной оценки взаимного и совместного влияния процессов трения и механической усталости на работоспособность материалов и моделей силовых систем в сложных условиях нагружения разработаны специальные методы износоусталостных испытаний [1–8].

В результате таких испытаний определяют количественные характеристики сопротивления износоусталостным повреждениям. Эти характеристики могут быть использованы:

- при выборе конструкционных материалов для силовых систем и обосновании конструктивно-технологических решений;
- при контроле качества материалов;
- при расчетах на этапе проектирования силовых систем;
- при сертификации силовых систем по критерию износоусталостных повреждений;
- при конструировании и создании материалов с заданными физико-механическими свойствами для обеспечения требуемых характеристик сопротивления износоусталостным повреждениям.

Один из путей разработки методов комплексных (износоусталостных) испытаний – совмещение известных методов испытания на механическую усталость и методов испытания на трение и изнашивание. На рисунке 1 в качестве примера показан принцип такого формирования в том случае, когда базовым методом испытания на усталость принимают изгиб с вращением. Заметим, что вращательное движение наиболее характерно для современных машин, поэтому методы, представленные на рисунке 1, являются практически важными.

Используя подобный подход, достигают той цели, что на машинах, предназначенных для износоусталостных испытаний, можно проводить и обычные испытания либо на механическую усталость, либо на трение и изнашивание в определенных условиях.

Основная концепция разработки методов износоусталостных испытаний состоит в том, что все они построены на базе единого типоразмера основного элемента силовой систе-



Рисунок 1 – Формирование методов износоусталостных испытаний при главном вращательном движении: КМУ – контактно-механическая усталость; ФМУ – фрикционно-механическая усталость; ФУ – фреттинг-усталость

мы – вала (диаметром 10 мм). Это позволяет корректно сравнивать и анализировать результаты любых испытаний.

К настоящему времени типичные методы износоусталостных испытаний доведены до стандартного уровня (ГОСТ 30754–2001, СТБ 1233–2000, СТБ 1448–2004).

Рассмотрим основные методы износоусталостных испытаний применительно к конкретным силовым системам современных машин и оборудования.

Метод испытания моделей зубчатых зацеплений. На рисунке 2 показан оригинальный метод совмещенных испытаний материалов для зубчатых колес. Метод позволяет получить кривые изгибной и контактной усталости в процессе испытаний модели зубчатого зацепления при действии только контактной нагрузки – как в натуральных условиях.

Особенность модели состоит в том, что цилиндрический образец 1, изготовленный из материала зубчатого колеса, представляет собой консоль, на свободном конце которой сформирована зона контактного взаимодействия с роликом 2. С другой стороны формируется зона изгиба в виде галтели (радиусом r), соответствующей переходной кривой у основания зуба. Образец-модель 1, закрепленный в шпинделе 3, вращается с угловой скоростью ω_1 , а ролик 2 – с заданной скоростью ω_2 . Путем регулирования скоростей ω_1 и ω_2 можно получить требуемый коэффициент проскальзывания, имитируя скольжение в зубчатой передаче. Сила F_N , приложенная на плече L , обеспечивает одновременное возбуждение как контактных, так и изгибных напряжений в соответствующих зонах, а расстояние между этими зонами выбирают соответственно расстоянию между полюсом зацепления и основанием зуба.

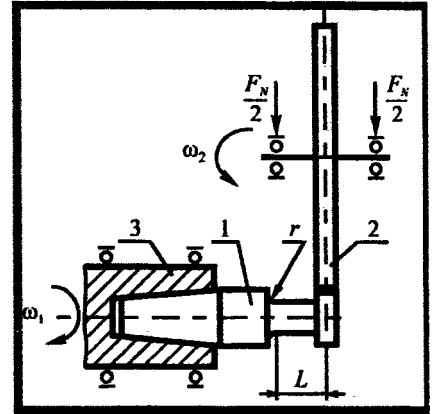


Рисунок 2 – Схема испытаний модели зубчатого зацепления

Пример реализации данного метода испытаний показан на рисунке 3. Были проведены совмещенные испытания моделей зубчатого зацепления, изготовленных из стали 18ХГТ. Упрочнение поверхностного слоя образцов и роликов проведено по технологии натурной детали – цементация (на глубину $h = 0,4 \dots 0,8$ мм) с закалкой до твердости 54 ... 64 HRC₃. Рабочие поверхности образцов ($d = 10$ мм) и роликов ($d = 100$ мм) шлифовали.

Испытания проводили при частоте 3000 мин⁻¹ в условиях нормальной температуры. При испытаниях в зону контакта капельным способом подавали смазочный материал (редукторное масло ТАД-17).

Испытания вели непрерывно до наступления предельного состояния или до базового числа циклов.

Сначала при более высоких нагрузках реализуется изгибная усталость. Критерием предельного состояния являлось разрушение образца (разделение его на две части в результате развития в опасном сечении поперечной магистральной трещины). База испытаний – 10⁷ циклов. По результатам испытаний построена кривая изгибной усталости с абсциссой точки перелома порядка 2 · 10⁶ циклов, и определена предельная нагрузка по критерию изгибной усталости $F_G = 1900$ Н (см. рисунок 3), соответствующая пределу выносливости $\sigma_{-1} = 570$ МПа.

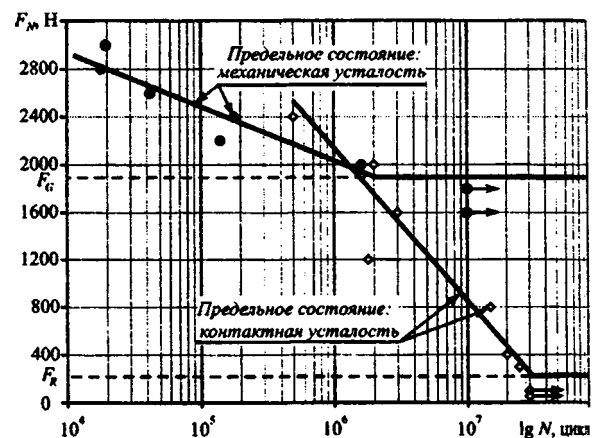


Рисунок 3 – Результаты испытания моделей зубчатого зацепления из стали 18ХГТ

Затем, при более низких нагрузках, реализуется контактная усталость. Критерием предельного состояния являлось предельное сближение осей в силовой системе ($\delta_c = 100 \text{ мкм}$). База испытаний – $3 \cdot 10^7$ циклов. По результатам испытаний построена кривая контактной усталости и определена предельная нагрузка $F_R = 200 \text{ Н}$ (см. рисунок 3), соответствующая пределу контактной усталости $p_f = 3100 \text{ МПа}$.

Метод испытания моделей системы труба/поток нефти. На рисунке 4 приведена схема оригинального способа испытаний, который в известной мере имитирует работу системы труба / поток жидкости (под давлением).

Особенность контактного взаимодействия образца 1 и контробразца 2 состоит в том, что диаметр контактной поверхности контробразца вдвое превышает диаметр образца. Поэтому контакт осуществляется по узкой полоске, а между образцом и контробразцом реализуется конструктивный клин, в который затягивается жидкость при вращении образца. Если контакт между образцом и контробразцом будет чисто жидкостным, то контробразец исполняет лишь роль устройства для создания рабочего давления на площадке контакта твердого тела с жидкостью; последняя организуется в зоне растяжения изгибаемого образца. Непрерывное движение жидкости через конструктивный клин и площадку контакта обуславливает либо гидрозрозию (если среда слабо агрессивна), либо коррозионную эрозию (если среда агрессивна по отношению к металлу образца). Таким образом, предложенный метод испытаний имитирует, например, все основные условия работы внутренних поверхностей труб линейного участка нефтепровода.

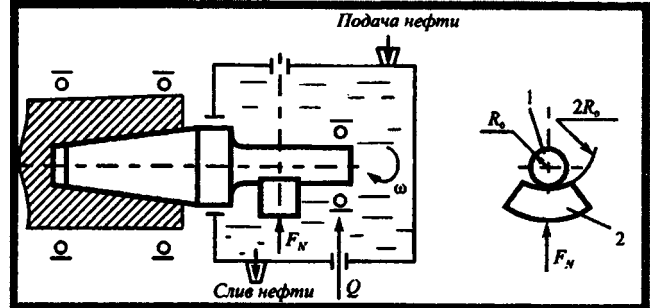


Рисунок 4 – Схема испытаний на коррозионно-эрозионную усталость

С применением разработанного метода проведены испытания на коррозионно-эрозионную усталость в среде нефти двух серий образцов низколегированной трубной стали; в качестве контробразцов использовали полимер. Образцы одной серии имели обычную феррито-перлитную структуру; структурные составляющие характеризуются следующими значениями микротвердости: перлит – 200...210 HV, феррит – 170...180 HV. Микроструктура другой серии образцов имела особенность: в зернах перлита (средняя микротвердость 200...210 HV) обнаруживаются включения, которые имеют аномально высокую твердость (360...380 HV). Методами дефектоскопического контроля было установлено, что в стали с такой микроструктурой возникают магнитные аномалии. Поэтому цель испытаний состояла в том, чтобы оценить роль микроструктурного состояния стали на изменение ее сопротивления коррозионно-эрозионной усталости.

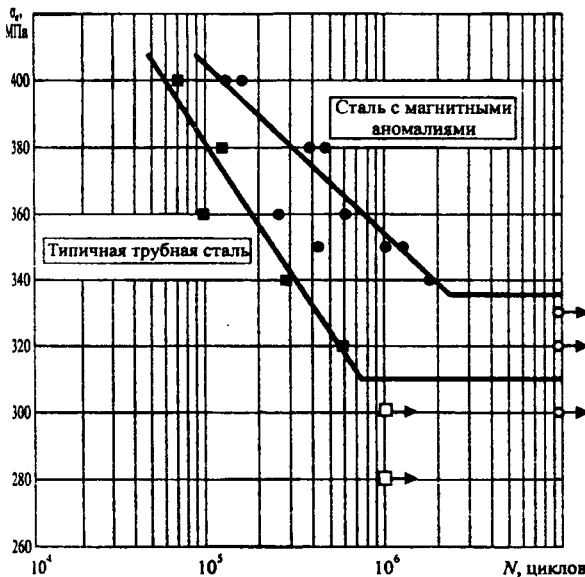


Рисунок 5 – Сравнение кривых коррозионно-эрозионной усталости типичной трубной стали и трубной стали с магнитными аномалиями

Видно, что предел выносливости стали с магнитными аномалиями примерно на 8 % выше, чем обычной стали. Это означает, что имеется известная перспектива повышения

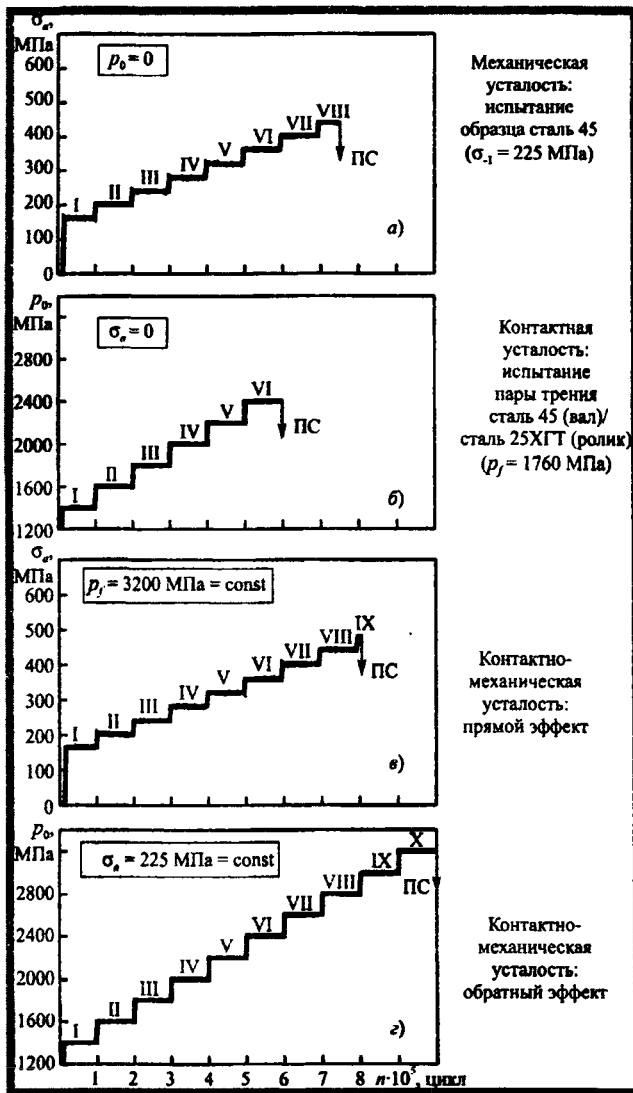


Рисунок 6 – Результаты испытаний объектов методом многоступенчатого нагружения (ПС – предельное состояние по соответствующему признаку)

важной особенностью: в этом случае контактная нагрузка является одновременно и изгибающей – как в условиях эксплуатации. Условия испытаний таких моделей позволяют в лабораторных условиях воспроизвести:

- различные виды поверхностного контактно-усталостного повреждения (износ, остаточная деформация, микротрещины, ямки выкрашивания и т. п.);
- объемное разрушение путем развития поперечной магистральной усталостной трещины (в том числе и с той особенностью, что очаг трещины обнаруживается под поверхностью качения).

На рисунке 8 дан один из результатов испытаний. Получено характерное повреждение – остаточная деформация и износ на дорожке катания; на этой дорожке обнаруживаются ямки выкрашивания – подобно

сопротивления трубной стали коррозионно-эрозивной усталости путем упрочнения литной фазы.

Метод многоступенчатого нагружения. Этот метод широко используют для ускоренной оценки основной характеристики сопротивления усталости металлических материалов – предела выносливости. Мы используем этот метод для того, чтобы получить комплекс специфических характеристик износоусталостного повреждения.

На рисунке 6 приведены результаты сравнительных испытаний образца стали 45 на механическую усталость, пары трения сталь 45 (вал) / сталь 25ХГТ (ролик) – на контактную усталость и аналогичной силовой системы сталь 45 (вал)/сталь 25ХГТ (ролик) – на контактно-механическую усталость в условиях прямого и обратного эффектов. Одного взгляда на рисунок 6 достаточно, чтобы увидеть: сопротивление износоусталостному повреждению и разрушению сравниваемых объектов существенно различно – по уровню предельных напряжений, по долговечности (суммарному числу циклов нагружения до наступления предельного состояния) и, наконец, по числу ступеней нагружения, которое может выдержать данный объект до перехода к предельному состоянию.

Метод испытания моделей системы колесо/рельс. На рисунке 7 показана схема испытаний системы ролик/кольцо, которая имитирует работу системы колесо/рельс в зоне качения с

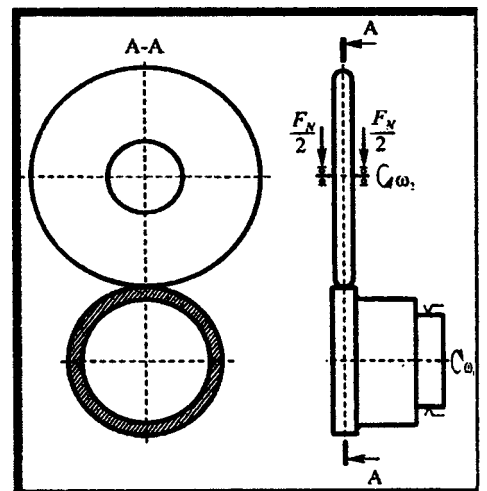


Рисунок 7 – Конструктивная схема модели системы колесо/рельс: система ролик/кольцо

тому, как это бывает при эксплуатации рельсов.

К настоящему времени разработаны и введены в действие следующие государственные стандарты, регламентирующие методы определения характеристик износоусталостного повреждения:

- ГОСТ 30638–99. Трибофатика. Термины и определения.
- ГОСТ 30754–2001. Трибофатика. Методы износоусталостных испытаний. Испытания на контактно-механическую усталость.
- СТБ 1233–2000. Трибофатика. Методы износоусталостных испытаний. Ускоренные испытания на контактно-механическую усталость.
- СТБ 1448–2004. Трибофатика. Методы износоусталостных испытаний. Испытания на фрикционно-механическую усталость.

Испытания моделей деталей и узлов можно вести на универсальном испытательном оборудовании – автоматизированных машинах серии СИ, основные технические параметры которых регламентированы требованиями стандарта. Это резко снижает затраты и расширяет возможности испытаний по количеству испытуемых объектов. Результат – повышение точности оценки служебных свойств объектов.

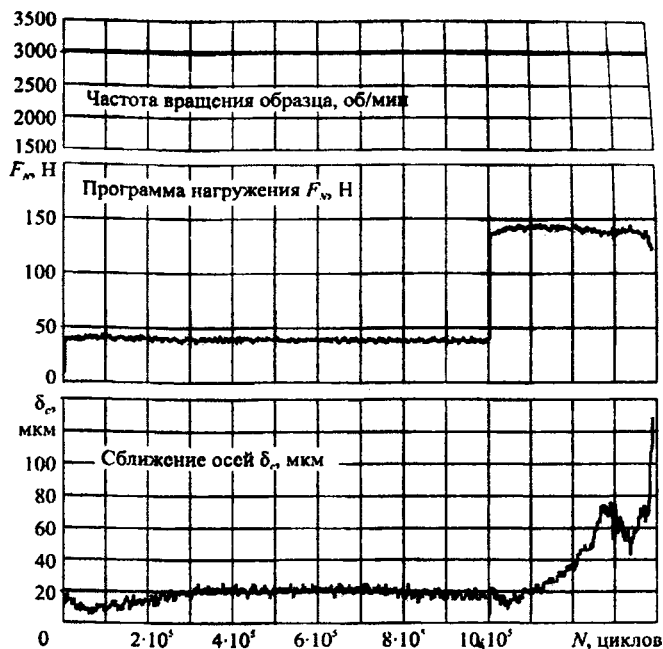


Рисунок 8 – Протокол испытаний системы ролик/кольцо

ЛИТЕРАТУРА

1. Сосновский, Л. А. Основы трибофатики / Л. А. Сосновский. – Гомель: БелГУТ, 2003. – Т. 1. – 246 с.; Т. 2. – 234 с. 2. Трибофатика: библиографический указатель (1985–2005) / Сост. С. А. Тюрин // Материалы V Междунар. симпозиума по трибофатике (ISTF 2005) / под ред. А. П. Хоменко. – Иркутск-Братск, 2005. – С. 69–116. 3. Фролов, К. В. Новые машины и методы испытаний / К. В. Фролов, Н. А. Махутов // Заводская лаборатория. – 1995. – № 5. – С. 32–33. 4. Сосновский, Л. А. Методы износоусталостных испытаний материалов / Л. А. Сосновский // Заводская лаборатория. – 1990. – № 6. – С. 90–95. 5. Махутов, Н. А. Методы износоусталостных испытаний и их реализация на машине СИ / Н. А. Махутов [и др.] // Заводская лаборатория. – 1995. – № 6. – С. 17–42. 6. Красневский, Л. Г. Оригинальные методы и технологии испытаний моделей компонентов общетехнического применения / Л. Г. Красневский, В. И. Сенько, В. А. Андрияшин, С. А. Тюрин // Тр. V Междунар. симпозиума по трибофатике (ISTF 2005), 3–7 октября 2005 г., Иркутск (Россия) / отв. ред. А. П. Хоменко. – Иркутск: Иркутский государственный университет путей сообщения, 2005. – Т. 1. – С. 178–203. 7. Жмайлик, В. А. Концепция испытаний сельскохозяйственных машин / В. А. Жмайлик // Тр. V Междунар. симпозиума по трибофатике (ISTF 2005), 3–7 октября 2005 г., Иркутск (Россия) / отв. ред. А. П. Хоменко. – Иркутск: Иркутский государственный университет путей сообщения, 2005. – Т. 1. – С. 234–246. 8. Плескачевский, Ю. М. Современные методы комплексных износоусталостных испытаний / Ю. М. Плескачевский, Н. А. Махутов, Л. А. Сосновский, Ю. Н. Дроздов, М. М. Гаденин, А. В. Богданович, С. А. Тюрин, В. В. Воробьев // Современные методы проектирования машин: сб. науч. тр. Вып. 2. В 7 т. / под общ. ред. П. А. Витязя. – Минск: УП "Технопринт", 2004. – Т. 1. – С. 33–47.

СОПРЯЖЕННОЕ НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ СИЛОВОЙ СИСТЕМЫ РОЛИК/КОЛЬЦО В УСЛОВИЯХ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ИЗГИБА

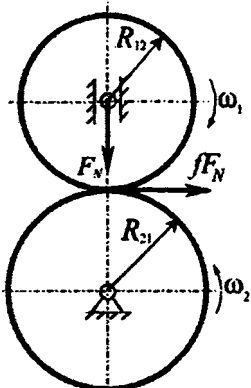
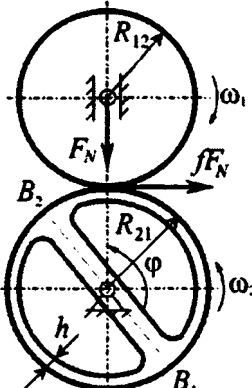
Белорусский государственный университет,
Минск, Беларусь

В ряде механических систем, называемых в трибофатике силовыми [1], имеет место как поверхностное деформирование и повреждение в локальной области контакта двух элементов системы, так и объемное деформирование и повреждение системы от действующей неконтактной нагрузки.

В работе [2] предложена общая классификация контактных задач применительно к силовым системам машин. В таблице 1 воспроизводится та ее часть, которая относится к контактным задачам для тел вращения. Согласно работе [3], тип контакта В соответствует простейшей механической модели для системы колесо/рельс. Данная модель предназначена для комплексных износоусталостных испытаний на машинах серии СИ [1]. Здесь ролик (элемент 2) имитирует колесо, а кольцо (элемент 1) – рельс. Далее эту модель будем называть системой ролик/кольцо.

Принципиальная особенность системы ролик/кольцо (таблица 1, тип В) по сравнению с соответствующей традиционной контактной задачей (таблица 1, тип А) для системы ролик/ролик состоит в том, в зоне взаимодействия кольца с роликом напряженное состояние обусловлено как полем контактных напряжений, так и полем напряжений вследствие изгиба. Будем называть напряженное состояние в зоне взаимодействия кольца с роликом сопряженным напряженным состоянием для того, чтобы подчеркнуть его особенность.

Таблица 1 – Схемы подвижного контакта

Элемент 1: $R_{11} > 0$ $R_{12} > 0$		
Элемент 2: $R_{21} > 0$ $R_{22} > 0$		
Тип контакта	А	В

Основные положения. При исследовании сопряженного напряженного состояния рассматриваемой системы будем исходить из следующих основных положений.

1. Приложенная к силовой системе ролик/кольцо нагрузка F_N , вызывает в системе как локальные контактные деформации, так и объемное деформирование (изгиб) кольца – они возбуждаются одновременно и в единой области.

2. В силу того, что в области контакта взаимодействующие тела (ролик и кольцо) ограничены поверхностями второго порядка, считается применимой теория Герца. Таким образом, в общем случае площадка контакта $S(x, y)$ имеет форму эллипса, а усилия $p(x, y)$ на площадке контакта распределены по эллиптическому закону [4, 5].

3. Размеры и площадь эллипса контакта в исследуемой системе дополнительно формируются за счет изменения главной кривизны кольца вследствие его изгиба.

4. Связь между напряжениями и деформациями в области контакта линейная.

5. Изгибные напряжения в кольце рассчитываются в соответствии с теорией изгиба плоского кривого бруса [6].

В [2, 7] был предложен сравнительно простой метод описания нагруженности системы ролик/кольцо. В основу метода положена гипотеза о том, что нагрузка F_N может быть разделена на контактную F_c и изгибную F_b составляющие:

$$F_N = F_c + F_b. \quad (1)$$

Способ определения величин F_c и F_b основан на следующем феноменологическом подходе. Под действием внешней сосредоточенной нагрузки F_N , передаваемой от ролика к кольцу, в последнем, вследствие упругого деформирования, возникает внутренний изгибающий момент M_b , который является, по существу, «моментом противодействия» внешней нагрузке со стороны кольца. Условие равновесия, следовательно, будет

$$F_N = F_c + \varphi(M_b), \quad (2)$$

где F_c – нескомпенсированная моментом M_b часть приложенной нагрузки F_N , т. е. ее контактная составляющая, а функция

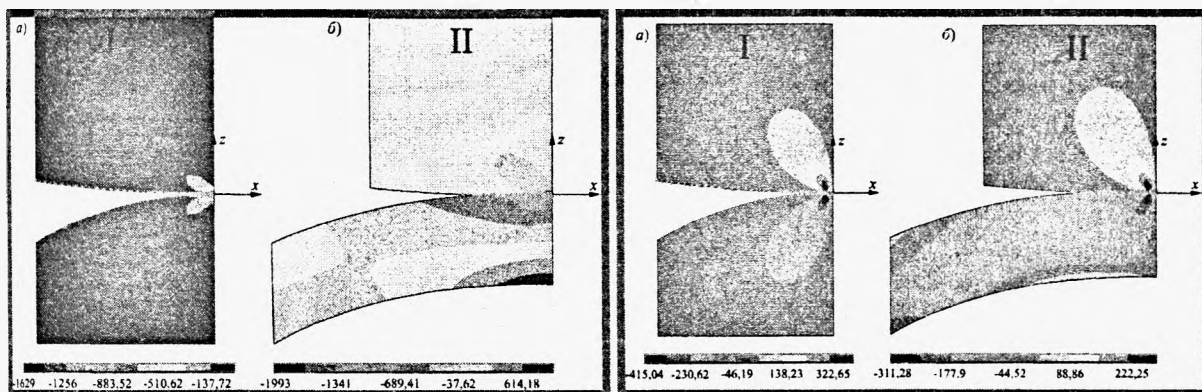
$$\varphi(M_b) = F_b, \quad (3)$$

представляется как некоторая эквивалентная изгибная (поперечная) нагрузка, которая и обеспечивает условие равновесия (2) или (1).

Соотношение между составляющими F_c и F_b приложенной нагрузки F_N в общем случае зависит от объемной жесткости кольца EI_z/l (E – модуль упругости материала кольца, I_z – момент инерции сечения, l – длина дуги кольца от точки приложения контактной нагрузки до ближайшей опоры) или, с точностью до постоянной k , от соотношения определяющих размеров кольца h/l , где h – толщина кольца. Постоянная k , следовательно, отражает, главным образом, влияние жесткости материала на формирование составляющих F_c и F_b .

а) Распределение напряжений σ_{xx}

б) Распределение напряжений σ_{xz}



в) Распределение напряжений σ_{zz}

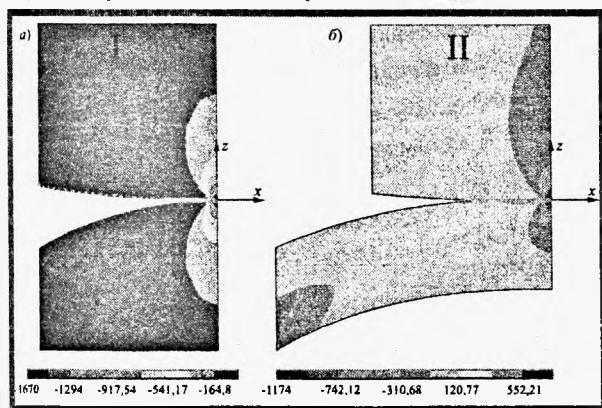


Рисунок 1 – Распределение напряжений при решении плоской задачи:

I – контактная пара,
II – силовая система

Принимается, что разделение составляющих F_c и F_b описывается экспоненциальной функцией

$$F_c = F_N \left(1 - \exp\left(-\frac{h}{lk}\right) \right), F_b = F_N \exp\left(-\frac{h}{lk}\right), \quad (4)$$

с сохранением условия (1). Функция (4) считается справедливой в интервале

$$0 \leq \frac{h}{lk} \leq \infty. \quad (5)$$

Когда $l \rightarrow \infty$, то случай $h/lk = 0$ означает, что кольцо трансформируется в брус бесконечной длины, для которого $F_N = F_b$, а $F_c = 0$. Когда же $l \rightarrow 0$, то случай $h/lk = \infty$ означает, что кольцо стягивается в ролик (или полукольцо – в половину ролика), для которого $F_N = F_c$, а $F_b = 0$.

Правомерность гипотезы (1) была подтверждена, в первом приближении, конечно-элементным моделированием и сравнительным анализом пары трения и силовой системы (рисунок 1) [7]. Рассмотрены как двумерная (первоначальный контакт по линии), так и трехмерная (первоначальный контакт в точке) задачи. Для расчета приняты: $F_N = 500$ Н, радиус ролика $R_{12} = 50$ мм, радиус кольца $R_{21} = 15$ мм, толщина кольца $h = 2,5$ мм. Результаты расчетов приведены на рисунке 1 и в таблицах 2 и 3. Из приведенных данных следует, что давление в центре площадки контакта (p_0) в силовой системе, вследствие «расхода» части R_2 на изгиб кольца, до 30 % меньше, чем в контактной паре.

Полное перемещение (w_1) силовой системы за счет изгиба кольца до 300 % больше, чем в контактной паре; смещение (z_0) точки контакта в силовой системе превышает такое в паре трения до 7,5 раз. В результате контактное сближение тел в силовой системе $\delta = w_1 - w_2$, w_2 – перемещение нижней точки кольца, лежащей на оси z) до 60 % меньше, чем в контактной паре. Указанные характеристики уменьшаются при переходе от двумерной к трехмерной задаче, вследствие существенного роста жесткости кольца за счет увеличения его ширины.

Таблица 2 – Результаты расчетов для двумерной задачи

Параметры	Контактная пара	Силовая система (толщина кольца $h = 2,5$ мм)	Соотношение параметров для контактной пары и силовой системы, %
$p_0, \text{Н/мм}^2$	-1670,3	-1173,6	29,7
$w_1, \text{мм}$	$2,417 \cdot 10^{-2}$	$9,138 \cdot 10^{-2}$	-278,1
$w_2, \text{мм}$	0	$8,221 \cdot 10^{-2}$	–
$\delta = w_1 - w_2$	$2,417 \cdot 10^{-2}$	$0,917 \cdot 10^{-2}$	62,1
$z_0, \text{мкм}$	11,9	83,4	-600,8

Таблица 3 – Результаты расчетов для трехмерной задачи

Параметры	Контактная пара	Силовая система (толщина кольца $h = 2,5$ мм)	Соотношение параметров для контактной пары и силовой системы, %
$p_0, \text{Н/мм}^2$	-3815,2	-3716,2	2,6
$w_1, \text{мм}$	$1,211 \cdot 10^{-2}$	$3,168 \cdot 10^{-2}$	-161,6
$w_2, \text{мм}$	0	$2,026 \cdot 10^{-2}$	–
$\delta = w_1 - w_2$	$1,211 \cdot 10^{-2}$	$1,142 \cdot 10^{-2}$	5,7
$z_0, \text{мкм}$	6,1	25,6	-319,7

Таким образом, результаты конечноэлементного расчета демонстрируют существенное влияние изгиба кольца на напряженное состояние в области контакта в результате действия единой, приложенной к системе силы F_N .

Следует, однако, отметить, что проведенный средствами специализированного расчетного пакета конечноэлементный анализ напряженного состояния силовой системы ролик кольцо рядом недостатков [7,8]. Так, погрешность расчета по сравнению с аналитическими данными превышает 10 %; при необходимости анализа для новых исходных данных всякий

раз задача решается заново и сполна; решение задач динамического изменения напряженного состояния сильно затруднено необходимостью выполнения большого объема вычислений.

Общий анализ напряженного состояния. Сопряженное напряженное состояние в любой точке $M(x, y, z)$ силовой системы ролик/кольцо будем определять из общего соотношения [7, 9, 10]

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^{(n)} + \sigma_{ij}^{(\tau)} + \sigma_{ij}^{(b)}, \quad i, j = x, y, z, \quad (6)$$

где $\sigma_{ij}^{(n)}$, $\sigma_{ij}^{(\tau)}$, $\sigma_{ij}^{(b)}$ – напряжения, вызванные соответственно нормальной контактной, касательной контактной и неконтактной нагрузками.

При исследовании напряженного состояния в зоне контакта в точной постановке обычно ограничиваются нахождением компонент напряжений в точках оси z и в некоторых точках поверхности контакта [4, 5]. Определение всех компонент напряжения в любой точке полупространства в точной постановке затруднительно в силу большой сложности интегрируемых функций.

Напряжения $\sigma_{ij}^{(n)}$ в формуле (6) можно представить в следующем виде:

$$\sigma_{ij}^{(n)} = \begin{cases} \sigma_{ij}^{(hs)} & \text{при } z < 0, \\ \sigma_{ij}^{(surf)} & \text{при } z = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Расчет напряжений $\sigma_{ij}^{(hs)}$ в любой точке $M(x, y, z)$ при $z < 0$ полупространства при действии на поверхность нормальных усилий $p(x, y)$ проводится численными методами с использованием решения задачи Буссинеска $\sigma_{ij}^{(B)}$ о действии сосредоточенной нормальной силы на полупространство [7, 8]:

$$\sigma_{ij}^{(hs)}(x, y, z) = \iint_{S(\xi, \eta)} p(\xi, \eta) \sigma_{ij}^{(B)}(\xi - x, \eta - y, z) d\xi d\eta. \quad (8)$$

Необходимо учесть, что в точке приложения единичной нагрузки напряжения $\sigma_{ij}^{(B)}$ не определены. Это приводит к тому, что для точек $z = 0$ поверхности полупространства расчет в соответствии с (8) не сходится.

Для расчета напряжений в любой точке $M(x, y, 0)$ поверхности полупространства при действии нормально распределенных усилий $p(x, y)$ проводится в соответствии со следующей общей формулой [7, 9]:

$$\sigma_{ij}^{(surf)}(x, y, 0) = \sigma_{ij}^{(S)}(x, y), \quad (9)$$

где $\sigma_{ij}^{(S)}(x, y)$ – напряжения на поверхности полупространства, вызванные действием давления, распределенного по области $S(x, y)$.

Расчет напряженного состояния $\sigma_{ij}^{(\tau)}$, вызванного действием силы трения, которая моделируется распределением касательных усилий $q(x, y)$, также выполняется численными методами с использованием решения задачи Черрути для действия сосредоточенной касательной силы на полупространство $\sigma_{ij}^{(C)}$ [7, 9]:

$$\sigma_{ij}^{(\tau)}(x, y, z) = \iint_{S(\xi, \eta)} q(\xi, \eta) \sigma_{ij}^{(C)}(\xi - x, \eta - y, z) d\xi d\eta. \quad (10)$$

Напряжения от внеконтактных нагрузок будем определять, применяя теорию, подходящую для конкретной геометрии и граничных условий взаимодействующих тел [6, 10]:

$$\sigma_{ij}^{(b)} = \sigma_{ij}^{(M)} + \sigma_{ij}^{(N)} + \sigma_{ij}^{(Q)}, \quad (11)$$

где индексы M , N и Q соответствуют внутренним моменту, продольному и поперечному усилиям.

Сопряженное напряженное состояние, определяемое выражением (6), с учетом (7)-(11) описывается моделью Сосновского – Журавкова – Щербакова [7]:

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} &= \sigma_{ij}^{(n)} + \sigma_{ij}^{(\tau)} + \sigma_{ij}^{(b)} = \left[\sigma_{ij}^{(hs)} \underset{z}{\vee} \sigma_{ij}^{(surf)} \right] + \sigma_{ij}^{(\tau)} + \sigma_{ij}^{(b)} = \\ &= \left[\iint_{S(\xi,\eta)} p(\xi,\eta) \sigma_{ij}^{(B)}(\xi-x, \eta-y, z) d\xi d\eta \underset{z}{\vee} \sigma_{ij}^{(S)}(x,y) \right] + \\ &+ \iint_{S(\xi,\eta)} q(\xi,\eta) \sigma_{ij}^{(C)}(\xi-x, \eta-y, z) d\xi d\eta + \sigma_{ij}^{(M)}(x,y,z) + \sigma_{ij}^{(N)}(x,y,z) + \sigma_{ij}^{(O)}(x,y,z). \end{aligned} \quad (12)$$

Приведем численный пример реализации (12).

Рассмотрим область кольца, непосредственно примыкающую к точке первоначально-го контакта, при $\varphi = 5\pi/12$.

Зададим локальную систему координат xuz с началом отсчета в точке первоначального контакта ролика и кольца. Ось z направим по внешней нормали, а ось x – по касательной к поверхности кольца в направлении действия силы трения. Ось y направим перпендикулярно плоскости xz . Тогда в силу соотношения $k_{11} + k_{22} > k_{12} + k_{21}$ большая полуось эллипса контакта будет сонаправлена с осью x .

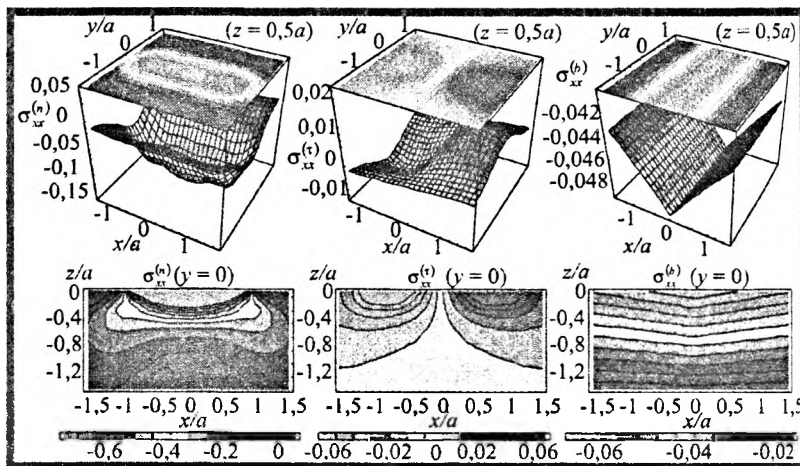


Рисунок 2 – Распределение напряжений $\sigma_{xx}^{(n)}$, $\sigma_{xx}^{(\tau)}$,

$\sigma_{xx}^{(b)}$, отнесенных к $p_0 = 3,511 \cdot 10^9$ Па, в кольце при $F_b = 47$ Н, $a = 4,867 \cdot 10^{-4}$ м, $b/a = 0,574$

В соответствии с формулой (1) при $k = 0,1$ и одновременном действии в системе сил $F_c = 953$ Н и $F_b = 47$ Н получим распределения соответствующих напряжений (рисунок 2 и 3). Поскольку величины напряжений $\sigma_{xz}^{(b)}$, $\sigma_{zz}^{(b)}$ в трехмерной области контакта ролика и кольца очень малы, то изменение напряженного состояния в данной области кольца по сравнению с чисто контактным напряженным состоянием происходит в основном за счет напряжений $\sigma_{xx}^{(b)}$ (см. рисунок 2). А величина компоненты тензора напряжений

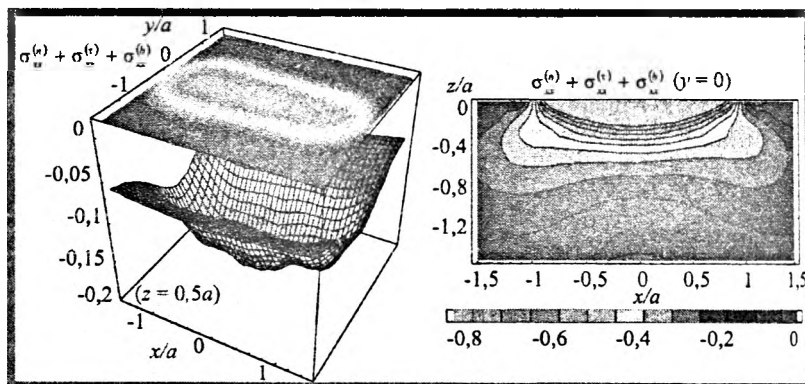


Рисунок 3 – Распределение напряжений

$\sigma_{xx}^{(n)} + \sigma_{xx}^{(\tau)} + \sigma_{xx}^{(b)}$, отнесенных к $p_0 = 3,511 \cdot 10^9$ Па, в кольце при $F_b = 47$ Н, $a = 4,867 \cdot 10^{-4}$ м, $b/a = 0,574$

$\sigma_{xx} = \sigma_{xx}^{(n)} + \sigma_{xx}^{(\tau)} + \sigma_{xx}^{(b)}$ в кольце в наибольшей степени определяется сжимающими напряжениями $\sigma_{xx}^{(n)}$ (рисунок 3). Однако уже на глубине $z = 0,5a$ заметно влияние напряжений $\sigma_{xx}^{(\tau)}$ разного знака (от контактной нагрузки) и сжимающих $\sigma_{xx}^{(b)}$ напряжений (вследствие изгиба).

Таким образом, установлено отличие сопряженного напряженного состояния системы ролик/кольцо (12) как от контактного напряженного состояния, так и напряженного состояния, рассчитанного в соответствии с теорией изгиба. Анализ показывает, что это различие, в зависимости от условий нагружения, может достигать 1,5–2 раз [7]. Это означает, что неучет сопряженного напряженного состояния при проектировании конкретной силовой системы может привести к неверной оценке ее работоспособности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сосновский Л. А. Основы трибофатики: – Гомель: БелГУТ, 2003. – Т.1. – 246 с.; Т.2. – 234 с. 2 Сосновский Л. А., Щербаков С. С. О классификации контактных задач применительно к силовым системам машин / Современные методы проектирования машин. Сборник научных трудов. Вып. 2. В 7-ми т. / Под общ. ред. П. А. Витязя. – Мн.: УП "Технопринт", 2004. – Т.4. – С. 48–58. 3 Тюрин С. А. и др. Новые способы испытаний применительно к системе колесо/рельс // Вестник БелГУТа. – 2004. – С. 54–64. 4 Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. – М.: Мир, 1989. – 510 с. 5 Пономарев С. Д. и др. Расчеты на прочность в машиностроении. – М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1958. – Т.1. – С. 387–486. 6 Тимошенко С. П., Гудьер Д. Теория упругости. – М.: Наука, 1975. – 576 с. 7 Сосновский Л. А. Механика износоусталостного повреждения: – Гомель: БелГУТ, 2007. – 434 с. 8. Журавков М. А., Захарик А. М., Босяков С.М., Щербаков С.С. Компьютерный анализ напряженно-деформированного состояния в зоне эллиптической площадки контакта тел при качении применительно к модели зубчатых зацеплений // Трение и износ, 2006. -№1. –С.12-16. 9 Журавков М. А., Щербаков С.С. Исследование опасных объемов при решении контактной задачи для системы «ролик/кольцо» / Тр. 5-го Международного симпозиума по трибофатике (ISTF 2005), 3–7 октября 2005 г., Иркутск (Россия) / отв. ред. А. П. Хоменко. – Иркутск: Иркутский государственный университет путей сообщения, 2005. –Т. 1. – С. 375–390. 10 Сосновский Л. А., Сенько В. И., Щербаков С. С., Залесский Н. А., Исследование напряженного состояния простейшей модели системы колесо/рельс // Вестник БелГУТА, 2005. – № 2. – С. 18–41.

УДК 539.3

Щербаков С. С.

ОПАСНЫЕ ОБЪЕМЫ КАК МЕРЫ ПОВРЕЖДЕННОСТИ

*Белорусский государственный университет
Минск, Беларусь*

Оценка поврежденности силовой системы [1] в общем случае основывается на статистической модели деформируемого твердого тела с опасным объемом [2].

Согласно этой модели при объемном деформировании опасным называется объем V_p , в котором с некоторой вероятностью P возможно появление циклических напряжений σ превышающих нижнюю границу σ_{-1lim} рассеяния пределов выносливости σ_{-1} . Соответственно при контактном деформировании опасным называется объем, в котором с некоторой вероятностью P возможно появление нормальных контактных напряжений, превышающих нижнюю границу P_{fmin} рассеяния пределов выносливости $P_f = P_{0lim}$, где $P_{0lim} = \sigma_{zz}^{(max)}$ – давление в центре контакта при предельной контактной нагрузке. Аналогичным образом определяется нижняя граница рассеяния пределов выносливости для касательных напряжений.

Применительно к силовым системам дуга расчета опасных объемов предполагает, во-первых, знание трехмерного напряженного ния элементов, вызванного как локальным, так и объемным нагружением, и, во-вторых, определения критических (предельных) напряжений, которые служат критерием для ограничения соответствующих опасных областей.

При действии на силовую систему предельной нагрузки F_{*lim} для однородного изотопного деформируемого твердого тела определяют предельные нормальные и касательные напряжения

$\sigma_n^{(*lim)}$ и $\sigma_\tau^{(*lim)}$, а также предельное главное напряжение $\sigma_1^{(*lim)}$ и предельную интенсивность напряжений $\sigma_{int}^{(*lim)}$ [2, 3]:

$$\begin{aligned} \sigma_n^{(*lim)} &= \max_{dV, i} \left(\left| \sigma_{ii} (F_{*lim}, dV) \right| \right), \quad i = x, y, z, \\ \sigma_\tau^{(*lim)} &= \max_{dV, i, j} \left(\left| \sigma_{ij} (F_{*lim}, dV) \right| \right), \quad i, j = x, y, z, \quad i \neq j, \\ \sigma_1^{(*lim)} &= \max_{dV} \left(\left| \sigma_1 (F_{*lim}, dV) \right| \right), \\ \sigma_{int}^{(*lim)} &= \max_{dV} \left(\sigma_{int} (F_{*lim}, dV) \right), \end{aligned} \quad (1)$$

где dV – элементарный объем нагруженного тела.

Тогда критериальные условия для ограничения опасных объемов будут иметь вид

$$V_{ij} = \left\{ dV / \sigma_{ij} \geq \sigma_k^{(*lim)}, dV \subset V_k \right\}, \quad i, j = x, y, z, \quad k = \begin{cases} n & \text{при } i = j, \\ \tau & \text{при } i \neq j, \end{cases} \quad (2)$$

$$V_i = \left\{ dV / \sigma_i \geq \sigma_1^{(*lim)}, dV \subset V_k \right\}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (3)$$

$$V_{int} = \left\{ dV / \sigma_{int} \geq \sigma_{int}^{(*lim)}, dV \subset V_k \right\}, \quad (4)$$

где V_k – рабочий объем деформируемого твердого тела.

Следовательно, если рассмотреть тензор напряжений σ_j в каждом элементарном объеме dV тела, то в общем случае для описания изменения величины действующих напряжений по сравнению с величиной предельных можно ввести три типа тензора повреждающих напряжений: компонентные, главные и октаэдрический:

$$\begin{aligned} g_{ij} &= \left| \sigma_{ij} / \sigma_k^{(*lim)} \right|, \\ g_i &= \left| \sigma_i / \sigma_1^{(*lim)} \right|, \\ g_{int} &= \sigma_{int} / \sigma_{int}^{(*lim)}, \end{aligned} \quad (5)$$

где g_{ij} , g_i , g_{int} имеют вероятностную природу, поскольку в условии прочности как действующие напряжения σ_{ij} , σ_i , σ_{int} , так и пределы выносливости $\sigma_k^{(*lim)}$, $\sigma_1^{(*lim)}$, $\sigma_{int}^{(*lim)}$ являются случайными величинами с соответствующими плотностями распределения $\varphi(\sigma_{ij})$, $\varphi(\sigma_i)$, $\varphi(\sigma_{int})$ и $\varphi(\sigma_k^{(*lim)})$, $\varphi(\sigma_1^{(*lim)})$, $\varphi(\sigma_{int}^{(*lim)})$.

Можно также рассматривать шаровую g^S и девиаторную g_{ij}^D части тензора g_{ij}

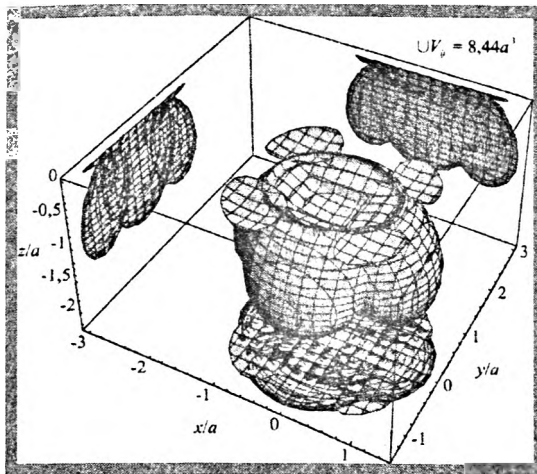


Рисунок 1 – Тензорный опасный объем $\cup V_{ij}$ ($i, j = x, y, z$) при $b/a = 0,813$

$$g^S = \begin{pmatrix} g & 0 & 0 \\ 0 & g & 0 \\ 0 & 0 & g \end{pmatrix}, (g_{ij}^D) = (g_{ij}) - g^S = \begin{pmatrix} g_{11} - g & g_{12} & g_{13} \\ g_{21} & g_{22} - g & g_{23} \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} - g \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где $g = \frac{(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})}{3\sigma_k^{(lim)}} = \frac{1}{3}(g_{11} + g_{22} + g_{33})$.

Тогда вероятность локального повреждения в точке, вызванного действием σ_{ij}

$$P(g_{ij}(dV) \leq 1) = \int_{-\infty}^1 \varphi[g_{ij}(dV)] dg_{ij}(dV). \quad (7)$$

При $0 \leq g_{ij} < 1$ вероятность появления повреждения в элементарном объеме dV будет $P(g_{ij}(dV) \leq 1)$. При $1 \leq g_{ij} < \infty$ степень повреждения тела в dV равна $g_{ij}(dV)$.

Аналогичным образом проводятся рассуждения для g_i и g_{int} .

Для описания характера и уровня повреждений в области контакта вводится представление о типах опасных объемов, определения, обозначения и формулы для расчета которых даны в таблице 1 [2, 3].

Поскольку опасные объемы могут иметь произвольную и сложную форму, то их аналитическое определение, согласно формулам таблицы 1, может быть затруднено; в таких случаях их вычисляют методом Монте-Карло.

Динамические опасные объемы рассчитываются по следующей общей формуле:

$$V^d = \int_l S(l) dl, \quad (8)$$

где S – проекции соответствующих опасных объемов на плоскость, ортогональную траектории движения (l).

Таблица 1 – Классификация статических опасных объемов

Тип опасного объема	Определение	Расчетная формула
Статический	$V_{ij} = \{dV / g_{ij} \geq 1, dV \subset V_k\}$ Область нагруженного тела, в каждой точке которой значение соответствующей компоненты тензора напряжений не меньше предельного	$V_{ij} = \iiint_{g_{ij}(V) \geq 1} dV$
	$V_i = \{dV / g_i \geq 1, dV \subset V_k\}$ Область нагруженного тела, в каждой точке которой значение соответствующего главного напряжения не меньше предельного	$V_i = \iiint_{g_i(V) \geq 1} dV$
Октаэдрический	$V_{int} = \{dV / g_{int} \geq 1, dV \subset V_k\}$ Область нагруженного тела, в каждой точке которой значение интенсивности напряжения не меньше предельного	$V_{int} = \iiint_{g_{int}(V) \geq 1} dV$
Шаровой	$V_S = \{dV / g \geq 1, dV \subset V_k\}$ Область нагруженного тела, в каждой точке которой значение компоненты шаровой части тензора напряжений не меньше предельного	$V_S = \iiint_{g(V) \geq 1} dV$
Девииаторный	$V_D = \{dV / \max_{i,j} g_{ij}^D \geq 1, dV \subset V_k\}$ Область нагруженного тела, в каждой точке которой значение хотя бы одной компоненты девиаторной части тензора напряжений не меньше предельного	$V_D = \iiint_{\max_{i,j} g_{ij}^D(V) \geq 1} dV$

Тип опасного объема	Определение	Расчетная формула
Совмещенный	$V_C = \bigcap_{i=p, j=m}^{q, n} V_{ij}, i, j, p, q, m, n = x, y, z,$ $V_C = \bigcap_{i=p}^q V_i, i, p, q = 1, 2, 3$ <p>Пересечение двух или более опасных объемов</p>	$V_C = \iiint_{\bigcap_{i=p, j=m}^{q, n} [g_{ij}(V)] \geq 1} dV$ $V_C = \iiint_{\bigcap_{i=p}^q [g_i(V)] \geq 1} dV$
Тензорный	$V_T = \bigcup_{i=p, j=m}^{q, n} V_{ij}, i, j, p, q, m, n = x, y, z,$ $V_T = \bigcup_{i=p}^q V_i, i, p, q = 1, 2, 3$ <p>Объединение двух или более опасных объемов</p>	$V_T = \iiint_{\bigcup_{i=p, j=m}^{q, n} [g_{ij}(V)] \geq 1} dV$ $V_T = \iiint_{\bigcup_{i=p}^q [g_i(V)] \geq 1} dV$

Проиллюстрируем общую модель (таблица 1) расчетом опасных объемов применительно к паре трения, определив предварительно напряженное состояние последней. При расчете напряжений при контакте воспользуемся теорией контактного взаимодействия Герца, которая позволяет определить параметры несогласованного контакта: p_0, a, b – давление в центре контакта, большую и меньшую полуоси эллипса контактной площадки соответственно.

Расчет напряжений $\sigma_{ij}^{(n)}$ и $\sigma_{ij}^{(\tau)}$ в полупространстве при действии на область полупро-

странства $S(x, y)$ соответственно нормальных $p(x, y) = p_0 \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}}$ и касательных

$q = fp(x, y)$ контактных усилий проводится численными методами с использованием решений задач Буссинеска и Черрути [4].

Напряженное состояние при контакте с трением на основе описывается суперпозицией напряжений $\sigma_{ij}^{(n)}$ и $\sigma_{ij}^{(\tau)}$ [2, 3, 4]:

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^{(n)} + \sigma_{ij}^{(\tau)}, i, j = x, y, z. \quad (9)$$

Рассмотрим формирование опасных объемов в условиях контактного взаимодействия в соответствии с (9) и таблицей 1 при следующих параметрах: модуль упругости $E_1 = E_2 = 2,01 \cdot 10^{11}$ Па, коэффициент Пуассона $\nu_1 = \nu_2 = 0,3$, $R_{11} = 0,003$ м, коэффициент трения $f = 0,05$, $R_{12} = 0,05$ м, $R_{21} = 0,005$ м, $R_{22} = \infty$, $\sigma_n^{(*lim)} = 0,3p_0$, $\sigma_\tau^{(*lim)} = 0,09p_0$.

Результаты вычислений представлены на рисунках 1–3. Из данных рисунков видно, что наибольшими по величине являются опасные объемы V_{zz} , V_{xz} и V_{yz} , которые соответствуют наибольшим напряжениям $\sigma_{zz}^{(n)}$, $\sigma_{xz}^{(n)}$ и $\sigma_{yz}^{(n)}$. Отметим, что, несмотря на небольшое значение коэффициента трения f , действие распределенных касательных усилий $q(x, y)$ приводит к изменению форм и величин опасных объемов, обусловленных действием нормальных усилий $p(x, y)$. Особенно заметна асимметрия объема V_{xz} относительно плоскости $x = 0$.

Поскольку опасные объемы являются мерой поврежденности деформируемых тел, то анализ рисунков 2 и 3 позволяет указать конкретные области (зоны), в которых возможно зарождение и развитие как поверхностных, так и внутренних трещин. Ясно, что действие необратимых повреждений реализуется там, где соответствующие опасные объемы пересекаются, т.е. накладываются друг на друга или совмещаются друг с другом. Условия взаимодействия опасных объемов (и, следовательно, повреждений в них) так же, как и условия нагруженности силовых систем.

Из анализа рисунков 2 и 3 можно сделать два принципиальных заключения. С одной стороны, процесс повреждаемости в общем случае является рассеянным, т.е. первичные

трещины могут появиться в любой точке тензорного опасного объема (рисунок 1). С другой стороны, процесс повреждаемости оказывается дискретным в том смысле, что существуют локальные области, в которых появление первичных трещин наиболее вероятно (например, в совмещенных опасных объемах – см. рисунки 2, 3). Таким образом, опасные объемы оказываются (абсолютной) мерой поврежденности элементов силовой системы. Эта мера имеет две принципиальные особенности. (1) Она характеризует «пространство повреждений», тогда как традиционные меры поврежденности относятся лишь к точке либо плоскому сечению деформированного твердого тела. (2) Она имеет вероятностный характер, что отражает природу любого реального повреждения.

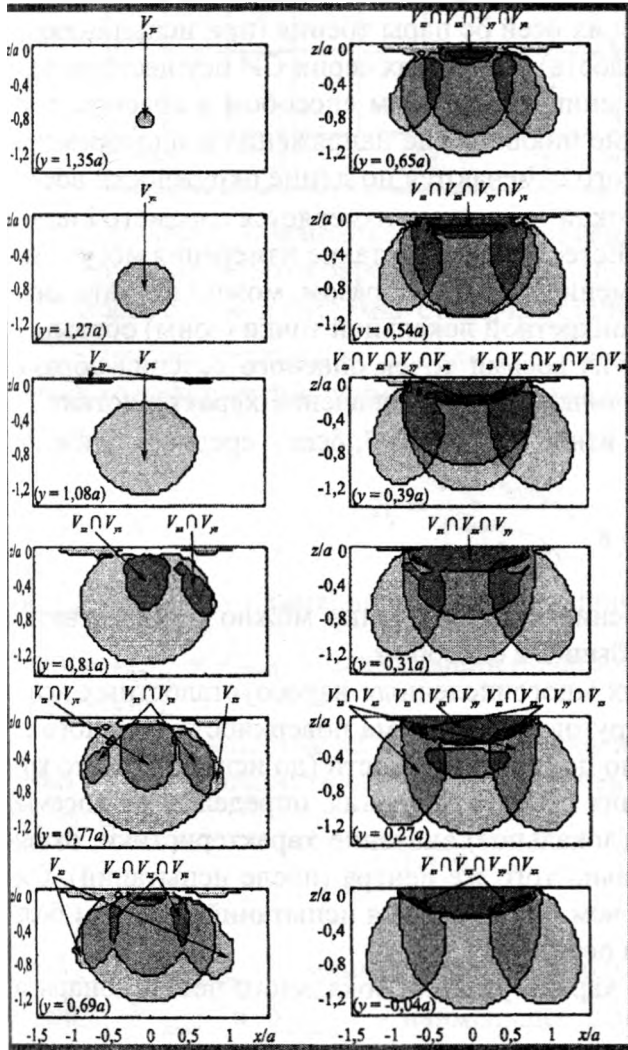


Рисунок 2 – Сечения тензорного опасного объема $\cup V_{ij}$ вдоль оси y

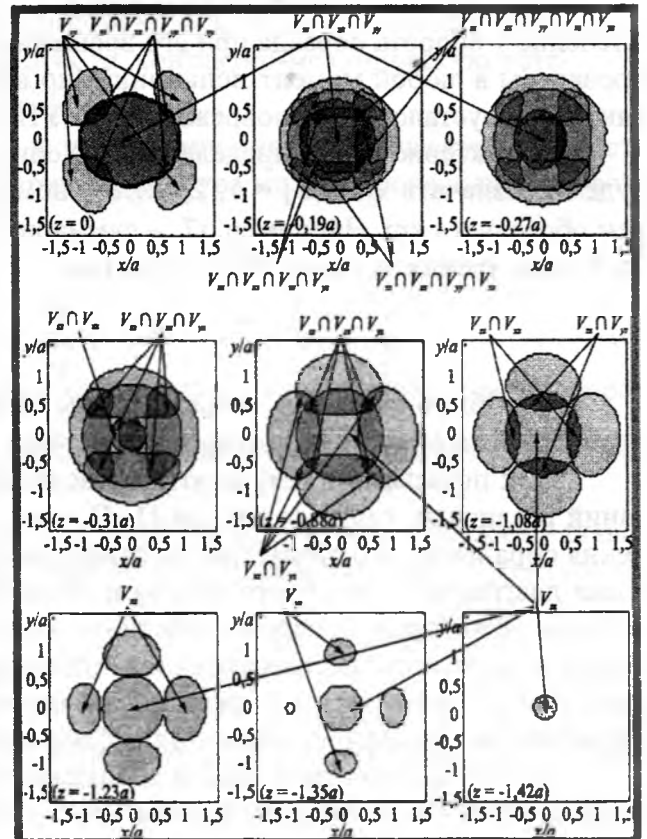


Рисунок 3 – Сечения тензорного опасного объема $\cup V_{ij}$ вдоль оси z

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Сосновский Л. А. Статистическая механика усталостного разрушения: – Минск: Наука и техника, 1987. – 288 с.
- 2 Сосновский Л. А. Механика износоусталостного повреждения: – Гомель: БелГУТ, 2007. – 434 с.
- 3 Журавков М. А., Щербаков С. С. Исследование опасных объемов при решении контактной задачи для системы «ролик/кольцо». / Тр. 5-го Международного симпозиума по трибофатике (ISTF 2005), 3–7 октября 2005 г., Иркутск (Россия) / отв. ред. А. П. Хоменко. – Иркутск: Иркутский государственный университет путей сообщения, 2005. – Т. 1. – С. 375–390.
- 4 Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. – М.: Мир, 1989. – 510с.

ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК ИЗНОСОУСТАЛОСТНОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ В ЛОКАЛЬНЫХ ЗОНАХ ИСПЫТУЕМОЙ МОДЕЛИ СИЛОВОЙ СИСТЕМЫ

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси
Минск, Беларусь

Измерение суммарного износа i (при испытаниях на трение скольжения и фрикционно-механическую усталость) и величины смещения осей δ_c пары трения (при испытаниях на трение качения и контактно-механическую усталость) в машинах серии СИ осуществляется с помощью индуктивного датчика микроперемещений дискретным способом в опасном сечении образца [1–3], где возбуждаются наибольшие циклические напряжения и одновременно реализуется процесс трения скольжения. Для этого отмечают по длине окружности восемь точек: (1), (2), ..., (8), в каждой из которых с высокой точностью измеряется параметр i или δ_c в течение 1 оборота образца при его вращении. Естественно, что такие измерения могут быть проведены в любой момент испытаний (по времени t). Таким образом, можно изучать кинетику износоусталостного повреждения (ИУП) конкретной локальной точки (зоны) образца.

Характеристику, определенную в одной из восьми точек опасного сечения образца, будем обозначать x_j , где $j = 1, 2, 3 \dots 8$ – номер точки. Среднее значение характеристики будем обозначать x_m . Например, i_7 – суммарный износ в точке № 7, δ_{cm} – среднее сближение осей пары трения за один оборот образца:

$$\delta_{cm} = \sum_{j=1}^8 \delta_{cj} / 8. \quad (1)$$

Как было замечено выше, среднее значение характеристики можно отождествить с интегральным значением, которое измеряется обычным способом.

Как показывают результаты проведенных многочисленных износоусталостных испытаний различных силовых систем [1–4], если круговая диаграмма поверхности опасного сечения образца строго симметрична относительно центра окружности (до испытаний), то круговая диаграмма суммарного износа и сближения осей пары трения, определяемая восемью точками, в которых измерено действительное (локальное) значение характеристики, оказывается существенно несимметричной относительно того же центра (после испытаний). Степень этой асимметрии, как правило, тем выше, чем больше время испытаний (или чем больше величина суммарного износа или сближения осей).

В этой связи можно ввести специальные характеристики локального нестационарного процесса ИУП: коэффициент асимметрии

$$R_r = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 \frac{r_{\min(j)}}{r_{\max(j)}}, \quad (2)$$

где r_{\min} и r_{\max} – меньший и больший радиус одного диаметра образца, и коэффициент неравномерности контура

$$\eta_r = \frac{r_{\max}}{r_{\min}}, \quad (3)$$

где r_{\min} и r_{\max} – наименьший и наибольший радиус образца в течение данного оборота.

На рисунке 1 указаны принятые обозначения радиусов образца, а также приведены зависимости коэффициентов R_r и η_r от уровня циклических напряжений при испытании силовой системы сталь 45 / сталь 25ХГТ на контактно-механическую усталость методом ступенчатого изменения изгибающей нагрузки при контактном давлении $p_0 = 0,7p_f = \text{const}$.

Видно, что степень неравномерности локального износоусталостного повреждения растет соответственно увеличению циклических напряжений. Заметим, что неравномерность износоусталостного повреждения тем больше, чем меньше величины R_a и η_a [5].

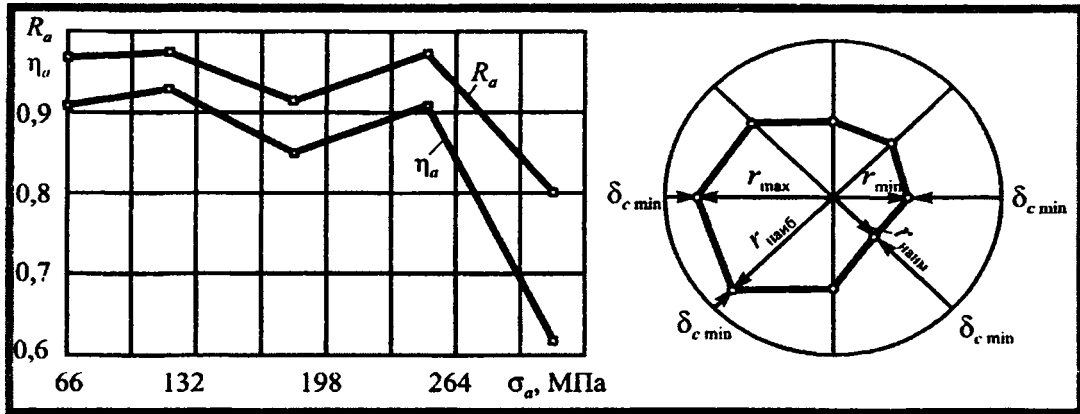


Рисунок 1 – Зависимость коэффициентов асимметрии и неравномерности износоусталостного повреждения при испытаниях на контактно-механическую усталость силовой системы сталь 45 / сталь 25ХГТ

При испытаниях на трение скольжения и на фрикционно-механическую усталость оценку коэффициентов асимметрии и неравномерности контура можно производить по формулам:

$$R_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 \frac{i_{\min(j)}}{i_{\max(j)}}, \quad \eta_i = \frac{i_{\text{наим}}}{i_{\text{наиб}}}, \quad (4)$$

где i_{\min} и i_{\max} – наименьший и наибольший суммарный износ одного диаметра за оборот образца; $i_{\text{наим}}$ и $i_{\text{наиб}}$ – наименьший и наибольший суммарный износ в течение данного оборота образца.

При испытаниях на трение качения и на контактно-механическую усталость аналогично можно выполнить оценку коэффициентов асимметрии и неравномерности контура по формулам:

$$R_\delta = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 \frac{\delta_{c \min(j)}}{\delta_{c \max(j)}}, \quad \eta_\delta = \frac{\delta_{c \text{ наим}}}{\delta_{c \text{ наиб}}}, \quad (5)$$

где $\delta_{c \min}$ и $\delta_{c \max}$ – наименьшее и наибольшее сближение осей одного диаметра за оборот образца; $\delta_{c \text{ наим}}$ и $\delta_{c \text{ наиб}}$ – наименьшее и наибольшее сближение осей в течение данного оборота образца (см. рисунок 2).

Предлагается также ввести коэффициенты неравномерности износа $\beta(i)$ и сближения осей $\beta(\delta_c)$:

$$\beta(i)_j = \frac{i_{\max j}}{i_{\max j} + i_{\min j}}, \quad \beta(i) = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 \frac{i_{\max j}}{i_{\max j} + i_{\min j}}, \quad (6)$$

$$\beta(\delta_c)_j = \frac{\delta_{c \max j}}{\delta_{c \max j} + \delta_{c \min j}}, \quad \beta(\delta_c) = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 \frac{\delta_{c \max j}}{\delta_{c \max j} + \delta_{c \min j}}. \quad (7)$$

С помощью первых формул в (6), (7) определяются коэффициенты неравномерности суммарного износа и сближения осей на j -том диаметре, а вторые формулы в (6), (7) служат для оценки среднего значения коэффициента неравномерности суммарного износа и сближения осей за один оборот образца.

Следует заметить, что в практике авторемонтного производства широко используется определяемый при дефектации деталей автомобиля подобный коэффициент неравномерности износа $\beta = i_{\max} / i$, где i_{\max} – максимальный износ поверхности детали на сторону; i – величина износа на диаметр [5]. При симметричном износе детали, когда $i_{\max} = i_{\min} = i/2$, коэффициент неравномерности износа $\beta = i_{\max} / i = 0,5$. А при одностороннем износе, когда $i_{\min} = 0$; $i_{\max} = i$, коэффициент неравномерности износа $\beta = i_{\max} / i = 1$. Поэтому значения коэффициента β могут изменяться в интервале $0,5 \leq \beta \leq 1$.

Обычно все характеристики ИУП оценивают на основе измерения среднего износа (остаточной деформации) образца (интегральный способ измерения). Однако предложенный [1–3] дискретный способ измерения и регистрации параметров поверхностного повреждения позволяет фиксировать локальные характеристики ИУП в нескольких точках опасного сечения образца. Соответственно появляется возможность оценивать характеристики ИУП в каждой такой точке. Для практических же расчетов представляется целесообразным использовать только два значения каждой характеристики – среднее и соответствующее 1-й точке, достигшей предельно допустимого износа (остаточной деформации). Так, для обозначения характеристик ИУП по 1-й точке, достигшей предельного состояния, предлагается использовать надстрочный индекс (1), например, $I_h^{(1)}$ – интенсивность изнашивания по 1-й точке, достигшей предельного состояния.

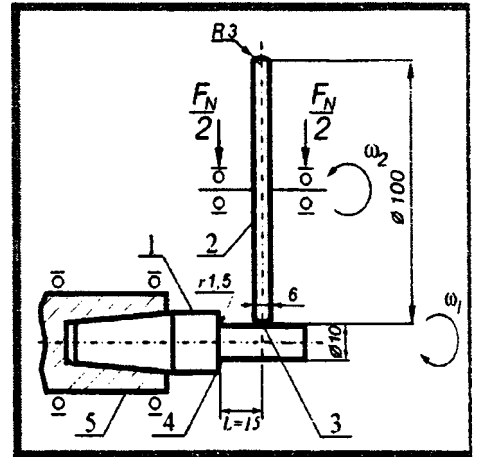


Рисунок 2 – Схема испытания модели зубчатого зацепления: 1 – образец-модель зуба; 2 – контрообразец; 3 – зона контакта; 4 – зона изгиба; 5 – шпиндель

Таблица – Основные характеристики сопротивления ИУП

Характеристика свойств	Обозначение			
	Кривые контактно-механической усталости		Кривые фрикционно-механической усталости	
	$N(\sigma_a, p_0 = \text{const})$	$N(p_0, \sigma_a = \text{const})$	$N(\sigma_a, \tau W = \text{const})$	$N(\tau W, \sigma_a = \text{const})$
Предел выносливости	$\sigma-1p$	$p\sigma$	$\sigma-1\tau$	$\tau\sigma$
Окончание таблицы				
Предел ограниченной усталости	$\sigma-1pN$	$p\sigma\sigma$	$\sigma-1\tau N$	$\tau\sigma\sigma$
Абсцисса точки перелома кривой усталости	$N\sigma pG$	$Np\sigma G$	$N\sigma\tau G$	$N\tau\sigma G$
Показатель наклона кривой усталости	$m\sigma p$	$mp\sigma$	$m\sigma\tau$	$m\tau\sigma$

Результаты износоусталостных испытаний представляют, как известно, в виде кривых фрикционно-механической и контактно-механической усталости, с помощью которых по ГОСТ 30638-99 определяют следующие характеристики сопротивления ИУП, приведенные в таблице. Эти характеристики получают экспериментально на основе измерения среднего износа (остаточной деформации) образца. Предлагается также оценивать их по 1-й точке, достигшей предельно допустимого износа (остаточной деформации). А для обозначения этих характеристик сопротивления ИУП по 1-й точке, достигшей предельного состояния, можно

также использовать надстрочный индекс (1), например, $P_{f\sigma}^{(1)}$ – предел выносливости (при контактно-механической усталости) по 1-й точке, достигшей предельного состояния.

Рассмотрим некоторые результаты исследования локальных характеристик ИУП.

На машине СИ-03М, которая удовлетворяет всем требованиям ГОСТ 30755, при частоте 3000 мин⁻¹ в условиях нормальной температуры были проведены испытания моделей зубчатых зацеплений, изготовленных из стали 20ХНЗА, на контактную усталость по схеме, изображенной на рисунке 2. При испытаниях в зону контакта капельным способом подавали смазочный материал (редукторное масло ТИ5-2). Испытания вели непрерывно до наступления предельного состояния или до базового числа циклов.

Обратимся теперь к изучению собственно локальных повреждений. Анализ показал, что можно обнаружить одиночные и связанные локальные повреждения; последние соединены между собой дорожкой качения [6]. Формирование ярко выраженного одиночного локального повреждения показано на рисунке 3. Нетрудно понять, что «сплошные» волнообразные повреждения есть конечная стадия развития локальных повреждений: от одиночного к связанным – и далее к тропи [6]. Если предельное состояние связывается, например, с глубиной локального повреждения δ_{lim} , то можно построить своеобразную кривую усталости по критерию локального повреждения (рисунок 4).

Цифрами 1, 2, ..., 8 здесь обозначены точки по периметру дорожки качения, в которых достигнуто предельное состояние (δ_{lim}) за соответствующее число циклов N . Анализ последовательности расположения точек 1, 2, ..., 8 приводит к заключению, что они располагаются на графике случайным образом.

Отсюда следует заключение: пунктирные кривые на рисунке 4 ограничивают область рассеяния данных. Такое заключение не противоречит известным статистическим результатам испытания образцов на механическую усталость: рассеяние растет с уменьшением действующей нагрузки. Подчеркнем, однако, что области рассеяния долговечности на каждом уровне напряжений устанавливают по результатам испытания только одной пары трения.

Подойдем к анализу данных, представленных на рисунке 4, с иной позиции: построим кривые усталости для каждой из восьми точек по отдельности (рисунок 5) [6]. Тогда сплошные линии на этом рисунке представляют собой кривые локальной усталости; каждая из них описывает достижение предельного состояния в конкретной точке периметра дорожки качения.

Таким образом, кривые Сосновского – Богдановича – Елового (см. рисунки 4 и 5) описывают (характеризуют) неоднородность физико-механических свойств в локальных областях испытываемого твердого тела.

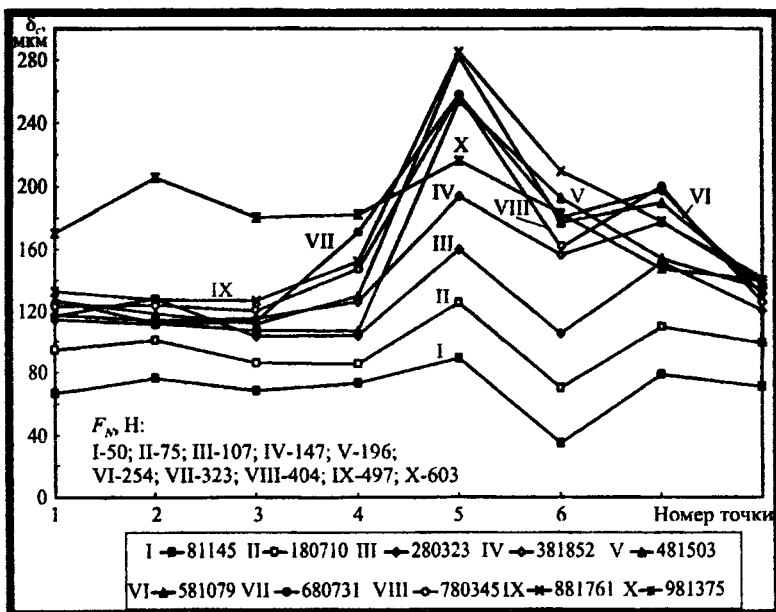


Рисунок 3 – Сближение осей в 8 точках на дорожке качения в процессе контактно-механической усталости в зависимости от числа циклов многоступенчатого (I, II, ..., X) нагружения силовой системы вал (сталь 45) / ролик (сталь 25 ХГТ)

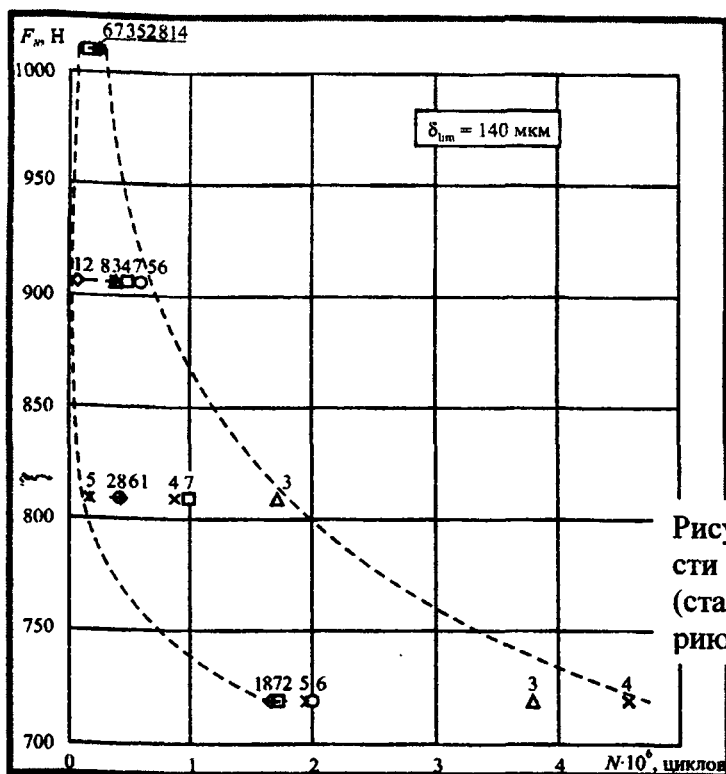


Рисунок 4 – Кривая контактной усталости для пары вал (сталь 20ХН3А) / ролик (сталь 20ХН3А), построенная по критерию локального повреждения

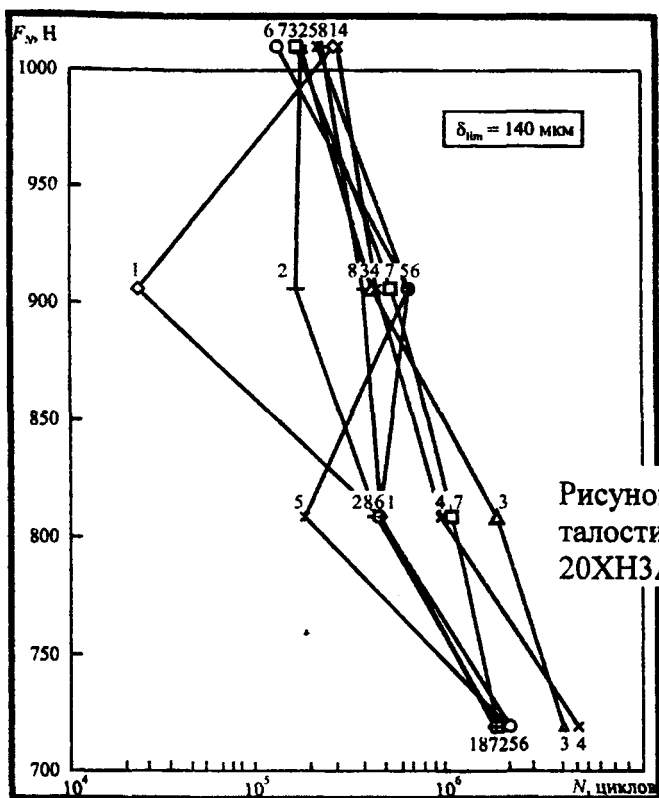


Рисунок 5 – Кривые локальной усталости для пары вал (сталь 20ХН3А) / ролик (сталь 20ХН3А)

На рисунке 5 изображены кривые усталости локальных точек опасного сечения образца, построенные в координатах контактная нагрузка FN – число циклов N до момента достижения предельно допустимого сближения осей $\delta_{lim} = 140$ мкм пары трения вал (сталь 20ХН3А) / ролик (сталь 20ХН3А). Как можно видеть из рисунка 5, сопротивление разрушению локальных точек поверхности образца существенно различается.

Аналогичные результаты получены также для других металл-металлических силовых систем при контактной и контактно-механической усталости.

По-видимому, следует провести широкие исследования сопротивления ИУП локальных зон различных силовых систем машин и оборудования и отразить их в новых методах

расчета, учитывающих неоднородность свойств материала в зависимости от вида ИУП, характера нагруженности, типа силовой системы.

ЛИТЕРАТУРА

1 Сосновский, Л.А. Основные закономерности износоусталостных повреждений /Л.А. Сосновский, А.В. Богданович, О.М. Еловой и др. // Материалы II Белорусского конгресса по теор. и прикл. механике. Под ред. акад. М.С. Высоцкого. – Гомель: ИММС НАНБ, 1999. – С. 121 – 122. 2 Еловой, О.М. Методы и некоторые результаты измерения параметров износоусталостного повреждения в дискретных точках / О.М. Еловой // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2001. – № 4. – С.32 – 36. 3 Еловой О. М. Измерение и регистрация дискретных параметров износоусталостных повреждений моделей силовых систем мобильной техники / Тр. 4-го Междунар. симп. по трибофатике, 23 – 27 сент. 2002 г., Тернополь, Украина / отв. ред. В.Т. Трощенко. – Тернополь: Тернопольский гос. техн. ун-т им. И. Пулюя, 2002. – Т.1. – С. 128 – 133. 4 Сосновский, Л.А. Основы трибофатики: учеб. пособие для студентов вузов: В 2 ч. /Л.А. Сосновский – Гомель: БелГУТ, 2003. – Ч.1. – 246 с.; Ч.2. – 235 с. 5 Дюмин, И.Е. Повышение эффективности ремонта автомобильных двигателей / И.Е. Дюмин. – М.: Транспорт, 1987. – 176 с. 6 Сосновский Л. А. Механика износоусталостного повреждения. – Гомель: УО «БелГУТ», 2007. – 434 с.

УДК 625.143

Сосновский Л. А., Матвеев В. И., Кебилов А. А.

КРИТЕРИЙ МЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛИ И ЕГО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ КРИТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РЕЛЬСОВ

*Белорусский государственный университет транспорта
Гомель, Беларусь*

Введение. Под воздействием колес подвижного состава происходит уменьшение размеров головки железнодорожных рельсов и изменение ее формы, что является следствием работы сил трения в зонах контакта колеса и рельса. Кроме того, из-за действия системы циклических нагрузок в металле происходят: остаточная деформация на поверхности катания, развитие внутренних и поверхностных трещин, изменение напряженного состояния и др. Эти факторы приводят к изменению сопротивления усталости, которое является особым свойством материала, формирующим эксплуатационную долговечность системы колесо/рельс и ее отдельных элементов, в том числе и рельсов. Изучению изменения характеристик механических свойств материала рельсов в процессе эксплуатации посвящены многочисленные исследования [1–6], однако, на наш взгляд, указанная проблема до сих пор остается не решенной. В данной работе в развитие [7, 8] установлен критерий достижения критического состояния рельсовой стали и выполнено его экспериментальное подтверждение.

1 Критерий механического состояния стали. Одной из важнейших характеристик работоспособности рельсов является предел контактной усталости [1, 9]. Известно, что рост твердости стали (HB) означает пропорциональное повышение предела контактной усталости p_f . Анализ результатов исследований [9] позволяет принять следующую зависимость

$$p_f = 3,12HB. \quad (1)$$

Изучение массива экспериментальных данных [10] по исследованию связи контактной усталости и твердости конструкционных сталей показывает, что зависимость (1), полученная для рельсовой стали, представляется в этом случае как среднестатистическая.

Хорошо известна тесная связь твердости с пределом прочности [11]:

$$\sigma_B = 3,50 HB \quad (2)$$

Объединим зависимости (1) и (2) на рисунке 1 (нижняя его часть), согласовав шкалы HB , HV и σ_B . Прямая $p_f(HB)$ не имеет каких-либо особенностей; она не противоречит устоявшимся научным представлениям.

Другой важнейшей характеристикой работоспособности рельсов является предел выносливости при изгибе [1, 9]. Если выполнить анализ по его связи с твердостью и пределом прочности, на основании изучения банков данных [11–13], можно получить зависимости, показанные в верхней половине рисунка 1. Видно, что прямая

$$\sigma_{-1} = 1,60 HV \quad (3)$$

аппроксимирует не всю группу экспериментальных точек, а только те, для которых предел выносливости σ_{-1} не превышает 550 МПа, а твердость $HV \leq 350$. Далее зависимость $\sigma_{-1}(HV)$ становится существенно нелинейной. Основная закономерность такова: если твердость превышает

примерно 380 HV , то дальнейший рост твердости не ведет к соответствующему росту сопротивления изгибной усталости в соответствии с (3). Напротив: рост σ_{-1} сначала замедляется, а затем, с достижением твердостью значений примерно 500 HV , сопротивление изгибной усталости при повышении твердости падает. Весь массив экспериментальных точек, представленный в верхней части рисунка 1, аппроксимирует, в первом приближении, кривая, уравнение которой

$$\sigma_{-1} = 2,68HV - 0,0025(HV)^2 - 933. \quad (4)$$

Общее заключение, которое следует из анализа рисунка 1, таково: повышение твердости более величины $\approx 400 HV$, по-видимому, неэффективно для систем, которые работают в условиях одновременного сочетания изгибной и контактной усталости. Именно такие условия реализуются в поверхностной зоне головки рельса.

Таким образом, исходя из изложенного, можно предложить следующую матрицу взаимосвязанных характеристик, которая определяет переход стали в критическое

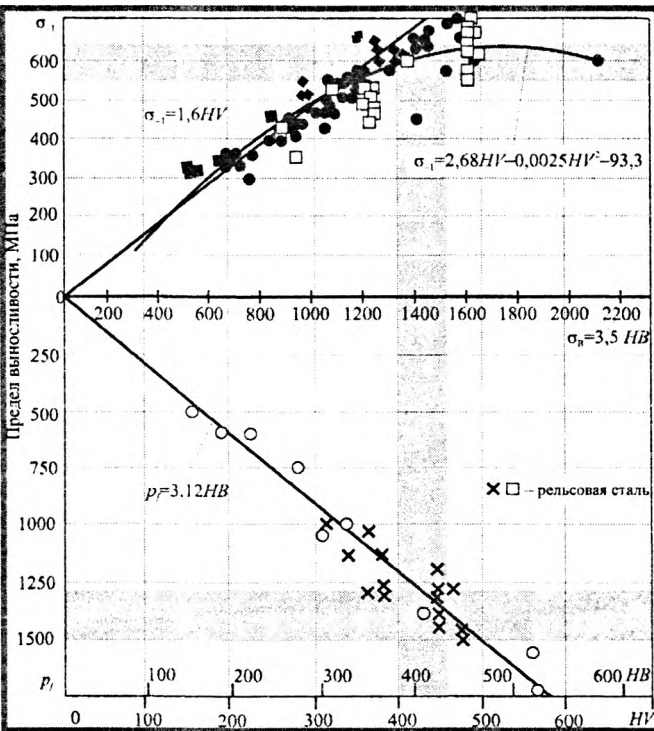


Рисунок 1 – К анализу взаимосвязей характеристик сопротивления усталости, твердости и предела прочности

состояние по критериям сопротивления контактной и изгибной усталости:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{-1}^{(k)} &= 550 \dots 650 \text{ МПа}, \\ p_f^{(k)} &= 1200 \dots 1300 \text{ МПа}, \\ HB^{(k)} &= 380 \dots 420, \\ HV^{(k)} &= 400 \dots 440, \\ \sigma_B^{(k)} &= 1300 \dots 1500 \text{ МПа} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Если характеристики, указанные в равенствах (5), не превышают установленных величин, то усталостная прочность материала считается обеспеченной. В противном случае следует ожидать возникновения и развития повреждений. Естественно, что эти выводы применительно к такой

ответственной системе, каковой является система колесо/рельс, требуют дополнительного обоснования.

На основании (1) – (5) можно предложить следующую методику анализа механического состояния сталей.

С использованием зависимостей, представленных на рисунке 1, изображается диаграмма состояния, которой придается следующий смысл. Если в процессе работы происходит повышение твердости на поверхности детали, то это означает, что одновременно повышается сопротивление как изгибной, так и контактной усталости. И это повышение отражает упрочнение стали согласно зависимостям $\sigma-1(HV)$ и $pf(HB)$. Процессы упрочнения будут иметь место только до тех пор, пока для зависимости $\sigma-1(HV)$ не наступит переход в критическую область (затемнено на рисунке 1). Это область начала поверхностного разрушения. Следовательно, рисунок 1 можно рассматривать как диаграмму механического состояния металла по критериям изгибной и контактной усталости.

2 Методика оценки механического состояния рельсовой стали. Механическое состояние рельсовой стали можно оценивать как по любой из характеристик, представленных в

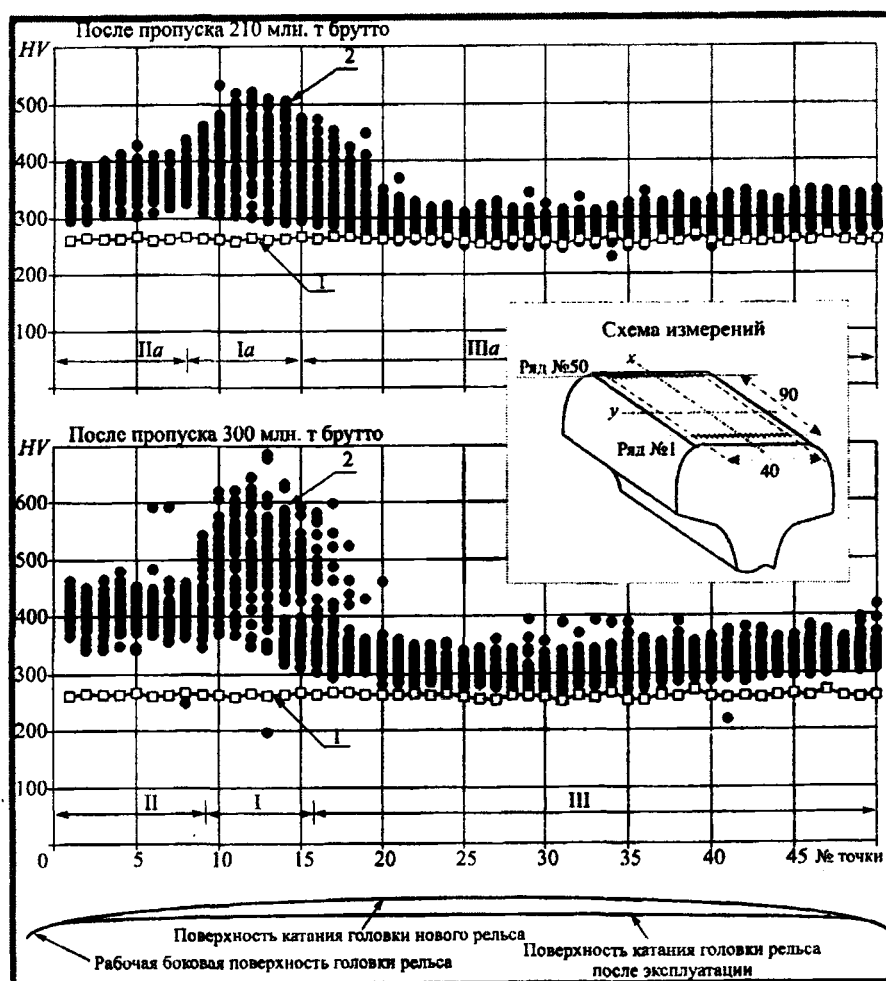


Рисунок 2 – Распределение по поверхности головки рельса из прямого участка твердости HV после пропуска 210 и 300 млн. т брутто 1 – средняя твердость до эксплуатации, 2 – твердость после эксплуатации

матрице (5) и на рисунке 1, так и по их полной совокупности. Так как твердость наиболее легко определить, а точность измерений твердости по Виккерсу выше, чем по Бринеллю, то предлагаемая методика оценки механического состояния рельсовой стали основана на измерении твердости по Виккерсу.

Исследование твердости на поверхности катания было выполнено для нетермоупрочненных рельсов типа Р50 производства меткомбината “Азовсталь”, которые эксплуатировались в Минском метрополитене. Объектами для изучения служили три отрезка рельсов: 1) новый, не бывший в эксплуатации (исходное состояние); 2) снятый с прямого участка пути, после пропуска 300 млн. т брутто, т. е. нормативного тоннажа, характеризующего суммарную наработку рельсов, при достижении которой должна производиться их замена, независимо от того, исчерпана их работоспособность или нет; 3) снятый с прямого участка после пропуска 210 млн. т брутто.

Испытания на твердость методом пробы по Виккерсу проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 2999-75. Образец устанавливали на предметном столе твердомера так, чтобы диагонали отпечатка пирамиды были ориентированы строго по продольному и поперечному направлениям головки рельса. Схема измерений на поверхности катания рельса представлена на рисунке 2. По продольной оси рельса x размечали 50 рядов, в каждом из которых через равные расстояния размечали 50 точек, в которых производили измерения твердости HV.

Измерения на поверхности катания головки рельса, не бывшего в эксплуатации, позволили установить, что значение твердости материала в исходном состоянии не превышало 300 HV, незначительно варьируясь в интервале (230...295 HV) и составляя в среднем 261 HV.

Для рельсов, бывших в эксплуатации, установлено, что поверхность катания деформируется неравномерно – обнаруживаются три характерные зоны (I, II, III см. рисунок 2) определяемые резким изменением полей рассеяния твердости.

По измеренным значениям твердости выполнена оценка характеристик сопротивления усталости и прочности в соответствии с (1)–(4). Результаты расчета приведены в таблице.

Проанализируем результаты для рельса, пропустившего 300 млн. т брутто. В зоне I твердость достигает наибольших значений порядка 500...600 HV и более, составляя в среднем 480 HV. Эта зона неравномерна по ширине головки и периодична по ее длине, другими словами, она – нестационарна. Поскольку твердость исходного материала не превышает 300 HV, то в данном случае имеет место двукратный рост твердости. В зоне II твердость достигает значений порядка 460 HV, составляя в среднем 410 HV, т. е. выше первоначальной в 1,5 раза. В зоне III твердость не превышает значений 400 HV; но в среднем она составляет 320 HV, т.е. немного больше (примерно на 25 %) исходной твердости.

Если предел выносливости до эксплуатации в среднем составлял $\sigma_{-1} = 436$ МПа, то после эксплуатации он достигает значений 500...620 МПа. Это означает, что имеет место повышение сопротивления усталости на 30...40 и даже до 50 %. Такой вывод не является неожиданным, он известен в трибофатике [14–17].

Таблица – Средние значения твердости HV, характеристик сопротивления усталости и предела прочности

Состояние рельсовой стали						
до эксплуатации	после пропуска 210 млн. т брутто			после пропуска 300 млн. т брутто		
	зона IIIa	зона IIa	зона Ia	зона III	зона II	зона I
Твердость по Виккерсу \overline{HV}						
261	292	361	396	320	410	480
Предел выносливости $\overline{\sigma_{-1}}$, МПа						
436	476	548	576	506	584	612
Предел контактной усталости $\overline{p_f}$, МПа						
793	885	1090	1190	969	1235	1399
Предел прочности $\overline{\sigma_b}$, МПа						
890	995	1225	1340	1090	1380	1590

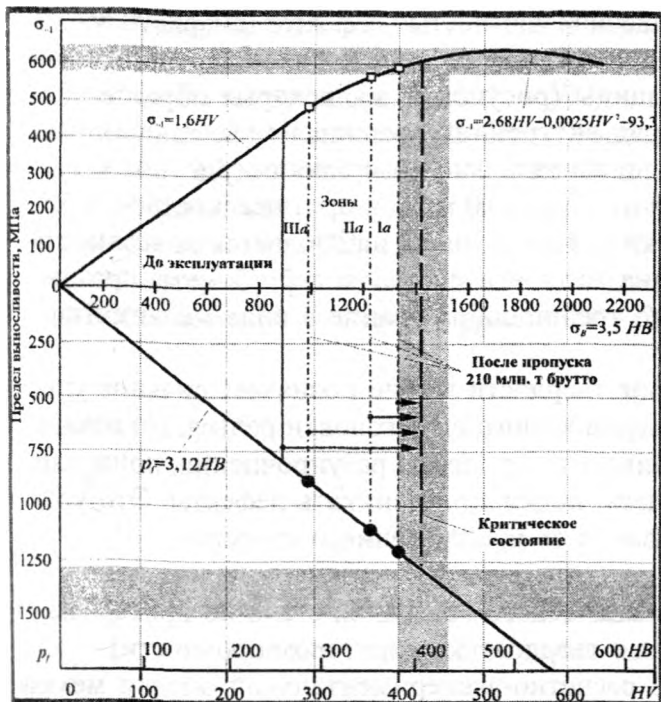


Рисунок 3 – Диаграмма механического состояния рельсовой стали после пропуска 210 млн. т brutto

Значения критериальных характеристик превышают критические значения. Это свидетельствует о возможности перехода рельсовой стали в критическое состояние и, следовательно, появления начальных повреждений именно в зоне I.

Диаграмма механического состояния рельсовой стали после пропуска 210 млн. т brutto, подтверждающая выше предложенный критерий достижения критического состояния рельсовой стали, построена на рисунке 3 с использованием результатов измерения твердости после пропуска 210 млн. т brutto (см. рисунок 2). Видно, что средние значения характеристик (HV, σ_{-1} , r_f , σ_B) не превышают установленных в (5) значений, следовательно, критическое состояние материала рельса после пропуска тоннажа 210 млн. т brutto еще не достигнуто.

3 Экспериментальное подтверждение критерия. Микроструктура стали для нового рельса приведена на рисунке 4, а; для зоны наибольшего деформирования – зоны I рельса после эксплуатации – на рисунке 4, б.

В обоих случаях структура сердцевины образцов характеризуется наличием сорбитообразного перлита, а также отдельных зон мелкопластинчатого перлита. В поверхностном слое зоне I образца рельса, пропустившего 300 млн. т brutto т.,

Предел контактной усталости в процессе эксплуатации вырос на 22...76 %, в зависимости от зоны ния, максимальное его повышение отмечено в зоне I.

Наиболее низкий уровень прочности ($\sigma_B = 890$ МПа) имеет исследуемый нетермоупрочненный рельс до эксплуатации. В процессе эксплуатации предел прочности его материала увеличивается до 1300...1400 МПа. Такие значения характерны для новых объемно или поверхностно термоупрочненных, а также для термически не упрочненных рельсов после эксплуатации. Кроме того, в зоне I предел прочности достигает значений порядка 1600 МПа. Таким образом, эксплуатационное упрочнение исследуемых рельсов оказывается значительным.

Сопоставление данных экспериментальных исследований с матрицей (5) позволяет заключить, что только для зоны I поверхности катания рельса средние значения критериальных характеристик превышают критические значения.

Это свидетельствует о возможности перехода рельсовой стали в критическое состояние и, следовательно, появления начальных повреждений именно в зоне I.

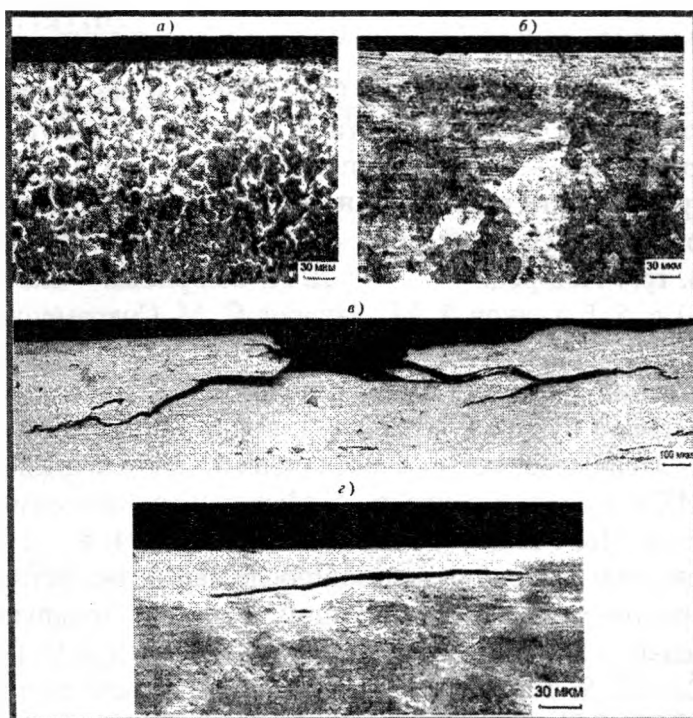


Рисунок 4 – Микроструктура стали нового рельса (а) и рельса после эксплуатации (б) и типичные усталостные повреждения, обнаруженные в зоне I поверхностного слоя головки рельса (в, г)

виден охрупченный поверхностный слой с повышенной плотностью дефектов (см. рисунок 4, б).

При дальнейшем исследовании зоны I в сечении поверхности головки рельса, бывшего в эксплуатации, выявлены наклонные трещины (рисунок 4, в), которые образовались в процессе эксплуатации. Наблюдается также ряд внутренних трещин, не выходящих на поверхность и ориентированных преимущественно параллельно поверхности (рисунок 4, г).

Глубина залегания трещин изменяется от 17 до 210 мкм, а протяженность – от 25 до 2000 мкм. Кроме того, на поверхности головки рельса в зоне I наблюдается поверхностное усталостное выкрашивание (питтинг). Глубина питтинга составляет 2...5 мкм, протяженность – 2...7 мкм. Наряду с этим имеет место трещинообразование в виде мелких извилистых трещин.

Таким образом, значительное повышение твердости в зоне I означает сильное упрочнение пластической деформацией тонкого поверхностного слоя головки рельса. Но именно в этой зоне со средней твердостью 480 HV развиваются процессы разупрочнения, приводящее к охрупчиванию и разрушению материала; здесь начинают возникать дефекты. Это убедительно подтверждает правомерность и обоснованность предложенного критерия.

Выводы.

1) Предложен общий метод оценки механического состояния стали по критериям изгибной и контактной усталости (во взаимосвязи с твердостью и пределом прочности).

2) Разработана процедура экспрессной расчетно-экспериментальной оценки механического состояния материала головки рельсов в процессе эксплуатации, основанная на предложенном методе.

3) Метод и процедура подтверждены экспериментальными исследованиями механического состояния нетермоупрочненных рельсов типа Р50 в процессе эксплуатации (после пропуска 210 и 360 млн. т брутто), а также микроструктурным анализом начального повреждения материала на поверхности катания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мелентьев Л. П. Содержание и ремонт рельсов. – М. : Транспорт, 1984. – 231 с. 2. Повышение эффективности и надежности работы рельсов : Сб. науч. тр. / Под ред. Л. Г. Крысанова. – М. : Транспорт, 1990. – 133 с. 3. Повышение надежности работы верхнего строения пути в современных условиях эксплуатации : Сб. науч. тр. / Под ред. Л. Г. Крысанова. – М. : Интекст, 2000. – 142 с. 4. Неметаллические включения в рельсовой стали: Сб. науч. тр. / Под ред. Л. А. Смирнова. – Екатеринбург : ГНЦ РФ ОАО "УИМ", 2005. – 151 с. 5. Богданов В. М., Захаров С. М. Современные проблемы системы колесо/рельс // Железные дороги мира – 2004. – № 1. – С. 57–62. 6. Шур Е. А. К вопросу об оптимальном соотношении твердости колес и рельсов // Современные проблемы взаимодействия подвижного состава и пути: сб. докл. науч.-практ. конф. / – М. : Интекст, 2003. – С. 87–93. 7. Кебилов А. А. Экспериментальные исследования остаточных свойств материала рельсов // ТРИБОФАТИКА: Сборник докладов V Международного симпозиума по трибофатике. ISTF-2005. – Иркутск: ИрГУПС, 2005. – Т.1. – С. 484–494. 8. Л. А. Сосновский, А. А. Кебилов Об одном критерии состояния рельсов после наработки нормативного тоннажа // Динамика, прочность и ресурс машин и конструкций: Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. / Отв. ред. В.Т. Трощенко. – Киев: Ин-т проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, 2005. – Т. 2. – С. 322-323. 9. Термически упрочненные рельсы; под ред. А. Ф. Золотарского – М. : Транспорт, 1976. – 264 с. 10. Сусин А. А. Химико-термическое упрочнение высоконапряженных деталей. – Мн. : Белорусская наука, 1999. – 175 с. 11. Хейвуд Р. Проектирование с учетом усталости. – М. : Машиностроение, 1969. – 504 с. 12. Трощенко В. Т., Сосновский Л. А. Сопротивление усталости металлов и сплавов: справочник. – Т. 1, 2. – Киев: Наукова думка, 1987. – 510 с., 825 с. 13. Сосновский Л. А. Механика усталостного разрушения: словарь-справочник. – Т. 1, 2. – Гомель: НПО "ТРИБОФАТИКА", 1994. – 328 с., 340 с. 14. Сосновский Л. А. и др. Диаграмма предельных состояний стали 45 при контактно-механической усталости // Заво-

ская лаборатория. – 1996. – Т. 72. – № 2. – С. 39–42. 15. Сосновский Л.А. Износоусталостные повреждения и предельное состояние силовой системы типа колесо/рельс // Вестник БелГУТа: наука и транспорт. – 2001. – № 2. – С. 100–104. 16. Sosnovskiy L.A. Tribo-Fatigue. Wear-fatigue damage and its prediction (Foundations of engineering mechanics). – Springer. – 2004. – 424 p. 17. Сосновский Л. А. и др. Общий подход к оценке интенсивности повреждения при циклическом деформировании, трении и комплексном нагружении // Заводская лаборатория. – 2005. – Т. 71. – № 2. – С.38-40. 18. Андрияшин В. А. и др. Изменение состояния материала нетермоупрочненных рельсов при эксплуатации в условиях Минского метрополитена // Вестник БелГУТа: наука и транспорт. – 2005. – № 2. – С. 98–113.

УДК 519.28:620.171

Сосновский Л. А., Щербаков С. С.

АНАЛИЗ ТРЕНИЯ В СИЛОВОЙ СИСТЕМЕ

ООО «НПО ТРИБОФАТИКА» Гомель, Беларусь
Белорусский государственный университет Минск, Беларусь

Силовая система представляет собой, по существу, пару трения, в которой хотя бы один из элементов находится под воздействием внеконтактной циклической нагрузки (рисунок 1) [1, 2]. К настоящему времени разработано три подхода к анализу трения в силовой системе.

(1) Сила трения в силовой системе может рассматриваться как некоторая функция обычной силы трения, например, при скольжении F_S , которая возникает в окружном направлении (объект – пара трения), и *циклической составляющей* F_C силы трения, которая дополнительно возникает вследствие возбуждения циклических напряжений (деформаций) в осевом направлении (см. рисунок 1) [2, 3].

Согласно первому подходу трение в силовой системе можно описать четырьмя отдельными (независимыми) характеристиками:

– сила трения при скольжении (закон Амонтона)

$$F_S = f_S F_N = \tau_w A_a = \gamma_S G A_a, \quad (1)$$

– коэффициент трения при скольжении

$$f_S = \frac{F_S}{F_N} = \frac{\tau_w A_a}{F_N} = \frac{\tau_w}{p_a} = \frac{\gamma_S G}{p_a}, \quad (2)$$

– *циклическая сила трения*

$$\pm F_C(t) = f_C(t) F_N = \sigma(t) A_a = \varepsilon(t) E A_a = M(t) \frac{A_a}{W}, \quad (3)$$

– *циклический коэффициент трения*

$$\pm f_C(t) = \frac{F_C(t)}{F_N} = \frac{\sigma(t) A_a}{F_N} = \frac{\varepsilon(t)}{p_a} = \frac{M(t) A_a}{F_N W}. \quad (4)$$

В формулах (1)–(4) f_S – коэффициент трения в трибологической паре; F_N – контактная нагрузка; p_a – номинальное контактное давление; $\tau_w = f_S p_a$ – удельная сила трения, или фрикционное напряжение; A_a – номинальная площадь контакта; γ_S – относительный сдвиг; G – модуль сдвига; $\sigma = M / W$ – наибольшее циклическое напряжение; ε – относительная деформация (растяжения – сжатия); E – модуль нормальной упругости; M – изгибающий момент; W – момент сопротивления изгибу.

Четыре характеристики (1)–(4) можно свести к двум относительным характеристикам трения в силовой системе

$$\pm F_C / F_S = \pm F_{CS} \text{ и } \pm f_C / f_S = \pm f_{CS},$$

которые, как нетрудно видеть, имеют одинаковое численное значение

$$\pm F_{CS} = \pm f_{CS} = \pm \sigma / \tau_w.$$

Таким образом, хотя трение в силовой системе есть более сложное явление, чем трение при (чистом) скольжении, тем не менее оно может быть описано единственной характеристикой

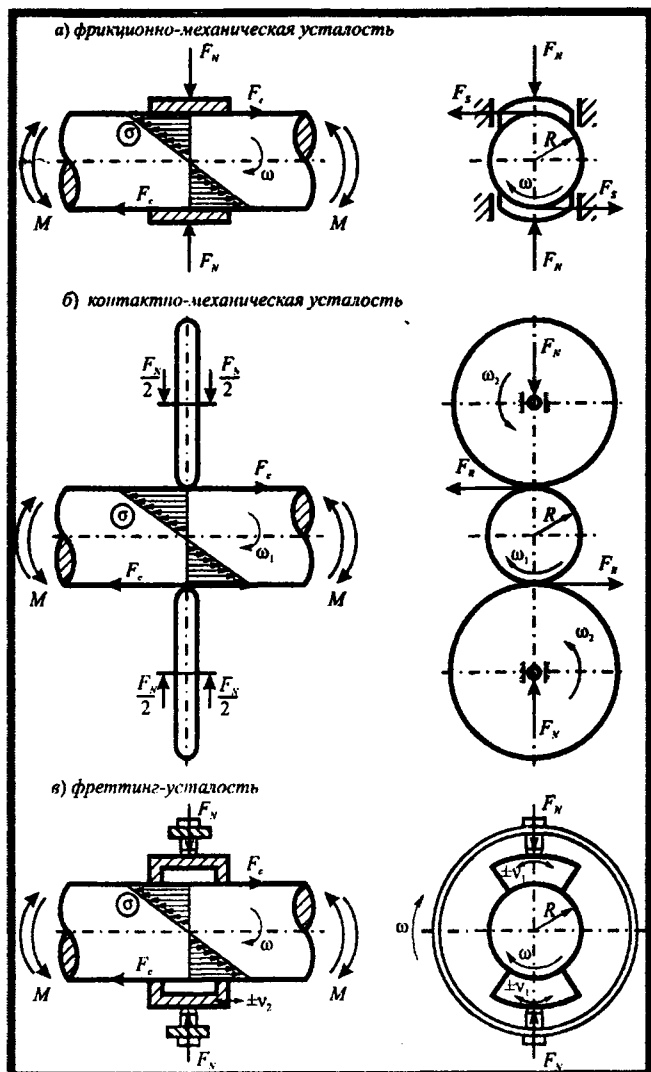


Рисунок 1 – Принципиальные схемы типичных силовых систем твердое тело / твердое тело

$$f_F = \pm \sigma / \tau_w = \sigma / f_S p_a = \psi_{\sigma\tau}, \quad (5)$$

которая является комплексным показателем трения в силовой системе; его называют индексом трения в силовой системе [2]. При этом оказывается, что индекс Сосновского f_f [4] есть, по существу, управляющий параметр износоусталостного повреждения [3]

Индекс трения имеет простейшую форму, но комплексный характер. Ибо одновременно учитывает “нормальный эффект” (через посредство p_a), “фрикционный эффект” (через посредство τ_w или f_S) и “циклический эффект” (через посредство $\pm \sigma$) в процессах трения в силовой системе.

Величину, обратную индексу трения (5), называют параметром трения в силовой системе:

$$\pm f_{\tau/\sigma} = f_S \frac{p_a}{\sigma}. \quad (6)$$

Из (6) следует, что параметр трения может быть больше, меньше или равным обычному коэффициенту трения:

$$\pm f_{\sigma/\tau} \geq f_S \quad (7)$$

поскольку соотношение контактных и циклических напряжений $f p_a / \sigma \geq 1$. Подчеркнем, что параметр трения (6) не зависит от уровня $f p_a$ и σ , а зависит только от соотношения этих величин.

(2) Другой подход к анализу трения в силовой системе предложен в работе [3].

Используя обобщенный закон Гука,

вычислим окружную деформацию (по направлению движения)

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{1}{E} [\sigma_{\theta} - \nu(\pm \sigma_0 - \sigma_n)] + \alpha T_{\Sigma},$$

откуда окружное напряжение

$$\sigma_{\theta} = 2G \left[\varepsilon_{\theta} + \frac{3\nu}{1-2\nu} \varepsilon_{cp} - \frac{1+\nu}{1-2\nu} \alpha T_{\Sigma} \right], \quad (8)$$

где

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad \varepsilon_{cp} = \frac{1}{3} (-\varepsilon_n + \varepsilon_{\theta} \pm \varepsilon_0). \quad (9)$$

Примем, что напряжение σ_θ , определяемое согласно (8), пропорционально окружной силе трения F_θ в силовой системе. Тогда из (8) и (9) имеем

$$F_\theta \approx 2GA_a \left[\varepsilon_\theta + \frac{\nu}{1-2\nu} (-\varepsilon_n + \varepsilon_\theta \pm \varepsilon_0) - \frac{1+\nu}{1-2\nu} \alpha T_\Sigma \right]. \quad (10)$$

Согласно (10) окружная сила F_θ определяется не только окружной ε_θ и радиальной (нормальной) ε_n , но и осевыми (циклическими) деформациями $\pm \varepsilon_0$; следовательно, формула (10) описывает обратный эффект (влияние циклических напряжений на изменение характеристики трения) [2–4]. В этой связи величину F_θ уместно назвать *квазистатической силой трения* (в силовой системе), а величину $f_\theta = F_\theta / F_N$ – *квазистатическим коэффициентом трения* (в силовой системе).

Достоинство формулы (10) состоит в том, что здесь учтено физическое взаимодействие трех (составляющих) деформаций – в нормальном (радиальном), осевом и окружном направлениях; эти деформации обусловлены как контактной, так и внеконтактной нагрузками. Другими словами, формула (10) вполне описывает то, что в трибологии именуют *механофрикционным эффектом при трении*, однако с иных позиций и с дополнительным учетом

термодинамического состояния в зоне контакта. Речь идет, следовательно, о *механо-термофрикционном эффекте* (МТФ-эффекте) в силовой системе [3].

Сила трения F_S , вычисляемая по формуле (1), и квазистатическая сила трения F_θ , вычисляемая по формуле (10), хотя они обнаруживаются в одном и том же (окружном) направлении, не тождественны. Во-первых, потому, что в формуле (10) учтены тепловые эффекты, тогда как в (2) таковые отсутствуют. Во-вторых, потому, что сила F_θ обусловлена совокупным действием как контактной, так и внеконтактной нагрузок, тогда как сила F_S определяется одной (и только) контактной нагрузкой.

Из изложенного следует, что в силовой системе измеренная в окружном направлении сила трения может оказаться большей, меньшей или равной той традиционной силе трения, которая будет измерена в аналогичной паре трения – в зависимости от условий нагружения. Это означает, что в общем случае закон трения в силовой системе, аналогично закону Амонтона – Кулона для пары трения, имеет вид [4]

$$F_\sigma = f_\sigma(f_S, Q_i, T)F_N + F_A(Q_i, T, F_N), \quad (11)$$

где F_σ и f_σ – сила и коэффициент трения в силовой системе, обусловленные как кон-

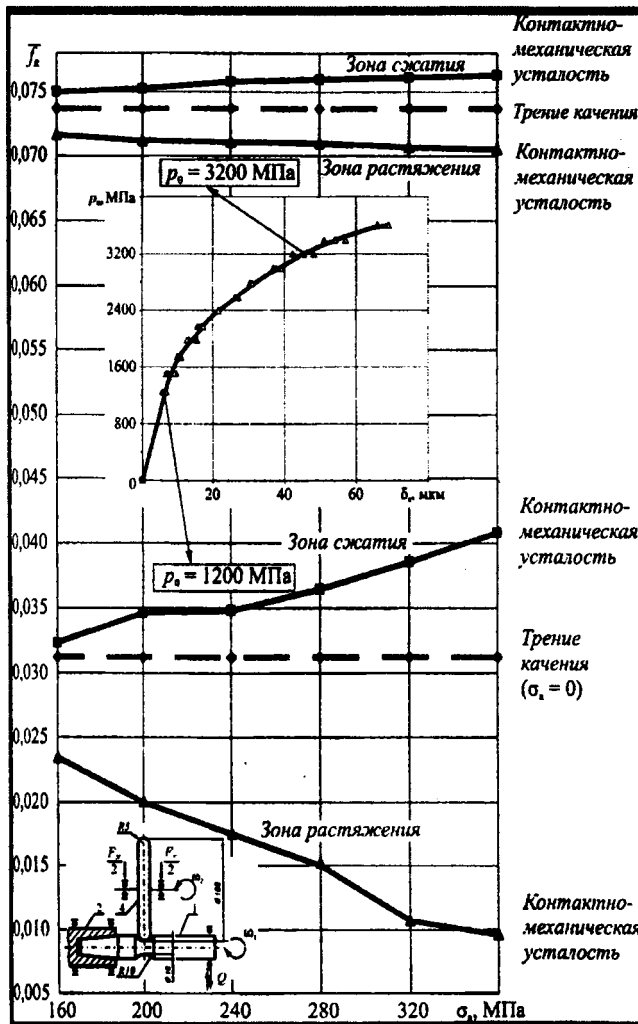


Рисунок 2 – Зависимость средних значений коэффициента трения \hat{J}_k от амплитуды напряжений σ_0 (Л. А. Сосновский, С. А. Тюрин, С. С. Щербаков, В. В. Комиссаров)

тактной (F_N), так и комплексом (Q_i, T) внеконтактных (Q_i) и термодинамической (T) нагрузок. Здесь

$$f_{\sigma}(f_S, Q_i, T)F_N = F_{TM}, \quad (12)$$

есть *термомеханическая составляющая*, а

$$F_A(Q_i, T, F_N) = F_{AT}, \quad (13)$$

– *адгезионно-тепловая составляющая* силы трения в силовой системе.

В простейшем случае контактно-изгибного нагружения *удельная сила трения в силовой системе* определяется, в соответствии с (11) [4], при $F_A = 0$:

$$\tau_{\sigma} = f_{\sigma}(f_S, \sigma) p_a. \quad (14)$$

(3) *Третий подход* состоит в том, что коэффициент трения в силовой системе может быть определен как функция проскальзывания.

В ряде работ (см., например, [5]) указывается, что в общем случае трения в зоне контакта формируются (а) область сцепления, где сила трения (при движении) меньше предельной $|q(x, y)| \leq f|p(x, y)|$ (f – коэффициент трения), а величина относительного проскальзывания равна нулю ($s = 0$), и (б) область проскальзывания, где сила трения равна предельной $|q(x, y)| = f|p(x, y)|$, а величина относительного проскальзывания [5]

$$s = s_1 - s_2 = (\bar{u}_1 - \delta_1) - (\bar{u}_2 - \delta_2) = (\bar{u}_1 - \bar{u}_2) - (\delta_1 - \delta_2),$$

оказывается отличной от нуля. Здесь индексы 1 и 2 соответствуют двум контактирующим телам; \bar{u} – упругие касательные перемещения на поверхности; δ – жесткие смещения точек, удаленных от поверхности контакта.

Если к одному из контактирующих тел, например, к телу 1, приложить внеконтактную нагрузку F_b (которая, скажем, может быть ортогональна направлению движения), то в области контакта тела 1 возникнут, в силу закона Гука, дополнительные перемещения. Найдем их, рассматривая, например, силовую систему ролик/вал (см. рисунок 1, б). Пусть ось x сонаправлена с силой трения, а ось y ортогональна x , так, чтобы площадка контакта принадлежала плоскости xy . Начало системы координат поместим в точку первоначального контакта ролика и вала.

Полное перемещение вдоль оси x на площадке контакта в результате действия контактной (индекс c) и внеконтактной (индекс b) нагрузок:

$$\bar{u}_x = \bar{u}_x^{(c)}(f, p(x, y)) + \bar{u}_x^{(b)}(Q_b).$$

Относительное проскальзывание вдоль оси x также изменилось в результате изгиба:

$$\begin{aligned} s_x^{(b)} &= s_{x1} - s_{x2} = (\bar{u}_{x1} + \bar{u}_{x1}^{(b)} - \delta_{x1}) - (\bar{u}_{x2} - \delta_{x2}) = \\ &= (\bar{u}_{x1} + \bar{u}_{x1}^{(b)} - \bar{u}_{x2}) - (\delta_{x1} - \delta_{x2}) = s_x + \bar{u}_1^b. \end{aligned}$$

Таким образом, вследствие изменения граничных условий в области контакта – появления перемещений $\bar{u}_{x1}^{(b)}$ (см. например [4]) – соответственно изменились характеристики фрикционного процесса. Изменение силы трения $q(x, y)$ в соответствии с ее традиционным определением может быть выражено двояко: через изменение нормальных контактных усилий $p(x, y)$ либо через изменение коэффициента трения. Поскольку Q_b не влияет на изменение $p(x, y) = \sigma_{zz}(x, y, z = 0)$, то рассчитаем измененный коэффициент трения в точке (x, y)

$$f_{\sigma}^{(\bullet)}(Q_b, p_0, x, y) = f_{\sigma}^{(\bullet)}[\bar{u}_x^{(c)}(x, y), \bar{u}_x^{(b)}(x, y)]. \quad (15)$$

Согласно (15), локальный коэффициент трения $f_{\sigma}^{(\bullet)}$ изменяется в зависимости от координат точки области контакта. Тогда (интегральное) значение коэффициента трения в силовой системе

$$f_{\sigma} = \frac{1}{S} \int_S f_{\sigma}^{(*)}(S) dS, \quad (16)$$

где S – величина площадки контакта. Конкретизация (16) с учетом (15) приводит [4] к определению коэффициента трения Щербакова – Сосновского

$$f_{\sigma} = f + \frac{1}{S} \iint_{S(x,y)} \frac{2G\bar{u}_x^{(b)}}{p_0(C - Ax^2 - By^2)} dx dy = f - \frac{1}{S} \iint_{S(x,y)} \frac{2G\nu M(Q_b)x}{EWp_0(C - Ax^2 - By^2)} dx dy. \quad (17)$$

Анализ (16) и (17) показывает, что коэффициент трения в силовой системе (f_{σ}) может быть больше, меньше или равным обычному коэффициенту трения при качении (в паре трения):

$$f_{\sigma} \lesseqgtr f_R,$$

– подобно тому, как это было установлено в условиях скольжения (см. (7)).

Заметим: если в процессе трения качения постепенно увеличивать степень проскальзывания, то в конечном счете реализуется трение скольжения, при этом значение коэффициента трения возрастает примерно в 10 раз. Отсюда следует перспективность анализа силы и коэффициента трения как функций степени проскальзывания в системе. Поскольку последняя может быть рассчитана (методами теорий упругости, вязкоупругости и др.) практически при действии любого комплекса нагрузок, в повестку дня ставится задача разработки деформационной теории трения (и изнашивания) [4].

Экспериментальное подтверждение (7) и (18) можно найти в работах [4, 6, 7]. Здесь приведем лишь один пример [4].

На рисунке 2 представлены зависимости осредненных значений коэффициента трения качения \bar{f}_R от амплитуды напряжений цикла σ_a при испытаниях на контактно-механическую усталость. Каждой точке на графиках соответствует 66 значений f_R . Главное заключение по данным рисунка 2: величины f_R всегда меньше или больше того значения, которое установлено при чистом трении качения, когда $\sigma_a=0$ (показано пунктиром). Это наблюдается как при упругом ($p_0 = 1200$ МПа), так и при упругопластическом ($p_0 = 3200$ МПа) деформировании.

Особенности влияния циклических напряжений на изменение коэффициента трения таковы. (1) Чем больше величина σ (и, следовательно, чем больше соотношение σ/p_0), тем сильнее изменяется коэффициент трения в силовой системе. Такая закономерность наблюдается и при упругом и при упругопластическом контакте. Но если в первом случае циклические напряжения способны изменять величину f_R в 2–3 раза, то во втором – лишь на 3–5 % (в условиях опыта). Одна из причин этого: при упругом деформировании величина σ достигает ~ 40 % от значения p_0 , а при упругопластическом контакте – лишь ~ 10 %. (2) Циклические напряжения сильнее изменяют величину f_R , когда трение организуется в зоне растяжения изгибаемого образца – по сравнению со случаем, когда оно организуется в зоне сжатия. И эта закономерность соблюдается как при упругом, так и при упругопластическом деформировании. Но в условиях упругого контакта она выражена более ярко: в зоне сжатия изменение f_R составляет до ~ 30 %, тогда как в зоне растяжения – в ~ 3 раза.

Наиболее общий вывод из изложенного анализа состоит в том, что в силовой системе величиной коэффициента трения можно управлять внеконтактными нагрузками примерно в такой же мере, как и нагрузкой контактной.

ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ 30638-99. Трибофатика. Термины и определения (Межгосударственный стандарт). – 1999. – 17 с. 2 Сосновский Л. А. Основы трибофатика. – Гомель: БелГУТ, 2003. – Т.1. – 246 с., – Т.2. – 234 с. 3 Износоусталостные повреждения и их прогнозирование (трибофатика). Научный редактор Сосновский Л. А. / Авт.: Л. А. Сосновский, В. Т. Трощенко, Н. А. Махутов, Гао Ван-Чжэн, А. В. Богданович, С. С. Щербаков. – Гомель, Киев, Москва, Ухань,

2001. – 170 с. 4 Сосновский Л. А. Механика износоусталостного повреждения. – Гомель: УО «БелГУТ», 2007. – 434 с. 5 Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. – М.: Мир, 1989, – 510 с. 6 Тюрин С. А., Щербаков С. С., Сосновский Л. А. Сравнительное исследование коэффициентов трения при качении и контактно-механической усталости // Заводская лаборатория. – 2005. – Т. 71. – № 2. – С. 48–51. 7 Щербаков С. С. Об одном требовании к выбору коэффициента трения в силовой системе // Заводская лаборатория. – 2005. – Т. 71. – № 2. – С.46–48.

УДК 620.178.16

Костюченко А.А., Бордовский А.М., Воробьев В.В.

ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ТРУБ НЕФТЕПРОВОДОВ

РУП «Гомельтранснефть Дружба»

Гомель, Беларусь

Исследования авторов [1-2] и данные обследований нефтепроводов внутритрубными диагностическими снарядами в 2004-2006 г.г. показали, что для трубопроводов с периодом работы более 30 лет существует проблема накопления и развития внутренних коррозионных дефектов стенки трубы. Опасные тенденции, связанные с накоплением коррозионных повреждений, уже вынудили предприятие наметить и провести ряд дорогостоящих мероприятий по замене участков нефтепроводов, например, резервных ниток подводных переходов.

На рисунке 1 представлено количество коррозионных дефектов и их распределение по трассе нефтепровода Мозырь-Брест -1 с 233 по 441 км, как наиболее полно характеризующего важность данной проблемы и необходимость разработки и внедрения комплекса упреждающих мероприятий. На данный момент большинство из выявленных дефектов не опасны.

Повреждения носят локальный характер и не превышают величин потери металла в 10-20 % от толщины стенки трубы. Но, даже если предположить, что коррозия равномерная, а ее скорость не возрастает со временем, видно, что уже в ближайшие 5-7 лет принятие мер грозит остановкой работы данного участка нефтепровода.

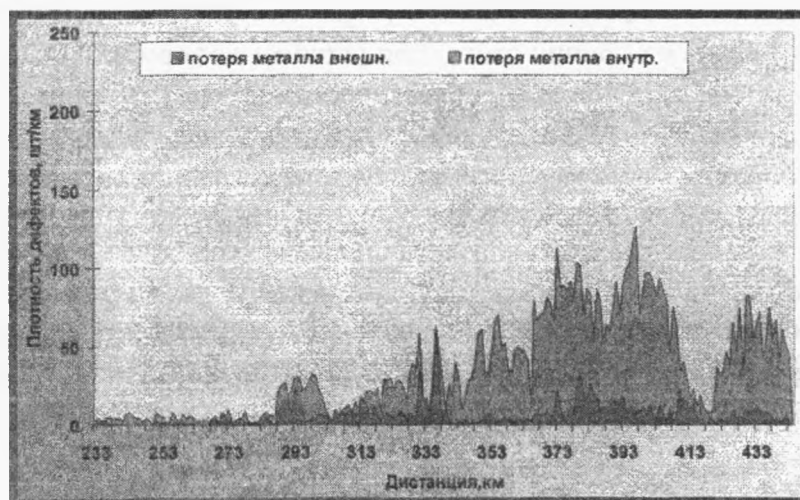


Рисунок 1 – Распределение коррозионных дефектов по длине нефтепровода Мозырь-Брест-1

С целью определения опасности внутренних коррозионных дефектов были проведены натурные испытания отрезка трубы.

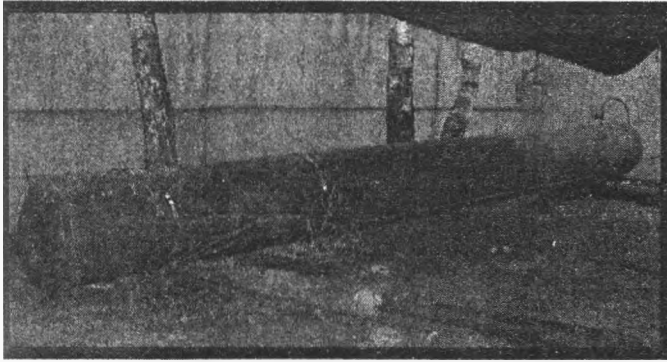


Рисунок 2 – Трубная плеть, подготовленная к гидроиспытаниям

Плеть длиной 7 м, диаметром 630 мм и толщиной стенки 9 мм была вырезана из демонтированной резервной нитки подводного перехода нефтепровода Мозырь-Брест-1 через реку Ствига (см. рисунок 2). Неразрушающий контроль сварных соединений плети не выявил дефектов швов выше браковочного уровня. В основном металле плети, методом толщинометрии, было выявлено пятно с утонением стенки на 10-40 % и площадью 0,5 м², предположительно внутренний коррозионный дефект. При осмотре про-

дольного сварного шва плети обнаружена трещина длиной 35 мм и шириной раскрытия до 0,5 мм. На внешней поверхности плети коррозионных или иных повреждений не обнаружено.

Для проведения гидроиспытаний натурального отрезка трубы внутренним давлением была разработана методика, включающая: технологию подготовки плети к испытаниям, монтаж системы нагружения внутренним давлением, составление программы нагружения, монтаж и проверку системы сбора информации о величинах деформаций металла в характерных точках плети в ходе гидроиспытаний (принят метод тензометрирования), гидроиспытания, обработку результатов.

Гидроиспытания проводили в несколько этапов нагружения и с использованием различных по мощности насосных станций (станция насосная ГНС-1-24 при давлении до 10 МПа и наступления предела текучести в локальных точках плети и опрессовочного агрегат ЦА-320 при давлении свыше 10 МПа для достижения разрушающего давления), что позволило подробно и с минимальной погрешностью зафиксировать кинетику процесса разрушения трубы

Исходя из имеющихся исходных данных тензорезисторы были установлены:

- по сечению трубы 8 тензорезисторов, равномерно распределенных начиная от продольного сварного шва и 1 дополнительный тензорезистор с другой стороны сварного шва;
- у дефекта поперечного шва 2 тензорезистора;
- 18 тензорезисторов по контуру дефекта и в точках максимального утонения стенки;
- по 1 тензорезистору у трещины в продольном шве;
- 3 тензорезистора в месте локального утонения стенки плети.

Предельное состояние трубной плети, по критерию «течь перед разрушением», достигнуто при внутреннем давлении в трубе равном 13,7 МПа. Свищ образовался в изна-

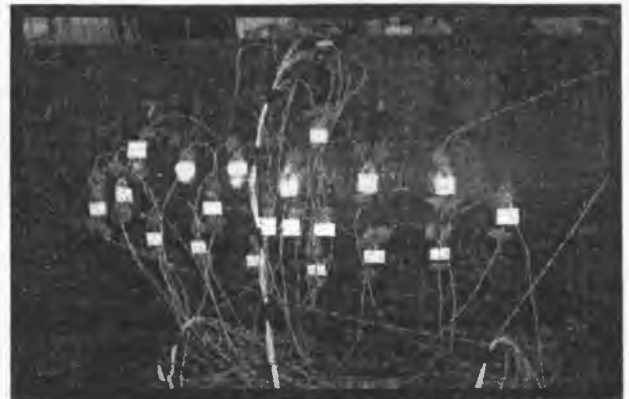


Рисунок 3 – Оконтуренный, с помощью тензодатчиков, внутренний дефект трубы

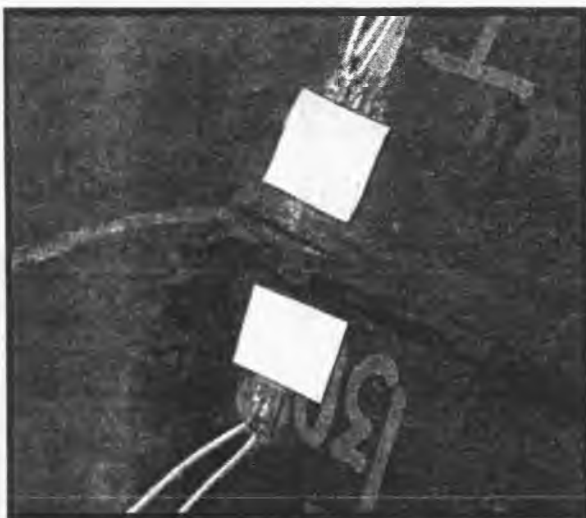


Рисунок 4 – Свищ по трещине при остаточном давлении в трубе

начально присутствовавшем дефекте (трещина в сварном продольном шве глубина 9 мм (90 % от толщины шва) и длиной 45 мм) (рисунок 5). Свищ был вышлифован, сварной шов восстановлен, испытания продолжены.

Предельное состояние трубной плети, по критерию «разрушение», произошло при внутреннем давлении в плети равном 14,3 МПа. Очаг разрушения – изначально присутствовавший коррозионный дефект трубы, расположенный с внутренней поверхности стенки (минимальная остаточная толщина металла - 6,6 мм, толщина стенки трубы 9,5 мм) (см. рисунок 5).

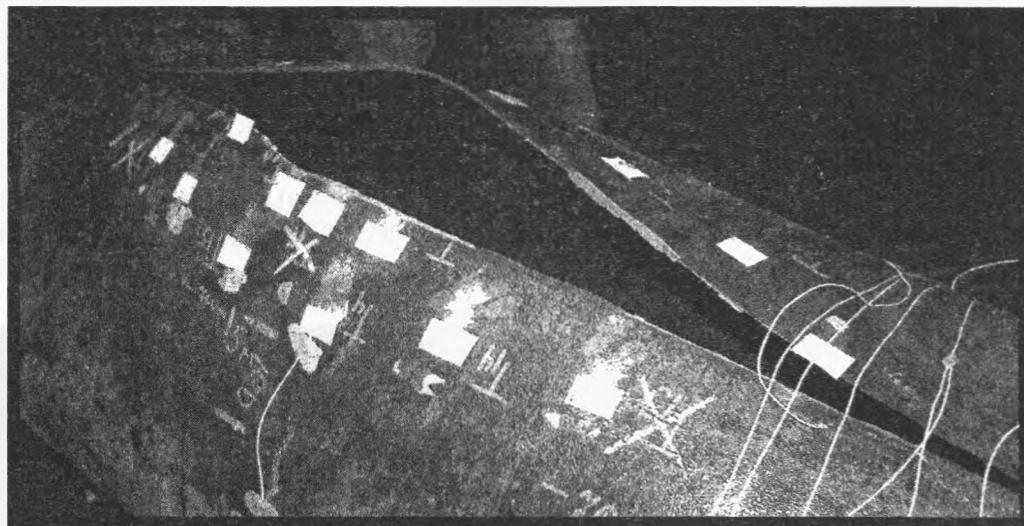


Рисунок 5 – Разрыв трубы по коррозионному дефекту

Напряжение в металле трубы, при котором произошло разрушение плети, близко к пределу прочности стали (520-590 МПа), указанному в заводском сертификате на трубы (494 МПа).

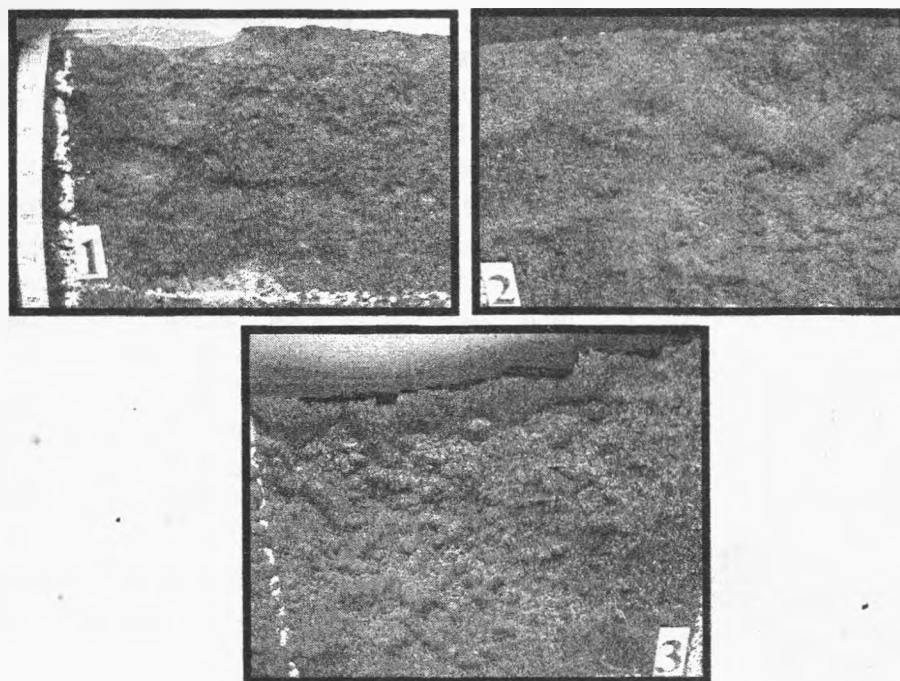


Рисунок 6 – Зона 2 фрагмента трубы из очага разрушения

Общий вид разрушения плети типичен для нефтепроводов – трещина прошла вдоль продольной образующей трубы. Однако разрушение произошло нетипично: не вдоль сварного шва, что наблюдается обычно, а по протяженному внутреннему пятну коррозионного повреждения. В очаге разрушения и в зоне распространения трещины вид излома хрупкий. В очаге разрушения присутствуют следы пластической деформации. Кромки разрыва длитель-

но эксплуатируемых труб имеют «рваную» структуру. Прочность сварного продольного шва оказалась выше, чем прочность металла в зоне локального пятна язвенной коррозии, даже несмотря на то, что сварной шов имеет значительный коэффициент концентрации напряжений, допустимые внутренние (неплошности) дефекты.

Внутренняя поверхность основного металла трубы подвержена равномерной коррозии, а в зоне разрушения (рисунок 6) – язвенной коррозии. Повсеместно на внутренней поверхности трубы присутствуют пластовые отложения, состоящие из продуктов коррозии металла трубы взаимодействующего со средой. Глубина равномерной коррозии основного металла незначительна (составляет не более 0,5 мм за весь период эксплуатации). В зоне язвенной коррозии максимальная измеренная глубина язв, канавок ножевой коррозии относительно внутренней поверхности оставила 5,2 мм, а минимальная толщина остаточного металла – 4,3 мм.

Основное заключение, которое следует из результатов испытаний, состоит в том, что для труб, период эксплуатации которых превышает срок амортизации, возможно изменение критерия предельного состояния: оно достигается не в зоне сварных швов, а в области протяженного коррозионного повреждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бордовский А.М., Воробьев В.В., Сосновский Л.А. Прочностная надежность линейной части нефтепроводов. – Гомель: НПО ТРИБОФАТИКА, 2004. - 114 с. 2. Коррозионное разрушение поверхностей магистральных труб нефтепровода после длительной эксплуатации / Андрияшин В.А., Костюченко А.А., Комаров А.И., Воробьев В.В. // Защита металлов. № 1. - Т. 421.– 2006. – С. 52-56

УДК 539.538

Махутов Н. А., Сосновский Л. А.

ДИНАМИКА, ПРОЧНОСТЬ И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ

*ИМАШ РАН им. А. А. Благонравова Москва, Россия
ООО «НПО ТРИБОФАТИКА» Гомель, Беларусь*

В наиболее ответственных и массовых – силовых системах машин и оборудования развивается комплексное – износоусталостное повреждение [1–3]. В таблице 1 дана классификация таких повреждений, а на рисунке 1 показан конкретный пример анализа работоспособности одной из них.

Таблица 1 – Типичные силовые системы и их комплексное повреждение

Типичная силовая система	Комплексное повреждение и разрушение	Определение	Зона реализации в системе колесо / рельс
Шейка коленчатого вала / шатунная головка с подшипником скольжения	Фрикционно-механическая усталость	Износоусталостное повреждение, обусловленное кинетическим взаимодействием явлений механической усталости и трения скольжения	В зоне взаимодействия гребня колеса с боковой поверхностью головки рельса
Колесо / железнодорожный рельс	Контактно-механическая усталость	Износоусталостное повреждение, обусловленное кинетическим взаимодействием явлений механической усталости и трения качения (трения качения с проскальзыванием)	В зоне взаимодействия колеса с головкой рельса на дорожке качения

Окончание таблицы 1			
Шлицевой вал / втулка	Фреттинг-усталость	Износоусталостное повреждение, обусловленное кинетическим взаимодействием явлений механической усталости и фреттинга	В зоне взаимодействия подошвы рельса с подрельсовым основанием
Вал гребного винта / морская вода	Коррозионно-механическая усталость	Усталость материала при одновременном воздействии повторно-переменных напряжений и коррозионной среды	В зонах взаимодействия с окружающей средой (атмосфера, гидросфера, геосфера)
Лопатки турбины / поток жидкости или газа, несущий твердые частицы	Эрозионно-механическая усталость	Износоусталостное повреждение, обусловленное кинетическим взаимодействием явлений механической усталости и эрозии	
Труба / поток под давлением	Коррозионно-эрозионная усталость	Износоусталостное повреждение, обусловленное кинетическим взаимодействием явлений коррозии и эрозии	

К началу нашего века сложились два различных подхода к оценке работоспособности системы колесо / рельс. Согласно традиционной точке зрения, колесо / рельс – механическая система (рисунок 1, а). Прочнисты рассматривают железнодорожный рельс как балку, которая работает на усталость при действии пространственной системы сил. Естественно, что эксплуатационная надежность (долговечность) рельса оценивается ими по специфическому критерию – усталостному разрушению (F – от франц. *Fatigue* – усталость). В таком случае схема расчета сопротивления усталости рельса как элемента конструкции имеет, в первом приближении, вид

$$\sigma \rightarrow N(\sigma) \underset{\sigma_{-1}}{>} F(\sigma, \sigma_{-1}, N_{\sigma}), \quad (1)$$

где σ – циклические напряжения, $N(\sigma) = N_{\sigma}$ – усталостная долговечность, σ_{-1} – предел выносливости.

А трибологи представляют рельс как одну из деталей узла трения (колесо / рельс). Естественно, что эксплуатационная надежность (долговечность) рельса оценивается ими по другому специфическому критерию – износу (T – от греч. *Tribology* – трибология). В этом случае схема расчета износостойкости рельса как одного из тел пары трения имеет, в первом приближении, вид

$$p \rightarrow N(p) \rightarrow I(p) \underset{p_f}{>} F(p, p_f, N_p, I_p), \quad (2)$$

где p – контактное давление, $N(p) = N_p$ – долговечность по критерию износостойкости, p_f – предельное контактное давление (предел контактной усталости), $I(p) = I_p$ – интенсивность изнашивания при действии p .

И ясно, что оценки (1) и (2) существенно различны для одного и того же рельса.

С позиций же трибофатики (ТФ) еще яснее: ни одна из этих оценок не может быть верной, поскольку в действительности рельс – один из элементов *силовой системы* (рисунок 1, б) и для него характерно *комплексное – износоусталостное повреждение и разрушение*. И тогда схема расчета сопротивления комплексному повреждению и разрушению имеет, в первом приближении, вид

$$(\sigma, p) \rightarrow N(\sigma, p) \rightarrow I(\sigma, p) \begin{matrix} \sigma_{-1}(p) \\ p_f(\sigma) \end{matrix} \rightarrow F\left[\left[\sigma, p, \sigma_{-1p}, p_{f\sigma}, N(\sigma, p), I(\sigma, p)\right]\right], \quad (3)$$

где $\sigma_{-1}(p) = \sigma_{-1p}$ – предел выносливости, определяемый с учетом влияния контактного давления p ; $p_f(\sigma) = p_{f\sigma}$ – предел контактной усталости, определяемый с учетом влияния циклических напряжений σ ; $N(\sigma, p)$, $I(\sigma, p)$ – долговечность и интенсивность изнашивания, обусловленные одновременным действием σ и p .

Трибофатика создавалась на базе нескольких фундаментальных дисциплин (рисунок 2). С одной стороны, теории трения, изнашивания, смазки были объединены в единую научную дисциплину – трибологию (Т). Это естественно, потому что в парах трения реально сочетаются и взаимодействуют процессы трения и изнашивания, в том числе и со смазкой.

С другой стороны, среди общих проблем динамики, прочности и устойчивости вычленилась механика усталостного разрушения (F) как дисциплина, имеющая особое практическое значение для современного машиностроения. Чтобы эффективно решать комплексные задачи надежности (R) наиболее ответственных – силовых систем машин и оборудования по важнейшим критериям работоспособности, потребовалось создать трибофатику (TF).

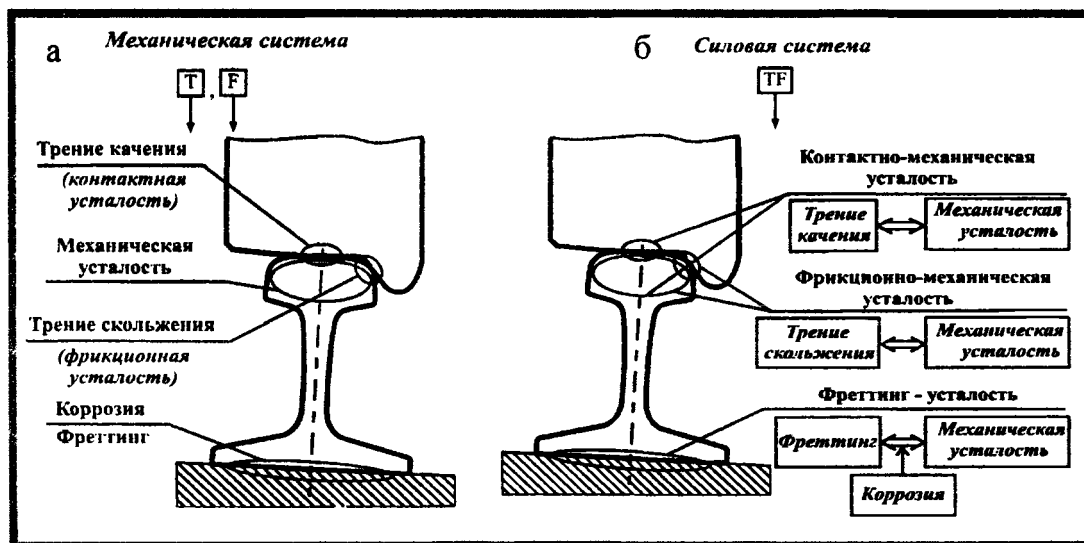


Рисунок 1 – Традиционный (а) и новый (б) подход к анализу работы системы колесо / рельс

Таким образом, трибофатика – это наука о комплексном – износоусталостном повреждении и разрушении силовых систем (ГОСТ 30638–99). Поскольку речь идет о механике износоусталостного повреждения, то термин «трибофатика» вполне, хотя и очень кратко, отражает ее содержание: от греч. *tribos* – трение, что символизирует современную трибологию, в том числе и трибологическую надежность; от франц. *fatigue* – усталость, что символизирует современную механику усталостного разрушения, в том числе и прочностную надежность. Как видно, термин «трибофатика» состоит из двух слов (понятий), которые совершенно равноправны. Если же говорить о физико-механических процессах, определяемых указанными понятиями, то следует принять во внимание их диалектическое взаимодействие и взаимовлияние: трение (и изнашивание) \leftrightarrow усталость = трибофатика (*friction (and wear) \leftrightarrow fatigue = tribo-fatigue*). Поскольку трибофатика – это новый раздел механики, ее можно определить и как механику силовых систем.

В таблице 2 дан сравнительный анализ методов исследования и расчета объектов, изучаемых в трибологии, механике усталостного разрушения и трибофатике.

Обратимся сначала к экспериментальным методам

Таблица 2 – Методы исследования объектов

Дисциплина	Объект для изучения	Основные методы исследования		Масштаб повреждения
		экспериментальные	теоретические	
Т (трибология)	Пара трения	Испытания на трение	Механика контактного взаимодействия	Поверхностное повреждение (износ, питтинг и др.)
F (механика усталостного разрушения)	Элемент конструкции	Испытания на усталость	Механика деформирования и разрушения	Объемное (усталостное) разрушение
TF (трибофатика)	Силовая система	Износоусталостные испытания	Механика износоусталостного повреждения	Комплексное поверхностное повреждение и объемное разрушение

Специалисты по механике усталостного разрушения разрабатывают и применяют методы и машины для испытания элементов конструкций в различных условиях циклического нагружения. Трибологи разрабатывают и применяют методы и машины для испытания пар трения в различных условиях контактного взаимодействия. А специалисты по трибофатике создают методы и машины для комплексных – износоусталостных испытаний моделей силовых систем. А разница вот в чем. На машинах трения нельзя изучать сопротивление усталости элементов конструкций. На машинах для усталостных испытаний нельзя изучать процессы трения и изнашивания. А на машинах для износоусталостных испытаний (серии СИ) можно и должно изучать и то, и другое, но – и это главное – можно проводить комплексные испытания при любых сочетаниях циклических и контактных нагрузок, действующих одновременно. Естественно, что это позволяет получать принципиально новые экспериментальные результаты.

Обратимся теперь к методам теоретических исследований (см. таблицу 2). Теория, как известно, опирается на опыт. Вот почему трибологи, исходя из своего опыта, прежде всего разрабатывают механику контактного взаимодействия. А прочнисты, исходя из своего опыта, разрабатывают механику деформирования и разрушения. Специалисты по трибофатике, конечно, используют и то, и другое – к тому же в неразрывном единстве. Но, имея более сложный объект для изучения,

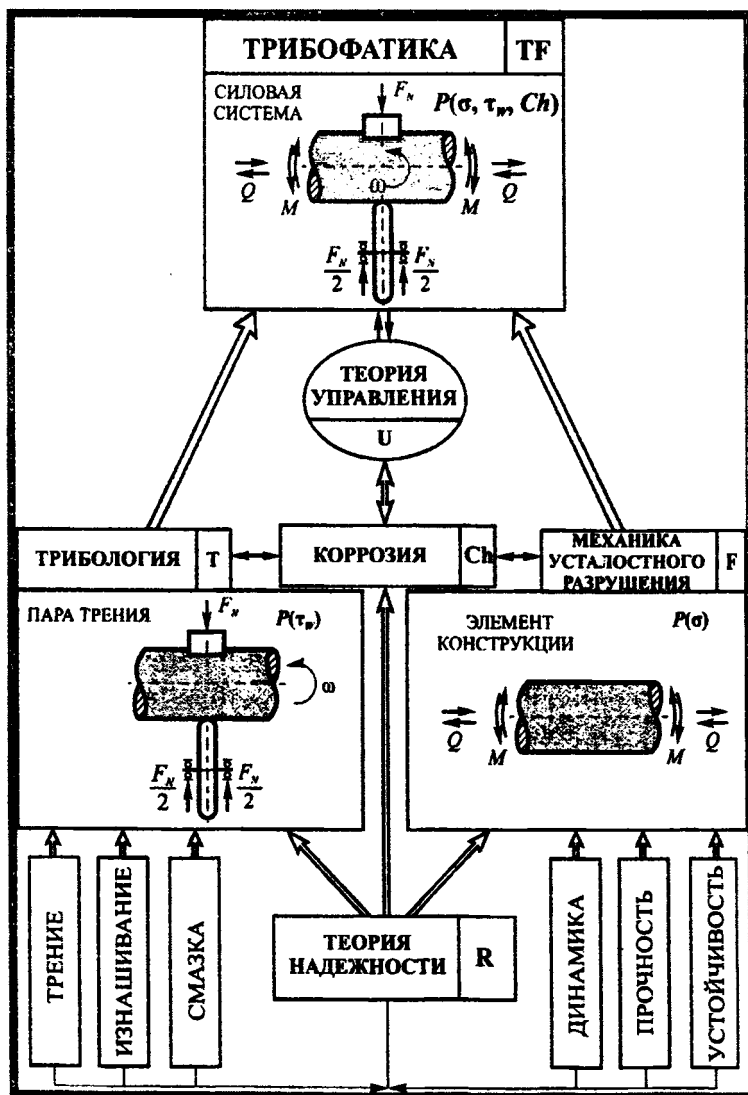


Рисунок 2 – Трибофатика как комплексная научная дисциплина

им приходится искать и новые подходы к исследованию комплексных явлений.

Контактные задачи составляют отдельное и широкое направление исследований в механике деформируемого твердого тела и в трибологии. В трибофатике развивается нетрадиционный подход к постановке и решению контактных задач [3–6], поскольку требуется их приложение к специфическим объектам – силовым системам машин и оборудования.

Классификация контактных задач для случая, когда контактная нагрузка F_N является одновременно и изгибающей, дана на рисунке 3. Традиционно решается лишь тип задач А. Типы задач В и С требуют учета объемного деформирования одного либо обоих тел, находящихся в силовом контакте. При этом тела могут представлять собой и «сэндвичи», т. е. состоять из двух и более слоев (толщиной h' и т. д.), материал которых отличается физико-механическими свойствами. Заметим, что при контакте тел вращения элементы могут иметь как положительную, так и отрицательную кривизну, и реализуются основные типы площадки реального контакта (полоска, круг, эллипс).

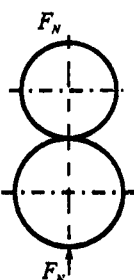
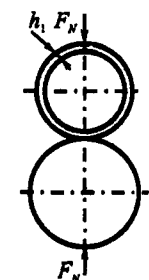
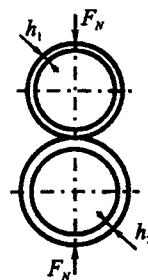
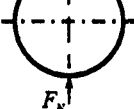

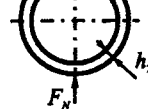
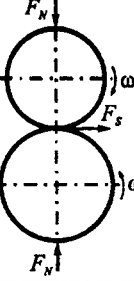
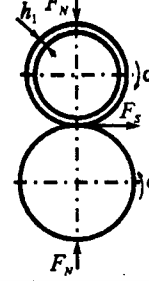
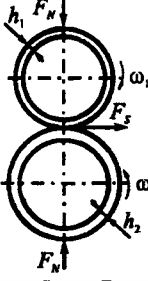
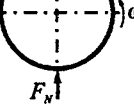
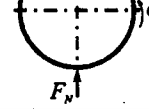

Статический контакт			
Элемент 1: $R_{11} > 0$ $R_{12} > 0$			
Элемент 2: $R_{21} > 0$ $R_{22} > 0$			
Тип контакта	А	В	С
Подвижный контакт			
Элемент 1:			
Элемент 2: $R_{21} > 0$ $R_{22} > 0$			
Тип контакта	А	В	С

Рисунок 3 – Классификация контактных задач для тел вращения по двум признакам: характеру нагружения и условиям деформации

Более общим является случай расчета силовой системы при раздельном действии контактных (F_N) и внеконтактных (M, M_s, Q) нагрузок (рисунок 4).

Таким образом, развитие трибофатики привело к тому, что механика контактного взаимодействия получила новый класс задач; это – задачи Сосновского. В более общем плане такие задачи ведут к построению нового подхода к оценке напряжений в точке [3].

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}(F_N, Q_m, T_\Sigma, F_A, D_{ch}), \quad (4)$$

которые рассматриваются как функция контактной (F_N) и любого комплекса внеконтактных (Q_m) нагрузок; температуры (T_Σ), обусловленной всеми источниками тепла; атомно-молекулярных сил взаимодействия (F_A) на площадке контакта; электрохимических воздействий (D_{ch}).

Более простой является задача построения механико-математической модели [3]

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}(F_N, Q_m), \quad (5)$$

являющейся частным случаем (4); предложен [1] простейший способ учета коррозионно-химических воздействий (D_{ch}). Что касается функции (4), то, конечно, возникает принципиальное сомнение о возможности (и, пожалуй, целесообразности) учета «сил» F_A и D_{ch} при расчете напряжений в рамках теории упругости. До его разрешения несомненный практический интерес представляет термомеханическая модель

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}(F_N, Q_m, T_\Sigma). \quad (6)$$

По нашему мнению, не видно непреодолимых трудностей для ее строения на базе современного знания – в рамках нового раздела теории упругости.

На основании большого комплекса теоретических экспериментальных исследований [1-3] было установлено, что в зависимости от условий нагружения:

(1) процессы трения и изнашивания могут не только снижать, но и существенно повышать сопротивление усталости (прямой эффект);

(2) циклические напряжения, обусловленные внеконтактной нагрузкой, способы управлять износостойкостью системы – повышать либо снижать интенсивность изнашивания, коэффициент трения, долговечность (обратный эффект) – примерно в такой же степени, как и контактная нагрузка;

(3) развитие локальных износоусталостных повреждений обуславливает возникновение виброударного процесса (явление троппи), т. е. резкое снижение долговечности системы.

Очевидно, что неучет описанных эффектов при расчете и проектировании силовых систем ведет к неверной оценке их эксплуатационной надежности.

По нашему мнению, развитие и внедрение нового подхода к анализу динамики, прочности и износостойкости в их органической взаимосвязи практически ведет к обеспечению требуемой надежности наиболее ответственных – силовых систем современных машин и оборудования. В этой связи представляется весьма полезным и своевременным многолетний опыт [7, 8] преподавания учебного курса «Основы трибофатики» в техническом университете. Распространение этого опыта способствовало бы повышению качества подготовки будущих инженеров-механиков.

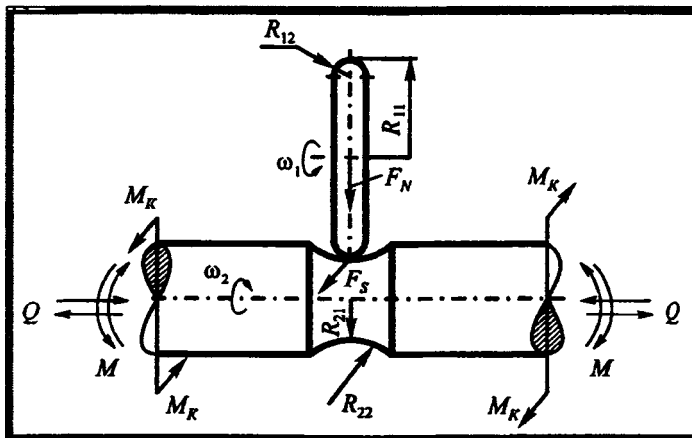


Рисунок 4 – Расчетная схема силовой системы при действии контактной (F_N) и внеконтактных (M , M_K , Q) нагрузок

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Сосновский Л. А. Основы трибофатики. – Гомель: БелГУТ, 2003. – Т.1. – 246 с., – Т.2. – 234 с.
- 2 Сосновский Л.А., Махутов Н. А. Трибофатика: износоусталостные повреждения в проблемах ресурса и безопасности машин. – Москва-Гомель: ФЦНТП "Безопасность"-НПО "ТРИБОФАТИКА", 2000. – 304 с.
- 3 Сосновский Л. А. Механика износоусталостного повреждения. – Гомель: УО «БелГУТ», 2007. – 434 с.
- 4 Сосновский Л. А., Щербаков С. С. 0 классификации контактных задач применительно к силовым системам машин / Современные методы проектирования машин: сб. науч. тр. вып. 2. В 7 т. / под общ. ред. П. А. Витязя. – Мн.: УП "Технопринт", 2004. – Т. 4. – С. 48–58.
- 5 Sosnovskiy L. A., Shcharbakou S. S. New Class of Contact Problems / Proceedings of the International Mechanical Engineering Congress and Exposition (Orlando, 5–11 November 2005). – Orlando, 2005. – 6 pp.
- 6 Сенько В. И., Сосновский Л. А., Щербаков С. С. Нетрадиционный подход к решению контактных задач / Основные идеи трибофатики. – Гомель: БелГУТ, 2005. – С. 147–180.
- 7 Сенько В.И., Сосновский Л.А. Основные идеи трибофатики и их изучение в техническом университете. –Гомель: БелГУТ, 2005. –187 с.
- 8 Фролов К.В., WEN Shi-Zhu, Трощенко В.Т., Высоцкий М.С., Махутов Н.А., Сенько В.И., Хоменко А.П., YAN Xinpeng, Сосновский Л.А. Трибофатика как учебная дисциплина в техническом университете / Тр. V-го Международного симпозиума по трибофатике (ISTF 2005), 3–7 октября 2005 г., Иркутск (Россия) / Отв. ред. А.П. Хоменко. –Иркутск: Иркутский государственный университет путей сообщения, 2005. –Т. 2. –С. 44-61.

О ФАКТОРАХ ИЗНОСА ВРАЩАТЕЛЬНЫХ ПАР РЫЧАЖНЫХ МЕХАНИЗМОВ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Для современных изделий машиностроения их моральный износ, как правило, не уступает износу физическому, а зачастую и превосходит его. В таких условиях целью применения упрочняющих технологий является обеспечение надежного функционирования изделия в течение номинального срока его эксплуатации. Это достигается в первую очередь обеспечением одинакового ресурса работы всех узлов и сопряжений машинного агрегата. Аналогичное требование может быть сформулировано и для отдельных быстроизнашивающихся пар трения, лимитирующих ресурс работы определенной машины: наибольшая долговечность трибосопряжения имеет место при равномерном изнашивании по всей поверхности трения. Повышенный локальный износ в большинстве случаев ведет к потере работоспособности пары в целом. Чем меньше номинальная площадь контакта трущихся деталей, тем в большей степени справедливо для нее данное предположение. К таковым следует отнести высшие пары зубчатых передач и кулачковых механизмов, а также вращательные пары рычажных механизмов, в которых из-за значительных зазоров площадь контакта в несколько раз меньше номинальной площади полуцилиндра.

В настоящее время исследованы механизмы изнашивания, имеющие место в подвижных сопряжениях машин, определены эмпирические зависимости, связывающие величину износа с кинематическими и силовыми параметрами. В общем случае при наиболее вероятных в кинематических парах механизмах изнашивания его интенсивность I характеризуется зависимостью /1/:

$$I = k \cdot p^m V^n, \quad (1)$$

где p – давление в контакте,
 V – относительная скорость в сопряжении,
 k , m и n – числовые коэффициенты.

Здесь давление в контакте является мерой напряженного состояния изнашиваемого участка поверхности. Относительная скорость скольжения является показателем, характеризующим усредненное время существования единичной фрикционной связи и, следовательно, продолжительность воздействия факторов износа.

Большинство механизмов работает в режиме установившегося периодического движения: в них происходит циклическое изменение внешних сил и передаточных функций. Это приводит к тому, что различные участки поверхностей трения нагружены неравномерно /2/. Существуют определенные участки, где значения наложенных друг на друга факторов износа – локальных напряжений и относительных скоростей скольжения – являются максимальными. Следовательно, в этих точка будет максимальной интенсивность изнашивания, и ресурс пары трения в целом будет лимитироваться ресурсом данного участка поверхности трения. Указанное явление следует учитывать при конструировании пар трения и при разработке технологий их восстановления-упрочнения. В частности целесообразно проводить упрочнение с заданным неравномерным распределением свойств по поверхностям трения в соответствии с эпюрами их износа так, чтобы более нагруженные участки обладали более высокой износостойкостью и наоборот /3/. Реализация такого подхода требует разработки алгоритмов расчета величины износа и интенсивности изнашивания, позволяющих количественно оценить влияние всех факторов износа. Эти факторы можно условно разделить на две группы: 1) зависящие от физико-механических свойств и состояния контактирующих по-

верхностей; 2) зависящие от кинематических характеристик и функциональных особенностей механизмов

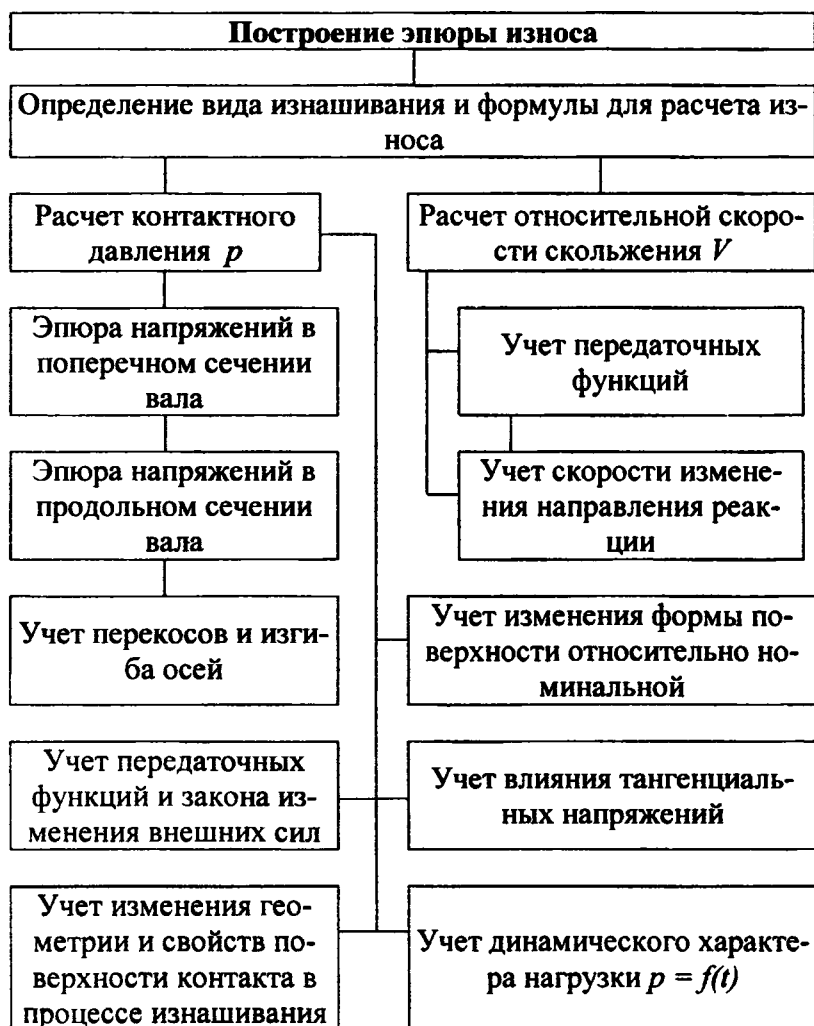


Рисунок 1- Схема расчета величины износа во вращательной кинематической паре

Факторы первой группы, такие как механические характеристики материалов поверхностей, фактическая площадь и реология контакта, шероховатость поверхностей, влияют преимущественно на величину контактного давления и подробно рассматриваются физикой и механикой твердого тела. В настоящее время получены сложные математические модели, позволяющие рассчитать напряженное состояние контактирующих поверхностей с высокой степенью точности [4]. Однако, этого недостаточно для расчета подвижных соединений.

Количество факторов износа и особенности их наложения друг на друга определяются конструкцией пары трения. Наиболее значимым представляется рассмотрение вращательных пар, так как им соответствует основной объем в номенклатуре деталей, подлежащих восстановлению и упрочнению. Для них предлагается следующая логическая схема расчета на износ (рис. 1).

Наблюдаемое интенсивное развитие триботехники позволяет предположить, что данная схема не является исчерпывающей, и в перспективе могут возникнуть дополнительные факторы, существенно влияющие на процесс изнашивания.

Динамический характер процесса изнашивания и неравномерное воздействие факторов износа на различные участки поверхности, обусловленные кинематикой и функциональными особенностями механизма, учитываются дискретностью расчета переменных величин. Для обеспечения наибольшей адекватности следует последовательно рассматривать элементарные участки сопряженных поверхностей трения по возможности с наименьшей площадью. Наиболее значимыми величинами являются значения реакции и относительной скоро-

сти скольжения между контактирующими поверхностями, а также изменением угла наклона реакции. Динамика изменения последнего параметра ранее не исследовалась, в то время как он в наибольшей степени определяет длительность фрикционного воздействия на локальный участок каждой из поверхностей пары трения. Данное предположение подтверждается сопоставлением графиков относительной угловой скорости (ω_{21}) и угловой скорости изменения направления реакции во вращательной паре между коленчатым валом и шатуном (ω_{F21}), например, в двигателе внутреннего сгорания (рис. 2). Приведенные зависимости построены с учетом воздействия только инерционных нагрузок, которые в быстроходных механизмах сопоставимы или превосходят внешние движущие силы или силы полезного сопротивления. Принималось, что средняя скорость вращения кривошипа равна 100 рад/с, коэффициент неравномерности вращения – 0,01.

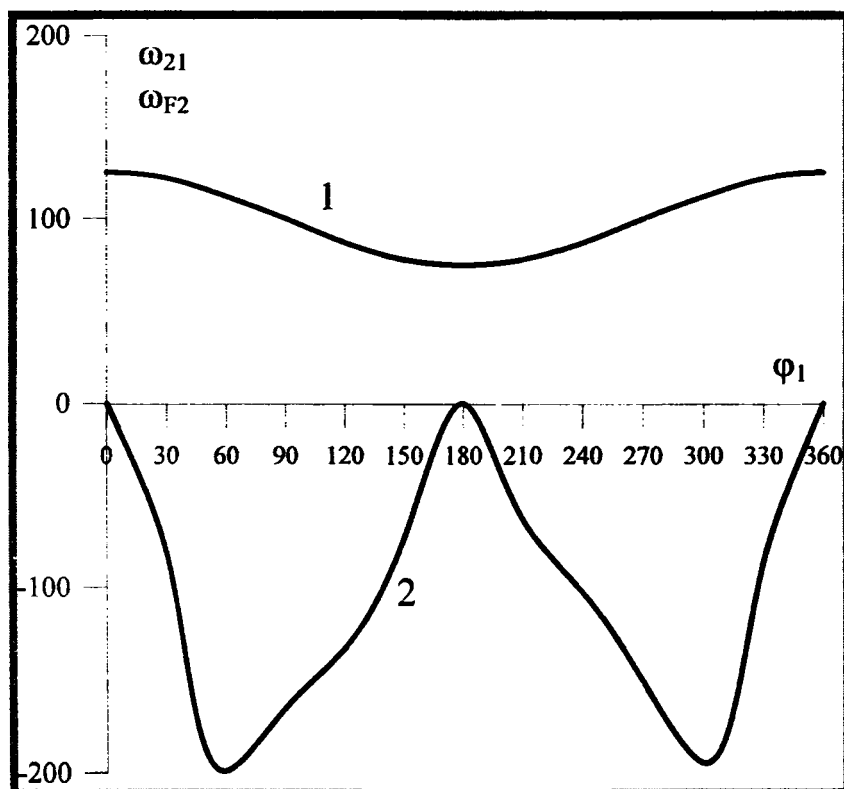


Рисунок 2- Зависимость скоростных факторов износа во вращательной паре «кривошип – шатун» от угла поворота кривошипа
 1 – относительная угловая скорость ω_{21} ;
 2 – скорость поворота вектора реакции ω_{F21}

Согласно проведенным расчетам максимальные значения относительной угловой скорости связаны со средней скоростью вращения кривошипа зависимостью

$$\omega_{21 \max} \approx \left(1 + \frac{l_1}{l_2} \right) \cdot \omega_{1cp}, \quad (2)$$

то есть в реальных механизмах превышают значения ω_{1cp} на 15...30 %. При этом максимальные по модулю значения скорости поворота вектора реакции $\omega_{F21 \max}$ – превышают ω_{1cp} более чем в два раза. Так как параметры ω_{21} и ω_{F21} имеют разные знаки, пренебрежение скоростью поворота реакции приводит к многократной ошибке в оценке продолжительности воздействия факторов износа на локальном участке. При этом следует отметить, что эти два параметра характеризуют различные относительные перемещения и не могут алгебраически складываться друг с другом. Вопрос о степени влияния на процесс изнашивания скорости поворота реакции во вращательной паре требует дополнительного анализа и проверки экспериментальными исследованиями. Предположительно формулу (1) для расчета интенсивности изнашивания вращательных пар рычажных механизмов следует представить в виде

$$I = k \cdot p^m \omega_{21}^n \omega_{F21}^q r \quad (3)$$

где q – числовой коэффициент,
 r – номинальный радиус вращательной пары.

Характер зависимости ω_{F21} от угла поворота кривошипа φ_1 меняется с изменением коэффициента неравномерности движения, но при этом не изменяется амплитуда колебаний значений параметра. Изменение координаты центра масс шатуна и соотношения длин кривошипа и шатуна l_1/l_2 приводит к изменению и формы кривой, и соотношений максимальных значений аналога скорости поворота реакции $\omega_{F21\max}/\omega_{1\text{ср}}$. Скорость поворота реакции существенно уменьшается с приближением центра масс шатуна к исследуемой вращательной паре, а также с увеличением длины шатуна относительно кривошипа.

При учете внешних сил, изменяющихся по разнообразным законам, в графике зависимости $\omega_{F21}(\varphi_1)$, как правило, появляются разрывы, что свидетельствует о скачкообразном изменении направления реакции. Это позволяет определить участки поверхностей трения, подверженные ударным нагрузкам. Для них вид изнашивания может отличаться от вида изнашивания прочих участков поверхности сопряжения, и для них следует применять иные формулы расчета величины износа и интенсивности изнашивания.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Трение, износ и смазка: (Трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун и др.; Под общ. ред. Чичинадзе А.В. - М.: Машиностроение, 2003. – 575 с. 2. Повышение долговечности трущихся элементов вращательных кинематических пар механизмов машин на основе моделирования их износа / Филонов И.П., Анципорович П.П., Акулич В.К., Булгак Т.И. // Современные методы проектирования машин: Респ. межведомств. сб науч. тр. Вып. 2 В 7 томах. Т. 4. / под общ. Ред. П.А. Витязя. – Мн.: УП «Технопринт», 2004. – С. 127 – 132. 3. Патент 2107902 С1 РФ, МКИ G 01 N 3/56. Способ повышения долговечности деталей подвижных соединений механизмов машин / И.П. Филонов, А.А. Черкас. – № 5030070/28; Заявл. 27.02.92; Оpubл. 27.03.98, Бюл. № 9. 4. Кравчук А.С., Чигарев А.В. Механика контактного взаимодействия тел с круглыми границами. – Мн.: Технопринт, 2000. – 196 с.

УДК 621.878

Пахарев Д.В., Соломевич П.А., Кравчук А.С., Карпыза С.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ ЭКСКАВАТОРА-ПОГРУЗЧИКА НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

*Белорусский национальный технический университет
 Минск, Беларусь*

1. Введение. Увеличение доли рассредоточенных объектов с малыми объемами строительства в 1960-х годах стало причиной интереса машиностроителей к созданию многоцелевых землеройных агрегатов - экскаваторов-погрузчиков (в обиходе - бэклодеров). На строительной площадке и в коммунальном хозяйстве они способны заменить сразу несколько специализированных машин. Их применение заметно повышает эффективность использования базовой машины благодаря сокращению простоев и экономии средств на приобретение и эксплуатацию универсальных землеройно-погрузочных агрегатов [1].

Экскаватор-погрузчик совмещает функции одновременно двух машин (Рисунок 1). С мощностью погрузочного ковша ведут погрузочно-разгрузочные работы с сыпучими, мелкокусковыми материалами и разрыхленным грунтом, который добывают из массива естественным оборудованием. Таким оборудованием в свою очередь ведут работы выше уровня стоянки, подбирают и грузят рыхлые материалы, планируют поверхности, засыпают траншеи.

Кроме того, в ковше можно перемещать песок, щебень и штучные грузы на расстояние до 2 км с прицельной отсыпкой по месту укладки. При транспортировке груза навесное экскаваторное оборудование, исполняющее роль контргруза, препятствует продольному опрокидыванию погрузчика в сторону погрузочного ковша.

Стандартный погрузочный ковш в конструкции большинства машин может быть заменен копающим, челюстным или колосниковым ковшом, поддонными вилами, грейдмастером, грузовой безблочной стрелой, рулонным захватом (пикой для тюков), бункерно-уборочной машиной, скирдоукладчиком, стогометателем, скребковым, ковшовым грейферным, вилочным или челюстным захватом.

2. Этапы создания экскаваторно-погрузочного оборудования. При создании навесного оборудования экскаватора-погрузчика использовались параметры, определённые стандартами [2, 3] (Таблица 1, 2).

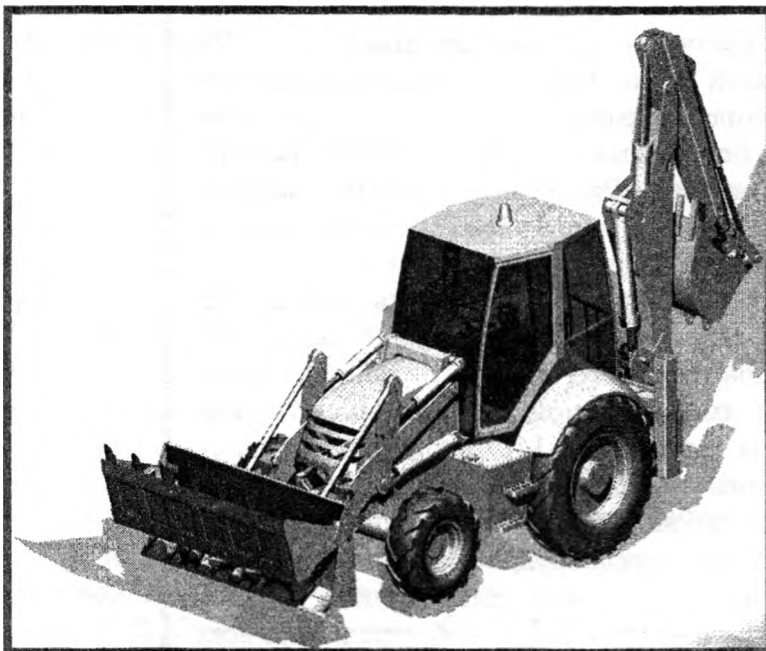


Рисунок 1. Трёхмерная модель экскаватора погрузчика Амкодор 732

Таблица 1. Исходные данные для погрузочного оборудования

Показатель	Значение
Максимальная высота разгрузки ковша по режущей кромке при угле разгрузки 45° , мм, не менее	2700
Вылет кромки ковша при максимальной высоте разгрузки, мм, не менее	800

Таблица 2. Исходные данные для экскаваторного оборудования

Показатель	Значение
Наибольшая кинематическая глубина копания, мм	4480
Наибольшая высота выгрузки, мм, не менее	3590
Угол поворота экскаваторного оборудования в плане, градус, не менее	170

Основными этапами создания навесного оборудования после задания исходных данных (Таблица 1, 2) являются: 1. сравнительный анализ; 2. кинематический анализ; 3. силовой расчёт; 4. Прочностной расчёт рабочего оборудования.

3. Кинематическая модель ваторного оборудования.

По тивной схеме обратную лопату выпускают нескольких разновидностей, но основными ее сборочными единицами всегда являются: стрела 1 (Рисунок 2); рукоять 2, ковш 3 и гидроцилиндры 4, 5 и 6 подъема стрелы, поворота рукояти и ковша.

Основную часть стрелы, как правило, используют при установке различных видов сменного рабочего оборудования, например обратной и прямой лопат, грейфера, погрузчика [4]. Удлиняющую часть стрелы при переходе с одного вида оборудования на другой или сохраняют (например, при переоборудовании обратной лопаты на грейфер), или демонтируют.

Наряду с составной стрелой на всех моделях экскаваторов применяют неразъемную стрелу Г-образной формы, представленная на рисунке 2

Стрела обратной лопаты — прочная, пустотелая, сваренная из легированного металлопроката конструкция. Пяту стрелы шарнирно укрепляют в проушинах поворотной колонки 9, к которой присоединен также и гидроцилиндр 4 подъема стрелы. Шток гидроцилиндра 4 шарнирно соединен со стрелой, при выдвигании штока изменяется угол наклона стрелы по отношению к поворотной колонке.

Рукоять подвешена на стреле и может поворачиваться по часовой стрелке или против нее при выдвигании или втягивании штока гидроцилиндра 5. Ковш 3 закреплен на рукояти в одной точке, поэтому также может свободно поворачиваться с помощью гидроцилиндра 6.

4. Кинематическая модель погрузочного оборудования.

Из большинства кинематических схем рычажного механизма, применяемых в мировой практике для подъема стрелы и поворота ковша, наиболее оптимальной является схема перекрестного типа [5]. Она обеспечивает лучшие технико-эксплуатационные показатели, поэтому принята на вооружение многими компаниями по производству экскаваторов-погрузчиков. В результате применения рычага первого рода с опорой на стреле обеспечивается наибольшее усилие в начале поворота ковша в штабеле насыпного груза. Представленная схема (Рисунок 3) состоит из следующих звеньев: стрела 1, цилиндр подъема стрелы 5 и цилиндр поворота ковша 6 крепятся на портале; ковш 3 шарнирно установлен на конце

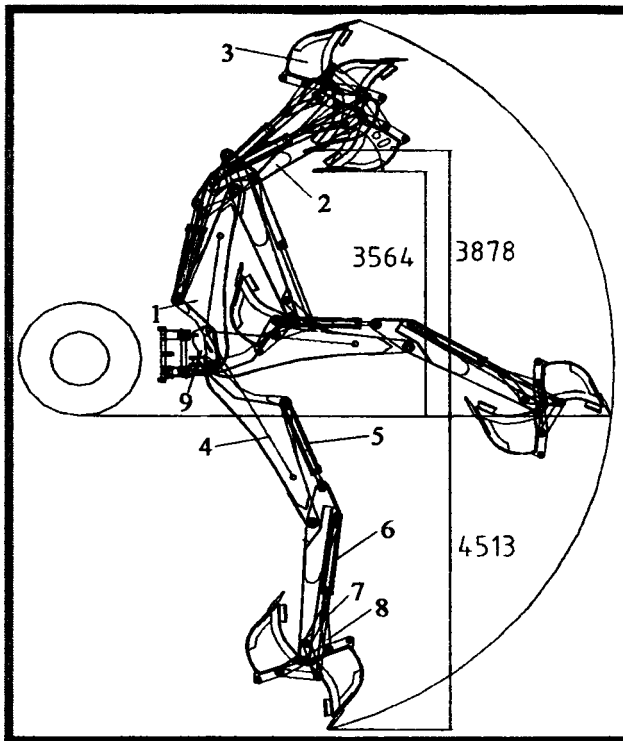


Рисунок 2. Кинематическая схема экскаваторного оборудования обратная лопата экскаватора-погрузчика Амкодор 732

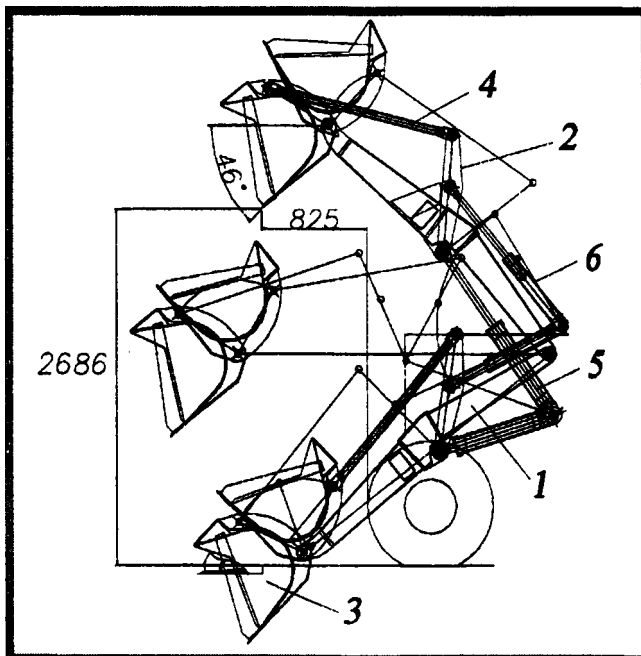


Рисунок 3. Погрузочное оборудование экскаватора-погрузчика Амкодор 732

стрелы; стрела и ковш имеют угловое перемещение в вертикальной плоскости под действием указанных цилиндров; штоки цилиндров 5 шарнирно связаны непосредственно со стрелой, а штоки цилиндров 6 – с ковшом через рычажную систему 2, 4.

5. Выводы. Разработана кинематическая модель погрузочно-экскаваторного оборудования в соответствии со стандартами: СТБ ИСО 7131-2001; SAE J49 Revised APR80. Для погрузочного оборудования: максимальная высота разгрузки ковша по режущей кромке при угле разгрузки 45° 2686 мм, вылет кромки ковша при максимальной высоте разгрузки 825 мм. Для экскаваторного оборудования: наибольшая кинематическая глубина копания 4513 мм; наибольшая высота выгрузки 3878 мм по СТБ ИСО 7131-2001 и 3564 по SAE J49 Revised APR80.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беркман И. Л. Одноковшовые экскаваторы и самоходные краны с гидравлическим приводом. М.: «Машиностроение». – 1971. 304 с. 2. СТБ ИСО 7131-2001. 3. SAE J49 Revised APR80. 4. Крикун В. Я., Манасян В. Г. Расчёт основных параметров гидравлических экскаваторов с рабочим оборудованием обратная лопата. Москва: «Ассоциация строительных вузов». – 2001. 103 с. 5. Базанов А. Ф., Забегалов Г. В. Самоходные погрузчики М.: «Машиностроение». – 1979. 406с.

УДК 621.825.5

Николаев В.А., Дворянчиков Д.А.

ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ДИНАМИЧЕСКОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРИВОДА МАШИННОГО АГРЕГАТА

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Наиболее объективной оценкой эффективности ограничения максимальных динамических нагрузок является коэффициент динамичности муфты K_D в самом тяжелом режиме нагружения привода – жестком стопорении.

Задавая в качестве исходных данных различные угловые скорости вращения ведомого вала ω перед моментом резкого его стопорения, получаем кривые изменения крутящего момента по времени (рис.1).

Каждая кривая дает величину максимального крутящего момента в зависимости от скорости его нарастания V_{Ti} , которая получается как результат деления номинального момента $T_{ном}$ на время t_{Hi} , в течение которого происходило нарастание крутящего момента от 0 до $T_{ном}$.

$$V_{Ti} = \frac{T_{ном}}{t_{Hi}} \quad (1)$$

Как видно из графика (рис.1), V_{Ti} есть тангенс угла наклона каждой кривой в начале координат.

Имея максимальные значения крутящих моментов T_{max} при различных скоростях их нарастания V_{Ti} , получаем общую зависимость $T_{max} = f(V_T)$ (рис.2). Из ее анализа следует, что начиная с некоторой, определенной скорости нарастания крутящего момента, максимальный момент срабатывания значительно превышает момент настройки муфты, т.е.

существенно увеличивается коэффициент динамичности муфты, причем эта зависимость носит явно степенной характер.

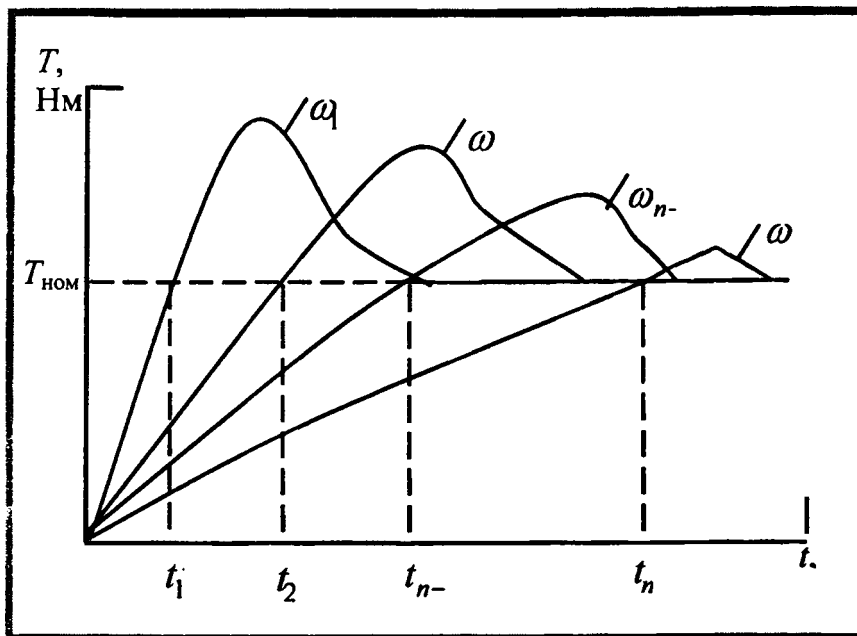


Рисунок 1 - Зависимость крутящего момента от угловой скорости

Это требует ее учета при проектировании привода с предохранительной муфтой. Количественно степень увеличения момента срабатывания может быть определена коэффициентом динамической чувствительности:

$$K_{д.ч.} = \frac{T_{V50}}{T_{ном}}, \quad (2)$$

где T_{V50} – максимальный момент срабатывания при скорости нарастания крутящего момента $50 \frac{\text{кНм}}{\text{с}}$.

Скорость нарастания крутящего момента $V_T =$

$50 \frac{\text{кНм}}{\text{с}}$ принята как наиболее характерная для практических случаев применения фрикционных предохранительных муфт.

Коэффициент динамической чувствительности $K_{д.ч.}$ характеризует муфту определенной конструкции относительно влияния скорости нарастания крутящего момента на величину максимального момента срабатывания и должен быть учтен при проектировании привода.

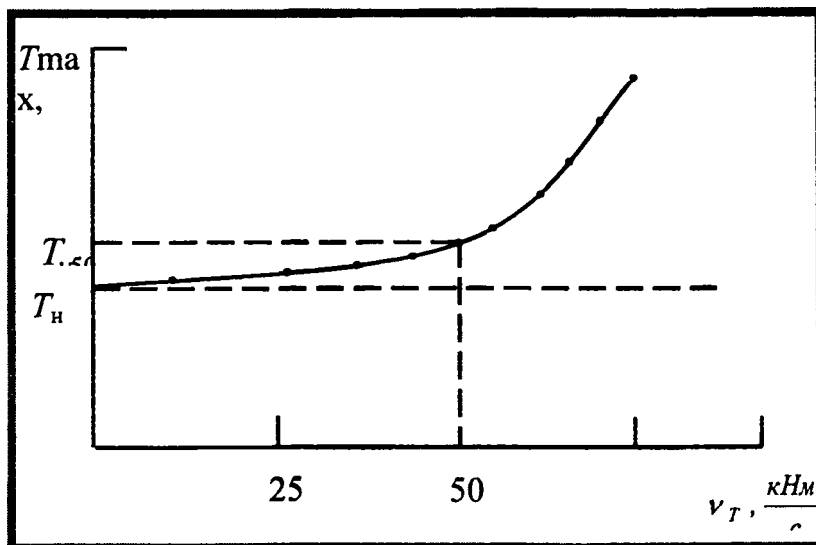


Рисунок 2 - Зависимость предельного момента срабатывания

При этом надо иметь в виду, что установка предохранительной муфты на тихоходном валу привода, где большой крутящий момент, приводит к увеличению габаритов и металлоемкости муфты, отсюда рациональным будет установка муфты на более быстроходном валу. Однако, в этом случае, должна быть учтена фактическая скорость нарастания крутящего момента в месте установки предохранительной муфты.

Практически эта скорость определяется приведенной податливостью машинного агрегата от предохранительной муфты до максимально вероятного места заклинивания механизма, которая может быть определена экспериментально или аналитически.

Зная величину указанной приведенной податливости $e_{пр}$ можно определить время нарастания крутящего момента от нуля до $T_{ном}$, на которую настроена муфта:

$$t_n = \frac{\varphi}{\omega}, \quad (3)$$

где $\varphi = e_{пр} \cdot T_{ном}$ – угловая координата ведомой полумуфты;

ω – угловая скорость момента заклинивания.

Таким образом, время нарастания крутящего момента:

$$t_{ni} = \frac{e_{пр} \cdot T_{ном}}{\omega_i}. \quad (4)$$

Имея время, за которое крутящий момент достигает своего номинального значения, определяем скорость его нарастания:

$$V_{Ti} = \frac{T_{ном}}{t_{ni}}. \quad (5)$$

Подставляя t_{ni} из формулы (4) имеем:

$$V_{Ti} = \frac{\omega_i}{e_{пр}}. \quad (6)$$

Таким образом, скорость нарастания крутящего момента в любой точке привода пропорциональна угловой скорости и обратно пропорциональна приведенной податливости $e_{пр}$ от данной точки до места заклинивания привода.

Отсюда вытекают рекомендации по проектированию привода с целью применения муфты на максимально возможных скоростях, при минимальной металлоемкости. Определив наиболее подходящее с этих позиций место установки муфты, можно рассчитать скорость нарастания крутящего момента V_{Ti} , а по ней максимальный момент срабатывания муфты:

$$T_{max} = K_{\partial} \cdot T_{ном}, \quad (7)$$

где K_{∂} – коэффициент динамичности при рассматриваемой скорости нарастания крутящего момента V_{Ti} .

$$K_{\partial} = K_{\partial.ч.} \left(\frac{V_{Ti}}{V_{T50}} \right)^n. \quad (8)$$

Показатель степени n определяется по зависимости

$$T_{max} = f(V_T).$$

Зная значения максимального момента срабатывания предохранительной муфты в рассматриваемой точке, можно решить вопрос о постановке муфты в данном месте или переносе его в менее динамичную зону привода.

Таким образом, чувствительность муфты к скорости нагружения можно определить ее коэффициентом динамической чувствительности, который должен быть учтен при проектировании привода.

УДК 629.113.65

Пирч А.И., Саболевский А.К., Астахов Э.И.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОДВЕСА МАХОВИКА ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АВТОМОБИЛЯ С МАХОВИЧНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

В настоящее время ведется активная разработка альтернативных экологически чистых автомобилей, не требующих органического топлива. На наш взгляд перспективными являются маховичные автомобили с быстровращающимся маховиком [1]. Ранее в работах [2,4] авторов предложена схема и определены основные параметры автомобиля и модели с маховичным двигателем. Для исследования воздействия маховика на корпус автомобиля и его управляемость при маневрировании создается физическая масштабная модель [4]. Задачей данной работы является определение параметров подвеса корпуса маховика в этой физической модели.

Физическая модель представляет собой уменьшенную в масштабе 1:10 радиоуправляемую копию автомобиля. Схема трансмиссии представлена на рисунке 1. Цифрами обозначены: 1 – маховик; 2 – корпус маховика; 3 – подвес корпуса маховика к раме модели; 4 – сцепление; 5 – гибкий вал; 6 – вал; 7 – двухступенчатый цилиндрический редуктор; 8 – дифференциал; 9 – корпус модели; 10 – муфта для раскрутки маховика.

При повороте на горизонтальном участке дороги у модели автомобиля с маховичным двигателем не будут возникать динамические нагрузки, так как вертикальная ось автомобиля остается в неизменном положении, а ось собственного вращения маховика расположена вертикально.

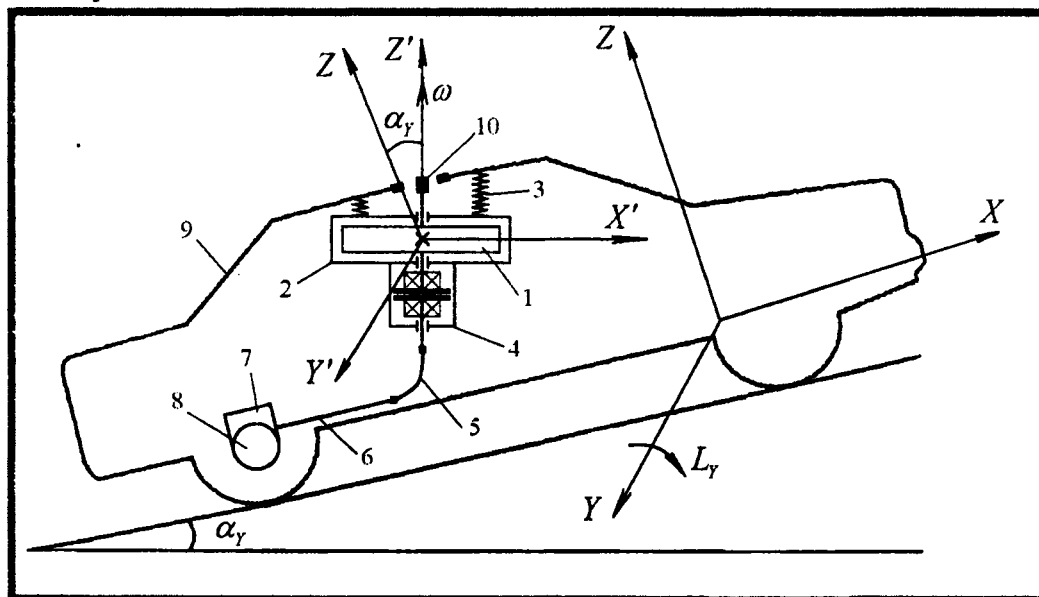


Рисунок 1 – Схема трансмиссии модели автомобиля с маховичным двигателем

При движении модели автомобиля с маховичным двигателем под гору (рисунок 1) ось z автомобиля 9 будет отклоняться от вертикальной оси вращения маховика z' на некоторый угол α_γ . При этом будет возникать нутационные нагрузки, которые будут действовать на

корпус маховика, а через него и на раму автомобиля. Будут возможны два случая.

а) Автомобиль преодолевает искусственную неровность дороги («лежащий полицейский»). При этом преодолеваемый угол будет достаточно мал, зато будет наблюдаться большая частота колебаний возмущающей силы. Предположим, что она будет изменяться по синусоидальному закону:

$$\varphi_{y1} = \varphi_{0y1} \cdot \sin \frac{2 \cdot \pi \cdot t}{T_1},$$

где t – время преодоления препятствия,

T_1 – период возмущения, $T_1 = 0.5$ с.

$$\varphi_{0y1} = \arctg \frac{h}{L} = \arctg \frac{0,01}{0,3} = 1,91 \text{ рад},$$

где $\varphi_{0y1} = \alpha_Y$ – угловая амплитуда,

h – высота неровности,

L – колесная база автомобиля.

Продифференцировав данное выражение, получаем угловую скорость нутации:

$$\omega_{y1} = |\dot{\varphi}_{y1}| = \varphi_{0y1} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{T_1} \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot t}{T_1}\right) = 1,91 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{0,5} \cdot \cos(4\pi \cdot t) = 24 \cdot \cos(4\pi \cdot t) \text{ рад/с.}$$

Найдем возмущающий момент нутации L_y , по методике литературы [3]:

$$L_{y1} = H \cdot \omega_{y1} = 2,64 \cdot \cos(4\pi \cdot t) \text{ Нм},$$

где H – кинетический момент маховика:

$$H = \frac{m \cdot R^2}{2} \cdot \omega = \frac{0,3 \cdot (0,05)^2}{2} \cdot 293 = 0,11 \text{ кг м}^2/\text{с},$$

где m – масса маховика,

R – радиус маховика.

Таким образом, максимальные значения момента и частоты будут равны:

$$L_{y1} = 2,64 \text{ Нм},$$

$$f_{y1} = \frac{\omega_{y1}}{2 \cdot \pi} = \frac{24}{2 \cdot \pi} = 3,82 \text{ Гц.}$$

б) Автомобиль поднимается по длительному уклону.

$$\varphi_{y2} = \varphi_{0y2} \cdot \sin \frac{2 \cdot \pi \cdot t}{T_2} = 0,8 \cdot \sin \frac{\pi \cdot t}{T_2} \text{ рад},$$

где $T_2 = 60$ с – период возмущения,

$$\varphi_{0y2} = 30^\circ = 1,01 \text{ рад.}$$

Угловая скорость нутации в этом случае будет равна:

$$\omega_{y2} = |\dot{\varphi}_{y2}| = \varphi_{0y2} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{T_2} \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot t}{T_2}\right) = 1,01 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot t}{60}\right) = 0,11 \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot t}{30}\right) \text{ рад/с,}$$

возмущающий момент равен:

$$L_{y2} = H \cdot \omega_{y2} = 0,012 \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot t}{30}\right) \text{ Нм.}$$

Максимальные значения при этом:

$$L_{y2} = 0,012 \text{ Нм},$$

$$f_{y2} = \frac{\omega_{y2}}{2 \cdot \pi} = \frac{0,11}{2 \cdot \pi} = 0,018 \text{ Гц.}$$

Как видно из расчетов, наиболее сильны возмущающие нагрузки, возникающие при преодолении моделью маховичного автомобиля мелких неровностей дороги.

При движении модели автомобиля с маховичным двигателем по наклонной поверхности дороги (рисунок 2) ось z автомобиля будет отклоняться от вертикальной оси вращения маховика z' на некоторый угол α_x . При этом будет возникать прецессионные нагрузки, которые будут воздействовать на корпус маховика, а через него и на раму автомобиля. Также рассмотрим два случая.

а) Автомобиль преодолевает искусственную неровность дороги. Предположим, что угол также будет изменяться по синусоидальному закону

$$\varphi_{x1} = \varphi_{0x1} \cdot \sin \frac{2 \cdot \pi \cdot t}{T_1},$$

$$\varphi_{0x1} = \arctg \frac{h}{B_1} = \arctg \frac{0,01}{0,15} = 3,81^\circ,$$

где B_1 – расстояние между колесами (колея) автомобиля.

Продифференцировав данное выражение, получаем угловую скорость прецессии ω_{x1} :

$$\omega_{x1} = |\dot{\varphi}_{x1}| = \varphi_{0x1} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{T_1} \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot t}{T_1}\right) = 3,81 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{0,5} \cdot \cos(4\pi \cdot t) = 47,85 \cdot \cos(4\pi \cdot t) \text{ рад/с.}$$

Найдем возмущающий момент прецессии:

$$L_{x1} = H \cdot \omega_{x1} = 5,26 \cdot \cos(4\pi \cdot t) \text{ Нм,}$$

где максимальные моменты и частоты будут равны:

$$L_{x1} = 5,26 \text{ Нм;}$$

$$f_{x1} = \frac{\omega_{x1}}{2 \cdot \pi} = \frac{47,85}{2 \cdot \pi} = 7,6 \text{ Гц.}$$

б) Автомобиль длительное время движется при поперечном уклоне дороги.

$$\varphi_{0x2} = \alpha_x = 30^\circ,$$

где h_c – высота центра тяжести автомобиля.

Угловая скорость прецессии в этом случае будет равна:

$$\omega_{x2} = |\dot{\varphi}_{x2}| = \varphi_{0x2} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{T_2} \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot t}{T_2}\right) = 30 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot t}{60}\right) = 3,14 \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot t}{30}\right) \text{ рад/с.}$$

Возмущающий момент:

$$L_{x2} = H \cdot \omega_{x2} = 0,35 \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot t}{30}\right) \text{ Нм.}$$

Максимальные значения при этом:

$$L_{x2} = 0,35 \text{ Нм,}$$

$$f_{x2} = \frac{\omega_{x2}}{2 \cdot \pi} = \frac{3,14}{2 \cdot \pi} = 0,5 \text{ Гц.}$$

В данном случае также будет наиболее опасен случай, когда автомобиль преодолевает мелкие неровности.

Таким образом становится ясно, что необходимо предусмотреть гибкие подвесы к раме, которые бы позволяли корпусу маховика изменять свое положение во время движения модели. В качестве таких подвесов предлагается использовать пружины, которые под действием веса маховика с корпусом, позволяют маховику перемещаться с тремя степенями свободы. Максимальные углы наклона корпуса маховика соответствуют максимальным углам горки $\alpha_y = 30^\circ$ и косогора $\alpha_x = 30^\circ$, преодолеваемых моделью. К раме подвесы будут крепиться в трех точках, поскольку это минимально необходимое и достаточное количество опор для устойчивой фиксации корпуса.

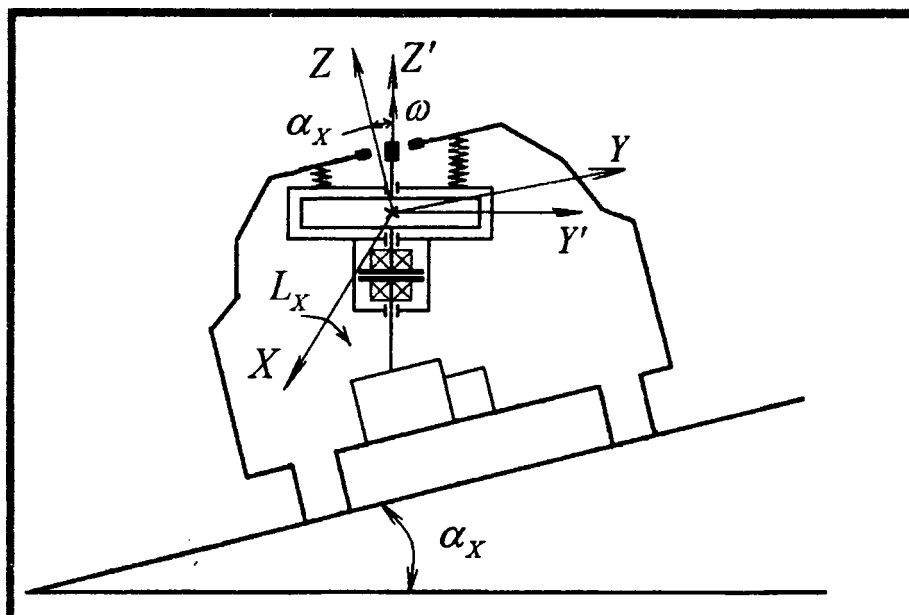


Рисунок 2 – Движение автомобиля по косогору

Поскольку корпус маховика будет подвижен, то и выходной вал также будет подвижен. Поэтому следует предусмотреть гибкий вал в трансмиссии модели. В качестве такой гибкой связи может выступать, например, резиновый вал.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуля Н.В. Инерционные аккумуляторы энергии. //Воронеж, 1973, 240 с. 2. Пирч А.И., Саболевский А.К., Ходор А.Л. Разработка кинематической схемы и определение основных параметров автомобиля с маховичным двигателем. В сб. «Материалы научной конференции учащихся, студентов и аспирантов, посвященной 85-летию БНТУ». Минск, 15-17 ноября 2005 г. – Мн., БНТУ, 2005, с. 152 -157. 3. Саболевский А.К., Астахов Э.И. Определение динамических моментов и реакций на корпусе мобильной машины с маховичным двигателем. //Машиностроение. – Мн., 2006. Вып. 22. 4. Астахов Э.И., Пирч А.И., Саболевский А.К. Определение параметров физической модели мобильной машины с маховичным двигателем. //Теоретическая и прикладная механика – Мн., 2007. Вып. 22, с.233-237.

УДК 621.01

Гарах В.А., Астахов Э.И.

ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НАГРУЖЕННОСТИ ПОДШИПНИКОВ РЫЧАЖНОГО МЕХАНИЗМА СТЕНДА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ГУСЕНИЦ

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

В предыдущей работе [1] было рассмотрено динамическое исследование движения рычажного механизма стенда для испытания гусениц с определением действительной скорости и ускорения входного звена. В данной работе ставится задача определения динамической нагруженности подшипников рычажного механизма стенда с определением векторов действия реакций.

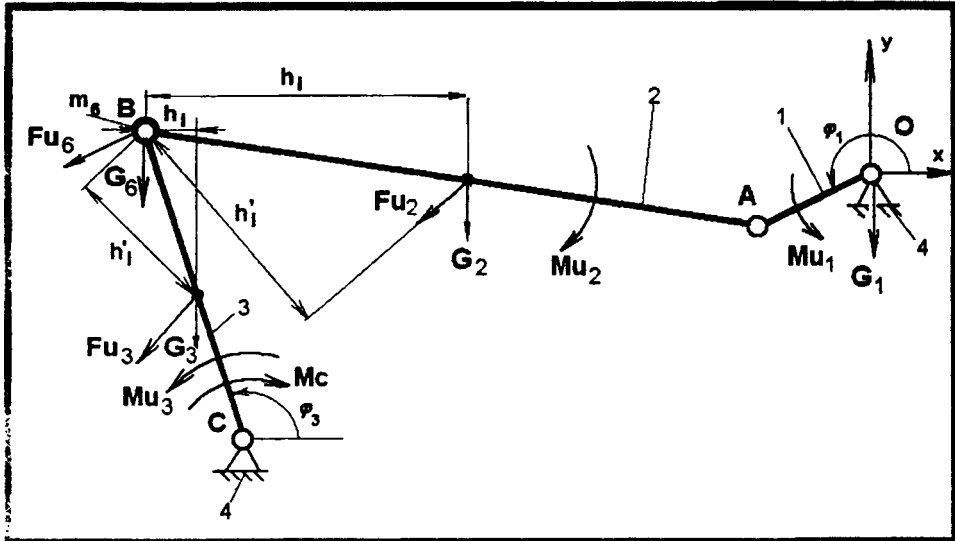


Рисунок 1. Внешние силы на рычажном механизме станда

Расчёт начинается с определения действительных скоростей и ускорений точек звеньев механизма по найденной скорости ω_1 и ускорению ε_1 входного звена – кривошипа 1 (рис. 1). Подвижная рама станда условно приведена к массе m_3 в точке B.

Действительные скорости V и ω звеньев определяем по ранее рассчитанным в работе [1] аналогам скоростей U :

$$\begin{aligned}
 V_B &= U_B \cdot \omega_1; \\
 V_{S2x} &= U_{S2x} \cdot \omega_1; \\
 V_{S2y} &= U_{S2y} \cdot \omega_1; \\
 V_{S2} &= \sqrt{V_{S2x}^2 + V_{S2y}^2}; \\
 V_{S3x} &= U_{S3x} \cdot \omega_1; \\
 V_{S3y} &= U_{S3y} \cdot \omega_1; \\
 V_{S3} &= \sqrt{V_{S3x}^2 + V_{S3y}^2}; \\
 \omega_2 &= U_{21} \cdot \omega_1; \\
 \omega_3 &= U_{31} \cdot \omega_1.
 \end{aligned}$$

Действительные ускорения a и ε звеньев определяем по ранее рассчитанным аналогам ускорений W и аналогам скоростей U :

$$\begin{aligned}
 a_{Bx} &= W_{Bx} \cdot \omega_1^2 + U_{Bx} \cdot \varepsilon_1; \\
 a_{By} &= W_{By} \cdot \omega_1^2 + U_{By} \cdot \varepsilon_1; \\
 a_B &= \sqrt{a_{Bx}^2 + a_{By}^2}; \\
 a_{S2x} &= W_{S2x} \cdot \omega_1^2 + U_{S2x} \cdot \varepsilon_1; \\
 a_{S2y} &= W_{S2y} \cdot \omega_1^2 + U_{S2y} \cdot \varepsilon_1; \\
 a_{S2} &= \sqrt{a_{S2x}^2 + a_{S2y}^2}; \\
 a_{S3x} &= W_{S3x} \cdot \omega_1^2 + U_{S3x} \cdot \varepsilon_1; \\
 a_{S3y} &= W_{S3y} \cdot \omega_1^2 + U_{S3y} \cdot \varepsilon_1; \\
 a_{S3} &= \sqrt{a_{S3x}^2 + a_{S3y}^2};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_2 &= W_{21} \cdot \omega_1^2 + U_{21} \cdot \varepsilon_1; \\ \varepsilon_3 &= W_{31} \cdot \omega_1^2 + U_{31} \cdot \varepsilon_1.\end{aligned}$$

Внешние силы на звеньях, учитываемые при силовом расчёте:

– момент сопротивления M_C , определяемый по экспериментально заданной характеристике сил сопротивления, возникающих при закручивании шарнира трака гусеницы:

$$M_C = M_C(\varphi_3);$$

– силы веса $G_i = m_i \cdot g$,

где m_i – массы элементов звеньев механизма.

При кинестатическом методе расчёта без учёта сил трения (по принципу Д'Аламбера) определяются инерционные нагрузки F_{Ui} , M_{Ui} подвижных звеньев:

$$\begin{aligned}F_{u2x} &= -m_2 \cdot a_{S2x}; & F_{u3x} &= -m_3 \cdot a_{S3x}; & F_{u6x} &= -m_6 \cdot a_{Bx}; \\ F_{u2y} &= -m_2 \cdot a_{S2y}; & F_{u3y} &= -m_3 \cdot a_{S3y}; & & \\ F_{u6y} &= -m_6 \cdot a_{By}; & & & & \\ M_{u1} &= -J_{np}' \cdot \varepsilon_1; & M_{u2} &= -J_{S2} \cdot \varepsilon_2; & M_{u3} &= -J_{S3} \cdot \varepsilon_3.\end{aligned}$$

Далее отделяется статически определимая структурная группа второго класса звеньев 2–3, а в местах отделения звеньев показываются реакции в кинематических парах со стороны отделения отсоединённых звеньев (рис. 2).

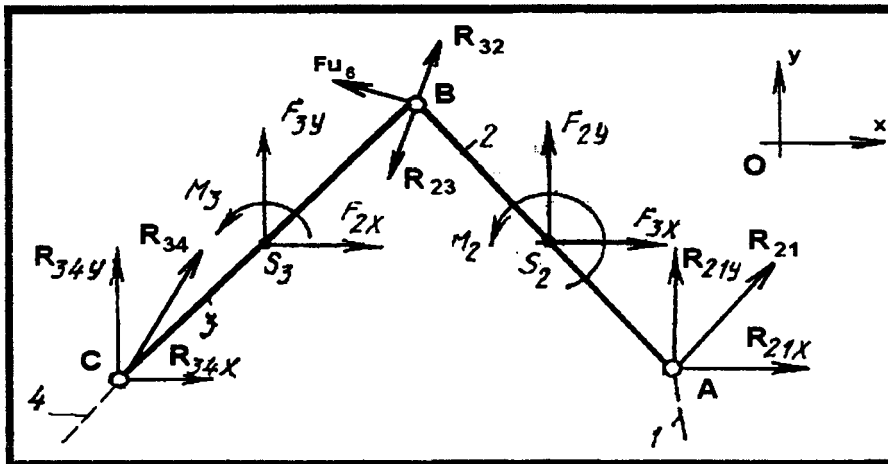


Рисунок 2. Реакции в кинематических парах механизма

Методика аналитического силового расчета заключается в аналитическом решении уравнений равновесия звеньев и структурных групп в виде проекций сил на оси координат.

При записи уравнений моментов относительно точки B исходим из того, что момент силы относительно этой точки равен векторному произведению радиус-вектора \vec{r} , соединяющего точку B с точкой приложения силы F_i .

Тогда система уравнений будет иметь вид:

$$\begin{cases} R_{21x} + F_{2x} + F_{6x} + F_{3x} + R_{34x} = 0; \\ R_{21y} + F_{2y} + F_{6y} + F_{3y} + R_{34y} = 0; \\ (x_A - x_B) \cdot R_{21y} - (y_A - y_B) \cdot R_{21x} + M_2 + (x_{S2} - x_B) \cdot F_{2y} - (y_{S2} - y_B) \cdot F_{2x} = 0; \\ (x_C - x_B) \cdot R_{34y} - (y_C - y_B) \cdot R_{34x} - M_C + M_2 + (x_{S3} - x_B) \cdot F_{2y} - (y_{S3} - y_B) \cdot F_{3x} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где

$$F_{2x} = F_{u2}^x; F_{2y} = F_{u2}^y - G_2;$$

$$F_{3x} = F_{u3}^x; F_{3y} = F_{u3}^y - G_3;$$

$$F_{6x} = F_{u6}^x; F_{6y} = F_{u6}^y - G_6;$$

$x_A, y_A, x_B, y_B, x_C, y_C, x_{S2}, y_{S2}, x_{S3}, y_{S3}$ – координаты точек A, B, C, S_2, S_3 .

Система из четырёх уравнений с четырьмя неизвестными (1) решается методом Гаусса по методике литературы [2].

По рассчитанным проекциям находятся модули реакций:

$$R_{21} = \sqrt{R_{21x}^2 + R_{21y}^2}, \quad R_{34} = \sqrt{R_{34x}^2 + R_{34y}^2}.$$

Полярные углы векторов реакций:

$$\gamma_{21} = \arctg \frac{R_{21y}}{R_{21x}}; \quad \gamma_{34} = \arctg \frac{R_{34y}}{R_{34x}}.$$

Внутреннюю реакцию $\overline{R_{23}} = -\overline{R_{32}}$ во вращающейся паре B определяем из уравнения равновесия сил одного звена, например, звена 2.

$$R_{21x} + F_{2x} + F_{6x} + R_{23x} = 0;$$

$$R_{21y} + F_{2y} + F_{6y} + R_{23y} = 0.$$

Полная реакция $R_{23} = \sqrt{R_{23x}^2 + R_{23y}^2}$.

Также, для определения реакции R_{14} в кривошипе со стороны стойки 4, производился силовой расчёт входного звена с приложением реакции $\overline{R_{12}} = -\overline{R_{21}}$ и уравновешивающего момента \overline{M}_{yp} :

$$M_{yp} = -R_{12x} \cdot x_B + R_{12y} \cdot y_B - M_{u1};$$

$$R_{14x} + R_{12x} = 0;$$

$$R_{14y} + G_1 + R_{12y} = 0;$$

$$R_{14} = \sqrt{R_{14x}^2 + R_{14y}^2}.$$

По указанной методике разработана программа динамического силового расчёта на языке Delphi 7, позволяющая получить графическую интерпретацию результата в виде годографов реакций.

Расчёт рычажного механизма проводился при следующих исходных данных:

– размеры звеньев:

$$l_1 = l_{OA} = 0,07425 \text{ м};$$

$$l_2 = l_{AB} = 0,739 \text{ м};$$

$$l_3 = l_{BC} = 0,3165 \text{ м};$$

– массы:

$$m_1 = 8,9 \text{ кг};$$

$$m_2 = 21,9 \text{ кг};$$

$$m_3 = 125 \text{ кг};$$

$$m_6 = 709 \text{ кг};$$

– средняя угловая скорость кривошипа $\omega_{1, \text{cp}} = 31,4 \frac{1}{\text{с}}$;

– осевые моменты инерции J_{Si} относительно центров масс S_i :

$$J_{S1} = 0,15 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$J_{S2} = 0,498 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$J_{S3} = 0,91 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

– величина момента сопротивления M_C находится в диапазоне $\pm 452 \text{ Нм}$

Результаты определения реакций в подшипниках кривошипно-коромыслового механизма представлены на рисунке 3.

Из рисунка 3 следует: полярные диаграммы реакций в подшипниках A O практически совпадают из-за малой величины G_j ; полярные диаграммы реакций в подшипниках B и C также близки по форме, что отражает характер их нагружения. Наибольшие величины реакций подшипников в положении № 9 при $\varphi = 62^\circ$. В этом, наиболее нагруженном, положении реакции $\bar{R}_{14} \approx \bar{R}_{12} \perp \bar{R}_{23} \approx \bar{R}_{34}$, что обусловлено конструктивной особенностью механизма натяжения. Следует также отметить, что все реакции, возникающие в подшипниках, изменяются с основной частотой $f = \frac{n_1}{60} = 5 \text{ Гц}$ вращения кривошипа.

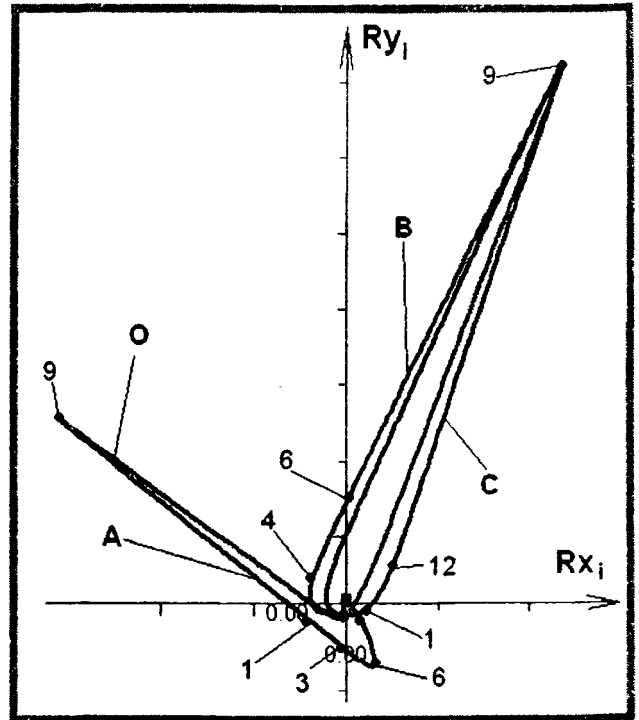


Рисунок 3. Полярные диаграммы нагружения подшипников

ЛИТЕРАТУРА

1. Гарах В.А., Астахов Э.И. Динамический анализ движения рычажного механизма стенда для испытания гусениц // Теоретическая и прикладная механика. – 2007. – Вып.22. с. 241-246.
2. Стенд для испытания гусениц. Инструкция по эксплуатации. / Под ред. Ч.И. Ждановича. – Мн.: БНТУ, 2005.
3. Элементы линейной алгебры и аналитической геометрии: Учеб. пособие для инж.-техн. спец. вузов / Под ред. Воднева В.Т. – 2-е изд., перераб. и доп. – Мн.: Выш. шк., 1986. – 272 с.

УДК 631.33.024.2/.3

Красноружский И.В., Мрочек Ж.А., Макеев В.В.

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ ДЛЯ УЗЛОВ ТРЕНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДРЕВЕСИНЫ ТОРЦОВО-ПРЕССОВОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Белорусский государственный университет транспорта
Гомель, Беларусь

Проблема экономии материальных и энергетических ресурсов в настоящее время приобрела особую актуальность в связи с изменившимися экономическими условиями хозяйствования. Многие предприятия стремятся провести внедрение недорогостоящих, но качественных деталей для узлов трения. Одними из таких деталей являются подшипники скольжения на основе природного композиционного материала – модифицированной прессованной древесины. Применение их в узлах трения приводит к улучшению технико-

экономических показателей машин и механизмов за счёт снижения затрат на ремонт и обслуживание.

Актуальность таких исследований обусловлена необходимостью разработки инженерного расчёта и технологии проектирования процесса, оснастки и оборудовании для комплексной механизации и автоматизации производства подшипников с использованием древесины торцово-прессового деформирования [1].

Для подшипников скольжения самосмазывающихся (ПСС) основной частью является вкладыш из древесины, от качества которого зависит работоспособность всего узла трения. Получение качественного древесного вкладыша является основным технологическим этапом в процессе изготовления ПСС. Для этого использовали следующие операции:

- 1 – распиловка древесины на заготовки;
- 2 – измерение влажности заготовок;
- 3 – деформирование заготовок;
- 4 – процесс рабочего цикла.

Установлено, что усушка и разбухание древесины в зависимости от содержания гигроскопической влаги неравномерны по отношению к направлению волокон и годовых слоев и составляют 0,1-0,3% вдоль волокон, 3-8 и 6-12% соответственно в радиальном и тангенциальном направлениях к спилу. При этом в пределах влажности от абсолютно сухого состояния до точки насыщения волокна объём капиллярно пористой системы древесины остаётся постоянным [1].

Коэффициент усушки, характеризующий деформацию древесины, меняется в зависимости от влажности. Например, коэффициент усушки древесины одноосного прессования оказывает влияние не только на увеличение содержания уплотнённой древесины, но и её смятие. В перпендикулярном направлении прессования, коэффициент усушки в интервале от 5% до 100%, мало зависит от степени прессования.

Коэффициент линейного расширения у древесины прессованной при степени $\epsilon = 50\%$ вдоль волокон составляет $7,9 \cdot 10^{-5}$, а в поперечном радиальном и тангенциальном направлениях соответственно $4,6 \cdot 10^{-5}$ и $5,4 \cdot 10^{-5}$ [2].

Прессованная древесина способна хорошо впитывать смазочные масла. Пропитка древесины маслами вдоль волокон в 103 – 105 раз выше проницаемости в поперечном направлении. Следовательно, при пропитке древесины движение смазки подшипника идёт практически с торцов заготовки, что обеспечивает хорошие условия смазки подшипника при его эксплуатации.

Результаты исследования механических свойств древесины показали, что предел прочности при сжатии заготовок вдоль волокон 40-52 МПа, в радиальном – 6-7 МПа и тангенциальном – 4-5 МПа; у прессованной древесины со степенью прессования $\epsilon = 45...60\%$ – 127-176 МПа; 49-68; 32-41 МПа, соответственно.

С увеличением степени прессования древесины возрастают её плотность и механические показатели, а при трении повышается стойкость. Минимальный износ древесины наблюдается при трении торцовой поверхностью, максимальный – поперёк волокон. Износостойкость древесины прессованной при трении на торец, вдоль и поперёк волокон выражается соотношением соответственно 9 : 3 : 1.

При периодическом нагружении у вкладышей торцово-прессового деформирования (ТПД) меньшие остаточные деформации и большая разрушающая нагрузка. Установлено, что подшипники скольжения при трении будут иметь стабильные размеры, высокую износостойкость, наибольшую прочность, лучшие условия самосмазывания, когда волокна будут располагаться по радиусу втулки, т.е. работать торцовой поверхностью.

Показано, что наилучшими свойствами обладает древесный брусок из берёзы, подвергнутый торцово-прессовому деформированию с расположением волокон вдоль радиуса.

Полученные ПСС имеют следующие характеристики:

- частота вращения вала до 1000 об/мин;
- температура эксплуатации до 1000^oС;

- величина радиальной нагрузки до 25 МПа;
- величина осевой нагрузки до 20 % от радиальной;
- коэффициент трения 0,05 – 0,12.

Кроме того:

- не требуется смазка узла трения в процессе эксплуатации;
- обеспечивается увеличение ресурса работы узла трения при эксплуатации в абразивных, агрессивных и влажных средах в сравнении с аналогичными подшипниками качения и подшипниками скольжения из бронзы, баббита, чугуна и полимеров в несколько раз в зависимости от условий эксплуатации;
- Отсутствует необходимость в применении специальных конструктивных элементов (манжеты, крышки, уплотнения) для защиты узла трения от попадания в него абразивных частиц и влаги.

Все эти показатели обеспечиваются в связи с неблагоприятными условиями эксплуатации сельскохозяйственных агрегатов, а также в связи с конструктивными особенностями узлов трения, выполненных для стандартных узлов машиностроения.

Примером служит базовая конструкция узла трения сошника сеялки СПУ-6 (рисунок 1).

В процессе его изготовления исключены подшипники качения и защитная манжета, вместо чего запрессован в ступицу древесный вкладыш. Наиболее необычно в данной конструкции то, что не используются наружная и внутренняя обойма ПСС, вкладыш запрессовывается в ступицу. При этом не требуется высокого качества поверхностей взаимодействующих с древесиной, а при установке шариковых радиальных подшипников требуется предварительная обработка посадочных поверхностей [3].

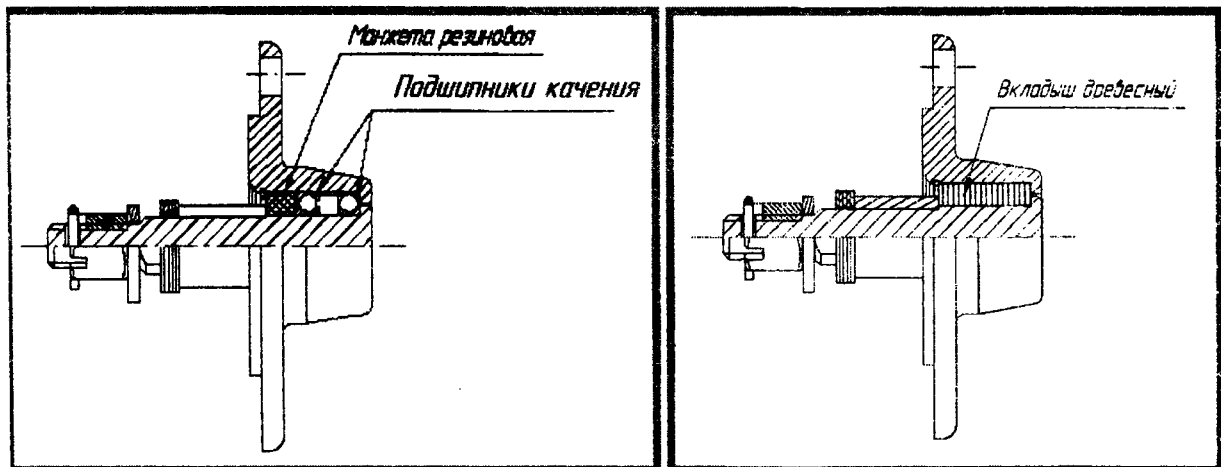


Рисунок 1- Сошник сеялки СПУ-6

В результате эксплуатации показано, что усовершенствованный узел трения сошника сеялки СПУ-6 характеризуется повышенным ресурсом, сниженной 15% массой и металлоёмкостью, низкой себестоимостью изготовления, простотой проведения операции монтажа и демонтажа. Проведённые в сельскохозяйственных предприятиях Брестской области в 2006 году полевые испытания подтверждают увеличение межремонтного периода узлов трения с применением ПСС в 1,5 раза в сравнении с подшипниками качения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Невзорова А.Б. Теоретические основы и технология механотрансформации древесины// Гомель: БелГУТ, 2003. – 160 с. 2. Справочник по триботехнике/ Под общ. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. В 3 т. Варшава: ВКЛ, 1992. – 730 с. Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы республиканской научно-технической конференции/ Бел.-Рос. ун-т, 2006. – 381 с.

ХАРАКТЕР РАЗВИТИЯ ТРЕЩИНЫ ПРИ ИСПЫТАНИИ СТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА НА УСТАЛОСТЬ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Несмотря на то, что проблеме разрушения материалов под действием переменных нагрузок посвящено огромное количество работ и получены очень существенные результаты, интерес к данной проблеме не ослабевает ввиду ее значимости как с теоретической, так и с практической точек зрения.

Усталость - это процесс постепенного накопления повреждений в материале под действием знакопеременной циклической нагрузки и приводящий к изменению структуры материала, появлению дефектов, образованию трещин и разрушению материала.

Циклические напряжения могут накладываться на статическую нагрузку. При циклическом нагружении разрушение может происходить при напряжении, максимальная амплитуда которого значительно меньше минимального статического напряжения разрушения. Именно это свойство металлов доставляет столько неприятностей проектировщикам конструкций, подвергающихся вибрационным нагрузкам. К таким конструкциям относятся трактора, автомобили, самолеты и пр.. Значительное число аварий самолетов вызвано усталостным разрушением.

Разрушение образца происходит после некоторого количества циклов напряжений. Это количество циклов может исчисляться миллионами, десятками миллионов или еще большими числами. Обычно чем меньше амплитуда циклического напряжения, тем больше среднее значение числа циклов, необходимых для разрушения.

Установлено [1], что на поверхности металлического кристалла, испытываемого на усталость, появляются, в результате пластической деформации и сдвига по плоскостям скольжения под углом в 45 градусов (рис.1), небольшие и очень тонкие, как бы выдавленные из металла выступы (экструзии) и впадины (интрузии). Было предложено, что механизмы зарождения двух источников дислокаций в результате скольжения по различным плоскостям находятся недалеко от поверхности деформируемого материала в результате скольжения по плоскостям.

Предполагается, что при циклическом нагружении эти два источника поочередно смещаются относительно друг друга. Сначала активируется один источник дислокаций и вызывает скольжение в своей плоскости скольжения, как показано на рис.1, позднее активируется второй источник и также вызывает скольжение. Скольжение от второго источника смещает плоскость скольжения первого источника. Во время обратной части цикла первый источник вновь вызывает скольжение, но уже в противоположном направ-

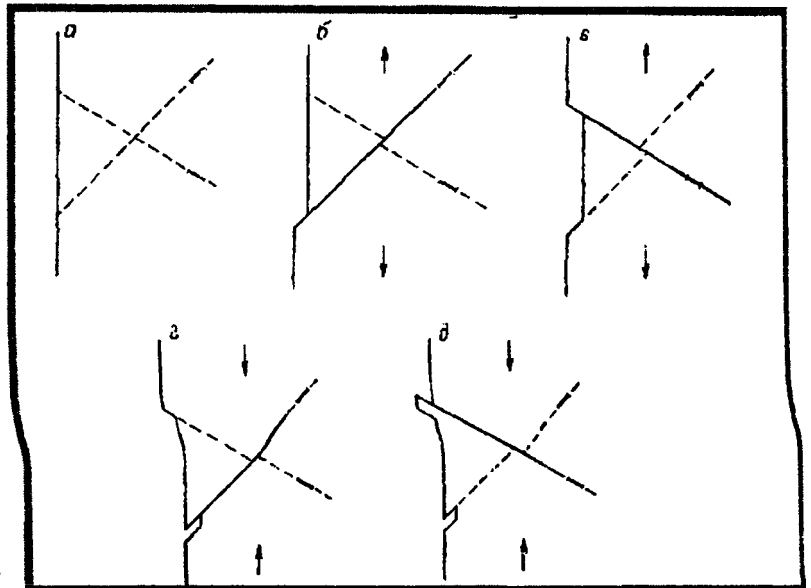


Рисунок 1- Механизм возникновения экструзий и интрузий в полосах скольжения, предложенный Коттреллом и Халлом [1]

лении. Вследствие смещения плоскости скольжения (рис.1) на поверхности кристалла образуется интрузия. Затем вновь активируется второй источник, который также вызывает скольжение в направлении, противоположном первоначальному, в результате чего образуется экструзия.

Орован [2] предложил остроумную теорию, позволяющую объяснить, почему усталостное разрушение происходит только после приложения к образцу определенного числа циклов напряжений. Он показал также причину возможного существования предела усталости. Представления Орована получили дальнейшее развитие в работах Хеда [3].

Теория Орована заключается в следующем. Рассмотрим процесс деформации некоторого критического объема материала образца. Примером критического объема служит область впереди зарождающейся трещины, которая может образоваться так, как это схематически показано на рис.1. Критическим объемом может также быть область вокруг включения в образце. Предположим, что деформационное

упрочнение металла протекает по линейному закону, и, что во время циклического нагружения деформация во всем образце будет упругой, за исключением критического объема. В критическом объеме концентрация напряжений может вызвать пластическую деформацию. Далее допустим, что упруго деформированная область вокруг критического объема заставляет этот объем расширяться и сжиматься при циклах с постоянной амплитудой деформации.

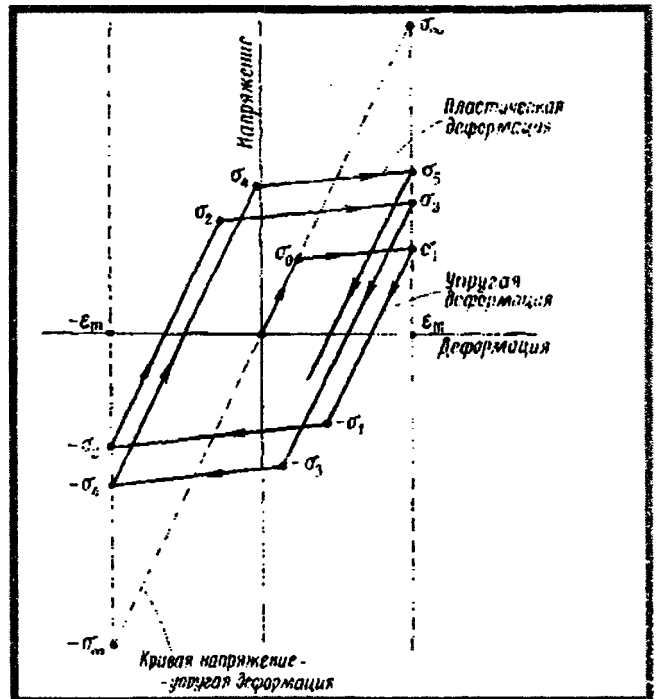


Рисунок 2

Общая деформация в критическом объеме представляет сумму упругой и пластической деформаций (рис.2). Процесс изменения напряжений и деформаций в циклически деформируемом критическом объеме показан на рис.2. В начале процесса напряжение и деформация равны нулю. При увеличении напряжения до значения σ^0 , равного критическому напряжению сдвига, металл деформируется упруго. При дальнейшем увеличении напряжения до значения σ_1 , соответствующего максимальной деформации ϵ_m , металл деформируется пластически. Далее напряжение уменьшается, а затем изменяет знак, деформация будет упругой до значения напряжения $-\sigma_1$. При этом напряжении начинается пластическая деформация, которая продолжается до напряжения $-\sigma_2$, когда достигается максимальная (отрицательная) деформация $-\epsilon_m$. Затем напряжение вновь изменяет знак, и цикл повторяется.

По мере того как образец продолжает упрочняться, все большая часть циклической деформации происходит за счет упругой деформации и все меньшая часть — за счет пластической деформации. С приближением числа циклов к бесконечности кривая деформации приближается к линии между $\pm\sigma_\infty$ на фигуре (рис.2). При этом пределе деформация становится полностью упругой. Напряжение в критическом объеме изменяется в пределах

$$\pm\sigma_\infty = \pm\mu\epsilon_m,$$

где μ — соответствующая упругая постоянная.

Если предельное напряжение σ_∞ больше, чем статическое разрушающее напряжение металла, то при определенном числе циклов критический объем, очевидно, разрушается. Разрушение произойдет при таком числе циклов, при котором амплитуда напряжения на рис.2 достигнет статического разрушающего напряжения. С другой стороны, если σ_∞ меньше, чем статическое разрушающее напряжение, то критический объем никогда не разрушит-

ся. Этот случай соответствует испытанию на усталость, проводимому при напряжениях ниже предела усталости.

Теория Орована дает правдоподобное качественное объяснение как усталостного разрушения, так и существования предела усталости. При этом не используется детальная дислокационная теория.

Представленная информация не дает полного представления о механизме формирования и роста трещины в деформируемом материале при испытании на усталость. Для получения более ясной картины нами был проведен эксперимент на упруго пластическом образце из Ст 45, который позволяет получить более полное представление о механизме роста трещины и разрушения.

На стальном образце, размером 45 x 45 мм, толщиной 10 мм, на середине одной из его сторон был выполнен V-образный надрез с углом раскрытия 45 градусов.

В вершине V-образного надреза, методом вибрационного нагружения, была выращена зародышевая трещина.

Образец, подготовленный таким образом, закреплялся в нагружающем устройстве, позволяющим прикладывать к образцу растягивающие нагрузки.

На нагружающем устройстве был смонтирован голографический интерферометр для измерения и регистрации поверхностных деформаций в зоне вершины трещины образца под действием растягивающих напряжений.

По мере увеличения растягивающей нагрузки велся постоянный контроль (под микроскопом) деформационного поля образца в зоне вершины трещины.

С ростом растягивающих напряжений в вершине трещины наблюдалось постепенное увеличение поля деформаций в виде острого языка, выступающего и растущего перед вершиной трещины до определенной величины. Затем происходил резкий, скачкообразный рост (выброс) вершины трещины на величину языка поля деформаций (Рис.3).

После такого прострела локальное поле деформаций исчезало. После очередного дополнительного увеличения напряжений начинало появляться и постепенно расти снова новое, в виде языка, поле деформаций в зоне вершины трещины. Ступенчатый процесс роста трещины повторяется каждый раз после достижения напряжением критической величины, достаточным для разрыва материала в зоне языка деформаций. Процесс циклически повторяется.

Величина (длина) языка поля деформаций по видимому определяется прочностными свойствами испытуемого материала и может быть характеристическим коэффициентом для расчетов прочностных параметров.

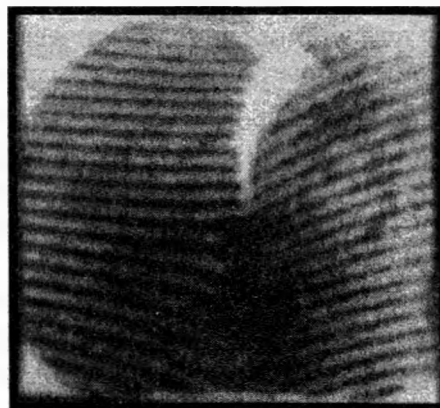


Рисунок 3

ЛИТЕРАТУРА:

1. Cottrell A., li., Dislocations and Plastic Flow in Crystals, Clarendon Press, Oxford, 1953, русский перевод: Коттрелл А. Х., Дислокации и пластическое течение в кристаллах, Металлургиздат, 1958.
2. O rowan K., Proc. Roy. Soc. (London), A171, 79 (1939).
3. Head A. K., Phil. Mag., 44, 925 (1953).

СПОСОБ РАСЧЕТА ПОЛЕЙ СМЕЩЕНИЙ У КЛИНОВИДНОГО ДВОЙНИКА

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Двойникование относится к основным каналам пластической деформации твердых тел [1 - 3]. Чаще оно проявляется в условиях затруднения развития скольжения, например, при низких температурах деформирования, при скоростной деформации, при наличии ориентационного запрета на скольжение [1].

Экспериментально двойникование исследовано на высоком уровне [1, 4 - 9]. Однако теория двойникования развита не достаточно [1]. Например, существующая дислокационная теория оперирует понятием тонкого двойника и не позволяет производить расчеты напряжений внутри двойника [10]. Нельзя назвать удовлетворительными и расчеты на основании этой теории напряжений в непосредственной близости у двойника. Необходимость в таких расчетах возникла из-за увеличения возможностей экспериментального оборудования, позволяющего изучать наноразмерные объекты, для образования которых, в частности, существуют благоприятные условия у двойниковых границ, являющихся концентраторами больших внутренних напряжений. Более того, дислокационная теория тонкого двойника удовлетворительно применима для двойников, у которых отношение их ширины и длины имеет порядок $10^{-4} - 10^{-3}$ [1, 10], в то время, как на практике эта величина составляет $10^{-2} - 10^{-1}$ [4 - 9]. В последнем случае модель тонкого двойника неприменима.

Целью данной работы является расчет на основании дислокационного подхода полей смещения у клиновидного двойника на таком масштабном уровне, когда расстояние между двойническими дислокациями можно считать пренебрежимо малым, и когда неприменима модель тонкого двойника.

В общем случае в плоскости XOY форма границ клиновидного двойника может быть описана функциями $f_1(x_0)$ и $f_2(x_0)$ (рис. 1). Пусть дислокации на данных границах параллельны друг другу и оси OZ , перпендикулярной плоскости XOY . Примем длину и ширину двойника равными L и H соответственно (см. рис. 1). Двойнические дислокации являются частичными дислокациями [1, 2], поэтому их вектор Бюргера (b) можно разложить на винтовую (b_v) и краевую ($b_{кр}$) составляющие, которые в нашем случае пусть будут ориентированы так, как это показано на рис. 1. Плотность двойнических дислокаций на границах клиновидного двойника равна ρ_1 и ρ_2 . Рассмотрим случай, когда клиновидный двойник имеет форму равнобедренного треугольника.

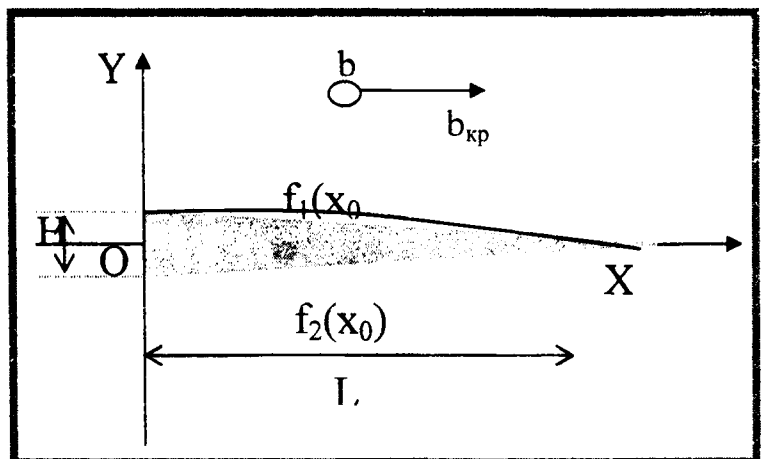


Рисунок 1. Схематическое изображение клиновидного двойника и направления компонент вектора Бюргера двойнических дислокаций

Тогда профиль его границ может быть описан функциями

$$f_1(x_0) = \frac{H}{2} \left(1 - \frac{x_0}{L} \right), \quad (1)$$

$$f_2(x_0) = -\frac{H}{2} \left(1 - \frac{x_0}{L} \right). \quad (2)$$

Поля смещений, которые создает такой двойник, определяются из соотношения

$$u_i(x, y) = u_i^{(1)}(x, y) + u_i^{(2)}(x, y), \quad (3)$$

где i принимает значения x , y или z ; $u_i^{(1)}(x, y)$ и $u_i^{(2)}(x, y)$ - смещения, создаваемые первой и второй двойниковыми границами соответственно, которые определяются из соотношений

$$u_i^{(1)}(x, y) = \int_0^L \rho_1(x_0) u_i^{(1,0)}(x, y, x_0) \sqrt{1 + \left(\frac{df_1(x_0)}{dx_0} \right)^2} dx_0, \quad (4)$$

$$u_i^{(2)}(x, y) = \int_0^L \rho_2(x_0) u_i^{(2,0)}(x, y, x_0) \sqrt{1 + \left(\frac{df_2(x_0)}{dx_0} \right)^2} dx_0. \quad (5)$$

Смещения, которые создает единичная двойникующая дислокация в однородной изотропной среде, находятся из соотношений [11]

$$u_x^d(x, y) = \frac{b_{kp}}{2\pi} \left[\operatorname{arctg} \frac{y}{x} + \frac{xy}{2(1-\nu)(x^2 + y^2)} \right], \quad (6)$$

$$u_y^d(x, y) = -\frac{b_{kp}}{2\pi} \left[\frac{1-2\nu}{2\pi} \ln(x^2 + y^2) + \frac{x^2 - y^2}{4(1-\nu)(x^2 + y^2)} \right], \quad (7)$$

$$u_z^d(x, y) = \frac{b_s}{2\pi} \operatorname{arctg} \frac{y}{x}. \quad (8)$$

Здесь ν - коэффициент Пуассона.

Данные соотношения позволяют определить $u_i^{(1,0)}(x, y, x_0)$ и $u_i^{(2,0)}(x, y, x_0)$ следующим образом

$$\begin{aligned} u_x^{(1,0)}(x, y, x_0) &= \frac{b_{kp}}{2\pi} \left[\operatorname{arctg} \frac{y - f_1(x_0)}{x - x_0} + \frac{(x - x_0)(y - f_1(x_0))}{2(1-\nu)((x - x_0)^2 + (y - f_1(x_0))^2)} \right], \\ u_y^{(1,0)}(x, y, x_0) &= -\frac{b_{kp}}{2\pi} \left[\frac{1-2\nu}{2\pi} \ln((x - x_0)^2 + (y - f_1(x_0))^2) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{(x - x_0)^2 - (y - f_1(x_0))^2}{4(1-\nu)((x - x_0)^2 + (y - f_1(x_0))^2)} \right], \\ u_z^{(1,0)}(x, y, x_0) &= \frac{b_s}{2\pi} \operatorname{arctg} \frac{y - f_1(x_0)}{x - x_0}, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} u_x^{(2,0)}(x, y, x_0) &= \frac{b_{kp}}{2\pi} \left[\operatorname{arctg} \frac{y - f_2(x_0)}{x - x_0} + \frac{(x - x_0)(y - f_2(x_0))}{2(1-\nu)((x - x_0)^2 + (y - f_2(x_0))^2)} \right], \\ u_y^{(2,0)}(x, y, x_0) &= -\frac{b_{kp}}{2\pi} \left[\frac{1-2\nu}{2\pi} \ln((x - x_0)^2 + (y - f_2(x_0))^2) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{(x - x_0)^2 - (y - f_2(x_0))^2}{4(1-\nu)((x - x_0)^2 + (y - f_2(x_0))^2)} \right], \end{aligned} \quad (10)$$

$$u_z^{(2,0)}(x, y, x_0) = \frac{b_a}{2\pi} \operatorname{arctg} \frac{y - f_2(x_0)}{x - x_0}.$$

Результат решения поставленной задачи представлен на рис. 2. Принималось $H = 11$ мкм; $L = 100$ мкм (отношение ширины и длины двойника имеет порядок 10^{-1} , как во многих экспериментах [1, 4, 5, 9]); $\rho_1 = \rho_2 = 105$; $\nu = 0,33$.

Без ущерба общности полученных результатов для исключения необходимости учета численных значений величин $b_{KP}/2\pi$ и $b_B/2\pi$, рассчитывались безразмерные распределения

$$\chi_i(x, y) = u_i(x, y)/B_i, \quad (11)$$

имеющие аналогичный вид, что и распределения $u_i(x, y)$. В (11) принималось

$$B_x = B_y = b_{KP}/2\pi, \quad B_z = b_a/2\pi.$$

Конфигурация распределения смещений ζ и u_z (рис. 2, а) имеет схожий вид. Отличие заключается в величине численных значений у изолиний в одних и тех же областях относительно клиновидного двойника. Следует отметить, что данные смещения знакопеременны относительно оси ОХ (рис. 2, а), а также относительно оси, параллельной оси ОУ, и проходящей у устья двойника.

Смещения ζ отрицательны и имеют высокое численное значение также в удалении от вершины двойника (рис. 2, б).

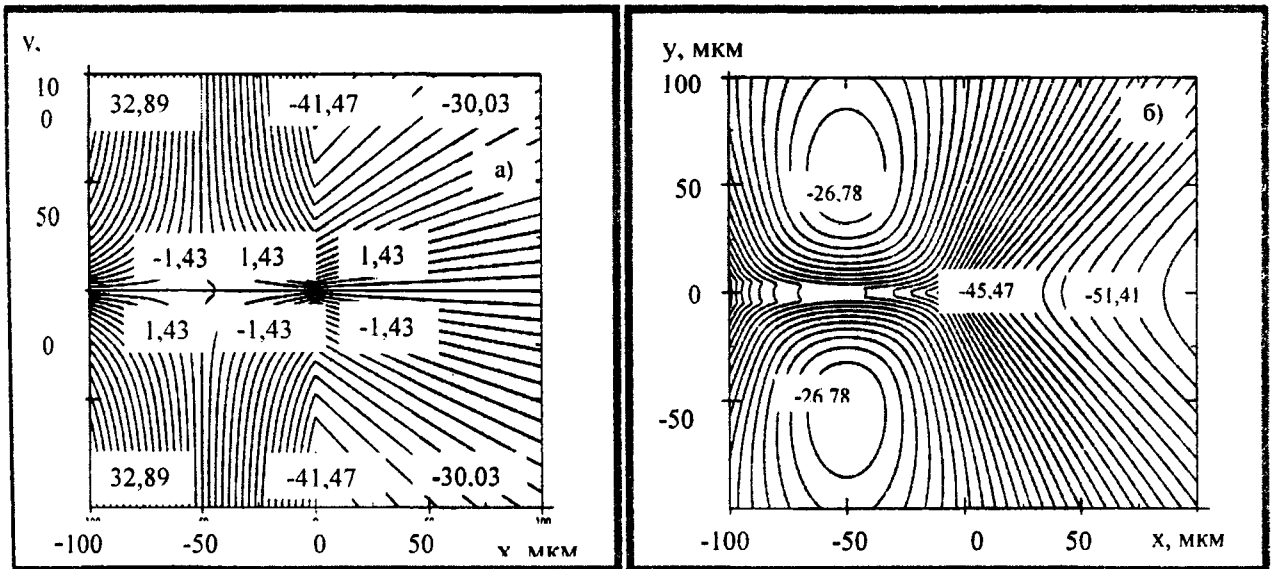


Рисунок 2 а, б)-Распределения: а) - $\chi_x(x, y)$; б) - $\chi_y(x, y)$ (аналогичный вид имеют распределения смещений $u_x(x, y)$, $u_y(x, y)$ и $u_z(x, y)$, соответственно)

Таким образом, разработана модель клиновидного двойника, которая в отличие от популярной модели тонкого двойника, позволяет рассматривать поля смещений у клиновидных двойников, отношение ширины у устья и длины которых имеет порядок $10^{-2} - 10^{-1}$. На основании данной модели предложен способ расчета полей смещений при условии непрерывного распределения двойникоующих дислокаций на двойниковых границах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Классен-Неклюдова М.В. Механическое двойникование кристаллов. - М.: АН СССР, 1960. - 262 с. 2. Полухин П.И., Горелик С.С., Воронцов В.К. Физические основы пла-

стической деформации. – М.: Металлургия, 1982. – 584 с. 3. Остриков О.М. Напряженное состояние у клиновидного двойника при дисбалансе плотностей двойникоующих дислокаций // Прикладная механика и техническая физика. – 2002. Т. 43, №4. – С. 180 - 182. 4. Пинчук А.И. Влияние электромагнитного поля на пластическую деформацию двойникованием кристаллов висмута // Автореф. дис... канд. физ.-мат. наук. - Минск, 1998. - 18 с. 5. Остриков О.М. Двойникование ионно-имплантированных монокристаллов висмута // Автореф. дис. ... к. ф. - м. н. - Минск, 1999. 17 с. 6. Остриков О.М., Дуб С.Н. Влияние скорости нагружения на механизм пластической деформации в висмуте // Журнал технической физики. - 2001. Т. 71, №5. – С. 44 - 46. 7. Остриков О.М. Физические закономерности двойникования при воздействии внешних ортогональных друг другу электрических и магнитных полей, прикладываемых к монокристаллам висмута, облученных ионами бора // Журнал технической физики. - 2000. Т. 70, № 12. – С. 39 - 42. 8. Остриков О.М. Магнитопластический эффект при двойниковании монокристаллов висмута // Прикладная механика и техническая физика. - 2001. Т. 42, № 3. – С. 159 - 161. 9. Савенко В.С. Влияние импульсов тока на двойникование металлических кристаллов // Автореф. дис. ... к. ф. - м. н. - Минск, 1982. 16 с. 10. Косевич А.М., Бойко В.С. Дислокационная теория упругого двойникования кристаллов // Успехи физических наук. - 1971. - Т. 104, № 2. - С. 101 - 255. 11. Хирт Дж., Лоте И. Теория дислокаций. – М.: Атомиздат, 1972. – 600 с.

УДК 548.24

Остриков О.М., Василевич Ю.В.

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ У ВЕРШИНЫ КЛИНОВИДНОГО МЕХАНИЧЕСКОГО ДВОЙНИКА

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Изучено напряженное состояние у вершины клиновидного механического двойника. Установлено, что компоненты напряжения знакопеременны не только в зависимости от баланса двойникоующих дислокаций на двойниковых границах, но и от соотношения между проекциями на оси декартовой системы координат отрезка, соединяющего две соседние дислокации.

Механические клиновидные двойники, как правило, возникают у концентраторов напряжений в условиях ориентационного запрета на скольжение или при его затруднении в связи с температурными условиями деформирования. В настоящее время накоплено большое количество экспериментального материала, который позволяет полагать хорошую изученность явления двойникования кристаллов [1 - 2]. Однако теоретические аспекты двойникования еще требуют своего развития. Так, например, существующая в настоящая время дислокационная модель тонкого двойника обладает рядом существенных ограничений, не позволяющими анализировать напряженное состояние внутри двойника [1]. Поэтому развитие теоретических модельных представлений о двойниковании кристаллов представляется целесообразным и актуальным.

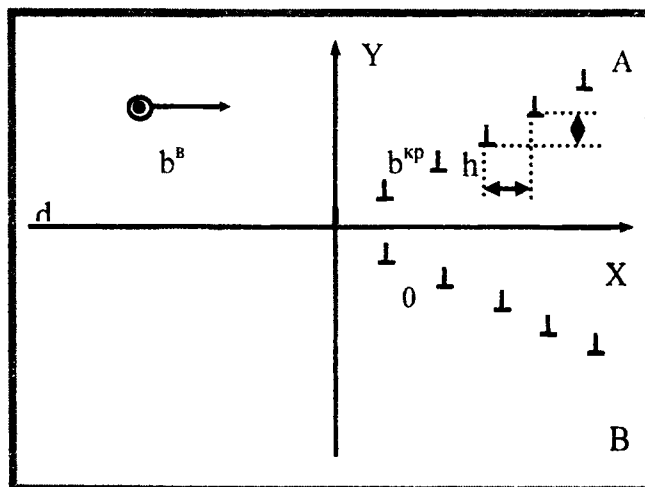


Рисунок 1

Цель данной работы - исследовать напряженное состояние у вершины клиновидного двойника. При этом масштабный уровень, на котором осуществляется исследование напряженного состояния, должен учитывать расстояния между двойникующимися дислокациями.

Двойникующиеся дислокации являются частичными дислокациями [1]. Поэтому их вектор Бюргера можно разложить на винтовую b_v и краевую b_{kp} составляющие. Будем моделировать клиновидный двойник скоплением дислокаций видом, представленным на рис. 1. Пусть винтовая и краевая составляющие вектора Бюргера ориентированы так, как это показано на рис. 1. Среду, в которой находятся дислокации, будем считать однородной и изотропной.

Тогда напряжения, у представленной на рис. 1 группы дислокаций будут, определяться по формулам

$$\begin{aligned}
 \sigma_{xx}(x, y) &= -\frac{\mu b_{kp}}{2\pi(1-\nu)} \left\{ \sum_{n=0}^N \frac{(y+nh)[3(x-nd)^2 + (y+nh)^2]}{[(x-nd)^2 + (y+nh)^2]^2} + \right. \\
 &\quad \left. + \sum_{m=1}^M \frac{(y-mh)[3(x-md)^2 + (y-mh)^2]}{[(x-md)^2 + (y-mh)^2]^2} \right\}, \\
 \sigma_{yy}(x, y) &= \frac{\mu b_{kp}}{2\pi(1-\nu)} \left\{ \sum_{n=0}^N \frac{(y+nh)[(x-nd)^2 - (y+nh)^2]}{[(x-nd)^2 + (y+nh)^2]^2} + \right. \\
 &\quad \left. + \sum_{m=1}^M \frac{(y-mh)[(x-md)^2 - (y-mh)^2]}{[(x-md)^2 + (y-mh)^2]^2} \right\}, \\
 \sigma_{xy}(x, y) &= \frac{\mu b_{kp}}{2\pi(1-\nu)} \left\{ \sum_{n=0}^N \frac{(x-nd)[(x-nd)^2 - (y+nh)^2]}{[(x-nd)^2 + (y+nh)^2]^2} + \right. \\
 &\quad \left. + \sum_{m=1}^M \frac{(x-md)[(x-md)^2 - (y-mh)^2]}{[(x-md)^2 + (y-mh)^2]^2} \right\}, \\
 \sigma_{zz}(x, y) &= -\frac{\mu b_{kp}\nu}{2\pi(1-\nu)} \left\{ \sum_{n=0}^N \frac{y+nh}{(x-nd)^2 + (y+nh)^2} + \right. \\
 &\quad \left. + \sum_{m=1}^M \frac{y-mh}{(x-md)^2 + (y-mh)^2} \right\}, \\
 \sigma_{xz}(x, y) &= -\frac{\mu b_v}{2\pi} \left\{ \sum_{n=0}^N \frac{y+nh}{(x-nd)^2 + (y+nh)^2} + \right. \\
 &\quad \left. + \sum_{m=1}^M \frac{y-mh}{(x-md)^2 + (y-mh)^2} \right\}, \\
 \sigma_{yz}(x, y) &= \frac{\mu b_v}{2\pi} \left\{ \sum_{n=0}^N \frac{x-nd}{(x-nd)^2 + (y+nh)^2} + \right. \\
 &\quad \left. + \sum_{m=1}^M \frac{x-md}{(x-md)^2 + (y-mh)^2} \right\},
 \end{aligned} \tag{1}$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ - нормальные, а σ_{xy}, σ_{yz} - скалывающие напряжения, вызванные двойникующимися дислокациями; N и M - номер и число дислокаций на каждой из границ двойника; μ - модуль сдвига; ν коэффициент Пуассона; d и h - проекции на оси OX и OY, соответственно, отрезка, соединяющего две соседние дислокации (рис. 1).

В плане анализа напряжений и деформаций у клиновидного двойника представляет интерес их рассмотрение в особых точках двойника. В качестве одной из таких особых точек можно выделить вершину двойника. Удалим из вершины двойника двойникующуюся дислокацию и рассмотрим напряженное состояние, создаваемое в этой точке дислокациями двой-

никовых границ. Такое удаление дислокации приведет к тому, что суммирование по n в (1) будет вестись не от нуля, а от единицы. Чтобы определить напряжения и деформации в вершине двойника, необходимо в (1) принять $x = y = 0$. Тогда получим [1,2]

$$\begin{aligned}\sigma_{xx}(0,0) &= -\frac{\mu b_{kp}}{2\pi(1-\nu)} \frac{h(3d^2 + h^2)}{(d^2 + h^2)^2} \left(\sum_{n=1}^N \frac{1}{n} - \sum_{m=1}^M \frac{1}{m} \right), \\ \sigma_{yy}(0,0) &= \frac{\mu b_{kp}}{2\pi(1-\nu)} \frac{h(d^2 - h^2)}{(d^2 + h^2)^2} \left(\sum_{n=1}^N \frac{1}{n} - \sum_{m=1}^M \frac{1}{m} \right), \\ \sigma_{xy}(0,0) &= -\frac{\mu b_{kp}}{2\pi(1-\nu)} \frac{d(d^2 - h^2)}{(d^2 + h^2)^2} \left(\sum_{n=1}^N \frac{1}{n} + \sum_{m=1}^M \frac{1}{m} \right), \\ \sigma_{zz}(0,0) &= -\frac{\mu b_{kp}\nu}{2\pi(1-\nu)} \frac{h}{d^2 + h^2} \left(\sum_{n=1}^N \frac{1}{n} - \sum_{m=1}^M \frac{1}{m} \right), \\ \sigma_{xz}(0,0) &= -\frac{\mu b_n}{2\pi} \frac{h}{d^2 + h^2} \left(\sum_{n=1}^N \frac{1}{n} - \sum_{m=1}^M \frac{1}{m} \right), \\ \sigma_{yz}(0,0) &= -\frac{\mu b_n}{2\pi} \frac{d}{d^2 + h^2} \left(\sum_{n=1}^N \frac{1}{n} + \sum_{m=1}^M \frac{1}{m} \right),\end{aligned}\quad (2)$$

В случае, когда $N=M$, из (2) имеем

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= 0, \quad \sigma_{yy} = 0, \quad \sigma_{zz} = 0, \quad \sigma_{xz} = 0, \\ \sigma_{xy} &= -\frac{\mu b_{kp}}{\pi(1-\nu)} \frac{d(d^2 - h^2)}{(d^2 + h^2)^2} \sum_{n=1}^N \frac{1}{n}, \\ \sigma_{yz} &= -\frac{\mu b_n}{\pi} \frac{d}{d^2 + h^2} \sum_{n=1}^N \frac{1}{n},\end{aligned}\quad (3)$$

Из-за симметричного расположения дислокаций на двойниковых границах при $N=M$ и постоянстве параметров d и h , компоненты тензора напряжений σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} и σ_{xz} равны нулю. Это связано с тем, что напряжения дислокаций на двух двойниковых границах скомпенсированы. В то же время, из-за расположения на двойниковых границах дислокаций одного знака напряжения σ_{xy} , σ_{yz} удваиваются. Рассмотрим эти деформации и напряжения более подробно.

Для численной обработки результатов удобно использовать величину

$$\eta_{ij}(d, h) = \frac{\sigma_{ij}(d, h)}{\sigma_{ij}^{(0)}}, \quad (4)$$

где

$$\sigma_{ij}^{(0)} = A_{ij}/L, \quad (5)$$

$$A_{xx} = A_{yy} = A_{xy} = \frac{\mu b_{kp}}{2\pi(1-\nu)}, \quad A_{zz} = \frac{\mu\nu b_{kp}}{2\pi(1-\nu)}, \quad A_{zx} = A_{zy} = \frac{\mu b_n}{2\pi}, \quad L \text{ длина}$$

двойника. Это позволяет не привязываться к численным значениям величины A_j . При этом не ущемляется общность полученных результатов, так как конфигурация полей напряжений σ_j идентична конфигурации τ_j .

На рисунке 2 представлена зависимость η_{xy} от числа двойникующих дислокаций на двойниковых границах N при $d = 0,15$ мкм.

$$\eta_{xy}(N).$$

С ростом N исследуемые напряжения и деформации монотонно растут по модулю. При больших значениях N скорость роста величины напряжений и деформаций уменьшается. Это связано с тем, что растет длина двойника, а вместе с ней увеличивается расстояние от вершины двойника до прибавляемых к его устью дислокаций, которые начинают вносить свой вклад в напряженное и деформационное состояние в вершине двойника.

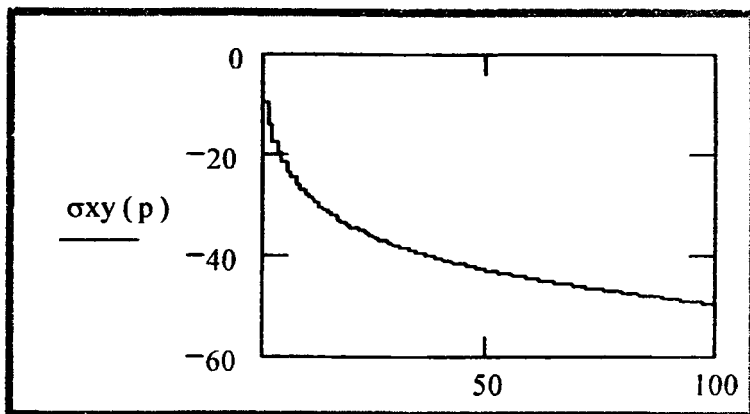


Рисунок 2

При $N \neq M$ напряжения σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} , σ_{xz} будут зависеть от параметра:

$$\Delta = \sum_{n=1}^N \frac{1}{n} - \sum_{m=1}^M \frac{1}{m}. \quad (6)$$

При $N < M$ имеем $\Delta < 0$. Это значит, что если на границе ОВ (рис. 1) дислокаций больше, чем на границе ОА, то напряжения σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} , σ_{xz} будут менять знак своей величины на противоположный.

Для анализа зависимости напряжений и деформаций у вершины клиновидного двойника от параметров d и h , рассмотрим соотношения

$$\frac{\eta_{ij}(d, h)}{\Delta}, \quad \frac{\eta_{ij}(d, h)}{\Sigma}, \quad (7)$$

где

$$\Sigma = \sum_{n=1}^N \frac{1}{n} + \sum_{m=1}^M \frac{1}{m}. \quad)$$

Зависимости (7) представлены на рисунке 3.

Напряжения σ_{xx} у вершины двойника увеличиваются по модулю с уменьшением расстояния между дислокациями (рис. 3). Скорость роста напряжений при этом увеличивается при меньших расстояниях между дислокациями. Максимальные значения напряжения достигают при $d \approx 1$ и $h \approx 1$.

Совершенно иначе у вершины двойника ведут себя напряжения σ_{yy} в зависимости от параметров d и h . Следует отметить, что данные напряжения меняют свой знак не только от дисбаланса плотности двойникующих дислокаций на противоположных двойниковых границах, но и от соотношения между параметрами d и h . Причем, при $d < 2$ мкм напряжения σ_{yy} отрицательны, а при $d > 2$ – положительны.

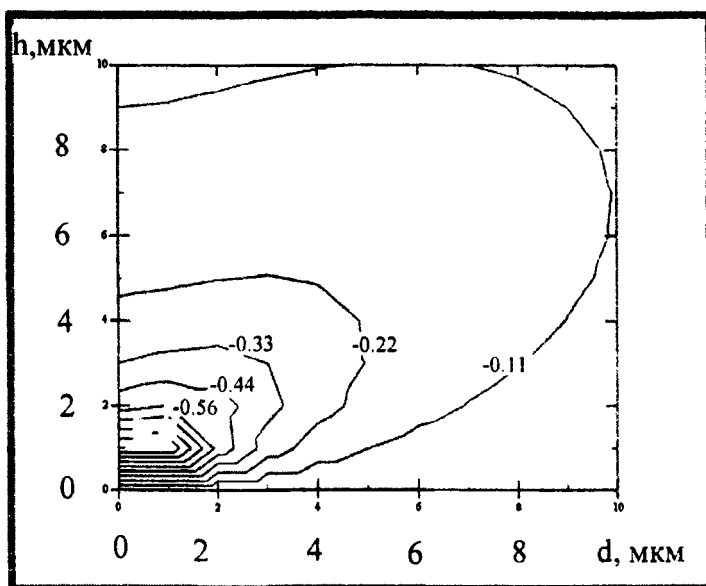


Рисунок 3

Скальвающие напряжения σ_{xy} так же, как и напряжения σ_{yy} , знакопе-

Скальвающие напряжения σ_{xy} так же, как и напряжения σ_{yy} , знакопеременны по отношению к параметрам d и h . Однако, в этом случае при $d < 2$ мкм напряжения σ_{xy} положительны, а при $d > 2$ – отрицательны.

Напряжения σ_{zz} и σ_{xz} в зависимости от параметров d и h имеют схожий вид. Отличие наблюдается в численных значениях изолиний в одинаковых областях зависимостей от d и h . При малых значениях этих параметров напряжения больше по величине, чем при больших значениях d и h . Знак напряжения σ_{xz} и σ_{xz} в рассматриваемом интервале значений d и h не меняют.

Конфигурация напряжений такая же, как и у напряжений σ_{zz} и σ_{xz} , но в отличие от них контуры изолиний напряжений σ_{yz} замыкаются на оси d , в то время как у напряжений σ_{xz} и σ_{xz} - на оси h .

Таким образом, на основании дислокационной мезоскопической модели исследовано напряженное состояние у вершины клиновидного двойника. Показано, что напряжения существенно зависят от баланса плотностей двойникоующих дислокаций на противоположных двойниковых границах. Знак напряжения у вершины двойника меняют не только с изменением баланса плотностей дислокаций на границах, но и при определенном соотношении между параметрами d и h .

ЛИТЕРАТУРА

1. Классен-Неклюдова М.В. Механическое двойникование кристаллов. - М.: АН СССР, 1960. - 262 с. 2. Остриков О.М. Использование полипараксилиленовых тонких пленок при исследовании пластической деформации монокристаллов висмута // Прикладная механика и техническая физика. - 2006. - Т. 47, № 4. - С. 162 - 166.

УДК 539.1

Колешко В.М., Дейнак Д.А.

НАНОУГЛЕРОД: СТРУКТУРА, СВОЙСТВА

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Нанотехнология – наука об изготовлении и свойствах элементов техники на атомном и молекулярном уровне. Важнейшим элементом этой науки является углерод, а именно его аллотропные формы – нанотрубки и фуллерены. Углеродные нанотрубки являются уникальным материалом, позволяющим проверять теории квантовых явлений, и обладающим уникальными и неповторимыми свойствами. Именно эти свойства привлекают внимание ученых всего мира, с целью создания приборов и машин на наноуровне.

Углерод – имеет несколько аллотропных форм, некоторые из них известны с древних времен (алмаз, графит), а некоторые открыты только 10-20 лет назад (графины, фуллерены, нанотрубки) (рис. 1) [1-10]. Аллотропия, от греч. allos - иной, tropos - поворот, свойство, существование одного и того же элемента в виде различных по свойствам и строению структур.

Основным состоянием атома углерода является состояние с максимальным числом неспаренных электронов. Образованию химической связи между атомами углерода предшествует переход в возбужденное состояние с максимальным числом неспаренных электронов по схеме $2s^2 2p^2 \rightarrow 2s^1 2p^1 2p^1 2p^1$. Атомы углерода, соединяясь, образуют ковалентные связи, в результате чего возможна sp -, sp^2 -, sp^3 -гибридизация.

При sp^3 -ции валентных электронов образуются четыре равноценные σ -связи, направленные к вершинам правильного тетраэдра. Так связаны атомы в алмазе и лонсдейлите.

При sp^2 -гибридизации каждый атом углерода образует три σ -связи в одной плоскости и, кроме того, дополнительно имеет по одному p -электрону. С такой связью существуют атомы углерода в графите. Возможна также sp -гибридизация атомов углерода, при которой образуются две σ -связи (Существуют аморфные и частично кристаллические переходные формы углерода (сажа, кокс, стеклоуглерод и др.) [6], в которых сочетаются различные типы связей (рис. 3).

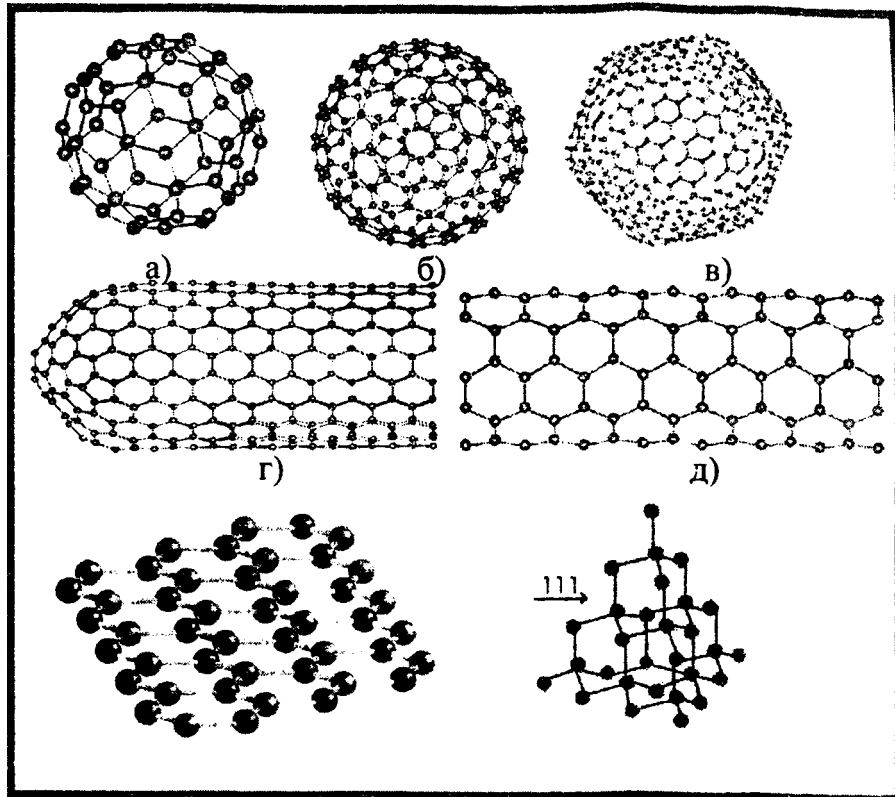


Рисунок 1- Кристаллические структуры различных аллотропов углерода: а) фуллерен C_{60} , б) фуллерен C_{240} , в) фуллерен C_{540} , г) нанотрубка с закрытым концом, д) нанотрубка с открытым концом, е) графин, ж) алмаз [5].

УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ

При частичном термическом разрушении слоев графита наряду с молекулами фуллеренов образуются и длинные трубки, поверхность которых составлена из правильных шестиугольников (или гексагонов). Углеродные нанотрубки — протяженные цилиндрические структуры диаметром от одного до нескольких десятков нанометров и длиной до нескольких микрон состоят из одной или нескольких свернутых в трубку гексагональных графитовых плоскостей (графенов) и заканчиваются обычно полу-сферической головкой.

Как следует из определения, основная классификация нанотрубок проводится по способу сворачивания графитовой плоскости. Способ предложен Хамадой и др. [7]. Структура нанотрубок описывается двумя целыми числами (m, n), указывающими координаты шестиугольника, который в результате сво-

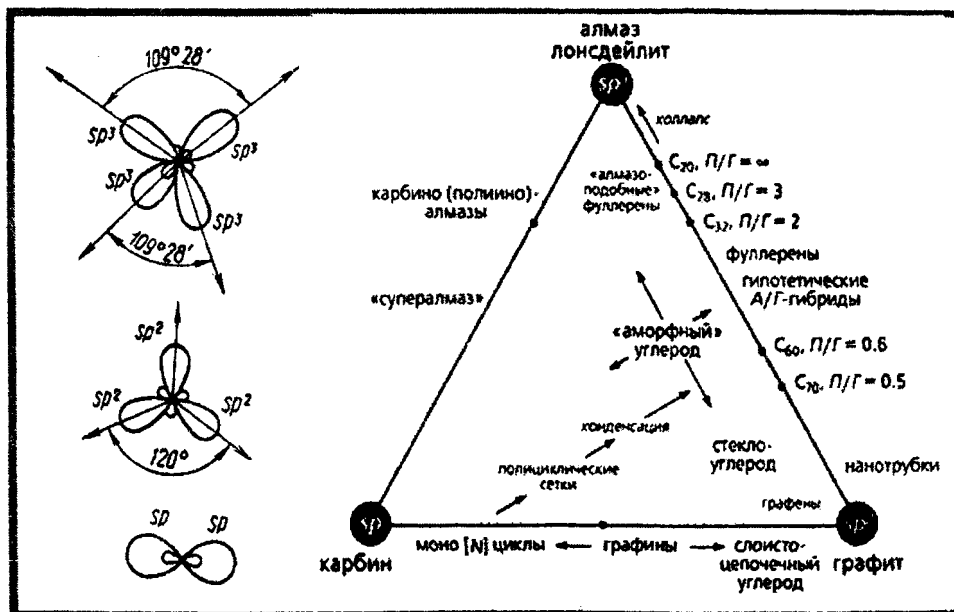


Рисунок 2 - Формы sp^n - гибридных орбиталей

цельми числами (m, n), указывающими координаты шестиугольника, который в результате сво-

рачивания плоскости должен совпасть с шестиугольником, находящимся в начале координат (рис. 4). Также эти числа можно обозначить как параметры так называемого хирального вектора, который задается следующей формулой:

$$\vec{c} = n\vec{a}_1 + m\vec{a}_2,$$

где \vec{a}_1, \vec{a}_2 - элементарные векторы трансляций графитовой плоскости.

Другой способ обозначения хиральности состоит в указании угла θ между направлением сворачивания нанотрубки и направлением, в котором соседние шестиугольники имеют общую сторону.

Однослойные нанотрубки (с англ. single-walled carbon nanotubes, SWNT) делятся на следующие подвиды:

- тип «кресло» (с англ. armchair) или «зубчатые» $n=m$;
- тип «зигзаг» (с англ. zigzag) или «зигзагообразные» $n=0$ или $m=0$;
- хиральные (с англ. chiral) (n, m), где $n > m$.

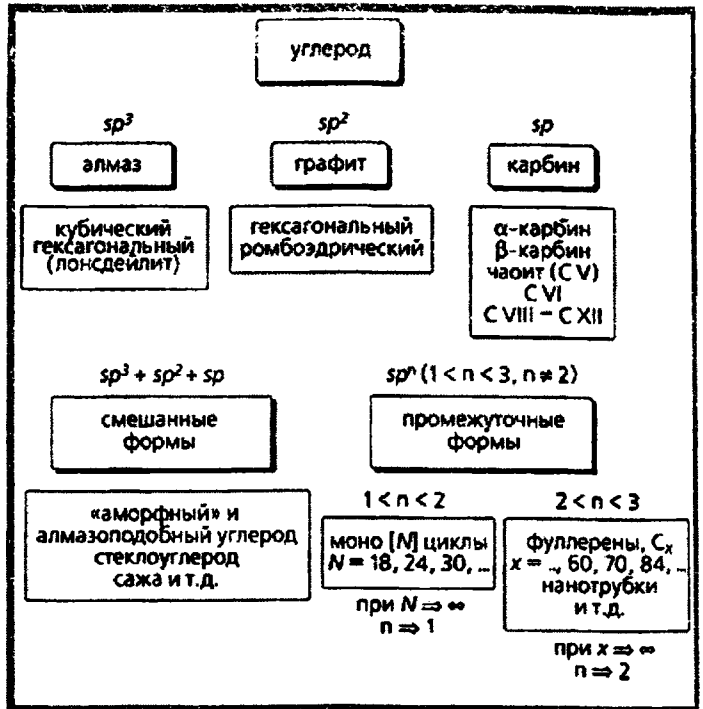


Рисунок 3- Гибридизация аллотропных форм углерода

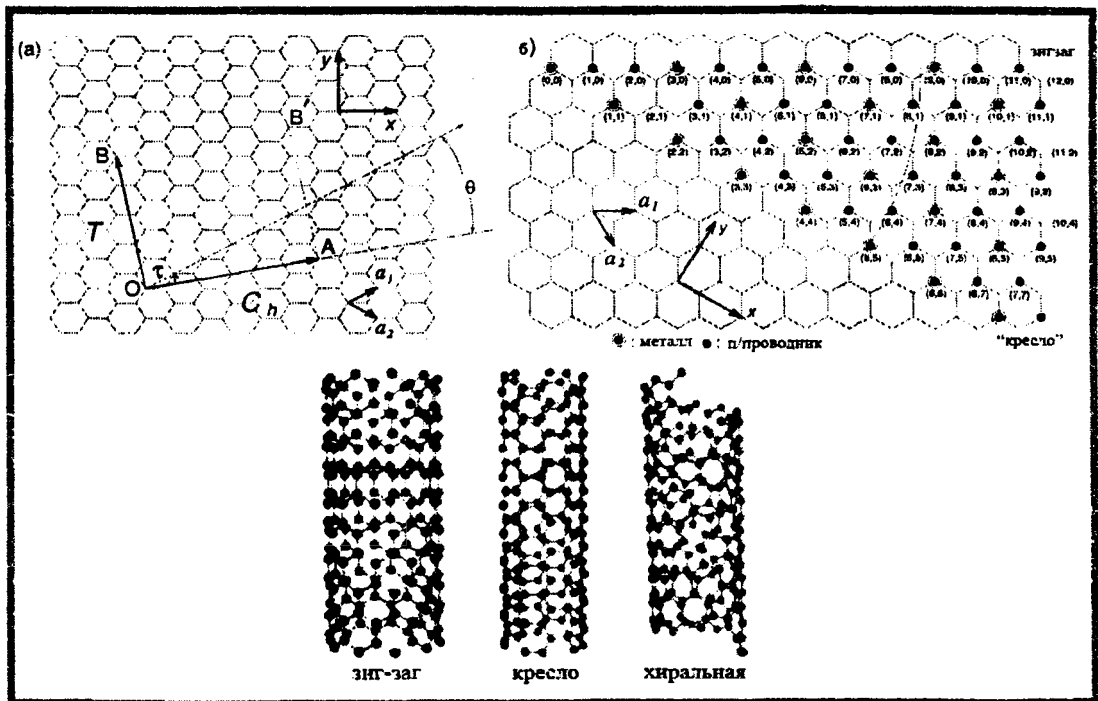


Рисунок 4 - Часть графитовой плоскости, сворачивание которой в цилиндр приводит к образованию однослойной нанотрубки

Индексы хиральности однослойной нанотрубки (n, m) однозначным образом определяют ее диаметр D . Эта связь имеет следующий вид:

$$D = \sqrt{m^2 + n^2 + mn} \frac{\sqrt{3}d_0}{\pi},$$

где $d_0 = 1,44 \text{ \AA}$ - расстояние между соседними атомами углерода в графитовой плоскости.

Связь между индексами хиральности (m, n) и углом θ , а также другие структурные параметры углеродных нанотрубок представлены в таблице 1.

Электронные и колебательные свойства углеродных нанотрубок существенным образом зависят от типа трубок.

Если разница $|m - n|$ кратна 3, такие трубки обладают металлическими свойствами. Металлические нанотрубки проводят электрический ток даже при абсолютном нуле температур, в то время как проводимость полупроводниковых трубок равна нулю при абсолютном нуле и возрастает при повышении температуры. Технически говоря у полупроводниковых трубок есть энергетическая щель на поверхности Ферми. Полуметаллами являются также все ахиральные трубки типа «armchair». В других случаях нанотрубки показывают полупроводниковые свойства [8].

Таблица 1. Структурные параметры углеродных нанотрубок.

Символ	Название	Формула	Параметр
a	Длина единичного вектора	$a = \sqrt{3}a_{C-C} = 2,49 \text{ \AA}$	$a_{C-C} = 1,44 \text{ \AA}$
a_1, a_2	Единичные вектора	$\left(\frac{\sqrt{3}}{2}, \frac{1}{2}\right)a, \left(\frac{\sqrt{3}}{2}, -\frac{1}{2}\right)a$	x, y координата
b_1, b_2	Вектора кристаллической решетки	$\left(\frac{1}{\sqrt{3}}, 1\right)\frac{2\pi}{a}, \left(\frac{1}{\sqrt{3}}, -1\right)\frac{2\pi}{a}$	x, y координата
C_h	Вектор хиральности	$C_h = na_1 + ma_2 \equiv (n, m)$	$0 \leq m \leq n$
L	Длина вектора C_h	$L = C_h = a\sqrt{n^2 + m^2 + nm}$	
d_t	Диаметр	$d_t = L/\pi$	
θ	Угол хиральности	$\sin \theta = \frac{\sqrt{3}m}{2\sqrt{n^2 + m^2 + nm}}$ $\cos \theta = \frac{2n + m}{2\sqrt{n^2 + m^2 + nm}}$	$0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{6}$ $\tan \theta = \frac{\sqrt{3}m}{2n + m}$
d	НОД (n,m)		
d_R	НОД (2n+m, 2m+n)	$d_R = \begin{cases} d, (n - m) & \text{некратно} \\ 3d, (n - m) & \text{кратно} \end{cases}$	$3d$ $3d$
T	Вектор смещения	$T = t_1a_1 + t_2a_2 \equiv (t_1, t_2)$ $t_1 = \frac{2m + n}{d_R}, t_2 = -\frac{2n + m}{d_R}$	НОД (t_1, t_2) = 1
T	Длина вектора смещения T	$T = T = \frac{\sqrt{3}L}{d_R}$	
N	Число 6-угольников в единичной ячейке нанотрубки	$N = \frac{2(n^2 + m^2 + nm)}{d_R}$	
R	Вектор симметрии	$R = pa_1 + qa_2 \equiv (p, q)$ $t_1q - t_2p = 1,$ $(0 < mp - nq \leq N)$	НОД (p, q) = 1
τ	Степень R	$\tau = \frac{(mp - nq)T}{N} = \frac{MT}{N}$	
ψ	Угол поворота R	$\psi = 2\pi/N$	в радианах
M	Число T в NR	$NR = C_h + MT$	

Примечание. Параметры n, m, t_1, t_2, p, q – целочисленные, а параметры d, d_R, N, M – функция этих чисел. НОД (n,m) – наибольший общий делитель чисел n и m

Известный наименьший диаметр нанотрубки 0,7 нм, что является диаметром молекулы фуллерена C_{60} . Нанотрубки, состоящие из коаксиальных графитовых цилиндров, с рас-

стоянием между слоями 0,34 нм, называются многослойными нанотрубками (с англ. multi-walled carbon nanotubes, MWNT).

Многослойные нанотрубки отличаются от однослойных значительно более широким разнообразием форм и конфигураций. Разнообразие структур проявляется как в продольном, так и в поперечном направлении.

Возможные разновидности поперечной структуры многослойных нанотрубок представлены на рис. 5 [9]. Структура типа «матрешки» (russian dolls) представляет собой совокупность коаксиально вложенных друг в друга однослойных цилиндрических нанотрубок.

Другая разновидность этой структуры представляет собой совокупность вложенных друг в друга коаксиальных призм. Последняя из приведенных структур напоминает свиток (scroll). Для всех структур характерно значение расстояния между соседними графитовыми слоями, близкое к величине 3,4 Å, присущей расстоянию между соседними плоскостями кристаллического графита.

Реализация той или иной структуры многослойной нанотрубки в конкретной экспериментальной ситуации зависит от условий синтеза. Анализ имеющихся экспериментальных данных указывает, что наиболее типичной структурой многослойных нанотрубок является структура типа «матрешки», в которой трубки меньшего размера последовательно вложены в трубки большего размера [10].

Следует заметить, что многослойные нанотрубки привлекают к себе не меньшее внимание, чем однослойные.

Синтез углеродных нанотрубок

Электродуговой метод. Наиболее широко распространен метод получения нанотрубок, использующий термическое распыление графитового электрода в плазме дугового разряда, горящей в атмосфере He. Модифицирование метода [11], заключавшееся в нахождении оптимальных параметров: давления He, тока дуги, напряжения и зазора между электродами, позволило увеличить выход нанотрубок. Предпочтительнее является непрерывный поток He при постоянном давлении, чем статическая газовая атмосфера.

В качестве катализатора использовались смеси: Ni-Co, Co-Y или Ni-Y с различным процентным содержанием атомов металла по отношению к углероду [12]. Распределение диаметров нанотрубок, относительная концентрация и структура нанотрубного материала определяются типом используемого катализатора, а также параметрами дугового разряда. Так, например, использование металлов группы железа (Co, Ni, Fe) способствует получению одностенных трубок с разбросом диаметров от 0,7 до 2,0 нм, с максимумами 0,84, 1,05 и 1,4 нм. Вдобавок к перечисленным выше рост одностенных трубок наблюдался на катализаторах Ce, Gd, La, Mn, Sc, V, Zr и не наблюдался на Co/Ru, Ni/B, Cu, Ti.

Лазерное распыление. Фокусирующийся системой линз лазерный пучок сканирует поверхность графитовой мишени для обеспечения равномерного испарения материала мишени. Получающийся в результате лазерного испарения пар попадает в поток инертного газа и выносится из высокотемпературной области в низкотемпературную, где осажается на охлаждаемой водой медной подложке. Сажа, содержащая трубки, собирается с медной подложки, стенок кварцевой трубки и обратной стороны мишени. Так же, как и в дуговом методе, получается несколько видов конечного материала.

В экспериментах, где в качестве мишени использовался чистый графит, получались многостенные нанотрубки [3], которые имели длину до 300 нм и состояли из 4-24 графеновых цилиндров. При 1200°C все наблюдаемые нанотрубки не содержали дефектов и имели

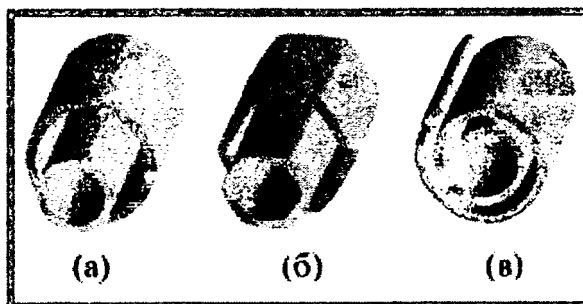


Рисунок 5 - Модели поперечных структур многослойных нанотрубок: а - матрешка; б - шестигранная призма; в - свиток

шапочки на окончаниях. При понижении температуры синтеза до 900°C в трубках появлялись дефекты, число которых увеличивалось с дальнейшим понижением температуры, и при 200°C образование нанотрубок не наблюдалось.

При добавлении в мишень небольшого количества переходных металлов, в продуктах конденсации наблюдались одностенные трубки. Однако в процессе испарения мишень обогачалась металлом, и выход таких нанотрубок снижался [3].

Каталитическое разложение углеводородов. Широко используемый способ получения нанотрубок основан на использовании процесса разложения ацетилена в присутствии катализаторов. В качестве катализаторов использовались частицы металлов Ni, Co, Cu и Fe размером несколько нанометров. В кварцевую трубку длиной 60 см, внутренним диаметром 4 мм, помещается керамическая лодочка с 20-50 мг катализатора. Смесь ацетилена C₂H₂ (2,5-10%) и азота прокачивается через трубку в течение нескольких часов при температуре 500-1100°C. После чего система охлаждается до комнатной температуры. На эксперименте с кобальтовым катализатором наблюдались четыре типа структур, а именно: аморфные слои углерода на частицах катализатора; закапсулированные графеновыми слоями частицы металлического катализатора; нити, образованные аморфным углеродом и многостенными углеродными нанотрубками.

Наименьшее значение внутреннего диаметра этих нанотрубок составляло 10 нм. Наружный диаметр свободных от аморфного углерода трубок находился в пределах 25-30 нм, а для трубок, покрытых аморфным углеродом, – до 130 нм. Длина определялась временем протекания реакции и изменялась от 100 нм до 10 мкм.

Выход и структура нанотрубок зависит от типа катализатора - замена Co на Fe дает меньшую концентрацию и количество бездефектных нанотрубок сокращается. При использовании никелевого катализатора большинство нитей имело аморфную структуру, иногда встречались нанотрубки с графитизированной бездефектной структурой. На медном катализаторе формируются нити с нерегулярной формой и аморфной структурой.

Электролитический синтез. Основная идея этого метода состоит в том, чтобы получить углеродные НТ, пропуская электрический ток между графитовыми электродами, находящимися в расплавленной ионной соли [11]. Графитовый катод расходуется в процессе реакции и служит источником атомов углерода. В результате формируется широкий спектр наноматериалов.

Для того чтобы выделить частицы углерода, получившиеся вследствие эрозии катода, соль растворялась в воде. Осадок выделялся, растворялся в толуоле и диспергировался в ультразвуковой ванне. Продукты электролитического синтеза исследовались с помощью ПЭМ. Выявлено, что они состоят из закапсулированных частиц металла, лукович и углеродных НТ различной морфологии, включая спиральные и сильно изогнутые. В зависимости от условий эксперимента диаметр нанотрубок, образованных цилиндрическими графеновыми слоями, колебался от 2 до 20 нм. Длина МСНТ достигала 5 мкм.

Методы очистки и детектирования. Наиболее удобный и широко распространенный метод экстракции нанотрубок и фуллеренов из продуктов термического разложения графита, а также последующей сепарации и очистки, основан на использовании растворителей и сорбентов.

Этот метод включает в себя несколько стадий. На первой стадии углеродсодержащая сажа обрабатывается с помощью неполярного растворителя, в качестве которого используются бензол, толуол и другие вещества. При этом фуллерены и нанотрубки, обладающие значительной растворимостью в указанных растворителях, отделяются от нерастворимой фракции, содержание которой составляет обычно 70-80 %. Выпаривание полученного таким образом раствора приводит к образованию черного поликристаллического порошка, представляющего собой смесь фуллеренов и нанотрубок различного сорта.

Экстракт нанотрубок, растворенный в одном из растворителей, пропускается через сорбент, в качестве которого может быть использован алюминий, активированный уголь либо оксиды (Al₂O₃, SiO₂) с высокими сорбционными характеристиками. Нанотрубки собира-

ются этим металлом, а затем экстрагируются из него с помощью чистого растворителя. Эффективность экстракции определяется сочетанием сорбент-растворитель. Поэтому растворитель, пропущенный через сорбент с сорбированными в нем нанотрубками, экстрагирует из сорбента поочередно нанотрубки различного вида, которые, тем самым, могут быть легко отделены друг от друга.

Свойства нанотрубок

Нанотрубки обладают уникальными свойствами. Так, они имеют очень малую массу и в то же время рекордно высокий модуль упругости (до 1 ТПа). Нанотрубки на данный момент являются прочнейшими волокнами, которые когда-либо могли быть созданы. При этом их можно произвольно закручивать: они не ломаются, а только гнутся. Данное свойство было успешно применено для использования нанотрубок в производстве зондов для атомно-силовой микроскопии [9].

Одним из интересных свойств углеродных нанотрубок является возможность адсорбирования в них различных атомов или молекул [4]. Огромная удельная площадь поверхности УНТ, достигающая $600 \text{ м}^2/\text{г}$, обеспечивает возможность адсорбирования больших количеств инертных газов, водорода, металлов, воды и т.д. Например, экспериментально показано [10], что УНТ могут поглощать более 3,5 % (вес.) водорода, что делает их перспективными аккумуляторами водорода. Там же показано, что экономически оправданным такое применение УНТ в машиностроении может быть уже при содержании водорода в них $\sim 6,5\%$.

Широкие перспективы использования нанотрубок в материаловедении открываются при капсулировании внутрь углеродных нанотрубок сверхпроводящих кристаллов (например, TaC). Возможность получения сверхпроводящих кристаллов, капсулированных в нанотрубки, позволяет изолировать их от вредного воздействия внешней среды, например, от окисления, открывая тем самым путь к более эффективному развитию соответствующих нанотехнологий [13].

Большая отрицательная магнитная восприимчивость нанотрубок указывает на их диамагнитные свойства. Предполагают, что диамагнетизм нанотрубок обусловлен протеканием электронных токов по их окружности. Величина магнитной восприимчивости не зависит от ориентации образца, что связано с его неупорядоченной структурой. Относительно большое значение магнитной восприимчивости указывает на то, что, по крайней мере, в одном из направлений эта величина сравнима с соответствующим значением для графита. Отличие температурной зависимости магнитной восприимчивости нанотрубок от соответствующих данных для других форм углерода указывает на то, что углеродные нанотрубки являются отдельной самостоятельной формой углерода, свойства которой принципиально отличаются от свойств углерода в других состояниях.

Применение нанотрубок

В основе многих технологических применений нанотрубок лежит такое их свойство, как высокая удельная поверхность (в случае однослойной нанотрубки около $600 \text{ м}^2/\text{г}$), что открывает возможность их использования в качестве пористого материала в фильтрах и т.д.

Материал нанотрубок с успехом может использоваться в качестве несущей подложки для осуществления гетерогенного катализа, причем каталитическая активность открытых нанотрубок заметно превышает соответствующий параметр для замкнутых нанотрубок [14].

Возможно использование НТ с высокой удельной поверхностью в качестве электродов для электролитических конденсаторов с большой удельной мощностью.

Углеродные нанотрубки хорошо себя зарекомендовали в экспериментах по использованию их в качестве покрытия, способствующего образованию алмазной пленки.

Такие свойства нанотрубки, как ее малые размеры, меняющаяся в значительных пределах в зависимости от условий синтеза, электропроводность, механическая прочность и химическая стабильность, позволяют рассматривать нанотрубку в качестве основы будущих элементов микроэлектроники.

Сейчас созданы опытные образцы полевых транзисторов на основе одной нанотрубки: прикладывая запирающее напряжение в несколько вольт, ученые научились изменять проводимость однослойных нанотрубок в пределах пяти порядков. Вообще создание полупроводниковых гетероструктур, то есть структур типа металл/полупроводник или стык двух разных полупроводников, позволит не выращивать отдельно два материала и затем соединять их друг с другом, а всего лишь в процессе роста нанотрубки создать в ней структурный дефект (а именно, заменить один из углеродных шестиугольников пятиугольником). Тогда одна часть нанотрубки будет проявлять металлические свойства, а другая – полупроводниковые [15].

Впрочем, возможности применения нанотрубок в электронике не ограничиваются областью создания на их основе новых типов миниатюрных элементов электронных схем. Наряду с этим нанотрубки могут служить основой тончайшего измерительного инструмента, используемого для контроля неоднородностей поверхностей таких схем [16].

В одной из работ в данном направлении была использована многослойная нанотрубка в качестве зонда для исследования поверхности на нанометровом уровне. Преимущества использования нанотрубок для этой цели связаны с их чрезвычайно высокой механической прочностью, на которую указывают, в частности, результаты прямых измерений. Так, модуль Юнга нанотрубок в аксиальном направлении составляет порядка 7000 ГПа, в то время как для стали и иридия, традиционно используемых для изготовления таких зондов, значение этого параметра не превышает 200 и 500 ГПа соответственно.

Другой пример использования нанотрубки – «насаживание» ее на острие сканирующего туннельного или атомного силового микроскопа. Обычно такое острие представляет собой остро заточенную вольфрамовую иглу, но по атомным меркам подобная заточка все равно достаточно «грубая». Нанотрубка же представляет собой идеальную иглу диаметром порядка нескольких атомов. Прикладывая определенное напряжение, можно подхватывать атомы и целые молекулы, находящиеся на подложке непосредственно под иглой, и переносить их с места на место.

Уже существуют применения нанотрубок в компьютерной индустрии. Например, созданы и опробованы прототипы тонких плоских дисплеев, работающих на матрице из нанотрубок. Под действием напряжения, прикладываемого к одному из концов нанотрубки, с другого конца начинают испускаться электроны, которые попадают на фосфоресцирующий экран и вызывают свечение пиксела. Получающееся при этом зерно изображения будет чрезвычайно малым – порядка микрона.

Интересные применения могут получить нанотрубки при заполнении их различными материалами. При контакте открытого конца нанотрубки с расплавленным свинцом трубка под действием капиллярного эффекта заполняется металлом, превращаясь в тончайший изолированный провод в оболочке. При этом нанотрубка может использоваться как в качестве носителя заполняющего ее материала, так и в качестве изолирующей оболочки, предохраняющей данный материал от электрического контакта, либо от химического взаимодействия с объектами [17].

Открытие углеродных нанотрубок относится к наиболее значительным достижениям современной науки. Эта форма углерода по своей структуре занимает промежуточное положение между графитом и фуллереном. Однако многие свойства углеродных нанотрубок не имеют ничего общего ни с одним из указанных элементов. Это позволяет рассматривать и исследовать нанотрубки как самостоятельный материал, обладающий уникальными физико-химическими характеристиками. Исследования углеродных нанотрубок представляют значительный фундаментальный и прикладной интерес. В настоящее время ведутся большие работы по исследованию электронных свойств нанотрубок – перспективных сверхпроводящих, проводящих и полупроводниковых материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колешко В.М., Баркалин В.В., Польшкова Е.В. Интеллектуальные акустоэлектронные микросистемы на основе углеродных и алмазоподобных пленок // Сборник «Машино-

строение» - Мн., вып. 17, 2001, с. 437-442. 2. Колешко В.М., Баркалин В.В., Шевченко А.А., Полюнкова Е.В. Алмазоподобные пленки, полученные магнетронным способом для сенсорики и электроники // Сб. «Пленки и покрытия 2001» - С-Пб., 2001, с. 629-636. 3. Колешко В.М., Шевченко А.А., Полюнкова Е.В. Мишени на основе графита для получения углеродных и алмазоподобных пленок // Сборник «Слоистые композиционные материалы» - Волгоград, 2001, с. 156-158. 4. Колешко В.М., Чашинский А.С., Хмурович Н.В. Сенсорные молекулярные микроанализаторы идентификации веществ // Сборник «Теоретическая и прикладная механика» - Мн., 2007, № 22, с. 131-139. 5. Graphene: carbon in two dimensions // Materials Today – 2007, vol. 10, № 1-2. 6. Федосеев Д.В., Новиков Н.В. Алмазы: Справочник – Мн.: Научная думка, 1981. 7. N. Hamada, S. Samada, A. Oshiyama. // Phys. Rev. Lett. - 1992, vol. 68, p. 1579. 8. С.В. Лисенков, И.В. Пономарева, Л.А. Чернозатонский // Физика твердого тела. 2004, т. 46, вып. 8. 9. А.С. Федоров, П.Б. Сорокин, П.В. Аврамов, С.Г. Овчинников «Моделирование свойств, электронной структуры ряда углеродных и неуглеродных нанокластеров и их взаимодействия с легкими элементами» - Электронное издание: Новосибирск, 2006. 10. Елецкий Ф.В. Углеродные нанотрубки и их эмиссионные свойства // УФН - 2002, т. 172, № 4, с. 401. 11. Белов Н.Н. и др. Структура поверхности катодного нароста, образующегося при синтезе фуллеренов // Аэрозоли - т. 4, № 1, 1998 г.. 12. Интернет-источник: <http://www.ktf.krakow.pl/courses/fulleren/g1.htm>. 13. H. Zhu, A. Cao, X. Li et al. // Applied Surface Science 178, 50 (2001). 14. Харрис П. «Углеродные нанотрубки и родственные структуры» - М: 2003. 15. M.S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, Ph. Avouris «Carbon nanotubes: synthesis, structure, properties and application» - изд. Springer: 2001. 16. V.N. Popov, Ph. Lambin «Carbon nanotubes: from basic research to nanotechnology» - изд. Springer: 2006. 17. Колешко В.М., Дейнак Д.А. Электронный язык на поверхностных акустических волнах // Сб. «Теоретическая и прикладная механика» - Мн., 2006, № 21, с. 104-109.

УДК 621.38.049.76

Колешко В.М., Гулай А.В., Гулай В.А.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОКОПЕРЕНОСА В ТУННЕЛЬНЫХ СЕНСОРНЫХ МДМ-НАНОСТРУКТУРАХ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

В качестве чувствительных элементов наносенсоров перспективно применение туннельных МДМ-наноструктур (металл–диэлектрик–металл) на основе сверхтонких диэлектрических пленок, в частности оксидов редкоземельных элементов (РЗЭ) [1]. Указанные тонкие пленки обладают относительно большой удельной емкостью, незначительным температурным коэффициентом емкости, низкими электрическими потерями, высокой термической и химической стойкостью [2]. Экспериментальные методы исследования элементов МДМ-наносенсоров на основе оксидов РЗЭ эффективно дополняются аналитическим моделированием параметров туннельных сенсорных МДМ-наноструктур [3]. С учетом того, что внешнее воздействие на МДМ-наносенсоры проявляется в изменении, прежде всего, переноса заряда в тонкой диэлектрической пленке, представляет значительный интерес моделирование механизмов токопереноса в МДМ-наноструктурах.

Механизмы токопереноса в туннельных МДМ-наноструктурах

Проводимость рассматриваемых тонких пленок оксидов РЗЭ определяется несколькими механизмами, проявление каждого из которых зависит от условий эксперимента. Для разных условий получения и толщин пленок, а также свойств диэлектрических материалов, электрического напряжения и температуры измерения один из механизмов проводимости может стать преобладающим. В связи с этим проанализированы различные механизмы токо-

переноса в сверхтонких (толщиной 2–20 нм) диэлектрических пленках, которые могут быть выявлены на основе исследования вольт-амперных характеристик. Анализ и сопоставление различных механизмов проводимости в окисных пленках (рис. 1) позволяют сделать следующие выводы.

Ток в диэлектрических пленках может осуществляться переносом электронов и дырок или ионов, причем некоторые из процессов токопереноса обладают четкой температурной зависимостью, так как в них участвует в определенной степени термическая активация. Один из рассмотренных эффектов – облегченная электрическим полем эмиссия электронов над барьером на границе раздела металл–диэлектрик (эмиссия Шоттки), дающая вольт-амперную характеристику вида $\ln(I) \sim U^{1/2}$. Облегченное полем термическое возбуждение электронов, захваченных неподвижными положительными зарядами в зону проводимости (эффект Пула–Френкеля) приводит к получению зависимости для тока в виде $\ln(I/U) \sim U^{1/2}$. Проводимость по примесям может осуществляться термически активируемыми переходами электронов между локализованными электронными состояниями. Для прыжковой проводимости характерна вольт-амперная характеристика вида $I \sim U$. При стремлении температуры к нулю энергия активации также стремится к нулю, так как в области низких температур энергетически разрешены лишь переходы между изознергетическими центрами.

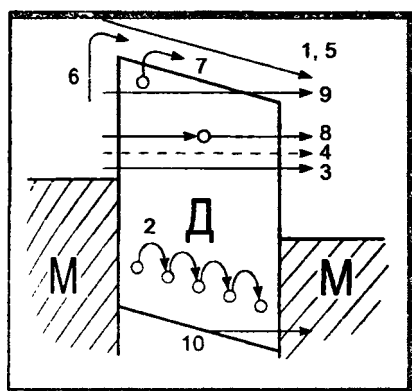


Рисунок 1 - Механизмы проводимости в структуре металл–диэлектрик–металл: 1 – проводимость зоны проводимости; 2 – прыжковая проводимость по примесям; 3 – прямое туннелирование; 4 – ионная проводимость; 5 – ток, ограниченный пространственным зарядом; 6 – эмиссия Шоттки; 7 – эффект Пула–Френкеля; 8 – двухшаговое туннелирование; 9 – проводимость Фаулера–Нордгейма; 10 – межзонное туннелирование

Кроме термически активируемых механизмов токопереноса существуют также электронные процессы, не обладающие сильной температурной зависимостью. Если инжекция носителей из металла в диэлектрик превышает их выход из другого электрода, то осуществляется режим токов, ограниченных пространственным зарядом. Ток, ограниченный пространственным зарядом, нелинейно зависит от приложенного поля: $I \sim U^2$. При достаточно больших полях (когда напряжение выше определенного критического значения) данный режим прекращается, и ток линейно зависит от поля: $I \sim U$.

Ионный ток характеризуется термической активацией, для него характерна зависимость $I \sim U$, причем обычно ионная проводимость незначительна из-за малой подвижности ионов. Так, при высоте барьера $\phi = 1$ эВ снижение температуры с 1200 до 300 К приводит к падению подвижности (отношения дрейфовой скорости и приложенного поля) на тринадцать порядков [4]. В этом случае при напряжении $U = 5$ В среднее время прохождения иона через пленку толщиной 10 нм составляет около $2 \cdot 10^3$ с, то есть значительно больше любых характерных времен. Однако не исключено существенное повышение ионной проводимости диэлектрической пленки, обусловленное свойствами ее материала и параметрами режима ее получения.

При толщинах диэлектрических пленок (в частности, SiO_2) более 4 нм заметные токи начинают протекать только при поле в диэлектрике порядка 10^7 В/см. В этом случае проявляется эффект Фаулера–Нордгейма ($\ln(I/U^2) \sim 1/U$), когда электроны (дырки) попадают в разрешенную зону окисла в результате их туннелирования через треугольный барьер, а затем переносятся по ней. Такой перенос опасен с точки зрения деградации возможностью энергетической релаксации этих электронов непосредственно в слое окисла (рекомбинации но-

сителей зона-зона, а также через уровни внутри запрещенной зоны окисла). В процессе такой релаксации могут выделяться большие порции энергии, что сопровождается генерацией новых дефектов. Напротив, в структурах с более тонким слоем SiO₂ (менее 3 нм) заметный перенос заряда начинается при значительно меньших полях в диэлектрике (например, 106 В/см), когда преобладающим механизмом переноса электронов является прямое туннелирование ($I \sim U$ при низких напряжениях, $\ln(I) \sim U$ – при высоких). Вследствие этого, вплоть до определенного напряжения, соответствующего трансформации туннельного барьера из трапецеидального в треугольный, протекание тока не сопровождается появлением в разрешенной зоне диэлектрика инжектированных носителей.

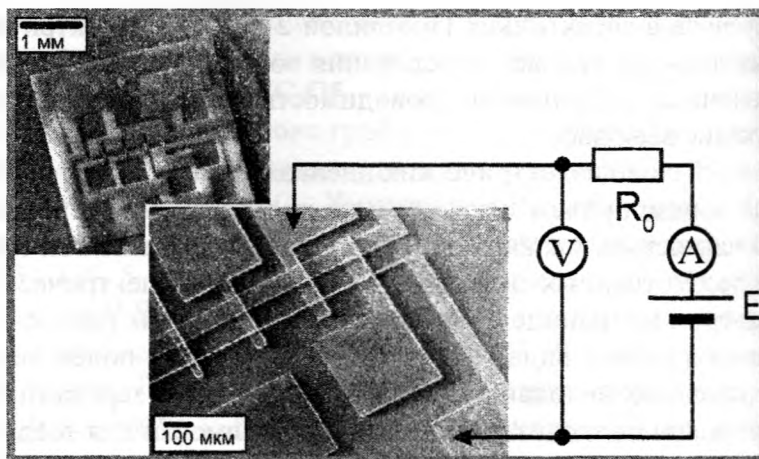


Рисунок 2 - Тестовый модуль и схема измерения вольт-амперных характеристик туннельных сенсорных МДМ-наноструктур: E – источник питания; A – амперметр; V – вольтметр; R₀ – измерительное сопротивление; $R_0 \gg R_{\text{МДМ}}$; R_{МДМ} – сопротивление МДМ-наноструктуры

Получение туннельных сенсорных МДМ-наноструктур

Тонкие аморфные пленки оксидов РЗЭ для туннельных МДМ-наноструктур получали методом реактивного магнетронного распыления металлических мишеней диаметром 95 мм и толщиной 10 мм на постоянном токе в среде аргона и кислорода. В качестве материалов мишеней использовали иттрий ИтМ-1 и гольмий ГоМ-1, а подложками служили кремниевые пластины n-типа проводимости с удельным сопротивлением 4,5 Ом·см, ориентированные по плоскости (100). Для получения пленок выбирали режим работы магнетрона при напряжении 400–440 В, когда поверхность мишени достаточно эффективно очищается от окисного слоя, а структура получаемых пленок соответствует стехиометрии оксида РЗЭ. На основе анализа вольт-амперных характеристик магнетронного разряда давления рабочих газов выбирали равными: аргона – $12,5 \cdot 10^{-1}$ Па, кислорода – $8 \cdot 10^{-3}$ Па.

Исследовали скорость осаждения пленок, их удельное сопротивление и показатель преломления в зависимости от изменения напряжения разряда и температуры подложки. Максимальная величина удельного сопротивления достигается при температуре 573–598 К как для иттрия, так и для гольмия. При использовании оптимального диапазона значений напряжения разряда образуются пленки с максимальной величиной удельного сопротивления более 1013 Ом·см и значениями показателя преломления 1,92 для оксида иттрия и 1,94 для оксида гольмия, характерными для стехиометрических составов. Скорость осаждения пленок в вышеуказанных оптимальных диапазонах технологических параметров составляет: для оксида иттрия – $\sim 3,5$ нм/мин, для оксида гольмия – $\sim 2,5$ нм/мин.

С целью изучения процессов токопереноса в тонких диэлектрических пленках разработана топология тестового модуля и комплект фотошаблонов для получения МДМ-контактов разной площади (рис. 2). Пересекающиеся под прямым углом нижние и верхние проводники МДМ-наноструктур имеют различную ширину: нижние – 10; 100 мкм, верхние – 20; 40; 60; 80; 100 мкм. Разработанный технологический процесс получения тестовых модулей включал операции термического окисления кремниевых пластин, отжига окисных пленок, а затем – напыления тонких пленок алюминия для нижних электродов, после фотолитографии наносили диэлектрические пленки оксидов РЗЭ толщиной 5–20 нм и формировали верхние проводники из алюминия.

Измерение вольт-амперных характеристик МДМ-наноструктур проводилось при увеличении напряжения на электродах от нуля до напряжения пробоя диэлектрической пленки. При толщине слоя оксида иттрия 5; 16 нм и площади МДМ-контакта (1; 2)·10⁻⁵ см² напряженность поля пробоя наноструктур составляет (1–3)·10⁶ В/см. Крутизна вольт-амперной характеристики при толщине пленки оксида иттрия 5 нм в пределах 0–0,2 В постоянна, что подтверждает предположение о линейной зависимости между напряжением и током при малых значениях напряжения, характерном для туннельного механизма проводимости диэлектрика. Повышение напряжения от 0 до 1,2–1,5 В приводит к росту крутизны вольт-амперной характеристики с (1,5–2,5)·10⁻⁸ до (19–22)·10⁻⁸ А/В.

Токоперенос в МДМ-наноструктурах на основе оксидов РЗЭ

Процедура моделирования токопереноса сводится к построению экспериментальной вольт-амперной характеристики, имеющей линейный характер в координатах, соответствующих определенному механизму проводимости диэлектрической пленки, аппроксимации этой характеристики (или ее отдельных участков) методом наименьших квадратов и анализу полученных зависимостей. При малых значениях напряжения ток в МДМ-наноструктурах осуществляется переносом электронов и дырок, при этом проводимость диэлектрика определяется одним из механизмов с термической активацией, дающих вольт-амперные характеристики вида $\ln(I) \sim U^{1/2}$. Один из распространенных эффектов в рассматриваемых многослойных структурах – эмиссия Шоттки, или облегченная электрическим полем эмиссия электронов над барьером на границе раздела металл-диэлектрик. Данный эффект связан с термической активацией и приводит к выражению для тока в виде:

$$I = AT 2 \exp\{-[(\phi/kT) - \alpha(E^{1/2}/kT)]\}, \quad (1)$$

где A – эффективная постоянная Ричардсона; ϕ – высота барьера; E – напряженность приложенного электрического поля; T – абсолютная температура; k – постоянная Больцмана; α – коэффициент [4]. Полученные при измерении вольт-амперных характеристик экспериментальные значения тока, исходя из выражения (1), можно представить следующим образом:

$$\ln(I) = C + BU^{1/2}, \quad (2)$$

где B, C – коэффициенты.

Поскольку на вольт-амперных характеристиках наблюдается перегиб в диапазоне напряжений 0,8–1,2 В, проводили линейную аппроксимацию экспериментальных зависимостей между $\ln(I)$ и $U^{1/2}$ до указанных значений напряжения. Выше этих напряжений наблюдается линейная зависимость между током и напряжением $I \sim U$. Аппроксимация экспериментальных результатов в координатах $\ln(I) \sim U^{1/2}$ для обоих участков вольт-амперной характеристики приведена на рисунке 3. Анализ показал, что определенный произвол в отнесении ближайших к перегибу экспериментальных точек к тому или другому механизму проводи-

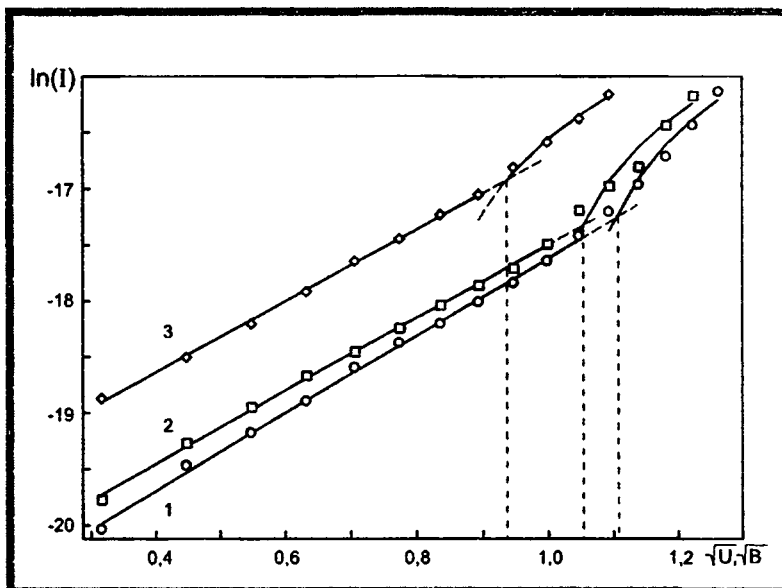


Рисунок 3. Вольт-амперные характеристики туннельных МДМ-наноструктур при разных топологических параметрах (значения I параметра $\ln(I)$ принимались в амперах): 1 – $d = 5$ нм, $S = 10 \cdot 10^{-5}$ см²; 2 – $d = 16$ нм, $S = 10 \cdot 10^{-5}$ см²; 3 – $d = 16$ нм, $S = 2 \cdot 10^{-5}$ см²

мости незначительно сказывается на характере аппроксимирующей кривой и ее параметрах. Из пересечения аппроксимирующих участков для каждой вольт-амперной характеристики были получены критические значения напряжения, при которых происходит переключение преобладающего механизма проводимости (табл. 1). По величине критического напряжения U_k были найдены концентрации носителей заряда на границе раздела металл–диэлектрик N_0 (см-3):

$$N_0 = U_k / (d \cdot 3,5 \cdot 10^{-10}), \quad (3)$$

где d (нм) – толщина диэлектрической пленки [4]. По коэффициентам линейной аппроксимации B , C (2) были определены высота потенциального барьера ϕ структуры металл–диэлектрик–металл и коэффициент α зависимости между напряжением и током для механизма проводимости Шоттки (1).

Таблица 1. Электрофизические параметры туннельной МДМ-наноструктуры

Толщина диэлектрика d , нм	Площадь контакта S , см ²	Критическое Напряжение U_k , В	Концентрация носителей N_0 , см-3	Высота барьера ϕ , эВ	Коэффициент α
5	10-5	1,224	6,995·10 ¹⁷	1,332	0,9753·10 ⁻²⁴
16	10-5	1,108	1,978·10 ¹⁷	1,324	1,6435·10 ⁻²⁴
16	2·10-5	0,873	1,559·10 ¹⁷	1,304	1,6151·10 ⁻²⁴

ЛИТЕРАТУРА

1. Колешко В. М., Гулай А. В., Гулай В. А. Получение туннельных сенсорных МДМ-наноструктур на основе оксидов РЗЭ // Научно-технический международный журнал «Теоретическая и прикладная механика» – 2007. – вып. 22. – с. 287–296; Получение туннельно-тонких пленок оксидов РЗЭ для МДМ-структур // Материалы международной научно-технической конференции «Современные технологии металлообработки», Минск, 14–17 июня 2005 г. – 2005. – с. 117–121.
2. Колешко В. М. и др. Авт. свид. СССР №№ 782604, 860646, 1116753, 1424636, 1626792.
3. Колешко В. М., Гулай А. В., Гулай В. А. Туннельные сенсорные МДМ-наноструктуры: стратегии моделирования // Материалы докладов международной научно-технической конференции «Новые технологии изготовления многокристалльных модулей», Минск–Нарочь, 25–29 сентября 2006 г. / Доклады БГУИР – 2006. – № 5. – с. 97; Моделирование туннельных сенсорных МДМ-наноструктур // Тезисы докладов 2-й международной научно-технической конференции «Сенсорная электроника и микросистемные технологии» (СЭМСТ-2), Одесса, 26–30 июня 2006 г. – 2006. – с. 75.
4. Дирнлей Дж. и др. Электрические явления в аморфных пленках окислов // УФН – 1974. – т. 112, вып. 1. – с. 83–128.

ДОЛЯ СИЛИКАТА НАТРИЯ В ПОРЦИИ ШИХТЫ НА ОСНОВЕ КВАРЦЕВОГО ПЕСКА

Белорусский национальный технический университет
Институт общей и неорганической химии НАН Б
Минск, Беларусь

Конкуренентоспособность и рентабельность пористых проницаемых материалов, в частности, фильтрующих, во многом определяется стоимостью сырья. В этой связи для изготовления пористых проницаемых материалов актуально использование местного природного сырья, для республики Беларусь – кварцевого песка [1].

Технологии изготовления таких фильтроэлементов на основе песка известны и традиционно включают: подготовку шихты [2], прессование и спекание изделий [3]. Зачастую в таких технологиях регулирование структурных характеристик изготавливаемых изделий осуществляется использованием кварцевого песка различных фракций [4], что влечет и корректировку масс добавок в порции шихты [3] от размера частиц порошка песка и толщины слоя связки на поверхности частиц песка.

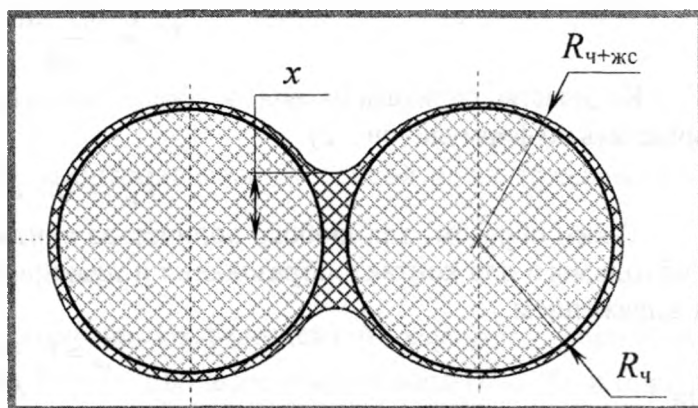


Рисунок 1 - Схема контакта сферических частиц

Следует отметить, что деструкция частиц кварцевого песка увеличивает их общее количество, число контактов частиц, и как следствие, увеличивается количество связующего (традиционно – жидкого стекла) потребного для консолидации песка в пористые тела.

Цель работы – расчет количества безводного силиката натрия, необходимого для формирования контактов при спекании прессовок.

Прежде чем переходить к определению количества связки в составе шихты, рассмотрим пару частиц. Поскольку стохастические корпускулярные структуры не поддаются точному физическому или математическому моделированию [5], на основании оценки реальной формы частиц песка [6] принята модель из 2-х контактирующих сферических частиц радиусом R , контакт которых имеет радиус x , толщина слоя силиката натрия на поверхности равна δ (рис. 1).

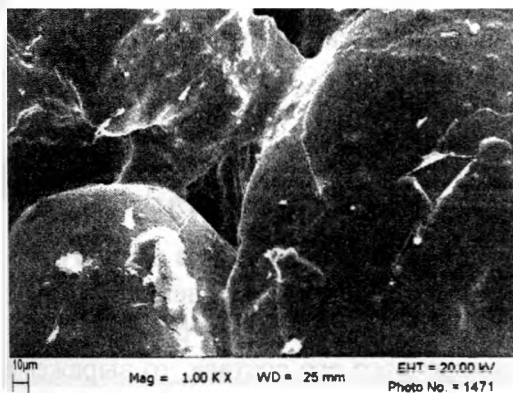


Рис. 2. Вид поверхности спекшихся частиц песка

Модель основана на том, что: 1) частицы сферической формы, одинакового размера, с гладкой поверхностью; 2) взаимное расположение – контакт в точке, изначально связка равномерно распределена по поверхности частиц; 3) контактирующие частицы отдают на формирование контакта равное количество силиката натрия; 4) слой силиката натрия на поверхности частиц истончается до уровня прекращения растекания ($>0,1$ мкм) [7].

Объем материала межчастичного контакта может быть рассчитан по уравнению [7]:

$$V_k = \frac{\pi \cdot x^4}{2R}, \quad (1)$$

Принимая во внимание известное положение о том, что приемлемое качество контакта в пористых материалах достигается при условии: $x = 0,3 \cdot R$ [7], формула (1) для минимально необходимого объема материала $V_{K_{min}}$, образующего контакт, может быть записана в виде:

$$V_{K_{min}} = \frac{0,3^4 \cdot \pi \cdot R^3}{2}. \quad (2)$$

Для перехода к рассмотрению некоторой совокупности частиц, каждая из которых имеет K_α контактов с соседними, оставаясь в рамках принятых допущений, предварительно отметим следующее: наиболее часто реализуем случай, когда $K_\alpha = 6$ [7]

Уравнение (2) для частицы имеющей количество контактов больше одного приобретает вид:

$$V_c = \frac{0,3^4 \pi R^3}{4} \cdot K_\alpha, \quad (3)$$

Количество силиката натрия, остающегося на поверхности частицы после спекания можно вычислить по формуле (рис. 2):

$$V_n = 4\pi \cdot R^2 \cdot \delta. \quad (4)$$

Таким образом, для любого количества контактов одной частицы минимальный объем необходимого для контактообразования и плакирования связующего материала, определяется выражением:

$$V_{cv} = V_c + V_n, \quad (5)$$

или

$$V_{cv} = \frac{\pi \cdot R^2 \cdot (0,3^4 \cdot R \cdot K_\alpha + 16 \cdot \delta)}{4}, \quad (6)$$

Отметим, что на практике удобно пользоваться не абсолютными значениями объемов связующих материалов, вводимых в состав шихты, а их массовой долей по отношению к основному компоненту шихты. Для практического использования предложен коэффициент K_{cv} , характеризующий отношение массы связующего к массе кварцевого песка:

$$K_{cv} = \frac{m_{cv}}{m_{SiO_2}}, \quad (7)$$

где m_{cv} – масса силиката натрия (безводного), кг/м³; m_{SiO_2} – масса кварцевого песка, кг/м³.

С учетом выражения (6), для сферической формы частицы песка получим:

$$K_{cv} = \frac{3}{16} \cdot \frac{(0,3^4 \cdot R \cdot K_\alpha + 16 \cdot \delta) \cdot \rho_{джс}}{R \cdot \rho_{SiO_2}}, \quad (8)$$

где $\rho_{джс}$ – плотность силиката натрия, кг/м³; ρ_{SiO_2} – плотность кварцевого песка, кг/м³.

Технологически введение в состав шихты силиката натрия осуществляют в виде его водного раствора. Поэтому для инженерных расчетов интерес представляет определение величины коэффициента K_{cv} по отношению к жидкому стеклу. Поскольку концентрации раствора могут различаться в зависимости от модуля жидкого стекла и конкретного его состава, то выражение (7) для любого жидкого стекла можно представить в виде:

$$K_{cvl} = K_{cv} \cdot \frac{\rho_{джс}}{\rho_{жс}}, \quad (11)$$

или

$$K_{cв1} = \frac{3}{8} \cdot \frac{(0,3^4 \cdot R \cdot K_a + 16 \cdot \delta) \cdot \rho^2_{ажс}}{R \cdot \rho_{SiO_2} \cdot \rho_{жс}}, \quad (12)$$

Например, для случая $d_ч=150$ мкм, $\delta=1$ мкм, $K_a=6$, $\rho_{ажс}=2180$ кг/м³ и $\rho_{жс}=1440$ кг/м³, $K_{cв1}=0,124$.

Поскольку расчет $K_{cв1}$ выполнен для одной сферической частицы песка, то формула (12) выражает минимальное количество жидкого стекла, которое должно присутствовать в составе шихты для образования качественных контактов между монодисперсными частицами основного компонента (песка) при спекании.

Деструкция частиц кварцевого песка при радиальном обжати увеличивает удельную поверхность порошка [6] и, соответственно, количество связующего, потребное для плакирования частиц. На основании рассева прессованной шихты установлено изменение размера частиц кварцевого песка, что стало основой для расчета удельной поверхности песка для фракций после прессования S_n [6] по уравнению:

$$S_n = k_1 \cdot S_1 + k_2 \cdot S_2 + \dots + k_i \cdot S_i, \quad (13)$$

где k_i – коэффициент, характеризующий отношение масс отсеянной после прессования и исходной фракций песка,

S_i – удельная поверхность частиц фракции.

Для практического использования предложен коэффициент k_s , характеризующий увеличение удельной поверхности кварцевого песка в процессе прессования (рис. 3), и определенный по уравнению:

$$k_s = \frac{S_n}{S_н}, \quad (14)$$

где $S_н$ – удельная поверхность порошка песка до прессования.

В качестве коэффициента пропорциональности масс связующего и жидкого стекла, учитывающего деструкцию частиц, предложен коэффициент K_{CB} , определяемый по уравнению:

$$K_{CB} = K_{cв1} + (K_{cв1} \cdot (k_s - 1)). \quad (15)$$

Попытки реализовать процесс спекания при рассчитанном по формуле (15) количестве жидкого стекла в составе шихты оказались неудачными.

Межчастичные контакты имели размер (радиус) в 4...6 раз меньше расчетного, кроме того, в объеме материала наблюдались соседние частицы, между которыми контакты не образовывались вовсе. Прочность получаемого материала оказывалась явно недостаточной для эксплуатации и, даже, для его испытаний на прочность.

Причин такого явления несколько.

- гранулометрический состав песка неоднороден. В пределах одной фракции размер частиц может различаться в 1,5 и более раза. Это изменяет вид укладки частиц порошка по сравнению с

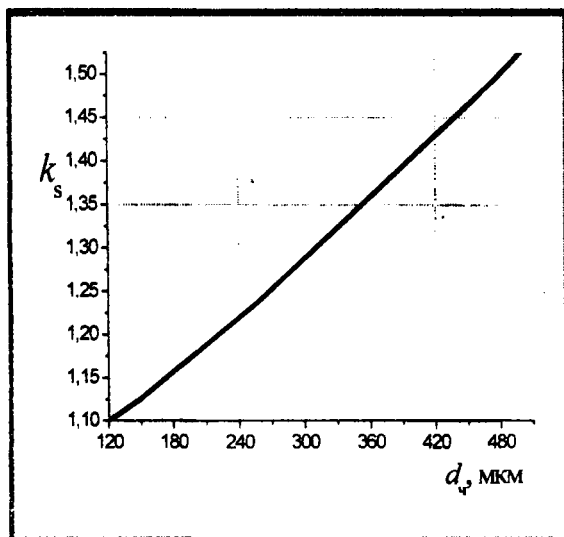


Рисунок 3 - Зависимость увеличения удельной поверхности песка от исходного размера частиц принятым при моделировании: увеличивается количество контактов;

- поверхность частиц песка не является гладкой, поэтому необходимо большее количество связующего материала для их полного плакирования;
- форма частиц отличается от сферической, поэтому площадь их поверхности больше, чем принятой при расчете сферы.
- толщина пленки связующего по поверхности частиц различна и имеет толщину более 1 мкм (см. рис. 2).

По результатам серии экспериментов, проводившихся с пошаговым увеличением содержания жидкого стекла в составе шихты, установлено следующее. Образование качественных контактов в пористом материале происходит при содержании жидкого стекла в 1,6..1,8 раза большем по сравнению с расчетным количеством.

Например, для случая $d_q=150$ мкм, $\delta=1$ мкм, $K_\alpha=6$, $\rho_{джс}=2180$ кг/м³ и $\rho_{жс}=1440$ кг/м³, $k_s=0,07$, $K_{св}=0,124+0,124 \cdot (1,15-1)=0,142$. Экспериментальное значение отношения массы песка и жидкого стекла случая $d_q=150$ мкм = 0,24.

Таким образом, для практического использования может быть предложена следующая зависимость:

$$K_{сд} = 169 \cdot K_{св}, \quad (16)$$

или

$$K_{сд} = 169 \cdot \left(\frac{3}{16} \cdot \frac{(0,3^4 \cdot R \cdot K_\alpha + 16 \cdot \delta) \cdot \rho_{джс}^2}{R \cdot \rho_{SiO_2} \cdot \rho_{жс}} + \frac{3}{16} \cdot \frac{(0,3^4 \cdot R \cdot K_\alpha + 16 \cdot \delta) \cdot \rho_{джс}^2}{R \cdot \rho_{SiO_2} \cdot \rho_{жс}} \cdot (k_s - 1) \right). \quad (17)$$

Получено уравнение определения доли связующего в порции шихты, учитывающее размер частиц песка и толщину пленки на поверхности частиц. Эффективность уравнения подтверждена экспериментально. Уравнение рекомендовано к практическому применению.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хомич, П.Д. Кварцевые пески Беларуси, их использование в промышленности / П.Д. Хомич, Л.О. Острогорова, Р.П. Янюк // Горный журнал. – 2003. – № 7. – С. 18-19.
2. Витязь, П.А.. Пористые порошковые материалы и изделия из них / П.А. Витязь, В.М. Капцевич, В.К. Шелег; под ред. П.А. Витязя – Мн: Высш. шк., 1987. – 162 с.
3. Петюшик Е.Е. Шихта на основе природного кварца для получения спеченных фильтрующих элементов / Е.Е. Петюшик, С.М. Азаров, А.А. Дробыш // Проблемы инженерно-педагогического образования Республики Беларусь: Материалы междунар. научно-практ. конф. – Минск: БНТУ, 21-22 октября 2004 г. – С. 221-223.
4. Смирнова, К.А. Пористая керамика для фильтрации и аэрации / К.А. Смирнова. – М.: Металлургия, – 1968. – 148 с.
5. Плаченков, Т.Г. Порометрия / Т.Г. Плаченков, С.Д. Колосенцев. — Л.: Химия, 1988. — 176 с.
6. Петюшик Е.Е. Деструкция порошков природного кварца при радиальном обжати / Е.Е. Петюшик, С.М. Азаров, А.А. Дробыш, Д.В. Макачук // Порошковая металлургия. – Мн., 2006.– Вып. 29. – С. 342 – 347.
7. Гегузин, Я. Е. Физика спекания / Я.Е. Гегузин. – М.: Наука, 1984. – 312 с.

ДЕФОРМАЦИОННЫЙ МЕХАНИЗМ УПЛОТНЕНИЯ ПОРОШКОВОГО ТЕЛА

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Установление зависимости плотности порошкового тела от давления прессования является основной задачей теории процесса уплотнения порошкового тела, т.к. на основе решения этой задачи возможна научно обоснованная разработка технологического процесса прессования, являющегося одним из основных технологических процессов порошковой металлургии.

Для решения этой задачи, в первую очередь, необходимо определить деформационный механизм уплотнения порошкового тела. Данный механизм должен учитывать все три компоненты деформации порошкового тела в процессе уплотнения: упругую, пластическую и структурную, межчастичную, наличие которой и отличает деформацию порошкового тела от деформации компактного тела.

При дальнейшем анализе будем полагать, что структура порошкового тела не является геометрически правильной, взаимное расположение частиц является равновероятным, все направления в порошковом теле равноправны. Каждая частица порошкового тела, как отдельное компактное тело, подчиняется всем законам классической механики.

Две контактирующие частицы в окрестностях рассматриваемого контакта, ограничены некоторыми, в общем случае, произвольными криволинейными поверхностями, преимущественно выпуклой формы. Даже в том случае, когда частица порошкового тела в окрестностях рассматриваемого контакта имеет сложную, разветвленную, дендритную форму она может быть представлена в виде модельной, геометрические закономерности деформации которой, будут достаточно близкими к реальной. Таким образом, форма поверхности частицы в окрестностях рассматриваемого контакта, всегда с достаточным приближением, может быть описана математической зависимостью, характер которой будет претерпевать изменения в процессе деформации. Это изменение может быть записано в виде следующей функции:

$$W_k = f(S_{kc}), \quad (1)$$

где W_k и S_{kc} – соответственно величины нормальной деформации и размера площадки контакта.

Величину площади сечения S_z приконтактной области частицы на участке между площадкой контакта S_z рассматриваемый момент деформации S_{kc} и предельным ее значением S_{kc} при стопроцентной плотности прессовки можно представить в следующем виде:

$$S_z = a_1 + a_2 \left(\frac{z}{h_n} \right)^n. \quad (2)$$

Форма записи выражения (2) позволяет описать функциональную зависимость величины площади сечения S_z приконтактной области частицы произвольной конфигурации от координаты «Z» в самом общем случае геометрии этой области, в произвольный момент контактной деформации.

a_1, a_2 – постоянные величины, определяемые из граничных условий;

h_n – высота слоя приконтактной области частицы, охваченной пластической деформацией.

Величина h_n – представляет собой расстояние между площадкой контакта S_{kc} и ее предельным значением S_{kc} . Изменяя величину показателя степени n можно описать

различную форму приконтактной области частицы. Граничные условия для выражения (2) могут быть записаны в следующем виде:

$$S_z|_{z=0} = S_{kc}, S_z|_{z=h_n} = S_{kk}. \quad (3)$$

Из совместного рассмотрения выражения (2) и граничных условий (3), следует, что:

$$a_1 = S_{kc}; a_2 = S_{kk} - S_{kc}. \quad (4)$$

Подставив найденные значения постоянных (4) в выражение (2), получим:

$$S_z = S_{kc} + (S_{kk} - S_{kc}) \left(\frac{z}{h_n}\right)^n. \quad (5)$$

В исходный момент контактной деформации, когда $S_{kc} = 0$, $h_n = h_{n0}$ выражение (5) принимает следующий вид:

$$S_z = S_{kk} \left(\frac{z}{h_{n0}}\right)^n, \quad (6)$$

где h_{n0} – начальная высота приконтактной области частицы.

Объем рассматриваемой приконтактной области частицы V_n может быть определен следующим образом:

$$V_n = \int_0^{h_n} S_z dz = \int_0^{h_n} \left[S_{kc} + (S_{kk} - S_{kc}) \left(\frac{z}{h_n}\right)^n \right] dz. \quad (7)$$

Интегрируя выражение (7) в указанных пределах, находим:

$$V_n = \frac{S_{kk} + nS_{kc}}{n+1} h_n. \quad (8)$$

Первоначальный объем рассматриваемой приконтактной области частицы V_{n0} при $S_{kc} = 0$, $h_n = h_{n0}$ может быть определен при помощи выражения (6):

$$V_{n0} = \int_0^{h_{n0}} S_z dz = S_{kc} \int_0^{h_{n0}} \left(\frac{z}{h_{n0}}\right)^n dz = \frac{S_{kc} h_{n0}}{n+1}. \quad (9)$$

Полагая, что в области активной пластической деформации объем материала частицы в приконтактной области остается постоянным, получим:

$$V_n = V_{n0},$$

$$\frac{S_{kk} + nS_{kc}}{n+1} h_n = \frac{S_{kc} h_{n0}}{n+1}. \quad (10)$$

Условие несжимаемости материала (10) может быть записано в следующем виде:

$$S_{kk}(h_{n0} - h_n) = nS_{kc} h_n. \quad (11)$$

Но разность $h_{n0} - h_n$ представляет собой величину нормальной контактной деформации W_k

$$W_k = h_{n0} - h_n. \quad (12)$$

Из рассмотрения выражения (12) следует, что

$$h_n = h_{n0} - W_k. \quad (13)$$

С учетом соотношений (12) и (13) выражение (11) может быть записано в следующем виде:

$$S_{kk} W_k = nS_{kc}(h_{n0} - W_k). \quad (14)$$

Запишем далее выражение (14) в следующем виде:

$$\frac{S_{kc}}{S_{kk}} = \frac{W_k}{n(h_{n0} - W_k)}. \quad (15)$$

Рассматривая совместно выражение (15) и выражения (2.69) и (2.70) работы [1], находим:

$$\frac{\alpha_k}{\nu^2} = \frac{W_k}{n(h_{n0} - W_k)}, \quad (16)$$

где α_k – относительное контактное сечение прессовки;

ν – относительная плотность прессовки в рассматриваемый момент процесса уплотнения.

Из совместного рассмотрения соотношения (1) и выражения (2.74) работы [1], находим:

$$W_k = \frac{\Phi_o \cos \varphi}{2\Phi} a_{cp} \ln \beta_o \nu, \quad (17)$$

где β_o – исходная величина относительного объема прессовки.

Очевидно, что величина h_{n0} – прямо пропорциональна среднестатистическому размеру частиц порошка a_{cp} :

$$h_{n0} = \Phi_3 a_{cp}, \quad (18)$$

где Φ_3 – коэффициент пропорциональности.

Среднестатистическая величина сближения центров частиц порошка по нормам связана со среднестатистической величиной нормальной контактной деформации соотношением (2.77) работы [1]

$$\delta_{kc} = 2W_k. \quad (19)$$

Рассматривая совместно выражения (17), (18) и (19), получим:

$$\frac{W_k}{h_{n0}} = \frac{\delta_{kc}}{2h_{n0}} = \frac{\Phi_o \cos \varphi}{2\Phi\Phi_3} \ln \beta_o \nu = a_3 \ln \beta_o \nu, \quad (20)$$

где a_3 – коэффициент пропорциональности.

Подставив соотношение (20) в выражение (16), находим:

$$\frac{\alpha_k}{\nu^2} = \frac{a_3 \ln \beta_o \nu}{n(1 - a_3 \ln \beta_o \nu)}. \quad (21)$$

«Критическое» граничное условие для выражения (21), может быть представлено в следующем виде:

$$\alpha_k |_{\nu=1} = 1. \quad (22)$$

С учетом граничного условия (22) выражение (21) принимает следующий вид:

$$\frac{a_3 \ln \beta_o}{n(1 - a_3 \ln \beta_o)} = 1. \quad (23)$$

Решая равенство (23) относительно величины коэффициента пропорциональности a_3 , получим:

$$a_3 = \frac{n}{(n+1) \ln \beta_o}. \quad (24)$$

Подставив найденное значение a_3 в выражение (21) после ряда преобразований и упрощений, находим:

$$\alpha_k = \nu^2 \frac{\ln \beta_o \nu}{\ln \beta_o \beta^n}. \quad (25)$$

Выражение (25) устанавливает зависимость величины относительного контактного сечения α_k от относительной плотности прессовки. Определяющей деформационный механизм уплотнения порошкового тела, включающего в себя все три возможные компоненты деформации: упругую, пластическую и структурную или межчастичную. От выражения (2.83) работы [1] выражение (25) отличается наличием показателя

теля степени n , учитывающего влияние реальной формы приконтактной области частицы порошка.

Выражение (25) устанавливает зависимость величины относительного контактного сечения α_k от относительной плотности прессовки. Определяющей деформационный механизм уплотнения порошкового тела, включающего в себя все три возможные компоненты деформации: упругую, пластическую и структурную или межчастичную. От выражения (2.83) работы [1] выражение (25) отличается наличием показателя степени n , учитывающего влияние реальной формы приконтактной области частицы порошка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г.М.Жданович. Сопrotивление порошковых материалов. 1999.-с.46. ПК ООО «Беспринт» г. Минск. 2. М.Ю.Бальшин. Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна. 1972. с.63. Металлургия. Москва.

УДК 621.313.04

Аваков С.М.

ОБНАРУЖЕНИЕ ИЗОЛИРОВАННЫХ ДЕФЕКТОВ ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОМ КОНТРОЛЕ ОРИГИНАЛОВ ТОПОЛОГИИ НА ФОТОШАБЛОНАХ

*Государственный научно-производственный концерн
точного машиностроения «Планар»*

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость точного определения вероятности обнаружения дефектов заданного размера обусловлена двумя причинами. Во первых, необходимо гарантировать определённую вероятность обнаружения дефектов на уровне порога обнаружения установки и, тем самым, подтверждать один из её основных параметров, а, во-вторых, необходимо определять обнаружительную способность для дефектов, имеющих размеры, меньшие порога обнаружения.

Так например, для установки, имеющей порог обнаружения на уровне 0,25 мкм с вероятностью 0,95, необходимо, с одной стороны, подтвердить эту вероятность для дефектов с размерами 0,25 мкм, а, с другой стороны, определить вероятность обнаружения дефектов с меньшими размерами - 0,20 мкм, 0,15 мкм, которые обнаруживаются, соответственно, с меньшей вероятностью. Определение этих вероятностей является важным потому, что при формировании ведомости дефектов, после завершения автоматического контроля, в неё включаются не только дефекты с заданными размерами, но и дефекты с меньшими размерами, которые, как правило, не являются критичными. При этом дефекты с размерами проекций на координатные оси, меньшими размера элемента разложения изображения (пиксела), идентифицируются как дефекты размером один пиксел. Для уточнения этих размеров используется специальный режим повторного сканирования обнаруженных дефектов с высоким интерполяционным разрешением, который позволяет отфильтровывать не критичные дефекты за счёт получения более точных оценок их размеров. Несмотря на то, что повышение обнаружительной способности оборудования является одной из основных задач на пути его совершенствования, в данном случае это пагубно влияет на характеристики системы, т.к. дефекты, меньшие порога обнаружения, считаются ложными и ухудшают параметр системы, связанный с вероятностью обнаружения ложных дефектов. Количество таких дефектов может оказаться существенным на общем фоне ложных дефектов различных типов (рис.1).

Снижение количества ложных дефектов является одной из основных целей при создании оборудования для автоматического контроля оригиналов топологии [1,2], что определяет

актуальность исследования причин появления ложных дефектов и методов определения вероятности их появления.

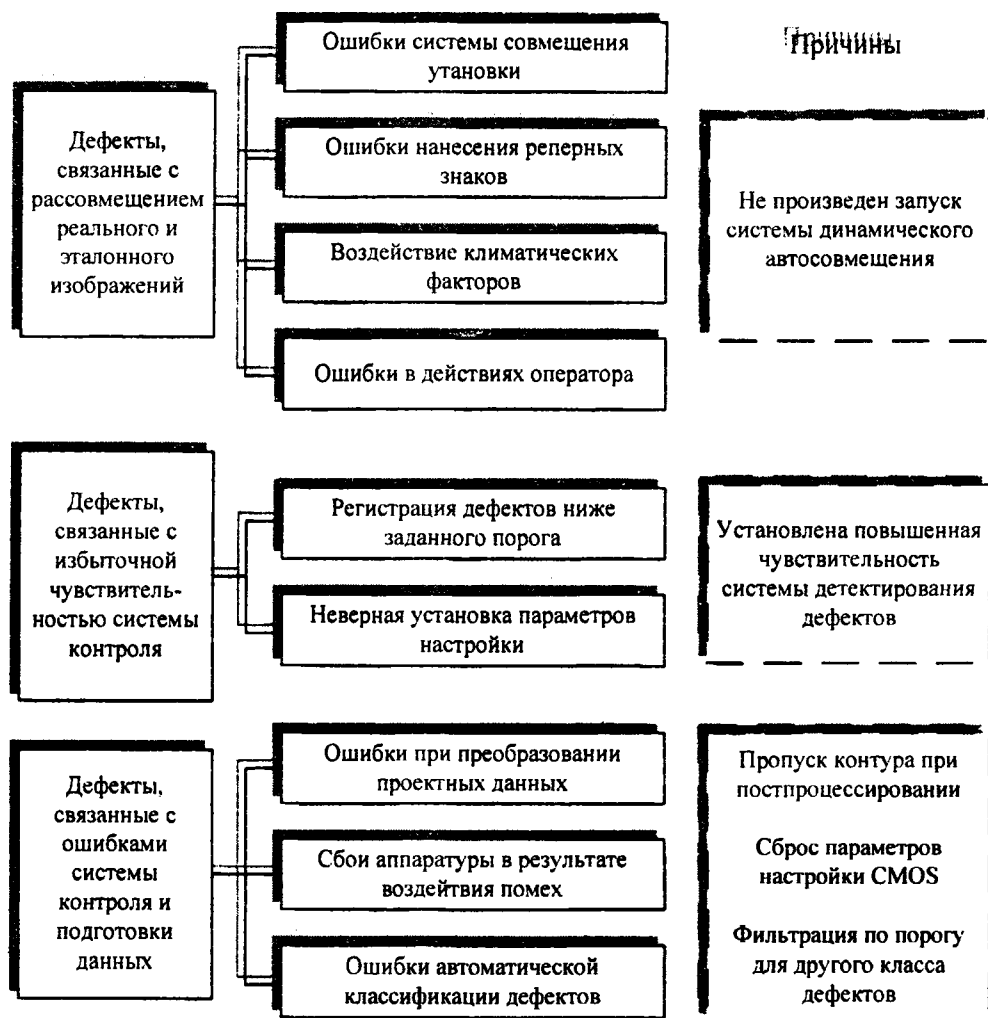


Рис. 1. Классификация источников происхождения ложных дефектов

При определении вероятностей обнаружения дефектов различного размера приходится производить дорогостоящих испытания большого объёма, поэтому важным является определение точного числа испытаний, гарантирующего определение этих вероятностей.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБНАРУЖИТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ

Возможность обнаружения дефектов с размерами, меньшими порога обнаружения, обусловлена тем, что разрешение оптической системы установки автоматического контроля топологии для элементов с размерами, меньшими паспортного разрешения, меняется плавно, без порогового эффекта. В табл. 1 приведены частотно-контрастные характеристики (ЧКХ) двух объективов – с разрешением 0,5 мкм, апертурой $NA=0,5$ и с разрешением 0,25 мкм, апертурой $NA=0,75$. Из таблицы видно, что элементы изображения с размерами, меньшими, чем разрешение объектива, воспроизводятся с меньшим контрастом, что до определённого предела не мешает их обнаружению при автоматическом контроле топологии при определённой настройке системы детектирования дефектов.

Например, объектив с апертурой $NA=0,5$ разрешает элементы до 0,3 мкм включительно, хотя и с меньшим контрастом. С учётом спектральной чувствительности используемой ПЗС это приводит к обнаружению при определённых вариантах совмещения сетки дискретизации установки с координатной сеткой фотошаблона дефектов с размерами до 0,35 мкм. Примеры регистрации дефектов с размерами меньше порога обнаружения показаны на рис. 2.

Для объектива с апертурой $NA=0,75$ с некоторой вероятностью обнаруживаются дефекты с размерами до 0,19 мкм. Аналогичные соотношения имеют место и для объектива с

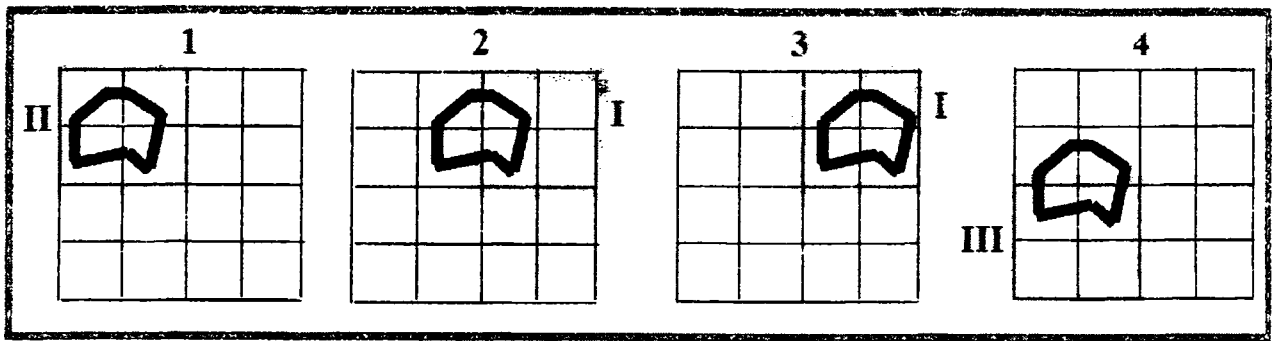


Рисунок 2 - Примеры регистрации дефектов с размерами меньше порога обнаружения

разрешением 0,15мкм, но в силу отсутствия экспериментальных результатов эти данные не приводятся.

При испытаниях оборудования для автоматического контроля топологии одной из основных является задача экспериментального определения обнаружительной способности. Для этого обычно производится некоторое количество циклов сканирования специально изготовленного и аттестованного тестового шаблона, в результате чего подтверждается вероятность обнаружения дефектов разных типов и размеров. Количество циклов сканирования при этом определяется, как правило, эвристическим путём. Наиболее сложным в этом случае является определение вероятности обнаружения дефектов с линейными размерами, соответствующими границе чувствительности установки. Предлагаемая методика определения вероятности обнаружения таких дефектов, основана на точном расчёте необходимого количества циклов сканирования для подтверждения чувствительности с заданной вероятностью. Следует отметить, что при этом необходимо уточнение определения дефекта заданного размера. Необходимость такого уточнения обусловлена тем, что обнаружительная способность установки автоматического контроля топологии зависит не только от линейных размеров дефекта, но и от его пространственного распределения, вследствие чего определение размера дефекта и, соответственно, размера минимального обнаруживаемого дефекта только через линейные размеры является неоднозначным. Этот вопрос решается путём стандартизации формы дефектов тестового шаблона и определения обнаружительной способности установки для дефектов фиксированной формы.

Таблица 1. Частотно-контрастные характеристики объективов установок контроля топологии

Оптическая система ЭМ-6029Б NA=0,5; $\beta=25X$; Ског=0,8; $\lambda=546\text{нм}$					
Минимальный элемент (нм)	ЧКХ без-абerraц. об-ва	ЧКХ реальной системы	Контраст системы	Контраст фото-приемника	Результир. контраст
500	0,40	0,35	0,80	0,40	0,30
450	0,30	0,30	0,70	0,40	0,30
400	0,20	0,16	0,60	0,40	0,25
350	0,10	0,10	0,30	0,30	0,10
300	0,04	0,04	0,10	0,30	0,03
200	0,02	0,01	0,00	0,30	0,00
Оптическая система ЭМ-6329 NA=0,75; $\beta=52X$; Ског=0,8; $\lambda=436\text{нм}$					
500	0,60	0,57	0,90	0,30	0,30
400	0,50	0,45	0,80	0,30	0,25
350	0,40	0,35	0,70	0,30	0,20
300	0,30	0,25	0,60	0,30	0,20
200	0,20	0,17	0,50	0,30	0,15
170	0,10	0,10	0,30	0,20	0,03
150	0,05	0,04	0,00	0,10	0,00

Испытания на обнаружительную способность проводятся по следующей схеме:

1. Подтверждение обнаружительной способности для минимального дефекта, обнаруживаемого со 100% вероятностью.

2. Подтверждение обнаружительной способности для минимального дефекта, размером "d", обнаруживаемого с вероятностью 95%. При этом d соответствует порогу обнаружения.

Последовательное определение вероятностей обнаружения дефектов с размерами, меньшими порога обнаружения. При этом последовательно рассматриваются дефекты, начиная с дефектов размером $d - \Delta d$, с шагом Δd , заканчивая дефектами, имеющими контраст 10%. Шаг Δd может быть выбран, например, равным 50 нм.

Предложенная методика определения вероятности обнаружения дефектов основан на использовании двух теорем, представляющих частные варианты закона больших чисел. Этот метод состоит в следующем.

Процесс последовательных сканирований участка тестового шаблона с аттестованными дефектами рассматривается как последовательность из n независимых испытаний (событий A) с двумя исходами каждое («успехом» и «неудачей»). При этом вероятности исходов не изменяются от испытания к испытанию. Такие испытания, как известно, называются испытаниями Бернулли. Соответственно, если пренебречь погрешностью перемещения координатного стола в точку начала сканирования, то независимыми можно считать и испытания, состоящие в сканировании каждого из группы дефектов одинаковой формы и размера. При этом количество циклов сканирования может быть уменьшено в "к" раз, где "к" – число однотипных дефектов на тестовом шаблоне.

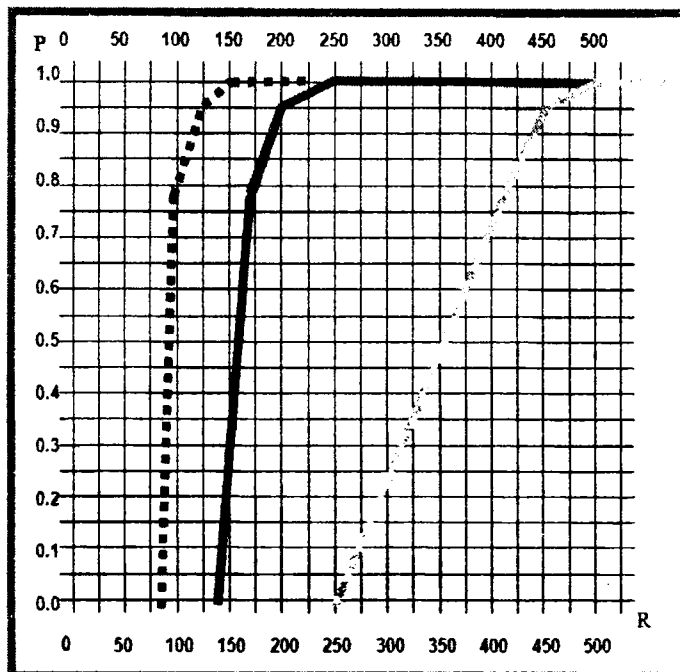


Рисунок 3 - Зависимость вероятности регистрации дефектов от порога обнаружения

Согласно следствию из теоремы Бернулли (при неограниченном увеличении числа опытов n частота события A сходится по вероятности к его вероятности P) [3, 4], вероятность обнаружения дефектов связана с частотой обнаружения дефектов следующим образом:

$$P(|m/n - p| < \epsilon) \geq 1 - p \cdot q / n \cdot \epsilon^2,$$

где P - вероятность нахождения вероятности обнаружения в интервале $\pm \epsilon$; m - число благоприятных исходов; n - общее число циклов сканирования; p - вероятность обнаружения дефектов; q - вероятность необнаружения дефектов; ϵ - размер доверительного интервала; m/n - частота события: «Обнаружение дефекта».

Для того, чтобы с вероятностью не меньшей, чем P (например, 0,95) можно было утверждать, что вероятность обнаружения минимального дефекта составляет p (например, 0,95), должно выполняться следующее неравенство:

$$1 - p \cdot q / n \cdot \epsilon^2 \geq 0,95, \text{ и, соответственно, } n \geq 20 \cdot p \cdot q / \epsilon^2 = 0,95 / \epsilon^2.$$

Отсюда получаем соответствие между значениями расхождения частоты и вероятности обнаружения ϵ и необходимым количеством циклов сканирования фотошаблонов, приведенное в табл.2. Например, для $\epsilon = 0,2$ должно быть выполнено 24 цикла сканирования (при наличии на тестовом шаблоне групп однотипных аттестованных дефектов количество

циклов сканирования может быть уменьшено в соответствующее число раз), а для $\epsilon = 0,005$ соответственно 38000.

При этом дефект должен быть обнаружен соответственно не менее 23-х и 38000 раз. Нужно отметить, что если воспользоваться теоремой Муавра-Лапласа, то можно получить существенно меньшие приближенные значения для числа циклов испытаний [4].

При необходимости подтверждения вероятностей P_1, P_2, \dots, P_n обнаружения дефектов различных размеров S_1, S_2, \dots, S_n , можно уменьшить количество испытаний, если использовать теорему Пуассона - распространение теоремы Бернулли на случай последовательности независимых испытаний, где вероятность появления события может зависеть от номера испытания.

Пусть эта вероятность для k -го испытания равна $P_k, k=1,2,3,\dots,n$, и пусть $P'=(P_1+P_2+\dots+P_n)/n$, тогда согласно следствию из теоремы Пуассона (Если производится n независимых опытов и вероятность появления события A в i -м опыте равна P_i , то при увеличении n частота события A сходится по вероятности к среднему арифметическому вероятностей P_i) [3, 4]:

$$P(|m/n - P'| < \epsilon) \geq 1 - P' \cdot Q^n / n \cdot \epsilon^2.$$

Представленный метод, использован для подтверждения обнаружительной способности установок контроля топологии методом сравнения с проектными данными ЭМ-6029В и ЭМ-6329 для дефектов типа островков и прокол.

График, показывающий зависимость вероятности обнаружения дефектов типа островков и прокол от размеров дефектов для установок ЭМ-6029Б и ЭМ-6329 представлен на рис. 3.

Таблица 2 . Необходимое количество независимых испытаний

№ п/п	Величина рассогласования ϵ	Количество циклов n
1	0,005	38000
2	0,01	9500
3	0,05	380
4	0,1	95
5	0,2	24

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для уменьшения влияния ложных и некритичных дефектов необходимо определить вероятности обнаружения дефектов, имеющих размеры ниже порога обнаружения. Имея значения этих вероятностей, с одной стороны, и зная насколько вероятным является появление дефектов подобного рода, с другой стороны, можно выбрать оптимальные параметры системы фильтрации ложных дефектов. В частности, можно определять необходимость выполнения дополнительного цикла сканирования в режиме с высоким интерполяционным разрешением для уточнения размеров дефектов.

Точное определение вероятности обнаружения дефектов с размерами, меньшими порога обнаружения установки, позволяет оптимизировать процесс фильтрации ложных дефектов типа прокол и островков при автоматическом контроле топологии, а также повысить воспроизводимость контроля.

Предложенная методика позволяет точно определить количество испытаний, необходимых для подтверждения вероятности обнаружения дефектов при автоматическом контроле топологии и может использоваться при разработке программ и методик испытаний оборудования для автоматического контроля топологии СБИС и других изделий электронной техники.

ЛИТЕРАТУРА

1. W.W.Volk, W.H.Broadbent, H.I.Garsia, S.G.Watson, P.M.Lim, W.E.Rush, "Multi-beam high resolution die-to-database reticle inspection", EMC2002-Januar 15-16 Munich, Germany-pp.163-173. 2. C.C.Hung, C.S.Yoo, C.H.Lin, W.Volk, S.Kanna, S.Biellak, D.Wang, "Multi-Beam High Resolution UV Wavelength Reticle Inspection." Yield Management. Vol.3, Issue 2 Spring 2001. pp.68-75. 3. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. Москва, «Высшая школа», 2001.- 575с.

УДК 539.2+621.385.833.2

*Трушко А.В., Чижик С.А., Кузнецова Т.А., Шкадаревич А.П.,
Курганович А.М., Городкин Г.Р., Глеб Л.К.*

КОНТРОЛЬ ШЕРОХОВАТОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

*Белорусский Национальный Технический Университет,
Минск, Беларусь
Институт тепло и массообмена им. Лыкова НАН Беларуси,
Минск, Беларусь
НПРУП ЛЭМТ, БелОМО
Минск, Беларусь*

Высокие функциональные характеристики изделий современной оптики, в частности лазерной, во многом зависят от качества рабочих оптических поверхностей и их устойчивости в процессе эксплуатации. Важным характеристическим свойством оптических стекол является их шероховатость, значение которой необходимо контролировать при подборе режимов технологической обработки оптических поверхностей с целью улучшения их функциональных качеств.

Нанометровый диапазон шероховатости, достигаемый при обработке оптических поверхностей, требует использования высокоточных методов контроля. Традиционно шероховатость поверхностей оптических стекол определялась методом рентгеновской рефлектометрии [1]. Дополнительные возможности открываются с применением атомно-силовой микроскопии (АСМ) [2,3], которая позволяет непосредственно измерять шероховатость нанометрового диапазона, как по высоте, так и по латеральным размерам. Также АСМ позволяет контролировать единичные дефекты рельефа, которые важны при обеспечении работоспособности оптически деталей.

Одним из перспективных видов обработки оптических поверхностей является магнитореологическая полировальная технология. В работе приведены результаты сравнения полученных методом АСМ данных измерения шероховатостей поверхностей оптических призм после финишной обработки в АО ЛОМО и после магнитореологической полировки, произведенной в ИТМО НАН Беларуси.

Объект и метод исследования

Исходные оптические призмы изготавливались Санкт-петербургским оптико-механическим объединением (ЛОМО). Для уменьшения шероховатости поверхности исследуемые детали подвергались магнитореологической полировке суспензиями различного состава в ИТМО НАН Беларуси. Рассматривались следующие образцы:

- исходная поверхность после финишной обработки в АО ЛОМО;
- поверхности обработанные по магнитореологической полировальной технологии суспензиями 1, 2 и 3;
- поверхность после нанесения многослойных покрытий с чередованием слоев оксида кремния и оксида циркония;
- поверхность после последующей эксплуатации в лазерном резонаторе.

При финишной обработке использовались следующие составы суспензий:

- суспензия №1 на основе карбонильного железа EW (фирмы BASF) и абразива оксида церия (3 мкм.) CrO₂;
- суспензия №2 на основе карбонильного железа P10 (Россия) и оксида церия такой же фракции как и №1;

– суспензия №3 на основе карбонильного железа EW фирмы BASF и абразива в виде микропорошка алмаза (1 – 3 мкм).

Шероховатость исследуемых поверхностей оценивалась при помощи атомно-силового микроскопа NT-206 (ОДО «Микротестмашины», Беларусь) [4]. Особенности применения АСМ в рассматриваемой задаче заключаются в необходимости осуществлять неразрушающий контроль дорогостоящих изделий оптики с высокими габаритными размерами (высота более 20 мм) без их разборки. Это потребовало оснастить базовую модель АСМ NT-206 дополнительной приставкой, увеличивающей расстояние между столиком-держателем образца и зондом АСМ. Выбор дефектных участков поверхности для их последующего сканирования производился с помощью оптической системы и микропозиционера NT-206 [5]. Сканирование производилось в контактном режиме с использованием зондов (MicroMasch Co., Россия). Визуализация и обработка результатов измерения методом АСМ осуществлялась с помощью программного обеспечения Surface Explorer [6].

Магнитореологическая обработка образцов

Магнитореологическая полировальная технология (МПТ) – контролируемый компьютером процесс финишного полирования деталей, при котором получается высокая геометрическая точность поверхности с одновременным высоким качеством этой поверхности.

Оптическая деталь устанавливается на определенном расстоянии от движущегося рабочего колеса (инструмента) таким образом, чтобы поверхность детали и поверхность колеса сходились в точку. Источник магнитного поля, расположенный внутри движущегося колеса, генерирует неоднородное магнитное поле с градиентом в зоне обработки, направленным по нормали к поверхности колеса. Магнитореологическая полировальная жидкость (МРЖ) подается на колесо с помощью системы гидравлической подачи в зону воздействия магнитного поля, т.е. в область полюсных наконечников магнита. МРЖ под воздействием неоднородного градиентного магнитного поля прижимается к поверхности вращающегося колеса, приобретая вид узкой дорожки, и движется вместе с колесом с определенной скоростью. При этом в точке соприкосновения дорожки с поверхностью детали получается точечный (зональный) полировальный инструмент. В зоне контакта МРЖ с деталью воздействует магнитное поле, под влиянием которого жидкость переходит в пластическое состояние. При этом МРЖ разделяется на два слоя, твердообразное ядро и разжиженная прослойка (состоящая из несущей жидкости и абразивных частиц), которая находится между ядром и поверхностью оптической детали.

Специальная компьютерная программа с помощью исполнительных устройств перемещает вращающуюся деталь относительно полировальной зоны по определенному алгоритму, который дает возможность получать сверхпрецизионные детали.

Получаемый полировальный инструмент обладает постоянными физическими и полирующими свойствами, поскольку его стабильность зависит от вязкости МРЖ, которая контролируется и поддерживается на постоянном уровне системой мониторинга. Полирующие способности инструмента не изменяются в течении длительного промежутка времени.

Оценка шероховатостей поверхности

Определялись следующие параметры шероховатости для участка поверхности, отображаемого АСМ-изображением:

\bar{z} средняя высота АСМ-изображения (практически - положение среднеарифметической горизонтальной плоскости для всей поверхности на текущей вертикальной шкале высот АСМ-изображения)

$$\bar{z} = \frac{1}{N_x \cdot N_y} \sum_{j=0}^{N_y-1} \sum_{i=0}^{N_x-1} z_{i,j},$$

R_a - среднеарифметическая шероховатость

$$R_a = \frac{1}{N_x \cdot N_y} \sum_{j=0}^{N_y-1} \sum_{i=0}^{N_x-1} |z_{i,j} - \bar{z}|,$$

R_q - среднеквадратичное отклонение

$$R_q = \left(\frac{1}{N_x \cdot N_y} \sum_{j=0}^{N_x-1} \sum_{i=0}^{N_y-1} (Z_{i,j} - \bar{Z})^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

R_{sk} - асимметрия распределения высот

$$R_{sk} = \left(\frac{1}{N_x \cdot N_y \cdot R_q^3} \sum_{j=0}^{N_x-1} \sum_{i=0}^{N_y-1} (Z_{i,j} - \bar{Z})^3 \right),$$

R_{ku} - эксцесс распределения высот

$$R_{ku} = \left(\frac{1}{N_x \cdot N_y \cdot R_q^4} \sum_{j=0}^{N_x-1} \sum_{i=0}^{N_y-1} (Z_{i,j} - \bar{Z})^4 \right).$$

В приведенных формулах N_x – количество столбцов, а N_y – количество строк матрицы АСМ-изображения.

Данные отображаются в графическом виде и представлены диаграммой распределения высот, гистограммой распределения локальных углов наклона и ориентационной диаграммой

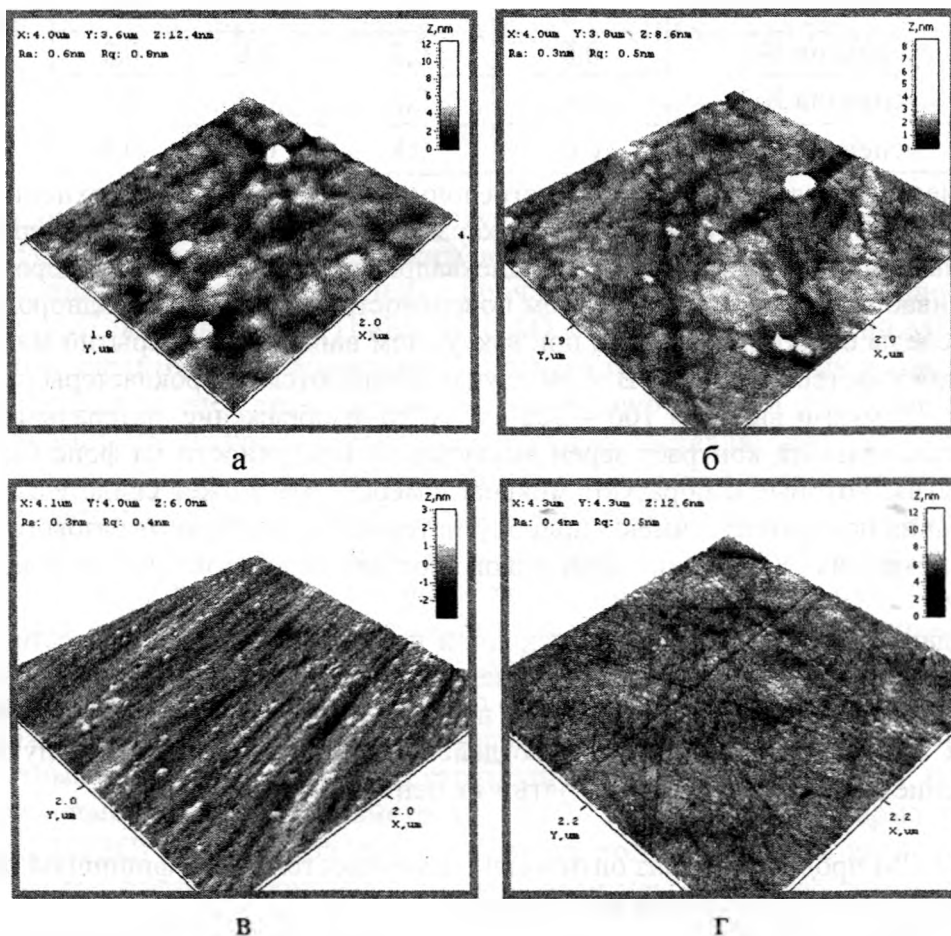


Рис. 1. Топография поверхности исследуемых образцов оптических призм, полученная методом АСМ: а – исходная поверхность после финишной обработки; б – поверхность после обработки МПТ суспензией №1; в – суспензией №2; г – суспензией №3

Результаты исследования. Из топографии поверхности исследуемых образцов можно судить о влиянии примененных методов обработки оптических поверхностей на поверхностную структуру образцов. Для исходной поверхности (рис.1, а) характерно наличие на поверхности сферических образований, разброс высоты которых в среднем со-

ставляет 0,8 нм. Для образца, отполированного по технологии магнитореологического полирования с суспензией №1 (рис.1, б), также характерно наличие сферических образований, но размер их меньше, 0,5 нм.

Также на поверхности присутствуют царапины, хаотично ориентированные и достаточно широкие и редкие, по сравнению с топографией образцов с другой обработкой, глубина царапин составляла около 10 нм. Для обработки по МПТ суспензией №2 рельеф поверхности изменяется, и появляются следы направленности обработки, представленные повторяющимися модуляциями (рис.1, в). Поверхность же обработанная по МПТ суспензией №3 также имеет следы поверхностной обработки в виде царапин, средняя глубина которых составляет около 15 нм, однако они ориентированы хаотично. Среднеквадратичная шероховатость для исследуемых образцов, представленная в таблице, говорит о снижении значения среднеквадратичской шероховатости оптических поверхностей примерно в 2 раза для образцов, обработанных по МПТ.

Таблица1 . Значения среднеквадратичской шероховатости для исследуемых образцов

сканобработка	32×32 мкм	10×10мкм	4×4мкм	2×2мкм
Финишная полировка	0,9	0,7	0,7	0,6
суспензия №1	0,6	0,7	0,6	0,3
суспензия №2	0,4	0,5	0,3	0,3
суспензия №3	0,6	0,8	0,4	0,4

После нанесения функционального многослойного покрытия на поверхности обнаруживается кластерная структура поверхности с характерным латеральным размером зерен-кластеров до 50 нм и их высотой до 30 нм. Среднеквадратическое отклонение шероховатости при этом увеличивается до 8 – 10 нм. В целом поверхность является более однородной, т. к. не проявляются следы обработки. Однако при вакуумном напылении покрытий может иметь место агломерация кластеров оксида. В этом случае образуются микрокластеры с латеральным размером 1 – 5 мкм и высотой 100 – 500 нм. АСМ–изображение, латеральных сил демонстрирует отличительный контраст зерен выступов на поверхности на фоне базовой поверхности покрытия, которые и образуют микроагломерат. Это может свидетельствовать о том, что кластеры на поверхности имеют природу материала отличную от базового материала поверхности покрытия. Уточнение химического состава кластеров требует дополнительных исследований.

Наличие данного типа дефектов на исходной поверхности может привести к катастрофическим последствиям при эксплуатации лазерной оптики. Были обнаружены локальные разрушения покрытий типа «прожиг» в местах наличия микрокластерных скоплений оксидов. В областях интенсивного локального воздействия луча имеет место вспучивание и хрупкое разрушение покрытия с круговым пятном в центре разрушения.

Выводы:

- методом АСМ проведен анализ оптических поверхностей после финишной обработки и после обработки по МПТ с суспензиями №1,2,3;
- показана эффективность комплексного АСМ контроля при оптимизации режимов технологии получения оптических поверхностей;
- значение среднеквадратичской шероховатости оптических поверхностей, обработанных по МПТ суспензией №2, наиболее низкое и примерно в 2 раза ниже, чем значения среднеквадратичной шероховатости после финишной обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Протопопов В.В., Валиев К.А., Имамов Р.М. Сравнительные измерения шероховатости подложек рентгеновских зеркал методами рентгеновской рефлектометрии и скани-

рующей зондовой микроскопии // Кристаллография. 1997. Т. 42. № 4. С. 747–754. 2. Bhushan V., Fuchs H., Hosaka S. Applied Scanning Probe Methods. Springer. 2002. 475 p. 3. Арутюнов П.А., Толстихина А.Л., Демидов В.Н. Параметры шероховатости по данным измерений атомно-силового микроскопа // Микроэлектроника. 1998. Т. 27. № 6. С. 431–439. 4. Чижик С. А., Суслов А. А., Чикунов В. В., Шашолко Д. И. Атомно-силовой микроскоп НТ-206 с функцией нанотомографии. Базовая конструкция прибора // Каталог приборов, комплексов и установок, разработанных по Государственной научно-технической программе «Приборы для научных исследований», Мн. 2006. С. 35–40. 5. Чижик С. А., Шкадаревич А. П., Кузнецова Т. А., Курганович А. М. Оценка качества поверхностей лазерной оптики методом атомно-силового микроскопии // Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии. Сб. докл. VII межд. семинара, ИТМО, Мн. 2006. С. 27–31. 6. SurfaceXplorer, <http://microtm.com/sx/sxr.htm>.

УДК 669.071

Мойсейчик Е.А.

МАКРОСТРУКТУРА АРМАТУРНЫХ СТЕРЖНЕЙ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

В производстве стержневой арматуры для железобетонных конструкций прослеживается устойчивая тенденция к снижению расхода дорогостоящих легирующих элементов при одновременном повышении прочности проката. Основные поставщики арматуры на белорусский рынок (РУП «БМЗ», ОАО «ЗСМК», Челябинский МК и др.) высоких прочностных характеристик арматурного проката из углеродистых и низколегированных сталей достигают за счет его термообработки. В основе этого процесса лежит формирование требуемой структуры проката и свойств его составляющих, дислокационных субструктур в процессе температурно-временных воздействий в линии прокатных станов [1–3]. В отдельных исследованиях [4,5] установлено, что в результате термообработки арматуры по режиму прерывистой закалки в сечении стержней формируется градиентная структура в виде различных структурных слоев. Микроструктура слоев в направлении от поверхности к осевой зоне изменяется. Эти исследования [4], проведенные с использованием термически упрочненной на класс А500С арматуры из низкоуглеродистых сталей производства ОАО «ЗСМК», показали, что строение арматурных стержней зависит от диаметра стержня [4]. С увеличением диаметра от 12 до 22 мм растет и толщина упрочненных поверхностных слоев при сохранении структурных составов. Наличие в поперечном сечении арматурных стержней диаметром 16,20,22мм (материал арматуры- Ст3пс) и 40мм(сталь 18Г2С) структурной неоднородности подтверждают и исследования диаметрального распределения микротвердости. При этом максимальную твердость имеет приповерхностная часть арматурного стержня, а минимальную- центральный участок [4,5].

Поставляемая металлургами арматура в процессе изготовления железобетонных конструкций подвергается ряду технологических воздействий (резка, правка, пластическое деформирование, сварка и т.д.). При работе железобетонного элемента под нагрузкой происходит изменение первоначального структурно-фазового состояния арматуры. Длительные сроки эксплуатации железобетонных конструкций вследствие этого приводят к ухудшению механических характеристик арматуры [6].

Прочностные и деформационные характеристики отдельных слоев арматурных стержней определяют механические характеристики стержня в целом, существенно ска-

зываются на работе арматуры как в процессе изготовления железобетонных конструкций, так и при их нагружении [5-7].

Термическая обработка при прокатке приводит к формированию по сечению стержня участков с неодинаковыми механическими характеристиками. Так, при закалке образцов диаметром от 2 до 16мм существенно изменяется распределение микротвердости по сечению [7], что придает арматурным стержням новые свойства.

Из приведенных литературных данных неясно, как сказываются геометрические параметры арматурных стержней (наличие продольных ребер в арматуре или их отсутствие) на изменение микротвердости наружных и внутренних участков арматурных стержней различных диаметров, насколько коррелирует распределение микротвердости по поперечному и продольному сечениям арматуры, как изменяется распределение микротвердости в арматурных стержнях, прокатанных по различным технологиям. Для ответа на указанные вопросы в настоящей работе выполнено металлографическое исследование арматуры РУП БМЗ и Челябинского М.К.

Пробы для изготовления заготовок отбирались из трех партий стержневой арматуры (табл.1) на ОАО «Завод сборного железобетона №1» (г.Минск), из которых затем вырезали заготовки, темплеты и готовили шлифы. Подготовка проб производилась фрезой при малых оборотах и интенсивной подаче охлаждающей жидкости в зону реза. Структурную неоднородность выявляли по измерениям микротвердости прибором «Micromet-II» (свидетельство о поверке от 01.03.2006г.) с нагрузкой на призму 100 г в соответствии с требованиями ГОСТ 9450-76. Полученные результаты представляли в табличной (табл.2) и графической форме (рис.1). Макроструктура в поперечном и продольном сечениях арматурных стержней показана на рис.2. Микроструктура слоев арматурных стержней приведена на рис.3-7.

Таблица 1. Характеристики арматурных стержней

№ п.п.	Класс арматуры, марка стали	Ø, мм	Химический состав, %										Механические свойства				
			C *)	Si *)	Mn *)	P **	S **)	Cr *)	Ni *)	Cu *)	As *)	N2 **)	σт, Н/мм2	σв, Н/мм2	A5, %	Угол изг.	σт, Н/мм2
1	Ат500С,	12	19	18	60	23	16	8	9	20	1	8	585,0	675,0	25,5	90	585,0
2	Ат500С,	25	18	19	58	9	16	13	10	21	1	9	550,0	660,0	20,5	90	550,0
3	А-III, 35ГС	32	34	51	112	27	16	4	4	4	-	-	430,0	690,0	27,0	90	430,0

Таблица 2. Изменения микротвердости и временного сопротивления слоев арматурных стержней

Диаметр стержня, мм	Интервалы изменения микротвердости по Виккерсу и временного сопротивления слоев стержней (слои отсчитываются от поверхности к сердцевине)									
	1 слой		2 слой		3 слой		4 слой		5 слой	
	HV	σв, МПа	HV	σв, МПа	HV	σв, МПа	HV	σв, МПа	HV	σв, МПа
12	200-275	680-930	187-225	630-760	160-210	540-710	155-200	530-680	140-160	480-540
25	185-215	630-730	150-215	510-730	135-190	460-650	140-160	480-540	130-160	440-540
32	190-245	650-830	190-240	650-810	175-225	590-760	170-200	580-680	160-190	540-650

Исследования макроструктуры поперечных и продольных сечений арматурных стержней показали, что в сечениях в процессе металлургической обработки формируется слоистый структурный (градиентный) состав. Приповерхностный слой состоит из продуктов отпуска

мартенсита, промежуточные слои - из отпускаемого бейнита и феррита; срединный слой содержит вырожденный перлит и феррит с вкраплениями видманштеттвого феррита при больших диаметрах стержней. Толщины приповерхностного и промежуточных слоев меньше изменяются с ростом диаметра стержня, чем осевого слоя. Измерения микротвердости в поперечных и продольных сечениях подтверждают наличие слоистого строения у исследованных арматурных стержней. Эта закономерность подтверждается и микроструктурой различных участков арматурных стержней. На шлифах из проката арматурного и термомеханически упрочненного по ТУ РБ 04778771.001-97 производства РУП БМЗ можно выделить до пяти различных по механическим свойствам соосно расположенных слоев. На шлифах из стали горячекатанной для армирования железобетонных конструкций по ГОСТ 5781-82 производства ОАО Челябинский МК число соосно расположенных слоев такое же.

Разброс величин микротвердости (временного сопротивления) для различных слоев термомеханически упрочненного проката колеблется в пределах 130...275(440...930МПа), а

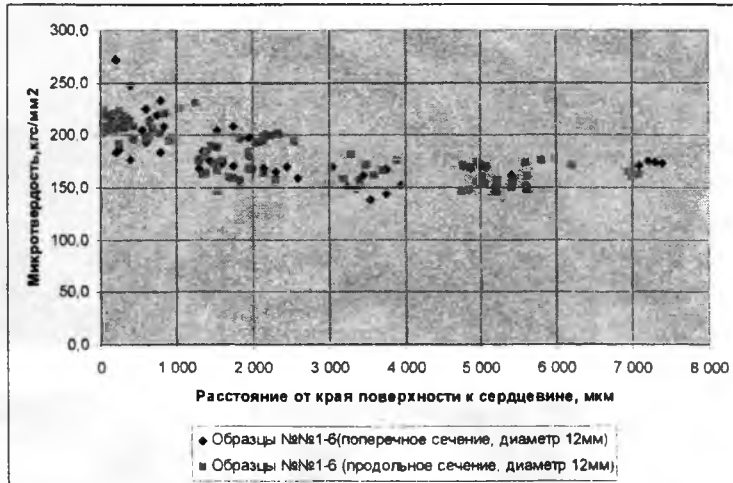
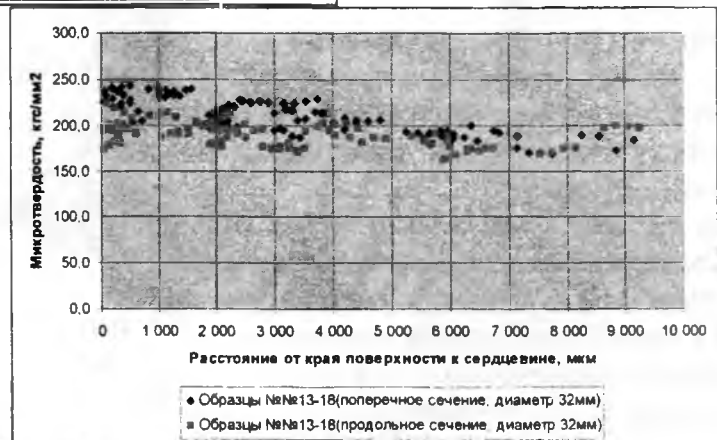


Рисунок 1 - Распределение микротвердости по поперечному сечению арматурных стержней



для горячекатаной арматуры 160...245(540...830МПа).

соответствующий интервал составляет

Выводы:

1. Прокат арматурный и термомеханически упрочненный по ТУ РБ 04778771.001-97 производства РУП БМЗ имеет слоистое строение с 5-ю соосно расположенными слоями, имеющими различные механические свойства, а арматурный стержень можно рассматривать как композитный стержень со слоистой структурой. Число соосно расположенных слоев в прокате из стали горячекатанной для армирования железобетонных конструкций по ГОСТ 5781-82 производства ОАО Челябинский МК не превышает 5, но различия в значениях механических характеристик для этого проката существенно меньше, чем для проката термомеханически упрочненного производства РУП БМЗ. Величины микротвердости слоев, измеренные в поперечных и продольных сечениях одного и того же стержня, отличаются между собой.

2. Соотношения между временным сопротивлением слоев можно принимать в соответствии с таблицей 2.

3. При проектировании изделий из исследованных арматурных стержней, у которых более прочные слои располагаются в приповерхностной зоне, и расчетах элементов конструкций с их использованием следует учитывать повышенную чувствительность таких стержней к надрезам различной природы, изменения механических характеристик слоев при технологических и эксплуатационных температурных воздействиях, изменения прочности и деформативности в результате воздействия коррозионных сред.

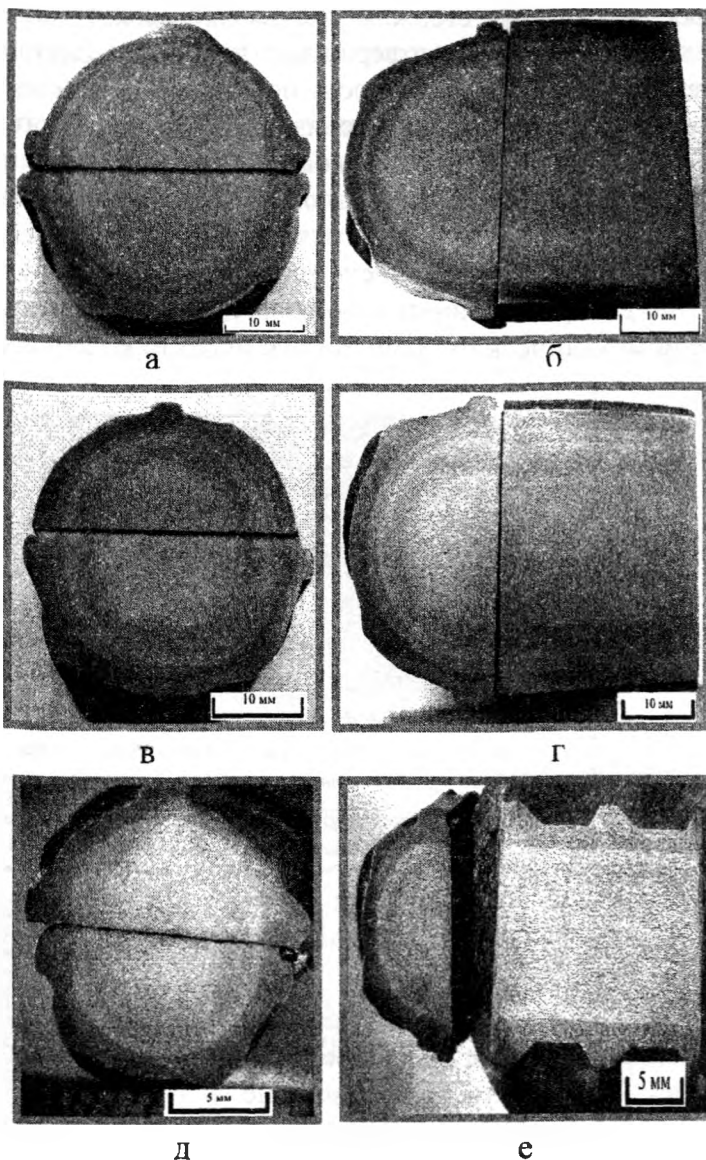
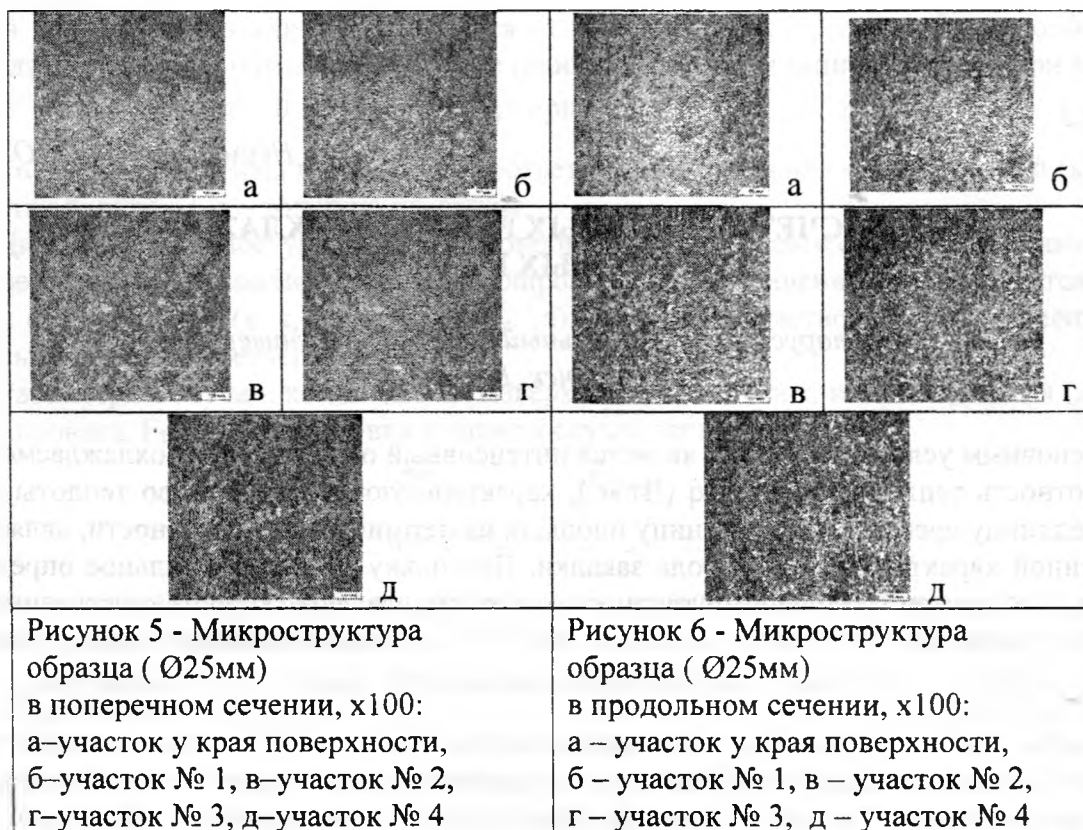
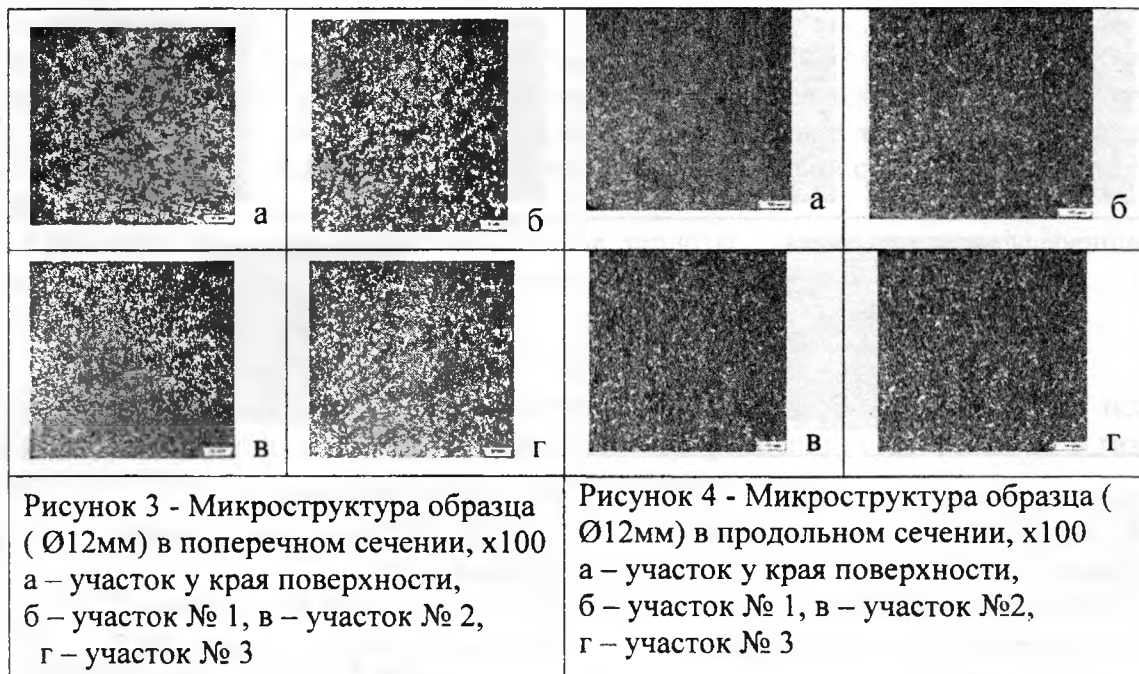


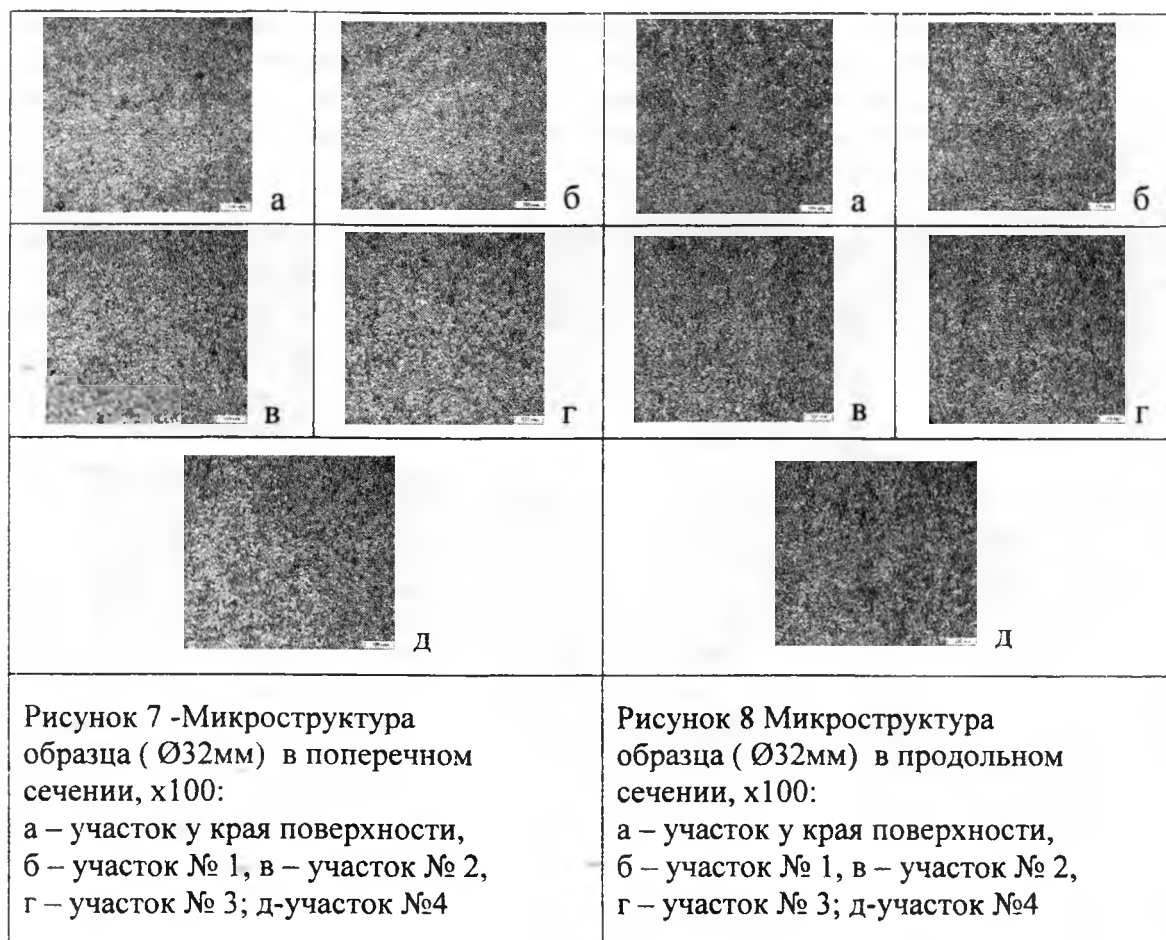
Рисунок 2 - Макроструктура арматуры: а,б - Ø32мм; в,г - Ø25мм; д,е - Ø12мм

ЛИТЕРАТУРА

1. Натапов А.С., Левченко Л.Н., Баскин С.Л. Производство эффективных арматурных профилей для железобетона.-М.:Металлургия,1992.-208с.
2. Айзатулов Р.С., Черненко В.Т.,Мадатян С.А. и др. Освоение массового производства арматурной стали повышенной надежности класса А400С для железобетона// Сталь. 1998. №6. С.53-58.
- 3.Мадатян С.А. Сталь класса А500С для нового поколения арматуры железобетонных конструкций// Национальная металлургия.-2002, №4.
- 4.Юрьев А.Б., Чинокалов В.Я.,Ефимов О.Ю.,Мыскова Н.В., Прокофьева О.С. Структура термически упрочненной стержневой арматуры// Технология металлов.-2005,№9.-с.5-7.
5. Чинокалов В.Я., Юрьев А.Б., Ефимов О.Ю.,Михаленко И.А., Мыскова Н.В. Прочность структурных слоев в сечении термически упрочненной арматуры// Технология металлов.-2005,№10.-с.15-18.
6. Микрюков В.П.,Юрьев А.Б.,Иванов Ю.Ф. Эво-

люция структурно-фазовых состояний арматуры в процессе эксплуатации//Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2006.№12.С.22-23. 7.Термическое упрочнение проката/ Стародубов К.Ф.,Узлов И.Г., Савенков В.Я.и др..-М.: Металлургия, 1970.-368с. 8. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. Ч.2. Механические испытания. Конструкционная прочность.-М.:Машиностроение,1974.-368с





УДК 539.3

Неумержицкая Е.Ю.

МЕТОД РАСЧЕТА ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ОХЛАЖДЕНИЯ ОДНОРОДНЫХ ПЛАСТИН

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Основным условием закалки является интенсивный отвод тепла от охлаждаемого объекта. Плотность теплового потока q ($\text{Вт}/\text{м}^2$), характеризующая количество теплоты, проходящее в единицу времени через единицу площади изотермической поверхности, является количественной характеристикой метода закалки. Поскольку экспериментальное определение величины q сопряжено с большими трудностями, то определяют скорость охлаждения, которая пропорциональна плотности теплового потока. Согласно основному закону теплопроводности плотность теплового потока пропорциональна градиенту температуры $q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n}$, где λ ($\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$) – коэффициент теплопроводности; $\partial t / \partial n$ – производная температуры по нормали n к изотермической поверхности (или температурный градиент); знак «минус» указывает, что векторы \vec{q} и $\text{grad } t$ лежат на одной прямой и направлены в противоположные стороны. Самой большой плотностью теплового потока будет та, которая рассчитана вдоль нормали к изотермическим поверхностям.

Процесс преобразования капли расплавленного металла в пластинку очень сложный. Поэтому при построении математической модели, описывающей охлаждение уже образованной пластины, будем предполагать, что ее толщина намного меньше двух других размеров (длины и ширины), пластина является неограниченной по протяженности.

Теплоотвод происходит в окружающую среду, имеющую постоянную температуру t_{cp} . Коэффициенты теплоотдачи α_i ($Вт/(м^2 \cdot К)$), $i = 1, 2$ на поверхностях пластины являются постоянными величинами и в общем случае $\alpha_1 \neq \alpha_2$. Температура пластины изменяется только по толщине, то есть в направлении оси x . Поэтому $\partial t / \partial y = \partial t / \partial z = 0$ и задача становится одномерной. Начальное распределение температуры описывается некоторой заданной функцией $t(x, 0) = f(x)$. Отсчет температуры во времени будем вести от температуры окружающей среды. Разность между температурой t пластины и температурой среды t_{cp} называется избыточной температурой $\theta = t - t_{cp}$.

При отсутствии внутренних источников теплоты в пластинке дифференциальное уравнение теплопроводности принимает форму уравнения Фурье

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где $a(м^2/с)$ – температуропроводность, является мерой теплоинерционных свойств тела. Металлы обладают малой тепловой инерционностью по сравнению с жидкостями и газами и, следовательно, большим коэффициентом температуропроводности.

Из (1) следует, что изменение температуры во времени $\partial \theta / \partial \tau$ в пластине пропорционально a . Чем больше значение a , тем больше скорость изменения температуры и тем быстрее при прочих равных условиях будет происходить выравнивание температуры во всех точках тела.

Запишем начальные условия

$$\text{при } \tau = 0 \quad \theta = \theta_0 = t(x, 0) - t_{cp} = f(x) - t_{cp} = F(x). \quad (2)$$

При $\alpha_1 \neq \alpha_2$ условия охлаждения для обеих сторон пластины будут разными. Теплота с большей интенсивностью будет отводиться от той поверхности, для которой коэффициент теплоотдачи будет большим. В этом случае граничные условия запишем в виде при $\tau > 0$

$$\text{при } x = 0 \quad \frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{\alpha_1 \theta}{\lambda}; \quad \text{при } x = d \quad \frac{\partial \theta}{\partial x} = - \frac{\alpha_2 \theta}{\lambda}, \quad (3)$$

где α_1 и α_2 – коэффициенты теплоотдачи соответственно на левой ($x = 0$) и правой ($x = d$) поверхностях пластины, d – толщина пластины.

Дифференциальное уравнение теплопроводности (1) совместно с условиями (2), (3) дает завершённую математическую формулировку задачи. Решение ее заключается в определении функции $t = f(x, \tau, a, \alpha_1, \alpha_2, \theta_0, t_{cp}, d)$, которая удовлетворяла бы уравнению (1) и граничным условиям третьего рода (3).

Рассмотрим случай, когда одна из поверхностей пластины, например, левая ($x = 0$) теплоизолирована. Граничные условия в данном случае запишем в форме

$$\text{при } x = 0 \quad \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0, \quad (4)$$

$$\text{при } x = d \quad \frac{\partial \theta}{\partial x} = - \frac{\alpha_2 \theta}{\lambda}. \quad (5)$$

Решение дифференциального уравнения (1) находится методом разделения переменных. Искомое решение запишем в виде

$$\theta = \theta(\tau, x) = \varphi(\tau) \psi(x). \quad (6)$$

Подставляя (6) в (1) получим $\varphi'(\tau) \psi(x) = a \psi''(x) \varphi(\tau)$. После разделения переменных имеем

$$\frac{\varphi'(\tau)}{\varphi(\tau)} = a \frac{\psi''(x)}{\psi(x)}, \quad (7)$$

$$\text{или } \varphi'(\tau) + a k^2 \varphi(\tau) = 0, \quad (8)$$

$$\psi''(x) + k^2 \psi(x) = 0, \quad (9)$$

где постоянная k находится из граничных условий.

Поскольку в [1] исследован случай, когда $\alpha_1 = \alpha_2 \equiv \alpha$, то воспользуемся необходимыми полученными результатами. Общие решения однородных дифференциальных уравнений (8) и (9) имеют вид

$$\varphi(\tau) = C_1 e^{-\alpha^2 \tau}, \quad (10)$$

$$\Psi(x) = C_2 \sin kx + C_3 \cos kx,$$

где C_1, C_2, C_3 – постоянные интегрирования.

Подставляя (10) в (6) получим

$$\theta = (C_2 \sin kx + C_3 \cos kx) C_1 e^{-\alpha^2 \tau}. \quad (11)$$

Для определения производных постоянных интегрирования C_i воспользуемся начальными и граничными условиями.

На теплоизолированной поверхности пластины при $x = 0$, имеем

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial x} \right|_{x=0} = k(C_2 \cos kx - C_3 \sin kx) C_1 e^{-\alpha^2 \tau} \Big|_{x=0} = 0, \text{ откуда } C_2 = 0.$$

Обозначим $C_1 C_3 = A$. Удовлетворяя граничному условию (5), получим

$$-kAe^{-\alpha^2 \tau} \sin kd = -\frac{\alpha_2}{\lambda} A e^{-\alpha^2 \tau} \cdot \cos kd,$$

$$\text{или } \operatorname{ctg} kd = \frac{kd}{\alpha_2 d / \lambda}.$$

Здесь $\alpha_2 \cdot d / \lambda = Bi$ – число Био. Безразмерное число Bi является важнейшей характеристикой процесса теплопроводности. Оно представляет собой отношение внутреннего термического сопротивления теплопроводности к внешнему термическому сопротивлению теплоотдачи

$Bi = \frac{d/\lambda}{1/\alpha_2}$. Обозначим $kd = \mu$. тогда

$$\operatorname{ctg} \mu = \frac{\mu}{Bi}. \quad (12)$$

Из тригонометрического уравнения (12) следует, что для каждого числа Bi существует множество решений $\mu_n, n = 1, 2, 3, \dots$. Решение уравнения (12) удобно находить графическим способом. Обозначив $\operatorname{ctg} \mu = y_1, \mu / Bi = y_2$ и изобразив котангенсоиду y_1 и прямую y_2 , найдем точки $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n, \dots$ пересечения их графиков. Очевидно, что $\mu_1 < \mu_2 < \mu_3 < \dots < \mu_n < \dots$.

Если $Bi \rightarrow \infty$ (практически $Bi > 100$), а это соответствует случаю, когда $\alpha \rightarrow \infty$ (то есть при заданных физических параметрах и толщине пластины имеет место интенсивный отвод тепла от поверхности), то прямая $y_2 = \mu / Bi$ совпадает с осью абсцисс и корнями уравнения (12) будут значения $\mu_n = (2n - 1) \frac{\pi}{2}, n = 1, 2, 3, \dots$

Если $Bi \rightarrow 0$ (практически $Bi < 0,1$), а это условие выполняется при малой толщине пластины, больших значениях коэффициента теплопроводности λ и малых значениях коэффициента теплоотдачи α_2 , то прямая $y_2 = \mu / Bi$ совпадает с осью ординат и корнями уравнения (12) будут $\mu_n = (n-1)\pi, n = 1, 2, 3, \dots$

При малых значениях μ функцию $\operatorname{tg} \mu$ можно заменить ее аргументом и уравнение (12) преобразуется к виду $1/\mu = \mu / Bi$. Тогда $\mu = \sqrt{Bi} = \sqrt{\alpha_2 d / \lambda}$.

Каждому найденному значению μ_i соответствует решение $\theta_i = A_i \cos(\mu_i \frac{x}{d}) e^{-\mu_i^2 \frac{\alpha \tau}{d^2}}$, описывающее частное распределение температуры. Совокупность таких решений дает общее решение исходного дифференциального уравнения, которое представляется в виде бесконечного ряда

$$\theta = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos\left(\mu_n \frac{x}{d}\right) e^{-\mu_n^2 \frac{at}{d^2}}. \quad (13)$$

Подчиняя (13) начальному условию, получим выражение для определения температурного поля при охлаждении однородной пластины

$$\theta = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\mu_n}{d(\mu_n + \cos \mu_n \sin \mu_n)} \left[\int_0^d F(x) \cos\left(\mu_n \frac{x}{d}\right) dx \right] \cos\left(\mu_n \frac{x}{d}\right) e^{-\mu_n^2 \frac{at}{d^2}}. \quad (14)$$

Отличие (14) от аналогичного выражения [1] при $\alpha_1 = \alpha_2$ заключается в наличии коэффициента 2 и других пределов интегрирования.

В дальнейшем положим, что в начальный момент времени $\tau = 0$ температура в пластине распределена равномерно, то есть $F(x, 0) = \theta_0 = \text{const}$. Тогда $\int_0^d F(x) \cos\left(\mu_n \frac{x}{d}\right) dx = \frac{\theta_0 d}{\mu_n} \sin \mu_n$, и формула (14) совпадает с аналогичным выражением [1]

$$\theta = 2\theta_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \mu_n}{\mu_n + \cos \mu_n \sin \mu_n} \cos\left(\mu_n \frac{x}{d}\right) e^{-\mu_n^2 \frac{at}{d^2}}. \quad (15)$$

Анализ распределения температуры в пластине удобно вести, если уравнению (15) придать безразмерную форму

$$\frac{\theta}{\theta_0} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + \cos \mu_n \sin \mu_n} \cos\left(\mu_n \frac{x}{d}\right) e^{-\mu_n^2 \frac{at}{d^2}}. \quad (16)$$

Безразмерные величины, фигурирующие в (16), имеют следующий смысл: $\theta/\theta_0 = T'$ – безразмерная температура; $x/d = X$ – безразмерная координата; $at/d^2 = F_0$ – число Фурье, представляет безразмерное время.

С учетом введенных обозначений уравнение (16) запишем в форме

$$T' = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + \cos \mu_n \sin \mu_n} \cos(\mu_n X) \exp(-\mu_n^2 F_0). \quad (17)$$

Поскольку $\mu_1 < \mu_2 < \mu_3 < \dots < \mu_n < \dots$, то чем больше μ_i , тем меньше значение последующего ряда по сравнению с предыдущим. К тому же члены ряда, как следует из (17), быстро убывают при возрастании n и увеличении числа Фурье. Численные расчеты показали, что при $F_0 \geq 0,3$ ряд является быстросходящимся и для расчета температуры достаточно ограничиться лишь первым его членом

$$T' = \frac{2 \sin \mu_1}{\mu_1 + \sin \mu_1 \cos \mu_1} \cos(\mu_1 X) \exp(-\mu_1^2 F_0). \quad (18)$$

Из изложенного материала следует, что характер охлаждения пластины определяется величиной критерия Био. Поэтому при исследовании распределения температурного поля по толщине пластины целесообразно рассмотреть три случая ее охлаждения: а) $Bi \rightarrow \infty$; б) $Bi \rightarrow 0$; в) $0 < Bi < \infty$.

Рассмотрим случай а). Как было отмечено ранее $Bi \rightarrow \infty$, когда при заданных геометрических и физических параметрах пластины наблюдается мощный отвод тепла от ее поверхности. В этом случае коэффициент теплоотдачи на поверхности пластины $\alpha_2 \rightarrow \infty$ и процесс охлаждения определяется ее геометрическими и физическими параметрами. Для исследуемого случая $\mu_n = (2n-1) \frac{\pi}{2}$, $n = 1, 2, 3 \dots$. При данных значениях μ_n коэффициент $2 \sin \mu_n / (\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n)$ равен $4(-1)^{n+1} / [\pi(2n-1)]$ и ряд (17) преобразуется к виду

$$T' = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} e^{-\pi^2 F_0 (n-0,5)^2} \cdot \cos \left[(2n-1) \frac{\pi}{2} X \right]. \quad (19)$$

Из (19) следует, что при очень большой интенсивности отвода теплоты от поверхности пластины на ее теплоизолированной поверхности ($x = 0$) изменение температуры определяется по формуле (19) и экспоненциально зависит от числа Фурье.

При $F_0 \geq 0,3$ ряд (19) является быстросходящимся. Ограничившись его первым членом,

получим $\theta_{x=0} = \frac{4}{\pi} e^{-\frac{\pi^2 F_0}{4}}$, ошибка при расчетах температуры не будет превышать 1 %.

На боковой поверхности пластины $X = 1$ температура $T' = 0$.

В случае $Bi \rightarrow 0$ все коэффициенты $2 \sin \mu_n / (\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n)$ членов ряда (17) при $n = 2, 3, \dots$ равны нулю. При $n = 1$ $\mu_1 = 0$ и $\left. \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n} \right|_{\mu_1 \rightarrow 0} = 1$.

Кроме того, $1/\mu_1 = \mu_1/Bi$, и уравнение (17) запишем в виде

$$T' = \cos(\sqrt{Bi}X) \exp(-BiF_0). \quad (20)$$

Кроме того, $1/\mu_1 = \mu_1/Bi$, и уравнение (17) запишем в виде

$$T' = \cos(\sqrt{Bi}X) \exp(-BiF_0). \quad (20)$$

На поверхностях пластины температуру определим по формулам

$$\text{при } X = 0 \quad T' = e^{-BiF_0}; \quad (21)$$

$$\text{при } X = 1 \quad T' = e^{-BiF_0} \cdot \cos \sqrt{Bi}. \quad (22)$$

При $Bi \rightarrow 0$, $\cos \sqrt{Bi} \rightarrow 1$ и из (21), (22) следует, что на поверхностях пластины температура практически принимает одно и то же значение $T' = e^{-BiF_0}$, то есть распределение температуры по толщине пластины можно считать однородным.

Таким образом, при $Bi \rightarrow 0$ процесс охлаждения пластины определяется интенсивностью теплоотдачи с ее поверхности или внешним термическим сопротивлением. Выравнивание температуры по толщине происходит намного быстрее, чем отвод тепла с поверхности.

В случае, когда $0,1 \leq Bi < 100$, процесс охлаждения пластины определяется отношением внутреннего термического сопротивления тела d/λ к внешнему термическому сопротивлению теплоотдачи $1/\alpha$. Рассмотрим охлаждение алюминиевой фольги, у которой с одной поверхности теплоотвод осуществляется в медную подложку, $\alpha_2 = 1 \cdot 10^5$ Вт/($m^2 \cdot K$); другая боковая поверхность теплоизолирована $\alpha_1 = 0$. В такой трактовке можно рассматривать охлаждение алюминиевой пластины, когда с одной ее поверхности теплоотвод происходит в медную подложку ($\alpha_2 = 6 \cdot 10^5$ Вт/($m^2 \cdot K$)), а другая поверхность находится в контакте с воздухом ($\alpha_1 = 1 \cdot 10^3$ Вт/($m^2 \cdot K$)). Поскольку коэффициент теплоотдачи $\alpha_1 \ll \alpha_2$, то в первом приближении поверхность контакта алюминий-воздух можно считать теплоизолированной.

Выше было отмечено, что характер охлаждения определяется величиной критерия Био. Рассчитаем безразмерное число Bi , принимая толщину фольги $d = 50$ мкм, $\alpha_2 = 6 \cdot 10^5$ Вт/($m^2 \cdot K$), $\lambda = 100$ Вт/($m \cdot K$), $Bi = 0,3$. Из расчета следует, что $0,1 \leq Bi < 100$.

Не представляет особого труда, варьируя параметрами α , λ и d , рассчитать величину критерия Био, и тем самым определить характер охлаждения пластины.

В случае, когда теплота передается с поверхности пластины с разной теплоотдачей, должен существовать максимум температуры внутри пластины. Изотермическая поверхность, соответствующая максимальной температуре, разделяет пластину на два слоя. Максимальное значение температуры соответствует условию $d\theta/dx = 0$. Пусть α_1 и α_2 коэффициенты теплоотдачи на левой и правой поверхностях пластины. Не нарушая общности, предположим, что $\alpha_2 > \alpha_1$; толщина пластины равна d . Поскольку λ , α_1 , α_2 имеют постоянные значения, то есть рассматриваемые материалы являются однородными, примем, что изотермическая поверхность с максимальной температурой расположена на расстоянии d_1 от левой

поверхности пластины. На ней расположим систему координат. Тогда $\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{d_1}{d - d_1}$; и

данного равенства находим $d_1 = \frac{\alpha_1 d}{\alpha_1 + \alpha_2}$ и $d_2 = \frac{\alpha_2 d}{\alpha_1 + \alpha_2}$. Начальные и граничные условия при $\alpha_1 \neq \alpha_2$ запишем в виде: начальные условия при $\tau = 0$ $\theta = \theta_0 = f(x) - t_{cp} = F(x)$; граничные условия при $x = \frac{\alpha_2 d}{\alpha_1 + \alpha_2}$ $\frac{\partial \theta}{\partial x} = -\frac{\alpha_2}{\lambda} \theta$; при $x = 0$ $\frac{\partial \theta}{\partial x} = 0$; при $x = -\frac{\alpha_1 d}{\alpha_1 + \alpha_2}$ $\frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{\alpha_1}{\lambda} \theta$. Для нахождения распределения температуры по толщине пластины необходимо рассмотреть два слоя, на которые разбита пластина изотермической поверхностью. Для правого слоя пластины при $x = 0$ $\frac{\partial \theta}{\partial x} = 0$; при $x = \frac{\alpha_2 d}{\alpha_1 + \alpha_2}$ $\frac{\partial \theta}{\partial x} = -\frac{\alpha_2}{\lambda} \theta$. Для левого слоя пластины при $x = 0$ $\frac{\partial \theta}{\partial x} = 0$; при $x = -\frac{\alpha_1 d}{\alpha_1 + \alpha_2}$ $\frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{\alpha_1}{\lambda} \theta$. Метод решения данных граничных задач изложен выше.

ЛИТЕРАТУРА

1. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача.- М.: Энергия, 1975.- 488 с.

УДК 539.376

Стеликов Н.Е.

КИНЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ ПРИ КРУЧЕНИИ

*Белорусская государственная сельскохозяйственная академия
Горки, Беларусь*

В работе [1] изложены основы кинетической теории ползучести твердых тел при осевом растяжении, где предполагается равномерное распределение напряжений на макроуровне нормальных сечений с соответствующим перераспределением на межатомные связи. В настоящей работе ставится задача по привязке теории к сдвигу, когда на макроуровне касательные напряжения имеют треугольную эпюру распределения.

С позиций кинетической концепции прочности, связывающей процессы, происходящие на микроуровне нагруженных тел с силами межатомного взаимодействия, ползучесть при растяжении и кручении является следствием этих процессов, т.е. имеет одну природу и должна подчиняться одним закономерностям. Запишем в соответствии с [1] уравнение ползучести для деформации ε , которая при кручении рассматривается и как угол закручивания:

$$t = \tau_0 \left(\ln \frac{\delta}{\varepsilon} \right) \exp \frac{U_0 - \gamma \delta \sigma_0 / \varepsilon}{kT}, \quad (1)$$

где t – время, необходимое на изменение величины деформации от 0 до ε ;

τ_0 – период колебаний атомов ($\approx 10^{-13}$ с);

δ – предельная величина деформации (угла закручивания), при которой тело теряет сплошность;

U_0 – энергия активации ползучести;

γ – структурно-чувствительный коэффициент с размерностью объема;

σ_0 – величина начального касательного напряжения;

k – постоянная Больцмана;

T – температура.

Первоначально мы рассмотрели ползучесть при кручении в условиях, когда распределение касательных напряжений по сечению образца на макроуровне приближается к равномерному. Это, в первую очередь, относится к кручению тонкостенных трубчатых образцов. В качестве экспериментальных рассмотрим данные из работы [2] по изучению ползучести при кручении тонкостенных трубчатых образцов из сплава Al с 3% Mg. На рис. 1 сплошными линиями показана кривая ползучести таких образцов и кривые последействия. Опыты проводились при постоянном напряжении $\sigma_0 = 35$ МПа и температуре $T = 473$ К. Пунктирными линиями показаны теоретические кривые ползучести и последействия. Кривые ползучести построены по формуле (1) с использованием следующих параметров: $U_0 = 169,34$ кДж/моль; $\gamma = 0,228$ кДж/(моль·МПа); $\delta = 0,003$.

Кривые последействия построены по формуле, приведенной в работе [3]:

$$t = \tau_0 \left(\ln \frac{\epsilon_0}{\epsilon'} \right) \exp \frac{U_0 - \gamma \delta \sigma_0 / \epsilon}{kT}, \quad (2)$$

где ϵ_0 – значение деформации в момент снятия нагрузки;

ϵ' – деформации последействия;

t – время, необходимое на снижение деформаций от значения ϵ_0 до значения ϵ'

Кривые последействия построены по тем же параметрам, что и кривая ползучести, за исключением коэффициента γ , который в формуле (2) принят равным 0,001 кДж/(моль·МПа).

Оценивая достоверность теории, в первую очередь, отмечаем хорошее соответствие экспериментальных и теоретических кривых. Во-вторых, проводим сравнение значения энергии активации ползучести, используемое при построении теоретических кривых, с аналогичными значениями энергии, но полученными другими независимыми способами. В связи с тем, что по представлениям кинетической теории ползучесть является результатом процесса самодиффузии, мы проведем сравнение с соответствующим значением энергии активации. Кроме этого, используем экспериментальные данные по определению значений энергии активации высокотемпературной ползучести, а также при сдвиге по границам зерен.

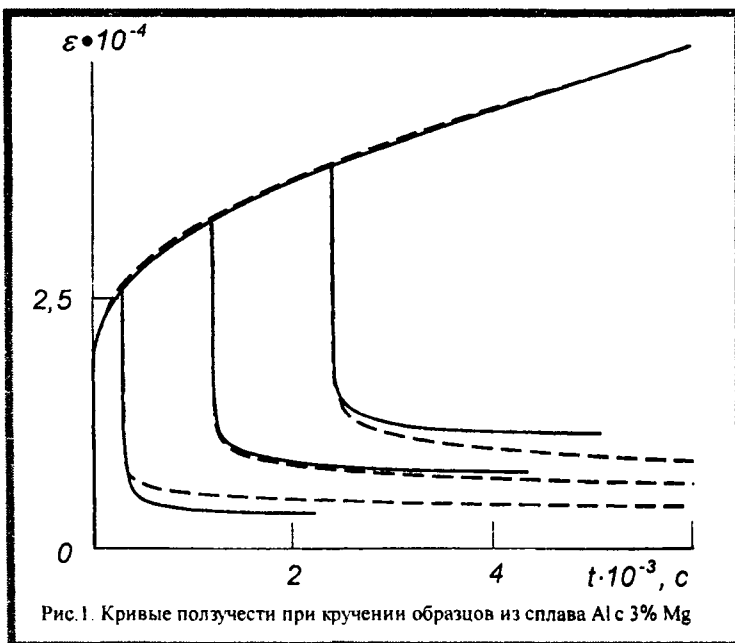


Рис. 1. Кривые ползучести при кручении образцов из сплава Al с 3% Mg

Значение энергии активации диффузии марганца в алюминии составляет 38,5 ккал/моль (161 кДж/моль) [4]. Следующие значения энергии активации берем из работы [5]. Так, в соответствии с источником [6] значение энергии активации высокотемпературной ползучести чистого (99,90%) наклепанного алюминия составляет 36 ккал/моль (151 кДж/моль). В соответствии с источником [7] значение энергии активации сдвига по границам зерен алюминия (99,996%) составляет 37 ккал/моль (155 кДж/моль). Мы наблюдаем близость сравниваемых значений энергии активации для ползучести, самодиффузии и сдвига по границам зерен, что в первом приближении можно считать хорошим подтверждением состоятельности разрабатываемой теории для условий равномерного распределения напряжений при кручении.

Дальнейшее исследование ползучести проводилось при кручении цилиндрических образцов сплошного сечения. На рис. 2 сплошными линиями показаны экспериментальные

кривые ползучести нейлона при кручении [8]. В опытах определялся угол закручивания круглых цилиндрических образцов на базе 101,6 мм при температуре 298 К. Напряжения в МПа в соответствии с нумерацией кривых составляли: 2,1 (1); 4,2 (2); 6,3 (3); 8,4 (4); 10,5 (5); 12,6 (6). Пунктирными линиями на рис. 2 показаны расчетные кривые, полученные по формуле (1) с подстановкой вместо деформации ϵ угла α при следующих значениях соответствующих параметров: $U_0 = 131,31$ кДж/моль; $\gamma = 0,718$ кДж/(моль·МПа); $\delta = 100$ град.

Во-первых, отмечаем удовлетворительное соответствие теоретических кривых экспериментальным.

Во-вторых, учитывая, что ползучесть мы рассматриваем как процесс, отражающий межатомные взаимодействия, проведем сравнение значения энергии активации ползучести, полученное с помощью формулы (1), со значениями энергии активации термической деструкции нейлона. По данным работы [9] энергия активации термической деструкции нейлона 6 с молекулярным весом 30000 составляет 27 ккал/моль (113 кДж/моль), а для нейлона с молекулярным весом 60000 – соответственно 34 ккал/моль (142 кДж/моль). Очевидно, что теория дает приемлемое значение энергии активации ползучести, входящее в экспериментальные пределы, что подтверждает одинаковость процессов, происходящих на микроуровне разрушаемого полимера механическим или термическим путем.

Дальнейшее развитие теории связываем с улучшением приближения теоретических кривых к экспериментальным. При сравнении данных кривых (сплошные и пунктирные на рис. 2) обращает на себя внимание то, что особенно при больших напряжениях теория показывает более медленный темп роста деформаций, чем эксперимент.

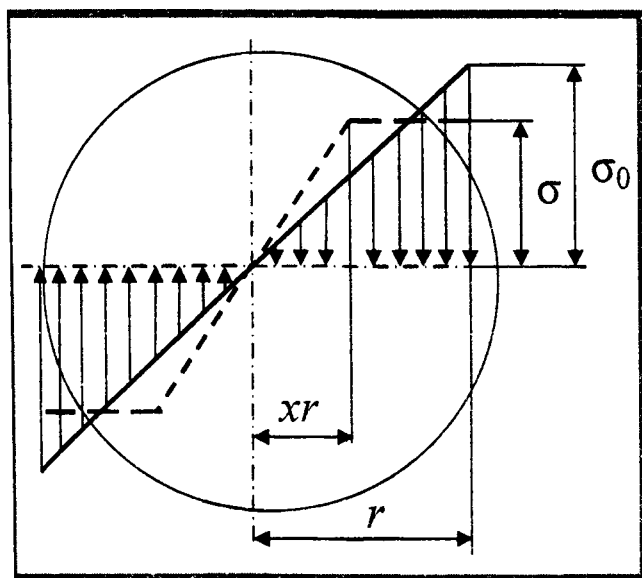


Рисунок 3 - Схема изменения распределения касательных напряжений при кручении в процессе ползучести

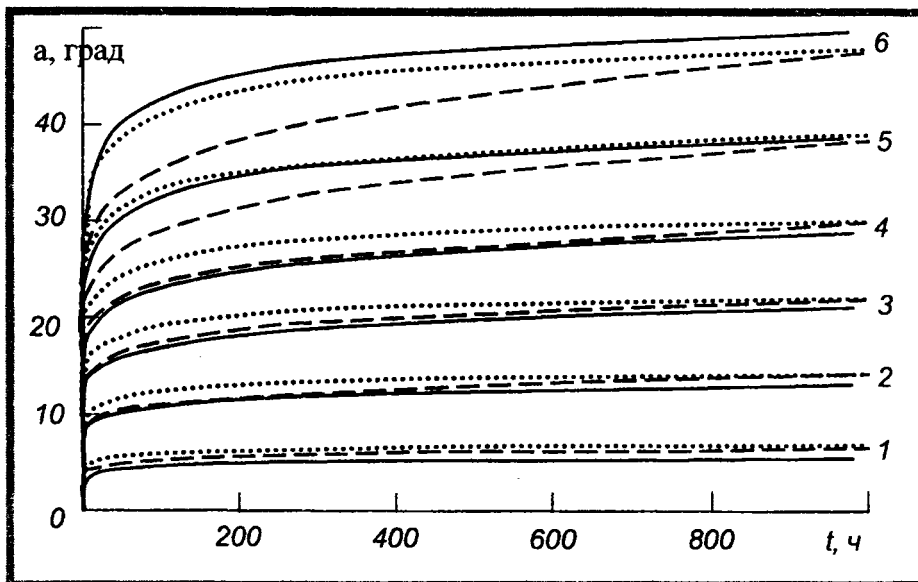


Рис. 2. Кривые ползучести нейлона при кручении

Объяснение такого поведения материала при кручении может быть связано с тем, что касательные напряжения по сечению распределяются неравномерно (по треугольной эпюре), а в течение ползучести происходит перераспределение напряжений с разрушенными межатомными связями на неразрушенные, что меняет картину распределения напряжений по сечению и, следовательно, скорость роста деформаций. На такое перераспределение напряжений уже обращалось внимание в работе [8], где качественно показано изменение распределения напряжений и переход от линейной закономерности распределения напряжений к нелинейной.

Мы предлагаем следующую модель ползучести при кручении с учетом пере-

распределения напряжений по сечению за счет разрушения более напряженных и нагружения менее напряженных, но более многочисленных межатомных связей при постоянной величине крутящего момента. На рис. 3 показана схема изменения распределения касательных напряжений по круглому сечению радиусом r в процессе ползучести, принятая в нашей модели. Первоначально эпюра напряжений имеет треугольный вид с максимальным значением σ_0 . Далее идет уменьшение напряжений и их выравнивание по сечению. Пунктирными линиями показана промежуточная эпюра распределения напряжений, когда часть сечения нагружена равномерно распределенными, а часть – треугольными по радиусу, отношение которого к радиусу r равно x . Учитывая, что при треугольном распределении напряжений крутящий момент равен $M_k = \sigma \pi r^3 / 2$, а при прямоугольном распределении – $M_k = 2\sigma \pi r^3 / 3$ [10], для случая, когда на внутренней части круглого сечения радиусом xr напряжения распределены по треугольнику, а на внешней оставшейся части – по прямоугольнику, крутящий момент запишется в виде

$$M_k = \frac{2}{3} \sigma \pi r^3 - \frac{2}{3} \sigma x^3 r^3 + \frac{1}{2} \sigma x^3 r^3 = \sigma \pi r^3 \left(\frac{2}{3} - \frac{1}{6} x^3 \right). \quad (3)$$

Принимая $M_k = const$, обозначив начальные напряжения при треугольной эпюре распределения касательных напряжений через σ_0 , получаем зависимость текущих максимальных напряжений

$$\sigma = 3\sigma_0(4 - x^3). \quad (4)$$

Значение x^3 меняется от 1 в начале нагружения до 0, когда напряжения выравниваются по сечению. Такому изменению величины x соответствует эмпирическая зависимость от времени в виде $x^3 = \exp(-\mu t)$, которую мы вводим в расчет, записав формулу (1) в виде

$$t = \tau_0 \left(\ln \frac{\sigma}{\alpha} \right) \exp \frac{U_0 - 3\gamma\delta \sigma_0 / \alpha [4 - \exp(-\mu t)]}{kT}. \quad (5)$$

На рис. 2 точечными линиями показаны кривые ползучести, рассчитанные по формуле (5) с использованием параметров U_0 и δ , по которым построены пунктирные кривые на рис. 2 и приведенных для нейлона выше, а $\gamma = 0,85$ кДж/(моль·МПа) и $\mu = 1,5 \cdot 10^{-7}$ с⁻¹. Очевидным является то, что введение коэффициента μ позволило приблизить теоретические кривые ползучести к экспериментальным, но самое важное – правильно отразить изменение скорости нарастания деформации ползучести во времени, что наглядно демонстрируется на рис. 2 почти идеальной параллельностью теоретических и экспериментальных кривых. Всё это говорит о состоятельности принятой модели изменения касательных напряжений при кручении в процессе ползучести и возможности применения формулы (5) для соответствующих расчетов.

Таким образом, в работе развит кинетический подход к ползучести в условиях неравномерного распределения напряжений на макроуровне расчетного сечения с учетом изменения характера распределения во времени. Это выражено в получении нового уравнения ползучести для условий кручения. Результатами расчетов с использованием данной зависимости и сравнения их с экспериментальными данными, полученными независимыми исследованиями, подтверждена правильность принятой модели изменения эпюры распределения касательных напряжений во времени в процессе ползучести цилиндрического образца, подверженного воздействию постоянным крутящим моментом.

Сравнение значений энергии активации при ползучести, полученных в результате расчетов по предложенной зависимости, с аналогичными значениями энергии активации при высокотемпературной ползучести, самодиффузии и при сдвиге по границам зерен материалов, полученных другими исследователями и другими методами, показывает их соответствие, а значит и то, что все эти процессы имеют одну природу. Кроме этого, данное сравнение показывает одинаковость процессов, происходящих на микроуровне нагруженного тела в режиме ползучести, как при растяжении, так и при кручении.

Результативность работы во многом обеспечена тем, что совершенствование разрабатываемой кинетической теории велось на основе связи с классическими методами механики деформируемого твердого тела. Очевидно, что такая связь позволяет не только совершенствовать кинетическую теорию, но и направлять ее в правильное, апробированное русло. Кроме этого, такая связь выводит на новые задачи, которой в нашем случае является задача о природе нового коэффициента μ и выражении его через параметры, отражающие силы межатомного взаимодействия.

Разрабатываемая теория, позволяющая с хорошим приближением описывать экспериментальные данные, направлена на применение при проектировании реальных конструкций, особенно машиностроительных, где кручение, как вид напряженного состояния деталей, имеет широкое распространение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стеликов. Н.Е. Кинетика деформирования и разрушения твердых тел при ползучести. / Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2004. №3. С. 60 – 63.
2. Кеннеди А.Д. Ползучесть и усталость в металлах. – М.: Metallurgizdat, 1965. – 312 с.
3. Стеликов Н.Е. Кинетическая теория ползучести: монография. – Горки: Ред.-изд. отдел БГСХА, 2006. – 104 с.
4. Зайт В. Диффузия в металлах. Процессы обмена мест: пер. с нем. Г.С. Куликова и Р.Ш. Малковича; под ред. Б.И. Балтакса. – М.: Изд. иностр. лит, 1958. 382 с.
5. Дорн Д.Э. Спектр энергий активации ползучести / Ползучесть и возврат. – М.: Metallurgizdat, 1961. – С. 291 – 325.
6. Frenkel R.E., Sherby O.D., Dorn I.E. Trans. ASM. 1955. Vol. 47. P. 632.
7. Fazan B., Sherby O.D., Dorn I.E. Trans. Amer. Inst. Of Mining and Metallurgical Engineers. 1954. Vol. 200. P. 919.
8. Макклиток Ф., Арагон А. Деформация и разрушение материалов. – М.: Мир, 1970. – 444 с.
9. Мадорский С. Термическое разложение органических полимеров. – М.: Мир, 1967. – 326 с.
10. Соппротивление материалов / А.Ф. Смирнов, А.В. Александров, Н.И. Монахов и др.; под. ред. А.Ф. Смирнова: изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1975. 480 с.

УДК 621.791.042

Макушок Е.М., Петюшик Е.Е., Реут О.П.

О ВОЗНИКНОВЕНИИ ДЕФОРМАЦИОННОЙ АНОМАЛИИ ПРИ РАДИАЛЬНОМ ОБЖАТИИ НАМОТАННЫХ ПРОВОЛОЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Первые эксперименты по обжатию проволочных намотанных конструкций методом изостатического (радиального) прессования через упругую оболочку (полиуретан) продемонстрировали вполне определенную тенденцию возникновения деформационных особенностей, с которыми практическое применение металлообработки еще не встречалось [1]. Существуют особенности в том, что в локальных областях по контуру поверхности фактического контакта образуются не только местные выплески выдавливания (какие возникают при измерении твердости), но и выбросы деформируемого материала проволок в форме, напоминающей пенек, а также (гораздо чаще) отдельные усобразные цилиндрические образования, длина которых многократно превосходит их сечение.

На рис.1 показаны снимки, демонстрирующие специфику локального поверхностного формообразования на разных стадиях развития процесса. На рис.1,а представлен одиночный выступ, на рис.1,б – развитый выплеск в виде слегка конического стержня с каплевидными пережимами винтового характера. Последнее обстоятельство свидетельствует о том, что ука-

занная особенность формообразования имеет место в очаге деформации локального истечения при температуре оплавления и сопровождается вращением стержня как жесткого, уже вышедшего из пласта деформирования. След вращательного движения прослеживается по винтообразности локального сужения на поверхности выплеска. Причиной столь неординарного характера деформационного движения на завершающей стадии является перекокс осей исходных проволок, приводящий, в конце концов, к образованию струи и ее вихревой составляющей в очаге истечения, возникающих в случае этого эксперимента вследствие несимметричности контактного напряженного состояния.

Характер деформационного движения столь сложен и неоднороден, что его теоретическое описание с анализом напряженного состояния не может быть представлено на основе современной теории пластичности. Возможности этой теории, ограниченной допущениями, искажающими физический смысл вследствие расхождения физической модели, ее упрощенного образа и математического описания, крайне ограничены.

В настоящее время в науке вообще, и в том числе в механике деформационного движения, наступил период смены парадигмы. Основу новой парадигмы (наряду с известными, применяемыми) составляют явления самоорганизации деформационного движения, которые преобразуют суть теории и позволяют устанавливать соотношения параметров по ходу развития процесса с учетом изменения условий его протекания, а не только в одной точке заданного формоизменения. Основы этого подхода для формирования нового уровня теории деформационного движения сформулированы в нашей республике. Продвижение к цели, т.е. к возможности построения деформационной теории с учетом явлений самоорганизации, может быть воспринято при ознакомлении с монографиями: "Самоорганизация деформационных процессов", "Инженерная теория пластичности", "Теоретические основы процессов поверхностного пластического деформирования" [2, 3, 4]. Новая парадигма пока еще не полностью раскрыла свои информационные возможности, позволяющие добраться до нюансов напряженно-деформированного состояния на микро-, макро-, мезо-, нано- и др. уровнях и закономерностей их коллективного проявления при совместном участии в деформационном движении.

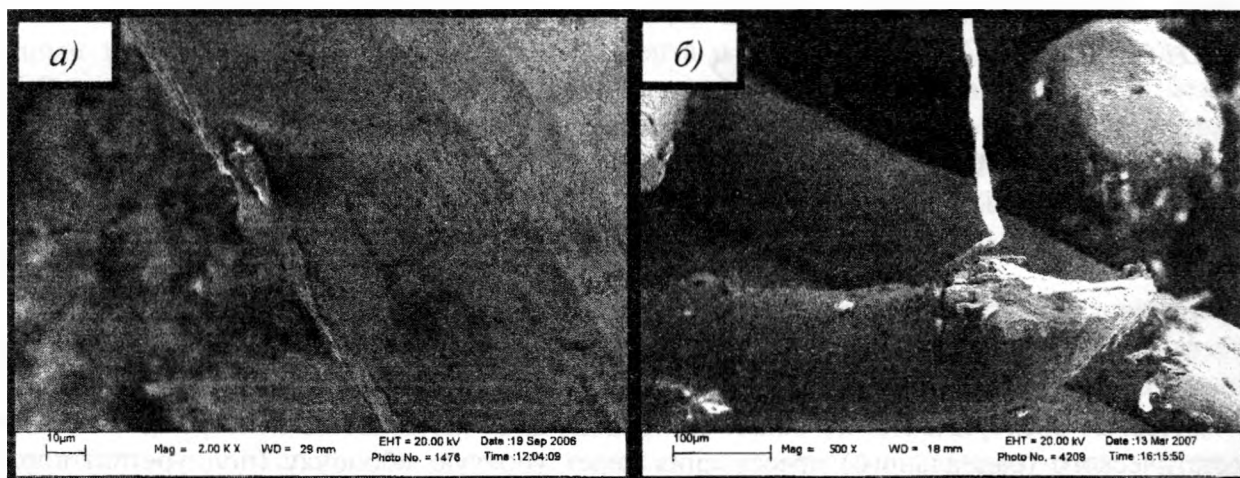


Рис. 1 Вид локальных деформационных новообразований

Особенно серьезный сдвиг в расширении возможностей парадигмы самоорганизации представляется открытием структуры напряженно-деформированного состояния и ее роли в описании деформационного движения. Термин "структура напряженно-деформированного состояния" непосредственно не связан со структурой строения вещества, это совершенно другая категория, на фоне которой проявляется влияние и структурных факторов строения. В общем случае мы сталкиваемся с их совместным проявлением. Структура напряженно-деформированного состояния как понятие и явление применительно к анализу напряженно-деформированного состояния выполняет важную познавательную функцию. Пренебрежение этим явлением привело к деграда-

ции теории, так как при анализе переходов от нагрузки к деформационной реакции тела из поля зрения выпадает специфика перехода от ламинарного течения к турбулентному. Теория пластичности в своем развитии остановилась на ламинарном характере течения. Физическая основа такого старта вполне понятна, она представляется кристаллографическими плоскостями зерна (монокристалла) с теоретическим уровнем сопротивления сдвигу, которое дислокационным механизмом снижается на 3-4 порядка, а допущением континуальности приводится в состояние изотропии, которая снимает роль поворота направлений максимальных сдвигающих напряжений относительно кристаллографических плоскостей.

Явления самоорганизации позволяют представить механизмы турбулентного движения и фрагменты расчетных ситуаций, сформировать расчетные схемы, учитывающие переход от ламинарного развития деформации к турбулентному [5].

Важность познавательной функции перехода от ламинарного характера течения твердого тела к турбулентному состоит в том, что геометрия в малом увязывается с геометрией в целом. Применительно к задачам деформационного движения это означает, что поле напряженно-деформированного состояния элементарного объема увязывается с полем всего деформируемого тела в целом. Более того, эта связь устанавливается не отвлеченными зависимостями, построенными на чисто математических, допускаемых, закономерностях, что пока принято, а физическими закономерностями, возникающими при анализе полей напряженно-деформированного состояния вследствие их самоорганизации и взаимовлияния. Вообще проблема перехода от геометрии в малом к геометрии в целом является одной из наиболее сложных в современной науке.

Ряд принципиальных сложностей самоорганизацией снимается или минимизируется. В частности, стыковка упругого и пластического состояний регламентируется условием пластичности. Однако в научно-технической литературе функционируют две формулировки условия идеальной пластичности. Эти условия представляют собой две математические модели одного и того же физического явления, построенные с учетом допущений, идущих от пластического течения и от законов упругой деформации соответственно. Применительно к реальным телам описание точечного (по кривой упрочнения) перехода от упругого состояния к пластическому или этого же перехода в условиях развитого пластического течения вызывает затруднения в процессе осмысления теоретических основ. С учетом эффектов самоорганизации неточности, которые вызываются двойственностью условия пластичности, уже не представляются непреодолимыми [6]. Та же неопределенность, возникающая при анализе контактного трения, также решается с позиций самоорганизации [7]. И условие пластичности, и контактное трение представляются подсистемами в расчетной системе, учитывающей явления самоорганизации деформационного движения.

Несмотря на кажущееся нагромождение сложностей, возникающих только от перечня параметров, которые нужно учесть, одной из наиболее удачных "конструктивных" особенностей парадигмы самоорганизации является возможность изложения теоретического материала с использованием минимума математических средств.

Переходя от общих соображений в оценке уровня развития современной теории к конкретному процессу, в котором проявилась аномалия концентрации деформаций, отметим большое значение этой технологической работы в качестве модельного случая, демонстрирующего высокий уровень проявления эффектов самоорганизации в условиях формирования турбулентной структуры деформационного движения и побуждающего к развитию теоретических представлений. Любые, в том числе аналитические, результаты этой работы в определенных областях могут оказаться в числе основополагающих.

На основании отдельных, уже полученных, экспериментальных результатов можно сделать предварительные выводы, очерчивающие рамки для оценки отмеченной аномалии развития деформационного процесса. Прежде всего, как и в других подобных случаях, следует обратить особое внимание на экстремальные ситуации, в которых нарушается симметрия напряженно-деформированного состояния (НДС). В данном случае первый момент этой особенности деформационного движения выступает в образе потери симметрии НДС в стыковке фаз нагрузки и

разгрузки. Из этого делаем вывод, что в этой ситуации радикальное изменение НДС происходит на стадии разгрузки. Эффект асимметрии НДС упомянутого перехода усиливается спецификой комбинированного процесса радиального сжатия, которое воздействует с торцевых поверхностей жгута проволок и сопровождается его сжатием в диаметральном направлении, локальным сжатием и изгибом, скручиванием вдоль длины изделия. Эта ситуация также является причиной асимметрии НДС, выражающейся главным образом в том, что при разгрузке сечение, несущее упругую деформацию, в силу чрезвычайной локализации сечения, подверженного пластическому воздействию, аккумулирует упругую энергию слабее, чем в случае нагрузки-разгрузки при симметричных условиях. Последнее обстоятельство сопровождается формированием области критического состояния, образуемого подконтактным пространством двух взаимодействующих контактов. Критическое пространство, находящееся в условиях всестороннего пластического сжатия, при разгрузке в числе прочего реверсирует сдвигающее напряжение на своей границе, что создает прогиб эпюры нормальных напряжений на своей границе и снижение их крайних значений, что обеспечивает снижение сопротивления выдавливанию из-под контакта при снижении его несущей способности. Дальнейшее изучение процесса позволит уточнить само явление и развить теорию деформационного движения, способную учесть проявление всех влияющих параметров.

Поскольку скорости и степени деформации при выбросе струй, несущих следы оплавления, столь высоки, анализ влияния теплового эффекта и теплопередачи, по-видимому, потребует введения конечной скорости распространения тепла и учета влияния нагрева на трансформацию поля напряженного состояния не только вследствие изменения предела текучести, но и вследствие теплового расширения и последующей усадки.

В качестве подтверждения вероятности существования механизма выброса обособившегося объема за границы свободной поверхности сошлемся на детскую игру, в которой сжимаемая вишневая косточка выстреливается при сжатии ее пальцами. Подобное явление использовано [8] с целью снижения усилия деформации при холодном выдавливании сталей за счет придания торцевым поверхностям инструмента очертаний соответствующих геометрии поверхностей скольжения.

Такова природа туннельного эффекта, на макро- микроуровне проявляющегося в процессе радиального обжатия проволочной структуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петюшик Е.Е. Особенности деформирования проволоки при радиальном обжатии тел намотки // Проблемы инженерно-педагогического образования в Республике Беларусь: Материалы междунар. научно-практ. конф. / Под общ. ред. Б.М. Хрусталева. – Мн.: УП «Технопринт», 2004. – С. 281-286.
2. Макушок Е.М. Самоорганизация деформационных процессов. – Мн.: Наука и техника, 1991. – 264 с.
3. Инженерная теория пластичности / Е.М.Макушок, А.В.Белый, Д.И.Дмитрович, Т.В.Калиновская и др. – Мн.: Наука и техника. – 1985. – 286 с.
4. Теоретические основы процессов поверхностного пластического деформирования / Е.М.Макушок, Т.В.Калиновская и др. – Мн.: Наука и техника, 1988 – 162 с.
5. Макушок Е.М. Закономерности самоорганизации деформационного движения и расчетный метод для его анализа / Теоретическая и прикладная механика, Вып.19, Мн.: БНТУ, 2005 – С.110–122.
6. Макушок Е.М., Макушок Ю.Е. Единое условие пластичности / Теория и технология процессов пластического деформирования / Под. ред. А.В.Зиновьева. – М.: МИСИС, 1997 – С.559-565.
7. Макушок Е.М. Механика трения. – Мн.: Наука и техника, 1974 – 252 с.
8. Алифанов А.В. Обработка давлением компактных и дисперсных материалов. – Мн.: ЭКО “Перспектива”, 2004 – 370 с.

ПОНЯТИЕ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ И ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ЕГО ФАКТОРЫ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

В современных условиях конкуренция между предприятиями развивается путем повышения уровня качества выпускаемой продукции, что является одним из важнейших показателей деятельности предприятия. Повышение качества продукции в значительной мере определяет выживаемость предприятия в условиях рынка, темпы технического прогресса, внедрение инноваций, рост эффективности производства, а также экономию всех видов ресурсов, используемых на предприятии.

Качество продукции наряду с количеством является главным итоговым показателем работы предприятия, определяющим эффективность его функционирования. В широком смысле качество — это свойство продукции удовлетворять определенную общественную или личную потребность. Следовательно, показатели качества определяются прежде всего характером требований потребителя к свойствам необходимого продукта [1].

Качество — относительное понятие; это совокупность свойств, оно не может быть «хорошим» или «плохим». С точки зрения экспертов в области качества, покупатель считает качественной ту продукцию, которая отвечает условиям потребления независимо от того, какие специфические потребности ей предназначалось выполнять. Если необходимо дать оценку качества продукции, то нужно сравнивать данную совокупность свойств с каким-то эталоном. Эталоном могут быть лучшие образцы, требования, закрепленные в стандартах или технических условиях. Но любой документ или эталон узаконивает определенный набор свойств и характеристик лишь на какой-то период времени, а потребности непрерывно меняются, и поэтому предприятия, изготавливая продукцию даже в точном соответствии с нормативно-технической документацией, рискует выпускать ее некачественной, не устраивающей потребителя. Таким образом, основное место в оценке качества продукции или услуг отводится потребителю, а стандарты, законы и правила, в том числе и международные, лишь закрепляют и регламентируют прогрессивный опыт, накопленный в области качества [2].

В роли критериев для сравнения продукции с эталоном выступают различные свойства, например, такие как вес, габариты, производительность, цвет, модель, надежность, безотказность работы и другие. Исходя из этого, свойства продукции можно разделить на группы показателей, влияющих на уровень качества:

- показатели назначения (производительность, мощность, скорость, и др.);
- показатели надежности (долговечность, безотказность работы и др.);
- эргономические показатели (учитывают гигиенические, психологические, физиологические свойства человека);
- эстетические показатели (стилевого соответствия, соответствия моде, цветового колорита и др.);
- показатели технологичности (трудоемкость и себестоимость изготовления, удельная стоимость ремонта и др.);
- экологические показатели (содержание вредных примесей, выбрасываемых в окружающую среду, вероятность загрязнения окружающей среды вредными отходами при хранении, транспортировке или эксплуатации и др.);

• показатели безопасности (вероятность безотказной работы, время срабатывания защитных устройств и др.) [3].

Но наличия одних показателей, влияющих на уровень качества продукции недостаточно, необходимо каким-то образом их оценить. Для этого используют метод оценки продукции по способам получения информации (в его состав входят измерительный, регистрационный, органолептический и расчетный методы), а также метод оценки по источникам получения информации (например, традиционный, экспертный и социологический методы) [3].

Любой потребитель всегда связывает качество продукции с ценой на нее, поэтому правильнее было бы определить качество продукции как совокупность ее свойств, способных удовлетворять определенные потребности потребителя при приемлемой для него цене.

Качество определяет конкурентоспособность продукции: чем оно выше, тем выше при прочих равных условиях конкурентоспособность и, следовательно, больше объем сбыта и доход предприятия. Уровень качества характеризуется как количественными, т.е. численными, показателями, так органолептическими, определяемыми пятью органами чувств человека (цвет, запах, звук и др.), значение которых в настоящее время резко возрастает в связи с повышением конкурентоспособности.

Качество — категория социально-экономическая. Всякое повышение его уровня должно приносить обществу или отдельному потребителю дополнительную пользу. Но производство продукции повышенного качества требует дополнительных затрат, которые должны быть компенсированы обществом или потребителем в виде повышенной цены.

Необходимым условием обеспечения высокого качества на стадии разработки является тщательный анализ информации о качестве на основе данных эксплуатации аналогичной продукции, выпускаемой в стране и за рубежом, и создание новых образцов продукции с улучшенными показателями качества в соответствии с действующими стандартами и другой нормативно-технической документацией.

Важное условие обеспечения высокого качества изготовления продукции — повышение квалификации инженерно-технических работников всех инженерных и производственных подразделений предприятия.

На стадии производства качество продукции обеспечивается путем поддержания необходимого уровня качества оборудования, оснастки, контрольно-измерительных приборов и средств, разработки и осуществления мероприятий по предупреждению брака и устранению причин выпуска продукции низкого качества. На этой же стадии осуществляются: входной контроль сырья, материалов, полуфабрикатов, комплектующих изделий; контроль и испытание выпускаемой продукции; сертификация; материальное стимулирование работников за выпуск продукции заданного качества. Запроектированный уровень качества на этой стадии обеспечивается: техническим совершенством, состоянием и точностью технологического оборудования и оснастки; наличием на предприятии метрологической службы и качеством ее работы; качеством поступающих сырья, материалов, комплектующих изделий; организацией, оснащенностью и качеством технического контроля и выполнения контрольных операций; нормальным ходом технологического процесса; надлежащим хранением и транспортировкой заготовок, деталей, узлов, агрегатов и готовой продукции; соблюдением технологической дисциплины; внедрением научной организации труда и управления качеством.

На стадии эксплуатации поддерживаются и реализуются с высокой эффективностью свойства, заложенные в продукции. Предприятие должно заботиться о безотказной работе выпущенного им изделия. Для достижения этой цели завод-изготовитель собирает, обрабатывает и анализирует информацию о качестве изделия, находящегося в эксплуатации, и соответствии его нуждам потребителя; снабжает потребителя эксплуатационной и ремонтной документацией; обеспечивает оптимальный межремонтный ресурс; выполняет гарантийный ремонт; снабжает потребителя запасными частями, инструментом и принадлежностями к изделию [1].

Решающим фактором, оказывающим влияние на качество продукции на всех ее стадиях, является человек, его квалификация, знания, образование, умение и желание выпол-

нять работу качественно. Без этого нельзя рассчитывать на высокое качество и конкурентоспособность продукции. Именно поэтому во всех развитых странах работающим уделяется особое внимание. Характерными чертами такого подхода к человеку в обеспечении высокого качества продукции являются нижеследующие.

1. Глубокое изучение запросов и требований потребителей к качеству и цене продукции. В производстве необходимо рассматривать исполнителя последующей операции как потребителя продукции предыдущей операции, что требует тесного взаимодействия всего коллектива работников в ходе производственного процесса.

2. Воспитание у всех работников предприятия, начиная с руководителя, стремления к всеобщему участию в обеспечении высокого качества.

3. Организация работ по обеспечению высокого качества руководителями всех уровней, вплоть до мастеров и бригадиров. Для этого должна регулярно проводиться учеба на местах и на специальных курсах. Каждый исполнитель, включая руководителей, должен обладать всесторонними знаниями факторов, влияющих на качество, как в своей, так и в смежных областях.

4. Мобилизация неисчерпаемого физического и интеллектуального потенциала всех работников, создание творческой атмосферы, способствующей всестороннему раскрытию их профессиональных возможностей.

5. Широкое применение методов статистического анализа и контроля качества исполнителями всех рангов, от директора до конкретного исполнителя-рабочего [1].

Использование этих методов позволяет каждому исполнителю не только выявлять брак в своей работе, но и предупреждать его появление.

Управление качеством, базирующееся на высочайшем уровне подготовки кадров, добросовестном отношении к труду, обеспечивает не только высокий уровень качества, но и минимальные затраты труда и средств на контроль специальным персоналом.

Управление качеством прошло ряд этапов в своем развитии. Этап зарождения отдельных элементов управления качеством в общем процессе управления предприятием сменился этапом интеграции, комплексным, системным подходом к управлению качеством.

Постоянный рост требований к качеству предопределил дальнейшее развитие управления качеством и внедрение на лучших предприятиях развитых стран «тотального» управления качеством, когда оно становится основой для организации всех направлений деятельности предприятия.

Для стимулирования предприятий к повышению качества продукции и услуг в ряде стран, в том числе и Белоруссии, учреждены национальные премии по качеству. Роль премий заключается не только в том, чтобы отмечать лучшие предприятия, но и в том, чтобы подтягивать средние путем проведения ими самооценки по критериям премий с последующим принятием мер по улучшению качества продукции и услуг.

Решающее значение в организации работ по качеству имеет позиция руководителей предприятий, их отношение к качеству выпускаемой продукции и услуг.

ЛИТЕРАТУРА

1. Организация и оперативное управление машиностроительным производством: учебник/ Н.С. Сачко. – Мн.: Новое знание, 2005. – 636с.: ил. – (Техническое образование).
2. Экономика предприятия: Учебное пособие/ И.М. Бабук, Л.В. Гринцевич, В.И. Демидов – Мн.: БНТУ, 2003. – 331с.
3. Организация, планирование и управление предприятием машиностроения/Под ред. И.М. Разумова – М.: Машиностроение, 1982. – 554с.

ПЛАНИРОВАНИЕ ЛОГИСТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫМ ПРЕДПРИЯТИЕМ

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет»

Могилев, Беларусь

Логистика – это наука об управлении социально-экономическими системами различных иерархических уровней посредством оптимизации потоковых процессов, происходящих в них.

Логистическое управление – это целенаправленное воздействие на социально-экономические системы различных иерархических уровней посредством оптимизации потоковых процессов, происходящих в них с целью достижения оптимальной структуры, поддержания оптимального режима функционирования и оптимальной продуктивности.

В соответствии с концепцией логистики фрагмент блок-схема логистического управления предприятием имеет следующий вид (рисунок а).

Успех любого предприятия в условиях все возрастающей конкуренции зависит от оперативности реагирования на имеющиеся изменения во внешней инфраструктуре. В этой связи предприятие должно иметь механизм управления, позволяющий осуществлять адаптацию к рыночным условиям и успешно конкурировать на рынках производителей продукции. Таким рычагом управления, прежде всего, является оперативное планирование, которое традиционно связано с разработкой среднесрочных и краткосрочных программ.

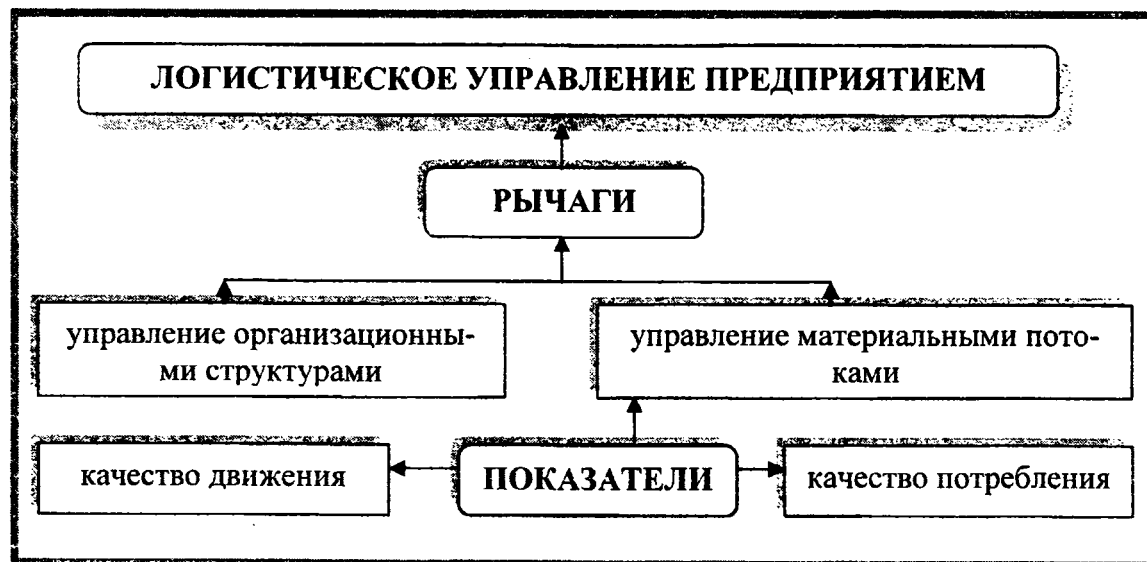


Рисунок а – Фрагмент блок-схемы логистического управления предприятием

Рассматривая проблему организационно-экономической устойчивости, следует отметить, что в современной практике одним из основных недостатков традиционной системы планирования деятельности предприятия является деформация структуры плана либо в сторону производства – рынок продавца, либо в сторону сферы обращения – рынок покупателя. В том и другом случаях теряются из вида значительные резервы повышения эффективной деятельности предприятия и упускаются возможности повышения эффективности потребления ограниченных ресурсов в полном объеме, что не отвечает требованиям основной цели предприятия.

Проведенный анализ организационных структур показал, что в настоящее время име-

ется хорошо разработанная теоретическая база по выбору организационных структур управления предприятием, но все предлагаемые к применению структуры имеют общую направленность и не учитывают логистическую составляющую производственно-хозяйственной деятельности предприятий.

Исследования организации функциональных служб на предприятиях с различными направлениями производственно-хозяйственной деятельности, а также анализ организационных структур, используемых в отечественной практике на предприятиях, свидетельствует о том, что в принципе не существует и не может существовать единого, стандартного варианта организационной структуры логистического управления. Организационная структура службы логистики и ее подразделений зависит от ряда факторов, к которым относятся следующие: направление производственно-хозяйственной деятельности субъектов хозяйствования; мощность и размеры предприятия, определяемые объемом станочного парка, а также занимаемой площадью территории; структура материально-технических ресурсов, потребляемых предприятием по направлениям деятельности; число поставщиков материально-технических ресурсов и их географическое месторасположение; количество потребителей как промежуточной, так и конечной готовой продукции, производимой предприятием; количество и назначение складов на территории предприятия, предназначенных для хранения материально-технических ресурсов, промежуточной и готовой продукции конкретного предприятия; состав и размеры внехозяйственного и внутризаводского парка транспортных средств, находящегося в собственности предприятия.

Как свидетельствует проведенный теоретический анализ, для управления службой логистики на промышленном предприятии наиболее применимой является трехуровневая организационная структура. Для полной производственной многоитерационной микрологистической цепи промышленного предприятия при трехуровневой организационной структуре логистического управления рекомендуется следующий состав отделов или групп с фрагментами осуществляемых функций:

- отдел закупок или материально-технического снабжения, занимающийся обоснованием потребности в поставляемых ресурсах, выбором поставщиков, организацией закупочного процесса;
- транспортное хозяйство, доставляющее материальные ресурсы на предприятие, между производственными подразделениями, осуществляющее перевозку готовой продукции до потребителя;
- отдел запасов, определяющий рациональные объемы запасов материальных ресурсов и готовой продукции;
- отдел складского хозяйства, осуществляющий приемку материальных ресурсов, их складирование и хранение, а также отпуск их в производство;
- производственный отдел, который рассчитывает и корректирует запасы промежуточной продукции в незавершенном производстве, разрабатывает рациональные схемы потоков продукции в технологических процессах;
- отдел распределения лимитирует потребности в материальных ресурсах, контролирует нормы их расхода и потребления в производственных подразделениях предприятия;
- отдел сбыта обеспечивает потребителей готовой продукцией в соответствии со спросом, взаимодействует с дистрибьюторской, дилерской и агентской сетью;
- отдел информационного обеспечения осуществляет организацию и управление коммуникациями микрологистической цепи логистики, обеспечивает связь внутри и между подразделениями предприятия, с поставщиками ресурсов и потребителями продукции.
- В зависимости от условий функционирования промышленного предприятия, для микрологистической цепи предлагается использовать следующее модульное построение с различными вариантами объединения отделов и групп (таблица 1).

Таблица 1 – Возможные варианты организации самостоятельных и объединенных отделов службы логистики

варианты	Отдел							
	закупок	транспорта	запасов	складов	распределения	Производства	сбыта	информации
I	■	■	■	■	■	■	■	■
II	■		■			■	■	■
III	■				■	■	■	■
IV	■			■	■	■	■	■
V	■		■		■	■	■	■

Каждый из предлагаемых вариантов в своем выборе зависит от ряда факторов, к основным из которых относятся: направление производственно-хозяйственной деятельности предприятия, его мощности, количество потребляемых материально-технических ресурсов, ассортимент и объем выпускаемой предприятием продукции. Рекомендусмый первый вариант может быть использован на промышленных предприятиях с полным производственным циклом, обширной номенклатурой поставляемых материальных ресурсов, большой номенклатурой производимой продукции. Последующие четыре варианта могут применяться в соответствии с перечисленными факторами при наличии следующих микрологистических цепей: полная, неполная, короткая и сервисная.

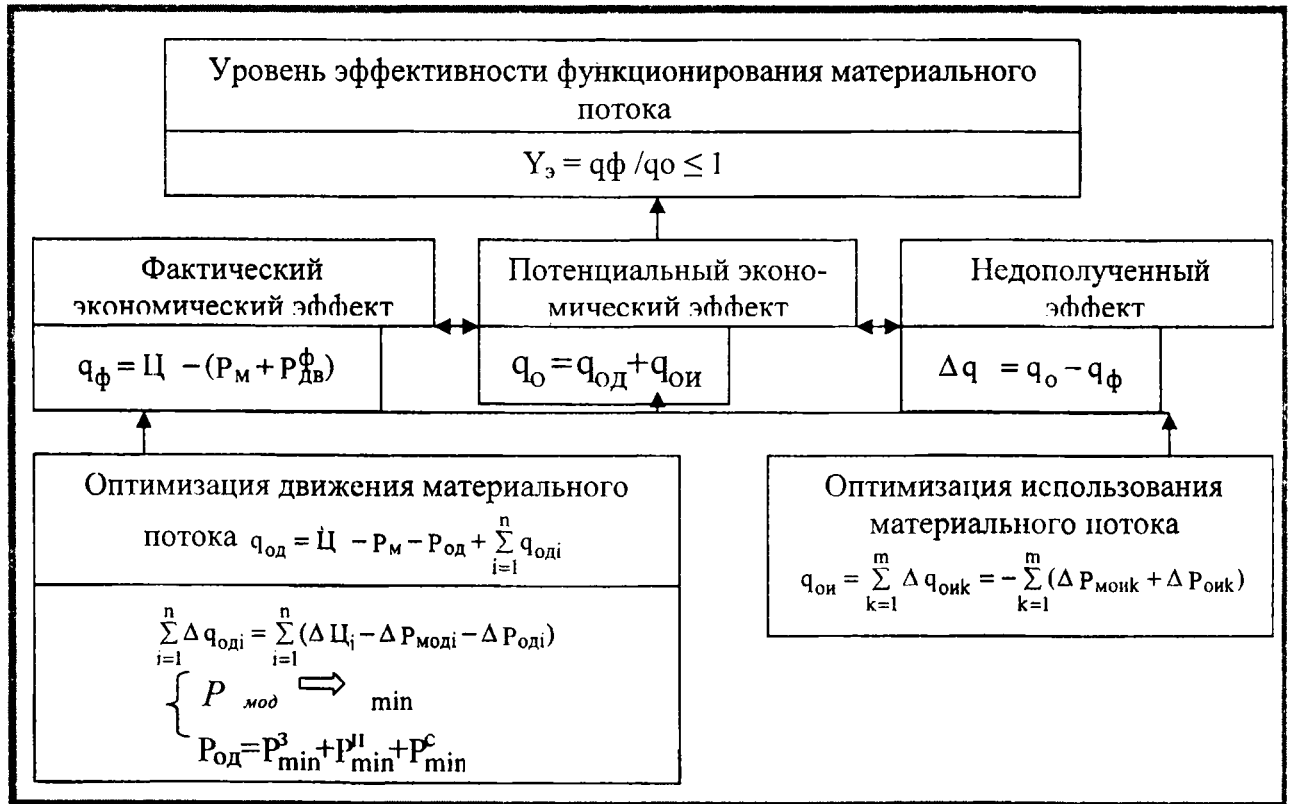


Рисунок 6 – Методика оптимизации движения и потребления материального потока предприятия с логистической позиции

В процессе планирования рационального движения материального потока затраты обусловленные снабжением, производством и сбытом продукции суммируются по звеньям

логистической цепи, распределяются по материальным потокам отдельных видов продукции и оптимизируются с учетом согласования экономических интересов. При этом дополнительно разрабатываются мероприятия по повышению эффективности движения материального потока в рассматриваемом периоде при его планировании. Формы экономии движения ресурсов разрабатываются по так называемым явным и неявным направлениям. К явным направлениям относится снижение расхода ресурса на единицу продукции в результате проведения мероприятий по оптимизации движения материального потока. К неявным направлениям: снижение расхода ресурса на единицу продукции в результате совершенствования технологии движения элементов материального потока, способствующего экономии других видов ресурса или повышению конкурентоспособности продукции; сокращению экономических потерь в виде упущенных выгод.

Планирование же потребления материального потока заключается в разработке мероприятий по снижению экономических потерь и изысканию резервов повышения эффективности применяемых ограниченных ресурсов предприятия. Здесь формы экономии использования ресурсов распределяются вновь по явным и неявным направлениям. Явное направление это снижение расхода ресурса на единицу продукции вследствие проведения мероприятия по оптимизации потребления материального потока, неявное направление это поддержание удельного расхода ресурса на оптимальном уровне, не допуская его роста вследствие динамического характера системы.

Методика оптимизации движения и потребления материального потока, предлагаемая для планирования в компактном виде представлена на рисунке б.

где C – отпускная цена изделия, руб./шт.; q_{ϕ} – фактический эффект, получаемый от функционирования материального потока в условиях хозяйственной деятельности предприятия, руб./шт.; q_0 – потенциальный эффект, предполагаемый от функционирования материального потока в условиях хозяйственной деятельности предприятия, руб./шт.; $q_{\phi,м}$ – затраты на закупку сырья и материалов (комплектующих полуфабрикатов), руб./шт.; P^3 – затраты в звене закупки, руб./шт.; P^n – затраты в звене производство, руб./шт.; P^c – затраты в звене сбыт, руб./шт.

Оптимизация движения и потребления материального потока предприятия позволяет дать количественную оценку экономического потенциала предприятия. Рынок товаров промышленного назначения, ориентированный на покупателя, предъявляет высокие требования к гибкости производства и срокам удовлетворения потребителей клиентов. Эти требования тесным образом согласуются с целью логистики. Более полно рынок покупателя реализуется на логистической концепции управления, которая обуславливает необходимость использования не плоскостных моделей планирования производственной программы предприятия, а пространственной, базирующейся на триаде: затраты – время – выпуск. При этом гибкость производства с позиции логистической концепции управления закладывается разработкой нескольких альтернативных вариантов регламента движения материального потока предприятия.

Альтернативные варианты регламентов движения материального потока в звеньях логистической цепи предприятия для определенной продукции заданного рынком качества характеризуются следующими основными тремя параметрами:

- интенсивностью движения материального потока, которая может определяться выпуском продукции в единицу времени, мощностью, пропускной способностью и т.д.;
- длительностью цикла движения материального потока;
- затратами на движение и использование материального потока.

На базе рационального соотношения загрузки рабочих мест и межоперационного пролеживания деталей определяют оптимальную партию и очередность запуска материальных ресурсов в производство. Результаты расчетов дают возможность распределить производственную программу в объемно-календарном плане, а также построить график движения материальных ресурсов в звене «закупки», «производство», «сбыт». Для подтверждения справедливости вышеприведенных теоретических предпосылок проведено планирование оптимальной интенсивности движения материального потока в звеньях логистической цепи ОАО «Техноприбор» при производстве насосов «Ручеек» в 2005г. (таблица 2).

Таблица 2 – Альтернативные регламенты движения материального потока в логистической цепи предприятия (числитель – тыс.руб./шт.; знаменатель – дни)

Материальные затраты, тыс. руб./шт.	Звено «закупок»	Звено «производство»	Звено «сбыт»	Полная себестоимость	Отпускная цена, тыс. руб./шт.	Экономический эффект
5,24	$\frac{6,2}{3}$	$\frac{20,5}{5}$	$\frac{10,5}{5}$	$\frac{42,44}{13}$	48,00	$\frac{5,56}{13}$
5,24	$\frac{6,2}{3}$	$\frac{20,5}{5}$	$\frac{10,2}{3}$	$\frac{42,14}{11}$	48,00	$\frac{5,86}{11}$
5,24	$\frac{6,2}{3}$	$\frac{20,5}{5}$	$\frac{11,3}{2}$	$\frac{43,24}{10}$	48,00	$\frac{4,76}{10}$
5,24	$\frac{6,2}{3}$	$\frac{19,82}{4}$	$\frac{10,5}{5}$	$\frac{41,76}{12}$	48,00	$\frac{6,24}{12}$
5,24	$\frac{6,2}{3}$	$\frac{19,82}{4}$	$\frac{10,2}{3}$	$\frac{41,46}{10}$	48,00	$\frac{6,54}{10}$
5,24	$\frac{6,2}{3}$	$\frac{19,82}{4}$	$\frac{11,3}{2}$	$\frac{42,56}{9}$	48,00	$\frac{5,44}{9}$

Результаты расчета показали, что при заданных условиях реализации продукции оптимальным вариантом регламента движения материального потока предприятия является вариант при котором достигается максимальная прибыль 6,54 тыс.руб./шт. и длительность логистического цикла предприятия – 10 рабочих дней.

Таким образом, в соответствии с фрагментом блок-схемы логистического управления предприятием предложены варианты модулей организационных структур логистического управления предприятием, методика оптимизации движения и потребления материального потока предприятия с логистической позиции и разработана логистическая модель оптимального планирования материального потока предприятия. Уровень эффективности функционирования материального потока в соответствии с позицией логистики предлагается определять как соотношение массы ресурса использованного для достижения результата с оптимальной массой ресурса необходимой для достижения результата.

УДК 339.564

Торская И.В., Хованская Н.М.

АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭКСПОРТНОГО ПОТЕНЦИАЛА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫМИ ПРЕДПРИЯТИЯМИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Экспортный потенциал представляет собой интегральную способность предприятия создавать и производить конкурентную продукцию, продвигать ее на внешнем рынке, выгодно реализовывать там товар и обеспечивать требуемый уровень сервисного обслуживания. В понятие экспортного потенциала включаются такие экономические категории, как потенциал конкурентоспособности, потенциал экспортной деятельности, промышленный потенциал, а также финансовые возможности.

Некоторые авторы отождествляют понятия потенциала и конкурентоспособности. Однако оперирование только понятием конкурентоспособности не дает реальной оценки экспортного потенциала предприятия. Конкурентоспособность есть понятие относительное, определяемое на осно-

ве сравнения, которое не в состоянии определить абсолютная оценка производственных мощностей, емкости рынка, финансового состояния предприятия.

В экономическую категорию экспортного потенциала следует включать также понятие «потенциал экспортной деятельности», определяемое как максимальные возможности предприятия по продвижению, реализации и обслуживанию экспортных товаров на внешних рынках. [1, стр.9].

В отличие от экспортной деятельности, в понятие экспортного потенциала, включен также и промышленный потенциал, представляющий собой максимальные возможности предприятия по генерации и производству промышленных товаров.

Финансовые возможности экспортера также во многом определяют формирование, развитие и использование экспортного потенциала и обеспечивают его стабильность и устойчивость.

Следовательно, основой экспортного потенциала является совокупность производственного, кадрового, финансового и рыночного потенциалов предприятия. Поэтому экспортный потенциал промышленного предприятия можно определить, как существующую или потенциально возможную способность данного предприятия осуществлять под влиянием факторов изменчивой внешней среды торговую деятельность на внешнем рынке, определяемую совокупностью его производственного, кадрового, финансового и рыночного потенциалов.

Экспортный потенциал является основным индикатором конкурентоспособности и его фактическая реализация служит подтверждением реальных конкурентных преимуществ и инструментом продвижения национальных интересов в масштабах мирового хозяйства.

Для продукции машиностроения перспективы изменения экспортного потенциала и конкурентоспособности продукции связаны с технологическим переоснащением предприятий и повышением качества и технических характеристик выпускаемой ими продукции.

Экспортный потенциал является комплексной величиной и предусматривает вовлечение в его анализ различных сфер деятельности предприятия. В связи с этим оценка экспортного потенциала является сложной трудоемкой операцией и предполагает наличие большого количества данных. Более простым является процесс оценки использования предприятием своего экспортного потенциала.

Использование экспортного потенциала промышленным предприятием предполагает увеличения оборота предприятия, объемов реализации, более полной загрузки производственных мощностей, появления необходимости и возможности создания новых рабочих мест, увеличения валютных поступлений, что является актуальным в условиях обострения международной конкуренции и требует, в том числе, освоения передовых технологий и внедрения инноваций.

Проанализируем использование экспортного потенциала белорусскими предприятиями на примере некоторых товаров машиностроения. Данные о структуре экспорта по группам стран представлены табл. 1 [3, стр.166-176 ; 4].

Таблица 1 - Распределение экспорта машиностроительной продукции Республики Беларусь по группам стран в 2003-2006 гг.

Наименование товара	2003		2004		2005		2006 (1 полугодие)	
	количество	стоимость тыс. USD	количество	стоимость, тыс. US D	количество	стоимость, тыс. US D	количество	стоимость, тыс. US D
Холодильники, морозильники и холодильное оборудование, тыс. шт.	790,2	262 472	848,9	320 334	890,1	297 374	401,5	132 094
страны СНГ	751,5	254 925	824,4	314 917	855,1	289 851	389,1	129 181
страны вне СНГ	38,7	7 547	24,5	5 417	35	7 523	12,4	2 790

Наименование товара	2003		2004		2005		2006 (I полугодие)	
	количество	стоимость тыс. USD	количество	стоимость, тыс. USD	количество	стоимость, тыс. USD	количество	стоимость, тыс. USD
Тракторы, тыс. шт.	24,1	247 376	29,5	339 786	35,4	397 233	19,9	277 127
страны СНГ	17	170 654	21,6	257 225	25,1	270 981	12,5	193 350
страны вне СНГ	7,1	76 722	7,9	82 561	10,3	126 252	7,4	83 650
Автомобили грузовые, включая седельные тягачи, тыс. шт.	11,9	370 023	12,3	532 429	13,2	613 011	6,7	338 611
страны СНГ	10,3	326 084	10,5	463 509	11,8	532 215	6,2	305 970
страны вне СНГ	1,6	43 939	1,8	68 920	1,4	80 796	0,5	32 660
Мотоциклы, тыс. шт.	25,1	7 337	17,4	5 346	7,6	2 899	3,1	1 494
страны СНГ	2,4	760	3,2	1 279	3,7	1 729	3,1	1 494
страны вне СНГ	22,7	6 577	14,2	4 067	3,9	1 170	-	-
Велосипеды, тыс. шт.	705,7	27 266	730,4	28 307	381,2	16 101	175,5	7 723
страны СНГ	703,3	27 178	727,6	28 202	379,9	16 040	175,4	7 718
страны вне СНГ	2,4	88	2,8	105	1,3	61	0,1	5
Телевизоры, видеомониторы и видеопроекторы тыс. шт.	544,3	63 249	739	87 968	814,8	92 938	203,8	18 953
страны СНГ	540,1	62 802	739	87 910	814,4	92 893	203,8	18 953
страны вне СНГ	4,2	447	-	58	0,4	45	-	-

На основе этих данных рассчитаем базисные индексы роста объемов экспорта в стоимостном и натуральном выражениях (за базу принят 2003 год) и цепные индексы, а также и их соотношение. Результаты проведенных расчетов представлены в табл. 2. (Где I_n - индекс роста в натуральном выражении ; I_c - индекс роста в стоимостном выражении . В числителе – базисный индекс, в знаменателе – цепной индекс)

Таблица 2 - Базисные и цепные индексы изменения объемов экспорта машиностроительной продукции в стоимостном и натуральном выражениях и их соотношение

Наименование товара	2004			2005			2006(I полугодие)		
	I_n	I_c	I_c / I_n	I_n	I_c	I_c / I_n	I_n	I_c	I_c / I_n
Холодильники, морозильники и холодильное оборудование, всего	1,07	1,22	1,14	<u>1,13</u> 1,05	<u>1,13</u> 0,93	<u>1,00</u> 0,89	<u>1,17</u> 0,90	<u>1,16</u> 0,88	<u>0,99</u> 0,98

Наименование товара	2004			2005			2006(1 полугодие)		
	<i>I_n</i>	<i>I_c</i>	<i>I_c / I_n</i>	<i>I_n</i>	<i>I_c</i>	<i>I_c / I_n</i>	<i>I_n</i>	<i>I_c</i>	<i>I_c / I_n</i>
- в страны СНГ	1,13	1,26	1,11	<u>1,18</u> 1,04	<u>1,17</u> 0,92	<u>0,98</u> 0,88	<u>1,19</u> 0,91	<u>1,17</u> 0,89	<u>0,98</u> 0,98
- в страны вне СНГ	0,63	0,72	1,13	<u>0,90</u> 1,43	<u>1,00</u> 1,39	<u>1,10</u> 0,97	<u>0,74</u> 0,71	<u>0,85</u> 0,74	<u>1,15</u> 1,04
Тракторы, всего.	1,22	1,37	1,12	<u>1,47</u> 1,20	<u>1,75</u> 1,27	<u>1,19</u> 1,06	<u>1,61</u> 1,12	<u>1,61</u> 1,17	<u>1,00</u> 1,04
- в страны СНГ	1,27	1,51	1,19	<u>1,48</u> 1,16	<u>2,50</u> 1,66	<u>1,70</u> 1,43	<u>1,43</u> 1,00	<u>1,59</u> 1,05	<u>1,11</u> 1,05
- в страны вне СНГ	1,11	1,08	0,97	<u>1,45</u> 1,30	<u>0,07</u> 0,07	<u>0,05</u> 0,05	<u>2,03</u> 1,44	<u>1,65</u> 1,53	<u>0,81</u> 1,06
Автомобили грузовые, включая седельные тягачи, всего	1,03	1,44	1,39	<u>1,11</u> 1,07	<u>1,66</u> 1,15	<u>0,49</u> 1,07	<u>1,13</u> 1,02	<u>1,83</u> 1,10	<u>1,63</u> 1,08
- в страны СНГ	1,02	1,42	1,39	<u>1,15</u> 1,12	<u>1,63</u> 1,15	<u>1,42</u> 1,03	<u>1,20</u> 1,05	<u>1,88</u> 1,15	<u>1,56</u> 1,10
- в страны вне СНГ	1,13	1,57	1,39	<u>0,88</u> 0,78	<u>1,84</u> 1,17	<u>2,10</u> 1,50	<u>0,63</u> 0,71	<u>1,49</u> 0,81	<u>2,38</u> 1,14
Мотоциклы, всего	0,69	0,73	1,05	<u>0,30</u> 0,44	<u>0,40</u> 0,54	<u>1,30</u> 1,23	<u>0,22</u> 0,82	<u>0,37</u> 1,03	<u>1,65</u> 1,26
- в страны СНГ	1,33	1,68	1,26	<u>1,54</u> 1,16	<u>2,28</u> 1,35	<u>1,48</u> 1,16	<u>2,33</u> 1,68	<u>3,54</u> 1,73	<u>1,52</u> 1,03
- в страны вне СНГ	0,63	0,62	0,99	<u>0,17</u> 0,27	<u>0,18</u> 0,28	<u>1,04</u> 1,04	= -	<u>0,22</u> -	= -
Велосипеды, всего	1,04	1,04	1,00	<u>0,54</u> 0,52	<u>0,59</u> 0,57	<u>1,09</u> 1,10	<u>0,42</u> 0,92	<u>0,48</u> 0,96	<u>1,14</u> 1,04
- в страны СНГ	1,03	1,04	1,00	<u>0,54</u> 0,52	<u>0,59</u> 0,57	<u>1,09</u> 1,10	<u>0,42</u> 0,92	<u>0,48</u> 0,96	<u>1,14</u> 1,04
- в страны вне СНГ	1,17	1,19	1,02	<u>0,54</u> 0,46	<u>0,69</u> 0,58	<u>1,28</u> 1,26	<u>0,07</u> 0,15	<u>0,09</u> 0,16	<u>1,34</u> 1,07
Телевизоры, видеомониторы и видеопроекторы, всего	1,36	1,39	1,02	<u>1,50</u> 1,10	<u>1,47</u> 1,06	<u>0,98</u> 0,96	<u>0,74</u> 0,50	<u>0,60</u> 0,41	<u>0,81</u> 0,82
- в страны СНГ	1,37	1,40	1,02	<u>1,51</u> 1,10	<u>1,48</u> 1,06	<u>0,98</u> 0,96	<u>0,75</u> 0,50	<u>0,60</u> 0,41	<u>0,80</u> 0,82
- в страны вне СНГ	-	0,13	-	<u>0,10</u> -	<u>0,10</u> 0,77	<u>1,00</u> -	= -	= -	= -

Как видно из табл. 1 и 2, белорусский экспорт машиностроительной продукции ориентирован в первую очередь на страны СНГ, что связано с хорошим знанием продукции покупателем и высокой степени доверия, о чем говорит тенденция роста экспорта, как в стоимостном, так и в натуральном выражении. Доля экспорта в страны вне СНГ значительно ниже, однако, здесь также существует положительные тенденции роста по таким товарам как

тракторы, грузовые автомобили. Во многом это связано с ценовой политикой фирм. Этот факт можно проиллюстрировать данными табл. 3.

Таблица 3 – Средние экспортные цены (USD) некоторых видов машиностроительной продукции в первом полугодии 2006 года

<i>Средние экспортные цены(USD)</i>			
	<i>Всего за 1 полугодие 2006г.</i>	<i>В страны СНГ</i>	<i>В страны вне СНГ</i>
Тракторы, за шт.	13926	15468	11304
Седелные тягачи, за шт.	32325	32186	33784
Грузовые автомобили, за шт.	50539	49350	62320
Холодильники, морозильники и холодильное оборудование, за шт.	329	332	225
Мотоциклы, за шт.	482	482	800
Велосипеды, за шт.	44	44	49

Экспортная цена продажи тракторов за пределы СНГ является ниже средней, что является оправданным как с точки зрения объемов продаж, так и с точки зрения увеличения выручки от реализации в этом регионе. В случае грузовых автомобилей наблюдается обратное: цена продажи вне СНГ выше средней, что повлекло за собой снижение объемов продаж. Тем не менее, в стоимостном объеме наблюдается рост.

Объемы реализации холодильников на рынках вне СНГ в натуральном и стоимостном выражении колеблются, что связано с жесткой конкуренцией на рынке данной продукции. Однако в развитии по годам в ситуации в целом заметно улучшение ситуации, что можно объяснить снижением экспортных цен ниже средних, что привлекает покупателей.

Если проанализировать соотношение стоимостных и натуральных индексов, то можно сделать вывод о том, что в основном машиностроительные предприятия смогли добиться роста цен на свою продукцию при сохранении и даже расширении рынков сбыта в натуральном выражении. Однако отмечены переходы в другие сегменты в отношении отдельных регионов сбыта.

Так, по тракторам наблюдается стабильное положение за счет рынков ближнего зарубежья, составляющих большую долю продаж. Но продажи в дальнее зарубежье характеризуются показателями, соответствующими гораздо более скромным возможностям повышения цен для работы на этих рынках. Это объясняется требованием обеспечения лучшего соотношения цены и качества для успешной работы на насыщенных конкурентных рынках вне СНГ.

По холодильникам позиция превышения стоимостного индекса над натуральным сохранилась лишь по продажам вне СНГ, несмотря на то, что цены в этом регионе ниже средних.

Предприятия, производящие грузовые автомобили обеспечивали весь анализируемый период рост объемов экспорта, как в натуральном, так и в стоимостном выражении, при этом стоимостные показатели росли быстрее, а, значит, средняя цена реализации продукции повышалась. Существенно хуже обстоит дело с реализацией мотоциклов и велосипедов. Желание повысить цены на велосипеды со стороны белорусских экспортеров привело к резкому сокращению объемов спроса на них. Это объясняется высокой эластичностью спроса на внешних рынках, где появилось большое число товаров-субститутов с лучшим соотношением цены и качества. В отношении телевизоров ситуация обратная: в связи с угрозой потерей покупателей производители вынуждены сознательно пойти на снижение цен.

Положительным явлением для экспорта некоторых товаров (тракторы, грузовые автомобили, холодильники) является наличие большого количества стран-импортеров, что свидетельствует о реализации стратегии диверсификации. Данный фактор значительно снижает риски предприятия, предоставляет больше шансов на сбыт. В качестве примера на рис. 1 показано распределение сбыта белорусских тракторов вне СНГ.

На основании изучения использования белорусскими предприятиями их экспортного потенциала можно сделать следующие выводы:

Для эффективного использования экспортного потенциала фирмам необходимо шире использовать ценовую политику, ориентированную на незатратные методы ценообразования.

Диверсификация экспорта положительно влияет на результаты внешнеэкономической деятельности. Необходимо продолжить усилие в этом направлении.

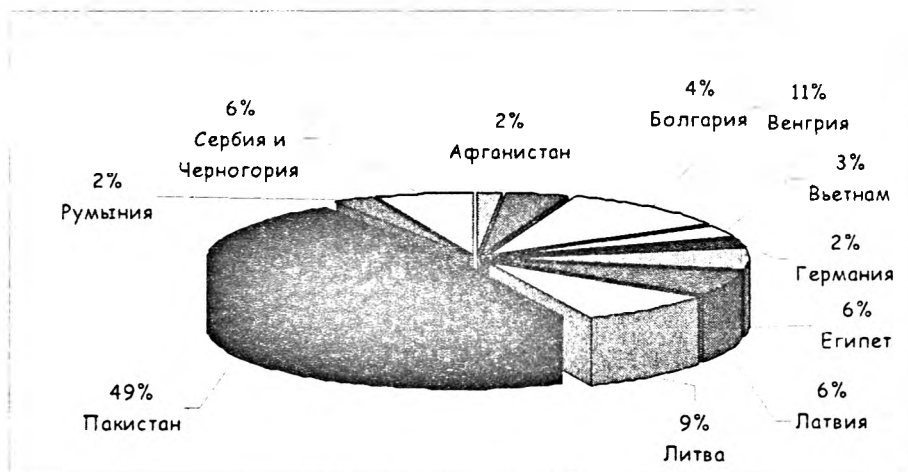


Рисунок 1-Структура сбыта белорусских тракторов вне СНГ в 2005 г.

Необходимы маркетинговые исследования для выявления интересов покупателей на различных рынках, их сегментирования в целях последующего производства новой конкурентоспособной продукции и продвижения на ее на внешних рынках.

ЛИТЕРАТУРА

1.Круглов В.С.: Формирование и использование экспортного потенциала промышленных предприятий: Автореферат на соискание ученой степени кандидата экономических наук.- Саратов: Саратовский государственный социально-экономический университет, 2006 – 19с.. 2.Манин П.В. Управление экспортным потенциалом промышленных предприятий :на примере предприятий Республики Мордовия: Автореферат на соискание ученой степени кандидата экономических наук.- Ульяновск :Волжский университет им. В.Н. Татищева, 2005 - 21с. 3 .Промышленность РБ. Статистический сборник.- Минск: Министерство статистики РБ., 2006 – 358с.. 4.На качелях // Белорусы и рынок .- №37.- 2006.

УДК 658.011.46

Бурейко В.В., Торская И.В.

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ РЕСУРСОВ В МАШИНОСТРОЕНИИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Повышение эффективности производства – одна из важнейших задач, стоящих перед экономикой Республики Беларусь в настоящее время. Ее значение обусловлено недостаточностью собственных природных и производственных ресурсов, которые необходимо экономно и рационально использовать. В связи с этим весьма важной является задача статисти-

ческой оценки эффективности использования производственных ресурсов и меры их влияния на динамику объема производства.

На рисунке 1 показана отраслевая структура промышленности Республики Беларусь. При этом наибольший удельный вес в общем объеме продукции промышленности в 2005 году занимает машиностроение и металлообработка (22,4%). Следовательно, машиностроение является одним из основных экономических и стратегических ресурсов экономики Республики Беларусь [1].

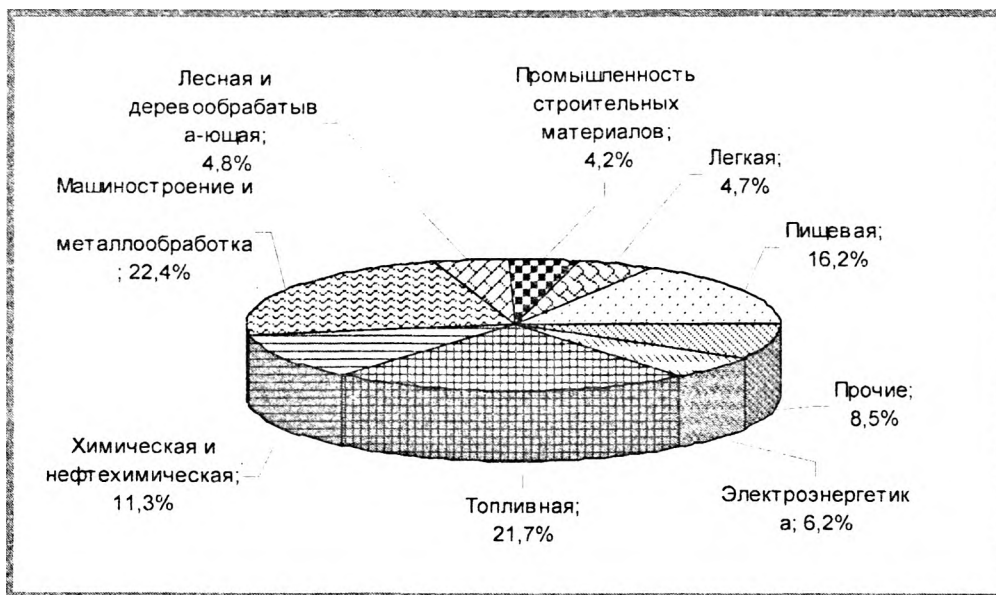


Рисунок 1 – Удельный вес продукции отдельных отраслей в общем объеме продукции промышленности в 2005 г.

В основу проведенного анализа был предложен подход, предложенный Тумасян А.А. и Василевской Л.И.[4]. Предполагаемый обобщающий показатель эффективности использования производственных ресурсов предприятия назовем общей ресурсоотдачей (РО). Он будет представлять собой отношение объема продукции в фактических действовавших ценах (В) к суммарной величине перечисленных производственных ресурсов (Р), а именно – стоимости рабочей силы (СРС), среднегодовой стоимости основных промышленно-производственных средств (ОФ) и среднегодовых запасов материальных оборотных средств (МОС). Общая схема расчета показателя общей ресурсоотдачи выглядит следующим образом:

$$RO = V/P = V/(СРС + ОФ + МОС)$$

Расчет и анализ сводного показателя эффективности использования производственных ресурсов проведем на основе данных по машиностроению [3, с. 213]. В таблице 1 сгруппированы исходные данные (показатели 1 – 4) и результаты расчета ряда других показателей для анализа динамики показателя эффективности использования совокупных производственных ресурсов по машиностроению. При этом стоимость рабочей силы (показатель 5) была рассчитана как произведение средней заработной платы рабочих и среднегодовой численности промышленно-производственного персонала.

Таблица 1 - Показатели объема производственных ресурсов и эффективности их использования по машиностроению

Показатель	Условное обозначение	Базисный период 2004 г.(0)	Отчетный период 2005 г.(1)	Соотношение отчетного и базисного
1. Объем производства в сопоставимых ценах, млрд. р.	В	10 755	12 284	1,1422
2. Среднегодовая численность промышленно-производственного персонала, тыс. чел.	СЧПП	383,3	315,6	0,8234

Окончание таблицы 1				
3. Среднегодовая стоимость промышленно-производственных средств, млрд. р.	ОФ	18 038	21 660,8	1,2008
4. Среднегодовая стоимость материальных оборотных средств, млрд. руб.	МОС	5 154	6 488,8	1,2588
5. Стоимость рабочей силы, млрд. р.	СРС	229,98	189,36	0,8237
6. Совокупные ресурсы (стр. 3 + стр. 4 + стр. 5) млрд. руб.	Р	23 421,98	28 338,96	1,2099
7. Производительность труда (стр. 1/ стр. 2), млрд. р./чел.	V_p	28,0589	38,9227	1,3872
8. Производство объема продукции в расчете на 1 руб. стоимости рабочей силы (стр. 1/ стр. 5), р./р.	$V^{СРС}$	46,7649	64,8711	1,3879
9. Фондоотдача (стр. 1/ стр. 3), р./р.	Ф	0,5962	0,5671	0,9512
10. Материалоотдача (стр. 1/ стр. 4), р./р.	М	2,0867	1,8931	0,9072
11. Производство объема продукции в расчете на единицу совокупных ресурсов (стр. 1/ стр. 6), р./р.	РО	0,4592	0,4335	0,9441

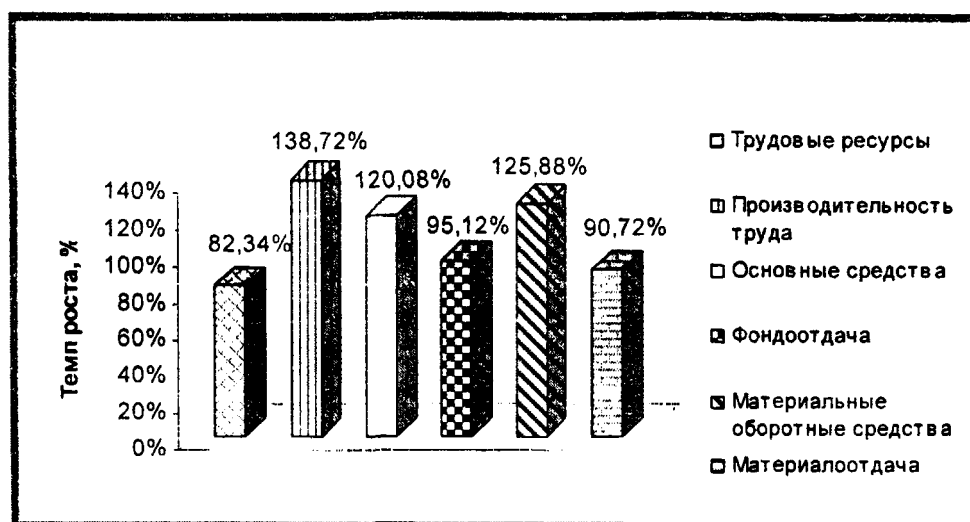


Рисунок 2 - Динамика объема производственных ресурсов в машиностроении и их отдачи за 2004 – 2005

Как видно из таблицы, рост объема производства в 2005 году на 14,22% произошел при увеличении объема основных фондов на 20,08% и среднегодовой стоимости материальных оборотных средств – на 25,88%, а также при сокращении численности промышленно-производственного персонала на 17,66%. При этом фондоотдача уменьшилась на 4,88%, материалоотдача – на 9,28%, а производительность живого

труда увеличилась на 38,72%. Динамика ряда абсолютных и относительных показателей представлена на рисунке 2.

Имея данные об общей величине ресурсов производства и их отдаче, можно определить размер влияния отдельных факторов на абсолютный прирост объема производства, который составил:

$$\Delta B = 12\,284 - 10\,755 = 1\,529 \text{ млрд. р.}$$

Прирост, полученный за счет увеличения объема вовлеченных в производственный процесс ресурсов составил:

$$\Delta B(P) = (P_1 - P_0) P O_0 = (28\,338,96 - 23\,421,98) 0,4592 = 2\,275,01 \text{ млрд. р.}$$

Сокращение, полученное за счет увеличения ресурсоотдачи составило:

$$\Delta B(PO) = (P O_1 - P O_0) P_1 = (0,4335 - 0,4592) 28\,339,96 = -728,31 \text{ млрд. р.}$$

Рассчитаем влияние отдельных видов ресурсов на динамику объема производства. Для этого, согласно методике анализа необходимо сначала определить долю каждого вида ресурсов в их общем объеме за базисный период [2, с. 12]. Она составит:

- для стоимости рабочей силы - 0,98%;
- для основных фондов - 77,01%;
- для материальных оборотных средств - 22,01%.

Абсолютное снижение объема производства, произошедшее в результате снижения величины трудовых ресурсов, составляет:

$$\Delta B(CPQ) = B_0 (I_{CPC} - 1) d_{CPC} = 10\,755 (0,8237 - 1) 0,0098 = -18,58 \text{ млрд. р.}$$

Абсолютный прирост объема производства, полученный за счет увеличения объема примененных основных фондов составляет:

$$\Delta B(O\Phi) = B_0 (I_{O\Phi} - 1) d_{O\Phi} = 10\,755 (1,2008 - 1) 0,7701 = 1\,671,96 \text{ млрд. р.}$$

Абсолютное увеличение объема производства в связи с ростом запасов материальных оборотных средств составляет:

$$\Delta B(MOC) = B_0 (I_{MOC} - 1) d_{MOC} = 10\,755 (1,2588 - 1) 0,2201 = 621,63 \text{ млрд. р.}$$

Суммарный абсолютный прирост объема продукции по факторам равен ее общему приросту, полученному за счет изменения общего объема примененных ресурсов, составившему 2 275,01 млрд. р.

Теперь, последовательно принимая величины B^{CPC} , Φ и M на уровне отчетного и базисного периодов, можно рассчитать систему взаимосвязанных индексов ресурсоотдачи.

Общий индекс эффективности использования ресурсов рассчитаем следующим образом:

$$I_{PO} = \frac{(1/(1/B_1^{CPC} + 1/\Phi_1 + 1/M_1))}{(1/(1/B_0^{CPC} + 1/\Phi_0 + 1/M_0))} = \frac{(1/(1/64,8711 + 1/0,5671 + 1/1,8931))}{(1/(1/46,7649 + 1/0,5962 + 1/2,0867))} = 0,9441.$$

Рассчитаем также частные индексы, выражающие меру повышения эффективности использования ресурсов под влиянием.

Индекс роста производительности труда:

$$I_{POB}^{CPC} = \frac{(1/(1/B_1^{CPC} + 1/\Phi_0 + 1/M_0))}{(1/(1/B_0^{CPC} + 1/\Phi_0 + 1/M_0))} = \frac{(1/(1/64,8711 + 1/0,5962 + 1/2,0867))}{(1/(1/46,7649 + 1/0,5962 + 1/2,0867))} = 1,0026.$$

Индекс снижения фондоотдачи:

$$I_{PO\Phi} = \frac{(1/(1/B_1^{CPC} + 1/\Phi_1 + 1/M_0))}{(1/(1/B_1^{CPC} + 1/\Phi_0 + 1/M_0))} = \frac{(1/(1/64,8711 + 1/0,5671 + 1/2,0867))}{(1/(1/64,8711 + 1/0,5962 + 1/2,0867))} = 0,9619.$$

Индекс снижения эффективности использования материальных оборотных средств:

$$I_{РОМ} = \frac{(1/(1/B_1^{CPC} + 1/\Phi_1 + 1/M_1))}{(1/(1/B_1^{CPC} + 1/\Phi_1 + 1/M_0))} = \frac{(1/(1/64,8711 + 1/0,5671 + 1/1,8931))}{(1/(1/46,7649 + 1/0,5671 + 1/2,0867))} = 0,9788.$$

Предположив, что интенсивные факторы вступают в действие вслед за экстенсивными, определим размер влияния эффективности использования отдельных видов ресурсов на динамику объема производства. Как уже было рассчитано выше, снижен объем производства за счет увеличения общей ресурсоотдачи составил - 728,31 млрд.р..

Эту величину можно представить как результат:

- увеличение эффективности живого труда:

$$\Delta B_{B^{CPC}} = B_0 \cdot I_P (I_{POB^{CPC}} - 1) = 10\,755 \cdot 1,2099 (1,0026 - 1) = 33,83 \text{ млрд.р.}$$

- снижение фондоотдачи:

$$\Delta B_{\Phi} = B_0 \cdot I_{POB^{CPC}} \cdot I_P (I_{PO\Phi} - 1) = 10\,755 \cdot 1,2099 \cdot 1,0026 (0,946 - 1) = -497,06 \text{ млрд.р.}$$

- снижение материалоотдачи:

$$\Delta B_M = B_0 \cdot I_{POB^{CPC}} \cdot I_P \cdot I_{PO\Phi} (I_{PO\Phi} - 1) = 10\,755 \cdot 1,2099 \cdot 1,0026 \cdot 0,9619 (0,9788 - 1) = -266,04 \text{ млрд.р.}$$

Результаты общего прироста объема продукции по факторам представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Факторная структура прироста объема производства по машиностроению

Фактор прироста объема производства	Условное обозначение	Изменение объема производства	
		млрд.р.	к общему приросту, %
Изменение стоимости рабочей силы	$\Delta B(CPC)$	- 18,58	- 1,3%
Изменение среднегодовой стоимости основных средств	$\Delta B(O\Phi)$	1 671,96	108,8%
Изменение запасов материальных оборотных средств	$\Delta B(MOC)$	621,63	40,1%
Итого: изменение ресурсов	$\Delta B(P)$	2 275,01	147,6%
Изменение производительности труда	$\Delta B_{B^{CPC}}$	33,83	2,2%
Изменение фондоотдачи	ΔB_{Φ}	- 497,06	- 32,5%
Изменение материалоотдачи	ΔB_M	- 266,04	- 17,4%
Итого: изменение ресурсоотдачи	ΔB	- 728,31	- 47,6%

Таким образом, средства, вложенные в рабочую силу, уменьшились, а их отдача (производительность труда) увеличилась. Средства, вложенные в стоимость основных средств и запасы материальных оборотных средств увеличились, а их фондоотдача и материалоотдача уменьшились.

Произведенные расчеты позволяют определить также размер условной экономии отдельных видов и общей величины совокупных ресурсов. Общая условная экономия ресурсов составит:

$$\mathcal{E}_P = P_0 \cdot I_B - P_1 = 23\,421,98 \cdot 1,1422 - 28\,338,96 = -1\,586,37 \text{ млрд.р.}$$

В том числе:

– условная экономия ресурсов труда:

$$\mathcal{E}_{CPC} = CPC_0 \cdot I_B - CPC_1 = 229,98 \cdot 1,1422 - 189,36 = 73,32 \text{ млрд.р.}$$

– условная экономия на инвестициях в основной капитал:

$$\mathcal{E}_{O\Phi} = O\Phi \cdot I_B - O\Phi = 18\,038 \cdot 1,1422 - 21\,660,8 = -1\,057,79 \text{ млрд.р.}$$

– условная экономия средств, вложенных в материальные активы:

$$\mathcal{E}_{MOC} = MOC_0 \cdot I_B - MOC_1 = 5\,154 \cdot 1,1422 - 6\,488,8 = -601,9 \text{ млрд.р.}$$

Полученные отрицательные значения показателя условной экономии совокупных ресурсов свидетельствует об убыточности этих ресурсов. Разделив установленные величины на общий объем ресурсов отчетного периода, получим долю относительного роста (снижения) общей ресурсоотдачи, полученную за счет изменения эффективности использования каждого отдельного вида ресурсов:

$$\Delta_{PO.CPC} = \frac{\mathcal{E}_{CPC}}{P_1} = \frac{73,32}{28338,96} \cdot 100\% = 0,26\%;$$

$$\Delta_{PO.O\Phi} = \frac{\mathcal{E}_{O\Phi}}{P_1} = \frac{-1057,79}{28338,96} \cdot 100\% = -3,7\%;$$

$$\Delta_{PO.MOC} = \frac{\mathcal{E}_{MOC}}{P_1} = \frac{-601,9}{28338,96} \cdot 100\% = -2,16\%.$$

Следовательно, при росте совокупных ресурсов производства на 20,1% общая ресурсоотдача снизилась на 5,6%.

Результаты позволяют сделать вывод о том, что в развитии машиностроения интенсивные факторы пока еще не стали главным условием роста объема производства. Качественный экономический рост будет иметь дело в том случае, когда положительная динамика объема производства будет достигнута только за счет экономии примененных ресурсов.

ЛИТЕРАТУРА

1. www.belstat.gov.by – официальный сайт Министерства статистики и анализа Республики Беларусь. 2. Рябцев В.М., Чистик О.Ф. Измерение и анализ производительности общественного труда // Вестник статистики. 1991. №11. – 54 с. 3. Краткий статистический сборник «РБ в цифрах», 2006. Минстат Республики Беларусь, Минск: 2006. – 347с. 4. Тумасян А.А., Василевская Л.И. Статистическая оценка и анализ эффективности использования производственных ресурсов // Веснік БДЭУ. 2006. №4 (57). – 62 с.

УДК 621.002:338

Старченко Е.В., Торская И.В.

АНАЛИЗ ИНВЕСТИЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ И ПРИВЛЕКАТЕЛЬНОСТИ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

При разработке экономической политики на отраслевом уровне в настоящее время недостаточно учитывается тот факт, что инвестиционная активность промышленных предприятий зависит не только от объема финансов, но и от заинтересованности производителей в совершенствовании своего производственного потенциала. Основным условием эффектив-

ного использования средств этого потенциала является обеспечение потребности в обновлении основных фондов и их расширенном воспроизводстве.

Таблица 1 – Темпы роста показателя инвестиций в основной капитал и стоимости введенных в действие основных средств в Республике Беларусь

Год	Темп роста инвестиций в основной капитал	Темп роста стоимости введенных в действие основных средств
1996	137,681%	165,823%
1997	126,316%	84,733%
1998	104,167%	100,901%
1999	73,600%	100,000%
2000	110,870%	85,714%
2001	95,098%	104,063%
2002	109,278%	107,107%
2003	114,151%	114,019%
2004	100,000%	100,000%
2005	101,653%	92,623%
2006*	104,065%	112,389%
2007*	102,344%	106,299%

В теории инвестиций и эконометрике существенное место отводится исследованию распределенных лагов, показывающих зависимость между объемами инвестиций и другими показателями, такими, например, как объем основного капитала, валовой национальный продукт — на макроэкономическом уровне; прибыли (сальдированного финансового результата) или денежных потоков — на микроэкономическом уровне.

Рассмотрим влияние инвестиций во времени на величину основного капитала. Очевидным является тот факт, что инвестиции с определенной задержкой во времени переходят в приращение основного капитала, причем эта задержка неодинакова для разных элементов инвестиций. Поэтому модель распределенного лага является адекватным инструментом для описания связи между инвестициями и приращением основного капитала. Воспользуемся методологическим подходом, изложенным в работе В.С. Левина [1]. Для анализа будем использовать информацию об инвестициях I_t и приращениях основного капитала (вводе в действие основных средств) ΔK_t в Республики Беларусь за период 1995-2005 гг. [3, с.213], а также прогнозные показатели на 2006-2007гг, обозначенные символом «*». Данные о соотношении индексов объема инвестиций в основной капитал и ввода в действие основных средств представлены на рис. 1.

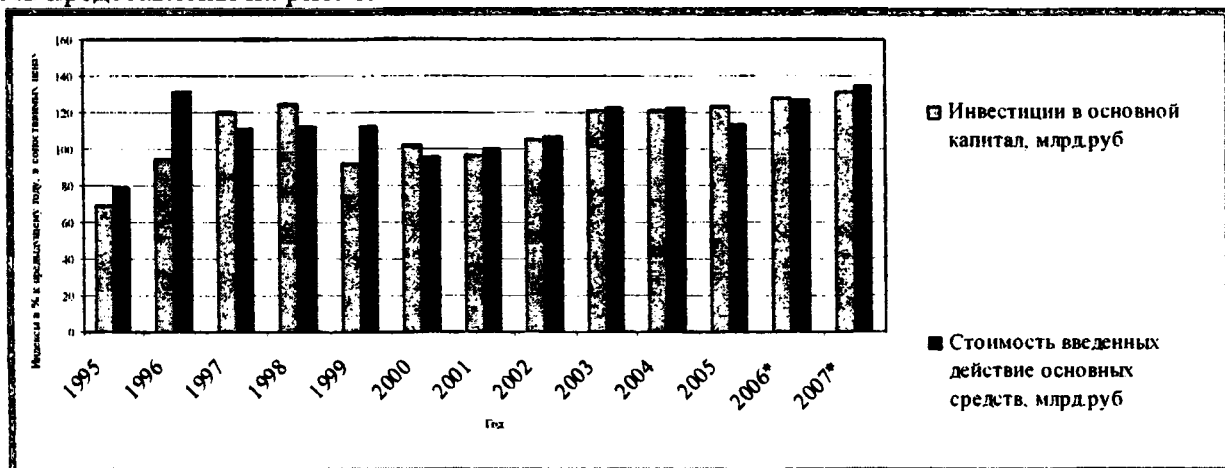


Рисунок 1 –Относительные показатели динамики инвестиций в основной капитал и введенных в действие основных средств в Республике Беларусь в 1995-2007гг.

Проведенный анализ показал, что стоимость введенных основных средств сильнее подвержена «ценовому», а не «натуральному» фактору, поэтому эта линия более гладкая. Очевидно, что данный показатель не отражает реального характера изменения стоимости основных фондов в динамике. Напротив, колебания уровней показателя «ввод в действие основных средств» более синхронны с колебаниями уровней показателя «индексы физического объема инвестиций в основной капитал», и поэтому именно он должен использоваться для приведения данных об объемах ввода в действие основных фондов в сопоставимый вид.

Если показатели индексов физического объема инвестиций в основной капитал и ввода в действие основных средств перемножить цепным способом на соответствующие значения уровней имеющихся данных, то получатся временные ряды, очищенные от действия инфляционного фактора. Это позволит исключить серьезные ценовые перекосы, возникшие в связи с проводимыми переоценками основных средств в период реформирования экономики. Кроме того, «натуральное» представление инвестиций и капитала позволяет лучше понять изменения, происходящие с физическими объемами этих показателей.

Приведем расчеты цепных темпов роста, используя имеющиеся статистические данные. Так, по показателю инвестиций в основной капитал I_t темп роста, например, в 1997 году по сравнению 1996 годом, рассчитывается по формуле:

$$T_p = \frac{I_{1997}}{I_{1996}} \cdot 100 = \frac{120}{95} \cdot 100 = 126,316.$$

Подобные расчеты выполним и для приращений основного капитала ΔK_t :

$$T_p = \frac{\Delta K_{1997}}{\Delta K_{1996}} \cdot 100 = \frac{111}{131} \cdot 100 = 84,733.$$

Результаты расчета всех цепных индексов представлены в таблице 1. При этом значения уровней за 2006 — 2007 гг. были получены путем прогнозирования по линейному тренду, где база прогнозирования ограничена периодом 2001 — 2005 гг.

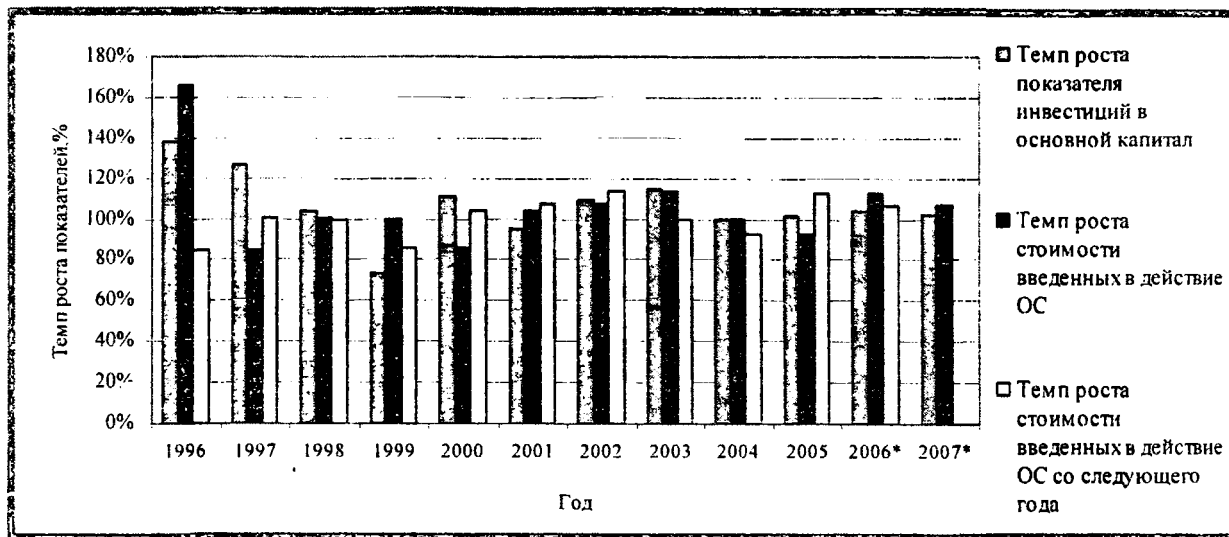


Рисунок 2 – Восстановленная динамика инвестиций в основной капитал и введенных основных средств в Республике Беларусь за 1995-2007гг.

Графическая интерпретация соотношения темпов роста объема инвестиций в основной капитал и ввода в действие основных средств представлена на рис. 2.

На основании полученных данных можно сделать вывод о цикличности изменения темпов роста объема инвестиций в основной капитал ввода в действие основных средств (которые то возрастают, то уменьшаются), а также что инвестиции с определенной задержкой во времени переходят в приращение основного капитала.

Степень инвестиционной активности во многом определяется инвестиционной привлекательностью, так как для осуществления инвестирования требуется большой объем за-

емных средств. Под инвестиционной привлекательностью будем понимать совокупность критериев, побуждающих инвестора относиться с предпочтением к вложению капитала в данную отрасль. Инвестиционная привлекательность отрасли – это совокупность различных объективных признаков, свойств, средств и возможностей отрасли, обуславливающих платежеспособный спрос на капиталобразующие инвестиции. Изучение инвестиционной привлекательности отдельных отраслей направлено на исследование их конъюнктуры, динамики и перспектив развития потребностей общества в продукции этих отраслей. Именно потребности общества определяют приоритеты в развитии отдельных отраслей. Так, традиционно приоритетными являются топливно-энергетический комплекс, машиностроение, транспорт, строительство.

Таблица 2 – Показатели производственно-хозяйственной деятельности машиностроительной отрасли Республики Беларусь

Год	Общ. объем инвестиций млрд.руб.	Объем производства, млрд.руб.	Соотношение объема инвестиций и объема производства	Производительность труда, млн.руб./чел.	Прибыль от реализации продукции млрд.руб.	Соотношение прироста прибыли к объему инвестиций
2000	51,97	802,99	0,0647	1,8845	88,66	0,35
2001	48,26	1 092,85	0,0442	2,6397	106,76	-0,29
2002	48,09	1 040,08	0,0462	2,6465	92,74	-0,24
2003	46,08	1 067,44	0,0432	2,7922	81,00	0,82
2004	66,64	1 329,42	0,0501	3,4684	118,78	0,25
2005	68,27	1 380,38	0,0495	4,3738	135,33	0,39
2006	76,88	1 661,43	0,0463	4,9010	161,73	0,37
2007*	89,00	1816,00	0,0490	5,7107	190,00	0,33

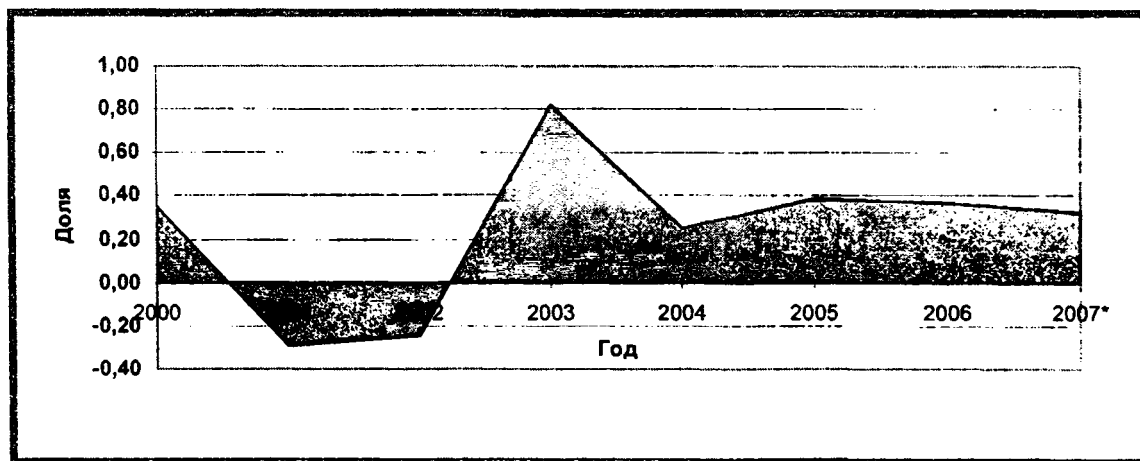


Рисунок 3 – Соотношения прироста прибыли к объему общих инвестиций в машиностроительной отрасли Республики Беларусь в 2000-2007гг.

Для «сиюминутной», недолговременной оценки инвестиционной привлекательности отраслей в качестве основных показателей принимается уровень прибыльности используемых активов и (или) уровень прибыльности инвестиций. В настоящее время не существует единой методики определения инвестиционной привлекательности отрасли. Для этих целей может использоваться ряд альтернативных методик:

1) на основе комплекса разнообразных факторов, всесторонне определяющих отрасль (например, по спросу на продукцию, финансовому состоянию отрасли, воздействию на окружающую среду и т.п.);

2) на основании ее финансового состояния (например, по текущей доходности отрасли, которая может оцениваться по доходности продаж, активов, собственных средств или инвестированного капитала).

3) на основе *макроэкономического мультипликатора* (мультипликатор показывает, на сколько увеличится ВВП, если инвестиции в данную отрасль возрастут на единицу) .

Для оценки инвестиционной привлекательности отрасли машиностроения в данной работе используется методика, основанная на основе оценки финансового состояния отрасли по доходности инвестированного капитала [2, с.51].

Для анализа использовались показатели производственно-хозяйственной деятельности машиностроительной отрасли в период с 2000г. по 2006г [3, 213]., а также прогнозные показатели на 2007гг, обозначенные символом «*». Все данные, представленные в табл.2, были приведены в сопоставимый вид к 2000г. с помощью индексов цен потребителей промышленной продукции [4].

Динамика соотношения прироста прибыли к объему общих инвестиций как результирующего показателя инвестиционной привлекательности представлена на рис. 3.

Определить, на какие параметры в наибольшей степени влияет объем инвестиций, можно с помощью корреляционно-регрессионного анализа [5, с.162]. Результаты анализа, который был произведен с использованием электронных таблиц Microsoft Excel, представлены в табл. 3.

Таблица 3 – Результаты корреляционно-регрессионного анализа показателей производственно-хозяйственной деятельности машиностроительной отрасли Республики Беларусь

<i>Коэффициент корреляции</i>	Объем производства	Производительность труда
Объем инвестиций	0,932130	0,939800

Проведенный корреляционно-регрессионный анализ показал, что объем инвестиций наиболее тесно связан с производительностью труда и объемом производства (коэффициенты корреляции равны 0,939800 и 0,932130 соответственно). Однако, так как ранее было продемонстрировано наличие временных лагов, проведем повторный анализ с использованием методики распределенных лагов, т.е. с учетом того, что вложенные инвестиции влияют на данные показатели с определенной задержкой, отразив полученные результаты в табл. 4

Таблица 4 – Результаты корреляционно-регрессионного анализа показателей производственно-хозяйственной деятельности машиностроительной отрасли Республики Беларусь с использованием методики распределенных лагов на период в один год

<i>Коэффициент корреляции</i>	Объем производства	Производительность труда
Объем инвестиций	0,939232	0,960301

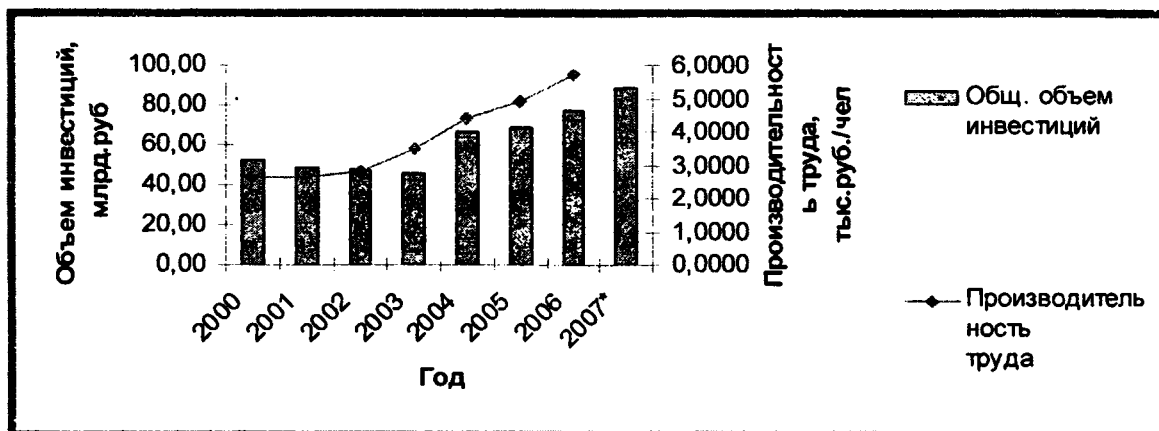


Рисунок 4 – Соотношение объема инвестиций производительности труда в машиностроительной отрасли Республики Беларусь за период 2000-2007гг.

Аналогичные расчеты коэффициента корреляции, производимые с лагом более одного года, дали в результате меньшее значение, что дает основание сделать вывод о том, что фактический лаг составляет период около одного года.

Графическая зависимость между объемом инвестиций и производительностью труда с лагом в один год представлена на рис.4.

Проведенное исследование распределенных лагов, показывающих зависимость между объемами инвестиций и другими показателями, позволило доказать, что инвестиции с определенной задержкой во времени переходят в приращение основного капитала. Лаг составляет период около одного года

ЛИТЕРАТУРА

1 Левин В.С. Лаговые модели инвестиционных процессов с независимыми переменными // Финансы и кредит, №18 (222) 2006 – 68 с. 2. Головач Э.П., Н.А. Мацукевич Прогнозирование инвестиционной активности предприятий строительной отрасли // Экономика и управление №4, 2005 – 76 с. 3. Краткий статистический сборник «РБ в цифрах», 2006. Минстат Республики Беларусь, Минск: 2006. – 347с.; 4. – Материалы официального сайта Министерства статистики и анализа Республики Беларусь. <http://www.belstat.gov.by>

УДК 658.51

Стельмах Е.В., Торская И.В.

РОЛЬ СТРАТЕГИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ В ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Промышленное предприятие может выполнять свою производственную функцию, используя определенные ресурсы. В этом случае ресурсы понимаются не как факторы производства, оптимизация использования которых призвана обеспечить максимизацию прибыли (неоклассическая модель), а как условие выполнения производственной функции, как объект и субъект во внутриорганизационном управленческом взаимодействии.

Для предприятия ресурсы и продукты – это две стороны одной медали. Большинство продуктов требует привлечения нескольких ресурсов, а значительная часть ресурсов может быть применена для производства целого ряда продуктов. Определив спектр деятельности предприятия на различных рынках, можно понять, каков необходимый минимум вложения ресурсов. И наоборот, обозначив контуры ресурсной базы предприятия, можно отыскать оптимальные подходы к деятельности, связанной с продуктами и рынками.

Обе трактовки предприятия нашли отражение в научной литературе по стратегическому менеджменту. Традиционное понимание стратегии формулируется в терминах ресурсной позиции (сильных и слабых сторон предприятия), что является ключевым этапом управленческого анализа. В основе сильных и слабых сторон предприятия лежат его ресурсы, которые для целей анализа могут классифицироваться так, как представлено на рис. 1.

Осязаемые ресурсы, или материальные активы — это физические и финансовые активы предприятия, которые отражены в бухгалтерском балансе (основные средства, запасы, денежные средства и т. д.). Важным направлением повышения эффективности деятельности предприятия может быть улучшение использования данных ресурсов — уменьшение материальных запасов, незавершенного производства, улучшение использования основных производственных фондов, экономия ресурсов.

Неосязаемые ресурсы, или нематериальные активы — это, как правило, качественные характеристики предприятия. В их составе выделяют:

✓ не связанные с людьми неосязаемые активы — торговая марка, ноу-хау, престиж, имидж предприятия;

✓ неосязаемые человеческие ресурсы (человеческий капитал) — квалификация персонала, опыт, компетенция, известность управленческой «команды».

Различают также следующие виды ресурсов:

➤ ресурсы внешней среды системы;

➤ трудовые ресурсы — промышленно-производственный персонал (основные и вспомогательные рабочие, руководители, служащие) и непромышленный персонал;

➤ материальные ресурсы (сырье, материалы, топливно-энергетические ресурсы, запасные части);

➤ основные производственные фонды — здания и сооружения, передаточные устройства, силовые машины, технологическое оборудование, транспортные средства, средства автоматизации управления, измерительные приборы, хозяйственный инвентарь и пр.;

➤ финансовые ресурсы — собственный капитал, заемный капитал, нематериальные активы и др.;

➤ информационные ресурсы;

➤ организационные ресурсы;

➤ совокупные ресурсы — сумма перечисленных видов ресурсов в денежном выражении.

Все виды ресурсов представляют собой в совокупности возможность достижения целей производственной системы. Это означает, что имея в своем распоряжении те или иные средства производства, кадры, производственные помещения, сооружения и прочие ресурсы, производственная система способна в той или иной степени удовлетворять изменяющиеся нужды, потребности и запросы потенциальных покупателей.

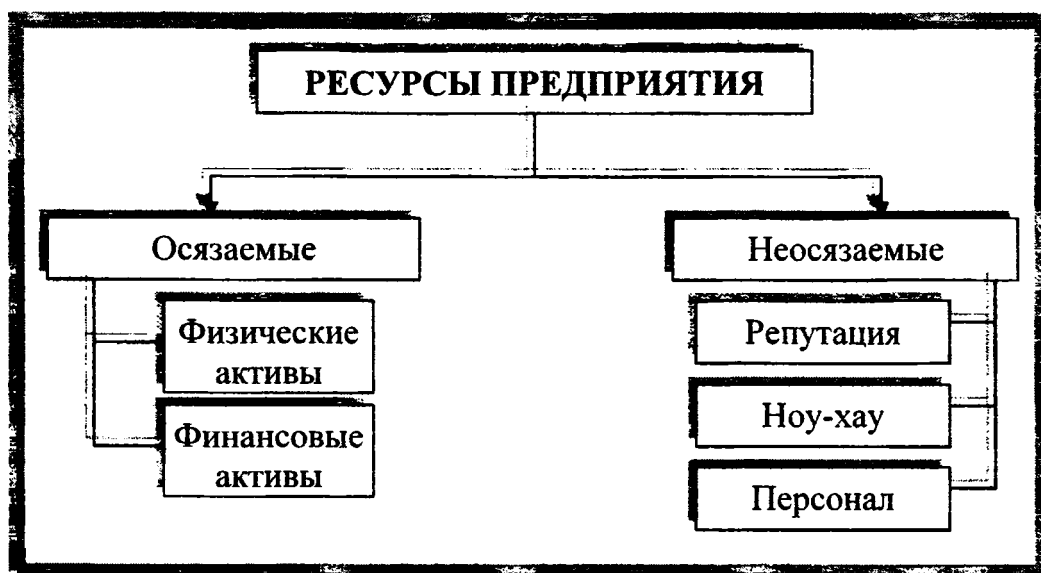


Рисунок 1 – Классификация ресурсов предприятия

Из целостности систем следует, что в результате взаимодействия всех составляющих систему ресурсов получают новые свойства, которыми каждый отдельный вид ресурса не обладает. Нельзя своевременно вывести на нужный сегмент рынка товар, отвечающий его требованиям, не располагая соответствующими ресурсами всех видов: возможностями применяемого оборудования, возможностями используемой технологии, квалификационными возможностями кадров и т.д. И, наоборот, каждый отдельный ресурс не может раскрыться полностью вне связи с другими ресурсами: возможности, которыми располагают станки, не могут быть реализованы без соответствующей квалификации работников, без применения соответствующих основных и вспомогательных материалов, без требуемых характеристик производственных помещений.

Принимая во внимание существование на любом предприятии совокупности разнородных ресурсов, образующих вместе его потенциал, а также включенность

предприятия в социально-экономическую систему большего масштаба, нужно отметить, что взаимодействие отдельных видов ресурсов носит не автономный характер и не является самоцелью, а обусловлен набором согласованных интересов и ожиданий.

Основополагающим принципом выделения элементов предприятия как производственной (социотехнической) системы в целях стратегического управления является оценка возможностей достижения стратегических целей системы, появляющихся при использовании соответствующего элемента системы. Следовательно, с этой точки зрения, элементами системы должны быть признаны не материализованные средства производства, предметы труда или определенные категории работников, а те возможности достижения стратегических целей производственной системы, которые открываются при использовании этих средств, предметов и категорий. Указанные возможности - это не что иное, как стратегические ресурсы производственной системы. Соответственно, производственной системой можно считать совокупность взаимосвязанных стратегических ресурсов.

Итак, стратегическими ресурсами предприятия является совокупность человеческих, информационных, материальных, финансовых и других ресурсов, необходимых для разработки и реализации стратегии предприятия.

Выбор стратегии, осуществляемый в основных значимых для предприятия областях, определяет основную линию поведения для достижения поставленной цели. Выполнение стратегии направлено на решение следующих задач. Во-первых, это установление приоритетности среди управленческих задач, касающихся распределения ресурсов, установления организационных отношений. Во-вторых, это установление соответствия между выбранной стратегией и внутриорганизационными процессами, направление деятельности предприятия на осуществление выбранной стратегии. В-третьих, это выбор и приведение в соответствие с осуществляемой стратегией всех подходов к управлению предприятием.

Для эффективного достижения стратегических целей предприятия как совокупности взаимосвязанных стратегических ресурсов необходим анализ и оценка этих ресурсов, а также управление их качеством. Последовательность процесса экономической оценки стратегических ресурсов от оценки структурных свойств до оценки качества выхода системы характеризует экономическую сущность анализа стратегического потенциала.

Оптимальное сочетание стратегических ресурсов должно обеспечивать баланс состояния внешней и внутренней среды предприятия. При этом параметры внешней среды являются первичными при анализе в системе стратегических решений, определяющими требования к внутренним ресурсам рассматриваемого предприятия.

Важно отметить, что стратегический потенциал формируют только те ресурсы, которые могут быть изменены в результате реализации стратегических решений. Кроме того, ресурсный потенциал предприятия существенно зависит от условий, в которых протекает деятельность предприятия, и он подвержен постоянным изменениям. Если речь идет о деятельности в условиях неплатежей и взаимозачетов, то основным стратегическим ресурсом становятся деньги и другие высоколиквидные средства. В условиях стабильной работы предприятия к стратегическим могут быть отнесены те ресурсы, которые обеспечивают достижение конкурентных преимуществ предприятия, такие как кадровые, технические, организационные и другие.

Конкурентные преимущества предприятия определяются скорее стратегическими материальными и нематериальными ресурсами, чем рыночной структурой. Ресурсы и способности предприятия приносят пользу тогда, когда дают возможность реализовать такую стратегию, которая обеспечивает явные преимущества в области эффективности. Следовательно, резервы конкурентоспособности предприятия также могут быть рассмотрены как ее стратегические ресурсы. Резервы конкурентоспособности — это специфические потенциальные возможности предприятия (возможности формирования необходимых запасов товарно-материальных ценностей, возможности совершенствования технологических процессов и обеспечения их гибкости, возможности улучшения использования основных производственных фондов и оборотных средств). Такой подход позволяет

классифицировать резервы конкурентоспособности (стратегические ресурсы) предприятия по следующим пяти основным группам.

Группа 1. Резервы использования возможностей, предоставляемых государством (внешние организационные ресурсы).

Группа 2. Резервы использования организационного потенциала предприятия (внутренние организационные ресурсы), в числе которых:

- повышение эффективности рекламы;
- использование научно-технического потенциала предприятия; повышение уровня патентной работы;

- обеспечение технико-экономических и качественных показателей, определяющих приоритетность продукции предприятия на рынке; изменение качества изделий и его технико-экономических параметров в соответствии требованиям потребителя и его конкурентных запросов, повышение внимания к надежности продукции;

- выявление преимуществ и недостатков товаров-аналогов, выпускаемых конкурентами, учет этих результатов на своем предприятии; изучение мероприятий конкурентов по совершенствованию аналогичных товаров, с которыми они выступают на рынке; разработка мер, дающих преимущества по сравнению с конкурентами;

- определение возможных модификаций продукта путем повышения качественных характеристик, (долговечность, надежность, экономичность эксплуатации, улучшение внешнего оформления);

- нахождение и использование возможных приоритетных сфер применения продукции, в особенности новой;

- обеспечение сертификации продукции и систем управления; улучшение предпроектного обслуживания продукции;

- развитие сервисного обслуживания;

- повышение эффективности гарантийного обслуживания;

- использование маркетингового потенциала предприятия.

Группа 3. Резервы использования производственного и технологического потенциала предприятия (производственно-технологические ресурсы):

Группа 4. Резервы использования финансово-экономического потенциала предприятия (финансовые ресурсы).

Группа 5. Резервы использования кадрового потенциала (трудовые ресурсы).

В реальном хозяйственном механизме одни виды ресурсов выступают узловыми (стратегическими) элементами в структуре организационных взаимодействий (кадры как социальная составляющая и технические ресурсы как материально-вещественная составляющая производственной системы), другие виды ресурсов опосредуют потоки событий. Такие виды ресурсов, как технологические, финансовые, пространственные играют роль промежуточных, связующих узлов, так как они характеризуют способ соединения конкретных социальной и технической подсистем предприятия.

Наличие определенного вида ресурсов еще не гарантирует его принадлежность к стратегическим. Основным показателем принадлежности ресурсов к данной категории является соответствующий уровень качества. Соответственно требуется оценка внутренней структуры качества, основанной на взаимодействии свойств, качеств частей, элементов производственной системы. Сопоставление внутренней структуры качества с ожиданиями хозяйственного окружения обеспечивает здесь связь между качеством конечных объектов (продукции, услуг, работ) и качеством ресурсного потенциала самой системы. В этом контексте анализ отдельных ресурсов предприятия проводится с целью соотнесения их качества с требуемым качеством выхода системы.

Учитывая особое место управления качеством в системе стратегического управления в рамках оценки потенциала производственной системы, следует подчеркнуть объектный и процессный характер оценки качества продукции и собственно предприятия. В оценку каче-

ства деятельности предприятия, со всей полнотой и многогранностью, должны включаться оценки качества ресурсов в их взаимосвязи.

В целом, в рыночных условиях важнейшей составляющей внутренних организационных ресурсов является инновационный потенциал, обеспечивающий возможность осуществления предприятием инновационной деятельности. Актуальность инновационной ориентации предприятия повышается в случае освоения им новых рынков сбыта (потребительских и географических) и осуществления им стратегии диверсификации. Содержательность и продуктивность инновационной деятельности структуры должна подкрепляться выработкой и реализацией научно-технической политики предприятия как одного из приоритетных направлений стратегического управления, осуществляемого на высшем уровне управления предприятием. Ее целью является определение основных направлений научно-технической и производственной деятельности в таких областях, как разработка и внедрение новой продукции, модернизация и усовершенствование выпускаемой.

Центральное место в организационной структуре ориентированного на инновации предприятия должна занимать служба НИОКР. Для эффективного внедрения нового продукта на рынок требуется тесное межфункциональное сотрудничество между отдельными подразделениями предприятия. Инновационная реакция должна широко использовать принцип децентрализации управления. В этом смысле реализация инновационного потенциала должна обеспечиваться соответствующим делегированием руководителям проектов инновационных преобразований полномочий, обязанностей и ответственности за успех, а также полноценным обеспечением финансовыми ресурсами для осуществления проекта. Следовательно, необходимо рассматривать этот данный ресурс как организационно-инновационный.

Был проведен анализ качества производственно-технологических и организационно-инновационных ресурсов на примере РУП «Минский тракторный завод» за период 2004-2005 гг. В ходе анализа качества производственно-технологических ресурсов было отмечено уменьшение удельного веса рекламаций в общем объеме реализованной продукции, рост фондовооруженности труда, увеличение коэффициента обновления основных фондов, рост фондоотдачи и снижение фондоёмкости продукции. Однако, возраст технологического оборудования на предприятии составлял в 2005 году 27 лет, а изношенность основных производственных фондов достигла 87%. Коэффициент использования среднегодовой мощности составлял по предприятию 70%. При оценке качества организационно – инновационных ресурсов выявлено увеличение доли расходов на НИОКР в затратах на производство; рост прибыли, приходящейся на один рубль заработной платы работника отдела маркетинга; рост доли административных расходов в выручке предприятия. При этом основными направлениями НИОКР на РУП «МТЗ» являлись формирование аппаратно- программных комплексов для проведения исследований, разработка методов испытаний машин и сборочных единиц, научное сопровождение разработок. Однако, при этом обращает на себя внимание, что доля нематериальных активов предприятия в общей сумме внеоборотных активов и доля расходов на НИОКР в затратах на производство являются весьма незначительными.

Руководители и все, кто заинтересован в организационно-экономической устойчивости предприятия, должны иметь индикаторы, то есть определенные количественные показатели, отражающие экономическое состояние предприятия и, таким образом, позволяющие оценить вероятность достижения предприятием стратегических целей. Поэтому логично введение критериальных показателей, представляющих собой детализацию общего критерия, оценивающего организационно-экономическую устойчивость. В долгосрочном периоде для оценки перспектив развития предприятия предлагается ввести критерии, которые оценивают уровень качества стратегических ресурсов предприятия.

ЛИТЕРАТУРА

1. <http://eup.ru/Catalog/42>. Раздел: Книги. Учебники./ Копылов А. В. Формирование и оценка стратегических ресурсов предприятия. 2. Маркова В. Д., Кузнецова С. А. Стратегиче-

ский менеджмент: Курс лекций. – М.: ИНФРА – М.: Новосибирск: Сибирское соглашение, 2006. – 288 с. 3. Wernerfelt B. A. Resource-Based View of the Firm // Strategic Management Journal. 1984. Vol. 5 № 2. P. 171-180. 4. Фатхутдинов Р. А. Производственный менеджмент. Учебник для ВУЗОВ. – 5-е изд. – СПб.: Питер, 2006, - 496 с.

УДК 658:339.137

Торская И. В., Мацыха Е. В.

ОПТИМИЗАЦИЯ ТОВАРНОГО ПОРТФЕЛЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ КАК ФАКТОР РОСТА ЕГО КОНКУРЕНТНЫХ ПРЕИМУЩЕСТВ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Товарный портфель промышленного предприятия представляет собой совокупность товаров, обладающих различным уровнем рентабельности, находящихся на различных этапах жизненного цикла (ЖЦТ) и, как следствие, имеющих различные перспективы на рынке. Из-за ограниченной продолжительности ЖЦТ состав портфеля является величиной переменной во времени, что обусловлено снятием с производства старых товаров и освоением новых.

Товарный портфель должен быть сбалансирован и включать в себя товары, находящиеся на разных стадиях жизненного цикла. Это обеспечивает преемственность производственно-сбытовой деятельности, постоянное получение прибыли, а также снижает риск неполучения прибыли от реализации продуктов, находящихся на начальных стадиях жизненного цикла. Следовательно, формирование оптимальной структуры товарного портфеля должно содействовать росту конкурентных преимуществ предприятия, которые являются концентрированными проявлениями его измеряемого экономическими показателями превосходства над конкурентами в экономической, технической, организационной сферах деятельности.



Рисунок 1 - Формирования сбалансированного товарного портфеля

Правильно сформированный товарный портфель должен соответствовать возможностям предприятия и конкретным условиям внешней среды. Предприятие должно периодически проводить анализ структуры сформированного портфеля и стремиться к его оптимизации, в ходе которой принимается решение о том, какие области деятельности необходимо сохранить, а от каких избавиться. Для этого необходимо проанализировать сильные стороны

и потенциал каждой из сфер деятельности. При разработке стратегий развития предприятия его товарный портфель может быть также расширен за счет включения в него новых видов деятельности. Следовательно, процесс поиска оптимальной структуры товарного портфеля предприятия является комплексным. Предлагается схема его реализации, приведенная на рис. 1.

В табл. 1 отражена структура производства тракторной техники на РУП «Минский тракторный завод (МТЗ)», товарный портфель которого был выбран в качестве объекта анализа.

Таблица 1 – Структура товарного портфеля РУП «МТЗ» в разрезе тракторной техники

Наименование товарной группы	Количество моделей	Общем производства в 2005 году, шт	Удельный вес, %
Универсально-пропашные трактора мощностью от 50 до 130 л.с., в том числе:	24 модели	36040	97,67
серия 500	9 моделей	4095	11,10
серия 800	4 модели	25018	67,80
серия 900	6 моделей	3498	9,48
серия 1000	2 модели	959	2,60
серия 1200	2 модели	2266	6,14
серия 1500	1 модель	204	0,55
Малогабаритные трактора от 20 до 30 л.с.(серия 300)	6 моделей	645	1,75
Трактора общего назначения (серия 2000 и 3000)	5 моделей	111	0,30
Специализированные (коммунальные, аэропортные, рисовые, хлопковые)	15 моделей	74	0,20
Лесные трактора	13 моделей	30	0,08
Всего:		36900	100

Для анализа структуры товарного портфеля могут быть использованы модели стратегического позиционирования, представляющие собой методический инструментарий, позволяющий определить место предприятия (или отдельного направления ее деятельности) в бизнес-пространстве. Наиболее известны следующие модели:

- модель «доля на рынке - темпы роста рынка» (матрица Бостонской консалтинговой группы БКГ) - положение предприятия или его отдельного направления деятельности позиционируется относительно всех остальных конкурентов, уже функционирующих на определенном рынке;

- модель «привлекательность рынка — конкурентоспособность предприятия» (модели GE/McKinsey, Shell/DPM) - положение предприятия позиционируется путем относительной оценки ее сильных сторон на рынке (в отрасли) в сочетании с относительной перспективностью самого рынка (отрасли). Позволяет определить конкурентную позицию различных видов деятельности предприятия на рынках разной степени привлекательности;

- модель «стадия эволюции рынка (жизненный цикл товара) - конкурентное положение предприятия» (модели Хофера-Шендлера, ADL-LC) - положение предприятия определяется в результате оценки ее позиций относительно конкурентов в зависимости от стадии эволюции рынка (или стадии жизненного цикла товара). Позволяет определить место различных видов деятельности предприятия на растущих, стабильных рынках.

В качестве инструментов анализа существующей структуры товарного портфеля РУП «МТЗ» и выработки направлений ее оптимизации были выбраны матрица Бостонской консалтинговой группы – БКГ и модель GE/Mc Kinsey (матрица МакКинзи).

Матрица БКГ классифицирует каждое предприятие или его товар по уровню текущего рыночного роста и величине занимаемой доли рынка. Рыночный рост служит для оценки

потребностей в финансировании, а относительная доля рынка используется для отражения прибыльности. Эта модель дает рекомендации по поиску новой стратегии поведения на рынке, выбор которой той или иной стратегии зависит от ресурсов фирмы и готовности идти на риск. Матрица БКГ разделена на четыре квадранта, в каждом из которых представлены различные элементы товарного портфеля:

- *Вопросительные знаки.* Вопросительными знаками обозначают стратегические бизнес-единицы (СБЕ), оперирующие на рынках с высокими темпами роста, но обладающие низкими относительными долями рынка. Вопросительные знаки требуют значительных денежных средств, поскольку предприятию необходимо создавать новые производства или расширять существующие, чтобы не отстать от конкурентов на быстро растущем рынке и попытаться обойти лидера. Следует иметь в виду, что "вопросительные знаки" являются "захватчиками ресурсов", поскольку потребности в их финансировании высоки, а размер доходов по ним относительно низок.

- *Звезды.* Если СБЕ - вопросительные знаки успешно развиваются, то они превращаются в звезды. Звезда является лидером на быстро растущем рынке, но она далеко не всегда обеспечивает предприятию существенный приток денежных средств. У предприятия возникает необходимость тратить значительные ресурсы на поддержание высоких темпов роста таких СБЕ и отражать атаки конкурентов.

- *Дойные коровы.* Если темпы роста рынка снижаются, звезда, продолжающая удерживать лидирующие позиции на рынке, превращается в дойную корову. Предприятие использует «золотое молоко» дойных коров для оплаты счетов и поддержки других направлений деятельности. Если относительные доли рынка дойной коровы будут сокращаться, то предприятию придется вкладывать в нее деньги, чтобы сохранить лидерство. Но если предприятие направит ресурсы на поддержку других СБЕ, дойная корова может превратиться в собаку.

- *Собаки.* К собакам относят направления бизнеса, характеризующиеся низкими относительными долями рынка на медленно растущих рынках. Как правило, они не приносят особой прибыли (нередко просто убыточны). Такие СБЕ необходимо либо сокращать, либо закрывать. Слабеющие собаки зачастую неспособны зарабатывать значительные средства в долгосрочной перспективе.

В таб. 2 представлены результаты анализа товарного портфеля РУП МТЗ в виде модифицированной матрицы БКГ, использующей в качестве параметров позиционирования абсолютную и относительную долю рынка.

Таблица 2 – Матрица БКГ для продукции РУП «МТЗ»

Параметры позиционирования		Позиция стратегической бизнес-единицы в конкуренции (относительная доля рынка)	
		Сильная	Слабая
Возможности расширения отраслевого рынка (абсолютная доля рынка)	Высокая	«Звезды»-	«Вопросительные знаки» Модели 1200, 1500, 2000, 3000
	Низкая	«Дойные коровы» Модели 800	«Собаки» Модели 500

На основе построенной матрицы БКГ можно сделать вывод о том, что модели тракторов 1200, 1500, 2000, 3000, попадающие в правую верхнюю клетку матрицы и являющиеся "вопросительными знаками", имеют высокие темпы роста, что делает их привлекательными с отраслевой точки зрения. Однако низкая относительная доля рынка поднимает вопрос о том, смогут ли эти в дальнейшем эти модели успешно конкурировать с продукцией более эффективно действующих сегодня на рынке соперников. Модели тракторов 800, имеющие высокую относительную долю рынка в медленно растущих отраслях, отнесены к категории «дойных коров», зарабатывающих средства в объемах, превышающих их потребности в реинвестировании. Модели тракторов 500 с низкой относительной долей рынка в на медленно

растущих рынках являются «собаками» из-за слабых перспектив их роста, отстающих позиций на рынке и того, что нахождение позади лидеров ограничивает размер их прибыли. «Звезды» в товарном портфеле отсутствуют.

После того, как предприятие определило место каждой СБЕ в матрице БКГ, оно должно проанализировать содержимое товарного портфеля. В несбалансированном портфеле слишком много собак и/или мало звезд и дойных коров. Следующая задача предприятия - определить цели, стратегии и бюджет каждой СБЕ. Матрица БКГ предлагает следующий набор решений о дальнейшей деятельности фирмы в соответствующих хозяйственных зонах:

- *расширение производства.* Цель - увеличение доли рынка СБЕ, даже если для этого придется пожертвовать краткосрочными доходами. Стратегия расширения обычно применяется к вопросительным знакам, которые имеют шансы «вспыхнуть» сверхновыми звездами. Финансирование моделей 1200,1500,2000,3000 должно быть направлено на расширение доли рынка, что даст возможность соперничать с предприятиями, имеющими более низкие издержки и более значительный накопленный производственный опыт, проявляющийся в большей доле рынка. Следовательно, предприятие может догнать лидеров или приблизится к ним, усиленно инвестируя в вопросительные знаки с высоким потенциалом и стараясь вырастить из них звезды;

- *сохранение.* Цель - сохранение доли рынка СБЕ. Наиболее целесообразно использование данной стратегии по отношению к сильным дойным коровам, которые приносят значительные объемы денежных средств. Все усилия предприятия должны быть направлены на поддержание дойных коров в процветающем состоянии, чтобы как можно дольше использовать их возможности в генерировании притока финансовых ресурсов. Пока модель 800 будет занимать наибольшую долю рынка, предприятию не следует беспокоиться;

- *уборка урожая.* Стратегия включает в себя возможность принятия решения об отказе от бизнеса и применения программы постоянного сокращения расходов. Ставка делается на то, что снижение расходов произойдет быстрее, чем упадет объем продаж СБЕ, что приведет к увеличению положительного притока денежных средств. Данная стратегия обычно применяется к слабым дойным коровам с неопределенным будущим, когда требуется увеличить надои, и к вопросительным знакам и собакам;

- *ликвидация.* Применяется она по преимуществу к собакам и вопросительным знакам, которые снижают прибыль предприятия.

Предприятие должно выбрать оптимальную для себя стратегию - уборку урожая или ликвидацию. Модели тракторов 500 не характеризуются высокой конкурентоспособностью и не претендуют на большую долю рынка. Почти весь сбыт серии 500 приходится на территорию Беларуси. Поэтому предприятие должно сократить объем этих моделей на экспорт, а для Беларуси производить в тех же объемах.

Таким образом, матрица помогает выполнению двух функций: принятию решений о позициях на рынке и распределению стратегических денежных средств между СЗХ. Можно сделать вывод, что портфель РУП «МТЗ» имеет перспективы для выхода на более сбалансированную стадию. Верная долгосрочная стратегия предприятия должна использовать дополнительные средства, поступающие от дойных коров, для финансирования «вопросительных знаков», имеющих хорошие шансы перерасти в звезды. В случае успеха захватчики ресурсов становятся звездами, полностью покрывающими свои потребности в финансировании. Затем, когда темпы роста рынков звезд замедляются и рынки переходят в стадию зрелости, звезды становятся дойными коровами. Таким образом, успешным является последовательное движение производства по пути «вопросительный знак» - «новая звезда» (вероятно, все еще являющаяся захватчиком ресурсов) - «звезда», обеспечивающая собственные потребности - «дойная корова».

В отличие от матрицы БКГ, матрица МакКинзи применима во всех фазах циклов спроса и технологии и при самых различных условиях конкуренции. Но пользоваться ею можно только после проведения ряда экспертных оценок и осуществления ряда расчетных операций. Была произведена оценка привлекательности товарного портфеля РУП «МТЗ» и

его конкурентоспособности по группе критериев. Для привлекательности товарного портфеля наибольший вес из 9 предложенных для оценки критериев имеют такие показатели, как качество товаров с позиции покупателя, глубина ассортимента и темп роста доли продаж. При оценке конкурентоспособности товарного портфеля наибольший вес из 8 предложенных критериев имели такие показатели как, уровень конкурентоспособности товаров, имидж товарной марки, сервисная политика. Был сделан вывод о том, что в настоящий момент для РУП «МТЗ» характерен средний уровень как конкурентоспособности, так и привлекательности товарного портфеля, что предполагает использование стратегии выборочного развития (см. табл 3).

Таблица 3 -Расширенная матрица «МакКинзи»

Параметры позиционирования		Конкурентоспособность товарного портфеля		
		Высокая	Средняя	Низкая
Привлекательность товарного портфеля	Высокая	Стратегия захвата позиций	Стратегия развития	Стратегия усиления конкурентных позиций
	СРЕДНЯЯ	Стратегия выборочного роста	<u>Стратегия выборочного развития</u>	Стратегия сбора урожая
	Низкая	Стратегия получения максимальной выгоды	Стратегия сбора урожая	Стратегия элиминации

Рекомендуемая стратегия предполагает поиск путей для поддержания конкурентных преимуществ, вложение средств в товары с высокой прибыльностью и меньшим риском, специализацию на перспективных товарах и товарных группах, т.е. концентрирование инвестиций в сегментах, где существует хорошая прибыльность и относительно низкий уровень риска. В первую очередь РУП «МТЗ» необходимо стремиться увеличивать привлекательность своего портфеля, чтобы заинтересовать своих потенциальных покупателей и удержать уже имеющихся клиентов. Для этого следует наращивать выпуск более мощных тракторов МТЗ-1005/1025, МТЗ-1221/1321, МТЗ-1522, а также мотоблоков и минитракторов.. Росту привлекательности будет содействовать также установка сертифицированных двигателей в соответствии со стандартами Евро-3 и Евро-4 . Далее этого предприятию следует усиливать свои конкурентные позиции и выходить на новые рынки. Требуется проведение активной рекламной кампании на существующих и потенциальных рынках с акцентом на обновление товаров, расширение их ассортимента а также упором на то, что продукция РУП «МТЗ» по ряду технико-эксплуатационных параметров превосходит, либо, как минимум не уступает своим конкурентам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стратегический менеджмент: практическое пособие/ И.В. Торская – Мн.: БНТУ, 2005. – 172 с.
2. Иващенко Н.С., Силаков А.В. Выбор структуры товарного портфеля предприятия на основе анализа его сбалансированности // Маркетинг в России и за рубежом. — 2004. — № 6(44).
3. Томпсон А.А., Стрикленд А. Дж. Стратегический менеджмент. Искусство разработки и реализации стратегии: учебник для вузов/ Пер. с англ. Под ред. Л.Г. Зайцева, М.И. Соколовой – М: Банки и биржи, ЮНИТИ, 1998 – 576с.
4. Голубков Е.П., Проектирование элементов комплекса маркетинга: формирование продуктовой политики // Маркетинг в России и за рубежом №5 / 2001

АНАЛИЗ ИНСТРУМЕНТОВ WEB-САЙТА ДЛЯ РАБОТЫ С ИНТЕРНЕТ-АУДИТОРИЕЙ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Развитие сети Интернет и ее проникновение в различные сферы жизни общества привело к тому, что все больше специалистов рассматривают ее, с одной стороны, как рыночную среду, с другой, как современный инструмент ведения бизнеса практически без временных и пространственных ограничений. Преимущества применения Интернет-технологий в экономической сфере очевидны и не вызывают сомнений. Интернет благодаря своей интерактивности, эффекту присутствия и информационной насыщенности, а также за счет использования сетевой навигации превосходит другие средства информации по возможностям общения с существующими и потенциальными клиентами. Интернет позволяет автоматизировать процесс обслуживания потенциальных клиентов, без излишних затрат предоставляя им требуемый сервис круглые сутки. Интернет открывает перед предприятием возможность не только организовать эффективную обратную связь с покупателем и оперативно изучить его потребности, но и необычайно гибко менять маркетинговые планы и рекламные проекты в соответствии с меняющейся экономической ситуацией. Сеть превосходит и дополняет традиционные коммуникационные средства, такие как пресса, телевидение и радио, а также представляет собой оптимальный способ поиска потенциальных партнеров и инвесторов.

В настоящее время трудно представить даже малый бизнес без Web-сайта или Web-страницы, но многие руководители пока рассматривают собственный сайт как "дань моде". Главный акцент смещается с предложения информации, товаров или услуг определенной целевой аудитории на индивидуальное обслуживание. Современное предприятие должно сосредоточить свои усилия на дифференциации потребителей, а не на дифференциации товаров. Товары же в свою очередь должны создаваться динамически для удовлетворения потребностей отдельных потребителей. Прошло то время, когда сайт представлял собой размещенную в Интернет рекламную брошюру компании. Сегодня сайт решает широкий круг задач и делает это все эффективнее:

1. Привлекает потенциальных клиентов

На 2006 год число активных пользователей Интернет - более 25% населения Республики Беларусь, что составляет более 2 миллионов человек. По мнению специалистов, это может означать, что каждый четвертый житель ищет поставщика или продавца через Интернет.

2. Расширяет рынок сбыта продукции

Web-сайт доступен из всех регионов, в которых найдутся дилеры и представители, а возможно, и поставщики с более низкими ценами предложат Вам свои услуги.

3. Рекламирует компанию и бизнес

Страница в сети - это альтернатива дорогостоящей рекламе в СМИ. Размещение рекламной информации на сайте с помощью конструктора быстро и, что самое главное, бесплатно, в отличие от рекламного ролика на телевидении или рекламы в газете.

4. Улучшает сервисное обслуживание

Гораздо проще получить информацию о новых ценах, условиях работы и просто времени работы или новых телефонах с Web-сайта компании, чем дозваниваться к тому человеку, который работает с этим поставщиком или партнером.

5. Снижает издержки на обслуживание клиентов

Когда часть клиентов получает информацию непосредственно с Web-сайта - снижается нагрузка текущих работников. Информация в Интернет защищена от человеческого фактора: Интернет-сайт никогда не болеет, не пьет кофе, не болтает по телефону с подружкой.

6. Увеличивает повторные продажи

Адрес сайта очень удобно передавать и рекомендовать. Его трудно перепутать, если правильно его выбрать. Его можно использовать как координаты компании.

7. Оперативно доставляет информацию клиентам

С помощью сайта можно менять буклеты, рекламные страницы и прочую информацию ежедневно. [4]



Рисунок 1 – Классификация инструментов Web-сайта для работы с аудиторией

Работать с аудиторией так или иначе приходится каждой компании, вопрос в том, насколько качественно исполнена эта работа. А качество исполнения в первую очередь зависит от выбранных инструментов.

Инструменты работы с аудиторией являются неотъемлемой составляющей современного Web-сайта. Индивидуальный подход упрощает пользование товарами, поскольку каждый потребитель получает товар только с тем набором функций, которые ему нужны, в результате чего он будет тратить меньше времени на изучение товара.

Грамотно проведенная работа с аудиторией позволяет получить обратную связь с пользователями — узнать об их отношении к продуктам, услугам, сайту и т.д. Это важно как для рекламодателей, потому что они должны знать аудиторию, для воздействия на которую покупают место, так и для владельцев сайта — в зависимости от демографического портрета его постоянной аудитории можно делать соответствующие корректировки в содержании, разделах и даже позиционировании, подстраиваясь тем самым под интересы аудитории. [2].

Условно, инструментарий работы с аудиторией можно разделить на четыре категории (рисунок 1).

К первой категории относятся инструменты для сбора информации.

Опросы посетителей - их отношение/мнение о продуктах, сервисах, сайте. Собрать важную информацию в Сети гораздо проще и быстрее. Для этой цели на сайт помещаются вопросники, голосования, гостевые книги и т.д.

Анкеты для посетителей - сбор демографической информации о посетителях сайта. Во-первых, это важно как для сайтов, продающих рекламу - рекламодатель должен знать

воздействие на какую аудиторию он покупает. Во-вторых, в зависимости от демографического портрета постоянной аудитории сайта, его администрация может делать соответствующие корректировки в контенте, разделах и даже позиционировании, тем самым, подстраиваясь под интересы аудитории.

Анализ поведения пользователей на сайте - владельцы ресурса могут следить за посещаемостью сервера, за наиболее популярными маршрутами по сайту, точками входа и выхода посетителей, временем, проведенным на каждой из страниц и т.д. Данная информация используется и для определения эффективности рекламных направлений, и для оптимизации структуры и навигации сайта.[1]

Вторую категорию составляют инструменты для поддержки пользователей/клиентов.

Консультации - с помощью интернет-технологий можно эффективно осуществлять информационную поддержку клиентов. Специалисты компании с помощью on-line конференций, чата или по e-mail могут отвечать на вопросы, давать консультации. В случае с конференцией это будет не столь оперативно (хотя и конференции могут проводиться в реальном режиме времени), но наглядно и информативно. Конференции имеют удобную древовидную структуру, а отсутствие необходимости отвечать сразу позволяет более тщательно подготовить ответ.

Чат дает максимальную оперативность, ту же, что и телефонная линия, но при этом не надо платить за международные переговоры, а специалист службы поддержки может одновременно отвечать сразу на несколько вопросов. Самым же распространенным способом поддержки пользователей остаются консультации посредством электронной почты.

FAQ (frequently asked questions) - на базе материалов конференций поддержки создаются сегментированные по определенным критериям сборники ответов на "наиболее часто задаваемые вопросы" (FAQ). Они доступны всем посетителям сайта. Существенно сокращают нагрузку на персонал по обслуживанию обращений клиентов.

Раздел «Документация». На сайте компании можно поместить всю необходимую документацию, причем сделать это очень оперативно и максимально полно, а не пытаться в целях экономии бумаги и транспортных расходов сокращать объем инструкций. Эту документацию могут получить клиенты и дилеры компании, разбросанные по всей стране или даже всему миру.

Предпродажное обслуживание клиентов входит в комплекс мер по получению доходов, но и послепродажное не менее важно. Интернет в состоянии обеспечить самый высокий уровень обслуживания потребителей. Чем больше информации предлагается на сайте, тем более ценной становится база данных фирмы для потребителей.

Онлайновое обслуживание клиентов приносит пользу не только потребителям, а также облегчает работу отдела компании, занятого поддержкой клиентов. Сотрудники этого отдела могут рекомендовать звонящим посетить сайт их компании, где легко найти исчерпывающую информацию. Это значительно сокращает количество и продолжительность телефонных разговоров. Экономия и удобство налицо.

В третью категорию предложенной классификации входят инструменты для организации продаж.

Представление товара - неотъемлемая часть любого интернет-магазина, своего рода виртуальная витрина, где представлены товары. К концепции виртуального каталога товаров применяются те же критерии, что для информационного наполнения сайта. Товары должны быть представлены наиболее эффектно и полно, поиск нужного товара должен быть быстрым и легким и т.д.

Система формирования заказа - понравившиеся пользователю товары должны быть помещены в виртуальную корзину - shopping cart. Заглянув туда, пользователь должен четко понимать, что он уже заказал, на какую сумму, и иметь возможность скорректировать заказ.

Оплата заказа - столь популярная на Западе оплата заказа в on-line по кредитной карте в белорусском сегменте Интернет не получила широкого распространения. В большей

степени, практикуется оплата банковским переводом или наличными курьеру, доставившему товар.

Мониторинг выполнения заказа - далеко не каждый заказ можно проследить, особенно если он доставляется в течение нескольких часов с курьером. Но все же в целом ряде магазинов покупатель имеет возможность удостовериться в том, что его денежный перевод получен, заказ оформлен или находится в процессе доставки.

Back-office - для владельцев магазина важно то, насколько удобно с ним работать не только покупателям, но и администрации. Ряд магазинов сразу интегрируется с торговой или складской программой, которую использует компания. Другие создают собственную базу данных. Необходимо иметь возможность оперативно корректировать товарные позиции (ассортимент, описание, цена, доступность и т.д.) и акцентировать внимание пользователей на определенном товаре, группе товаров, обрабатывать поступившие заказы и т.д. [3]

Важную роль в организации взаимодействия с аудиторией играют инструменты четвертой категории - для коммуникаций между пользователями.

Проблема формирования постоянной и лояльной аудитории стоит практически перед каждым развивающимся веб-ресурсом. Особенно важно ее решение для тех сайтов, которые продают взаимодействие или контакт со сформированной аудиторией. Приоритетными задачами при формировании лояльного сообщества являются:

- стимуляция повторных и все более частых посещений сайта;
- увеличение времени, проводимого пользователями на сайте;
- активное вовлечение пользователей в жизнь сайта (участие в дискуссиях, опросах, конкурсах, викторинах и т.д.);
- привлечение пользователей к развитию и продвижению ресурса;
- формирование чувства общности, принадлежности к сообществу.

Эксперты настаивают, что необходимо именно вовлекать пользователей в работу сайта. Сделать это можно, только уделяя работе с сообществом постоянное внимание и используя специальный инструментарий:

- on-line конференции;
- чаты;
- доски объявлений;
- системы коллективного принятия решения, голосования;
- игры, конкурсы;
- рассылки, дискуссионные листы;
- полезные сервисы и др.

Построение Web-сайта с точки зрения формирования лояльного сообщества непростое дело. Интерес пользователей Интернет может быть прикован к совсем другим сферам, не относящимся к предлагаемой продукции. Пользователи могут интересоваться новостями культуры, погодными сводками, гороскопами и т.д. Очевидно, что размещая на сайте информацию, не связанную непосредственно с рынком сбыта, можно обеспечить дополнительное внимание к своему продукту. Такой подход привлекает дополнительно нецелевую аудиторию, создает компании устойчивый имидж, способствует расширению рынка.

Комплексное использование инструментов Web-сайта для работы с аудиторией позволяет реализовать ряд преимуществ:

- очевидное преимущество Web-сайта заключается в возможности наиболее полного представления информации о товаре или услуге;
- размещение информации, не связанной непосредственно с фирмой или товаром (услугой) может значительно расширить круг посетителей сайта. Появляется возможность открытия новых рынков;
- возможность использования Web-сайта в качестве виртуального магазина, который будет доступен 24 ч в сутки, 7 дней в неделю из любой точки земного шара.

Подводя итоги необходимо отметить, что современные условия требуют от производителя намного более широкой деятельности, чем просто разработка хорошего продукта,

проведение приемлемой ценовой политики и доведение своей продукции до целевого сегмента рынка. Помимо этого компании должны активно общаться со своими реальными и потенциальными клиентами, розничными торговцами, поставщиками, другими заинтересованными лицами и потребителями. С этой целью необходимо изучать и совершенствовать применение различных инструментов взаимодействия с Интернет-аудиторией.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балабанов И.Т. Электронная коммерция: учебное пособие для вузов. –СПб.: Питер, 2001. -336с.
2. Успенский И. Энциклопедия Интернет-бизнеса. – СПб.: Питер, 2001. – 432 с.: ил.
3. Эймор Д. Электронный бизнес: эволюция и/или революция. /Пер. с англ. –М.: Вильямс, 2001. -752с.
4. Энциклопедия Интернет-рекламы - <http://www.book.promo.ru/>

УДК 681.3.01:339.138

Червяк Е.А., Лавренова О.А.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МОДЕЛЕЙ РАСЧЕТА СТОИМОСТИ ИНТЕРНЕТ-РЕКЛАМЫ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Происходящие в Республике Беларусь изменения в области экономики, а также дальнейшее развитие и расширение внешнеторговых связей предполагают разработку новых подходов к производственно-коммерческой деятельности компаний. Устойчивое финансовое положение возможно только в случае использования принципов и методов современного маркетинга, который неразрывно связан с сетью Интернет.

Появление и развитие сети Интернет внесли изменения в современный взгляд на средства рекламы и коммуникации. Учитывая то, что информационные возможности Интернет безграничны, и то, что на сегодняшний день всемирная сеть – это достаточно доступный способ рекламы, а также огромный рынок сбыта, интернет-реклама имеет хорошие перспективы для развития и применения в деятельности различных организаций. Однако, для того, чтобы реклама в сети давала положительный результат, необходимо не только исследовать рекламный рынок, работать с потребителями, искать новые возможности и средства, учитывать деятельность конкурентов и планировать свою деятельность, а также уметь выбрать наиболее приемлемую для компании ценовую модель, что и являлось целью работы.

Ценовая модель размещения рекламы - модель выплаты вознаграждения за размещение рекламы. Плательщиком является рекламодатель, а получателем вознаграждения - издатель ресурса.

Каждый раз, когда появляется новый тип СМИ, основанный на новых технологиях доставки информации, потребителям, издателям и рекламодателям приходится учиться применять общепринятые правила ценообразования рекламных услуг в новых условиях. Это сейчас и происходит с рекламой в Интернет.

Первыми с проблемой ценообразования рекламных услуг в сети Интернет столкнулись менеджеры HotWired, где впервые был размещен рекламный баннер. Решение было следующим: 30 000 долларов за размещение рекламного баннера на 12 недель, т.к. именно столько денег было нужно для компенсации расходов по содержанию Web-сайта. Этому примеру последовали менеджеры других популярных сайтов. Рекламодатели справедливо возмутились и через несколько месяцев под их давлением был предложен способ оплаты интернет-рекламы, основанный на подсчете количества показов рекламных

баннеров. Цены на рекламу в Интернет органично вписались в общепринятый механизм ценообразования.

В настоящее время в сети Интернет существуют ценовые модели, присущие традиционным рекламным каналам - **Cost per thousand (CPM)** - стоимость за тысячу показов рекламы и **Flat fee Advertising** (фиксированное размещение рекламы на заданный промежуток времени), а также ряд других уникальных моделей, не имеющих аналогов в традиционных рекламных каналах:

Cost per click (CPC) - стоимость за тысячу кликов;

Cost per visitor (CPV) - стоимость за тысячу посетителей;

Cost per action (CPA) - расчет рекламодателя с издателем за конкретные действия привлеченных посетителей;

Cost per sale (CPS) - расчет рекламодателя с издателем, базирующийся на продажах привлеченным посетителям.

Наибольшее распространение в Интернет получила модель CPM, а также CPC. Все чаще в последнее время встречаются Flat Fee и CPV. При этом каждая модель может быть более или менее выгодна рекламодателю или издателю. Рассмотрим перечисленные модели более подробно.

1. Фиксированная плата. При использовании данной ценовой модели оплата производится за размещение рекламы в определенном месте рекламной площадки и на определенный период. Стоимость зависит от посещаемости страниц, тематики сервера, расположения рекламы на странице. По своему типу данная модель похожа на размещение щитовой рекламы на улицах города, где оплата также идет за время.

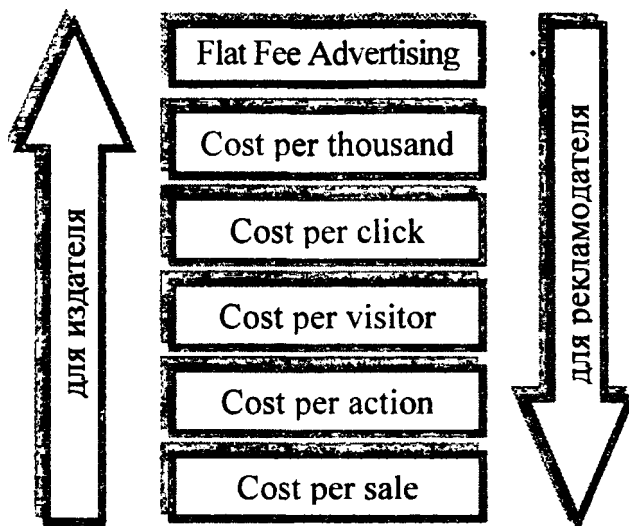


Рисунок 1 – Ценовые модели с точки зрения безопасности участников интернет-рекламы

Для издателя это самый "надежный" и простой способ размещения рекламы, т.к. вне зависимости от эффективности рекламы, рекламодатель заплатит свои деньги, и ответственность за хорошо составленную рекламу целиком несет рекламодатель.

Приведем несколько примеров ценовой модели Flat Fee Advertising:

- поисковая система **Yandex** (www.yandex.ru) – посещаемость составляет около 932 367 чел./сут.; стоимость баннера 468x60 пикселей, размещенного сверху справа составляет 714 долларов в день;

- поисковая система **TUT.BY** (www.tut.by) - посещаемость составляет около 60000 чел./сут.; стоимость баннера 468x60 пикселей, размещенного сверху справа составляет 50 долларов в день.

2. Стоимость за тысячу показов. Наиболее распространенная ценовая модель в Сети. Расчет идет за количество показов, подсчет которых ведет программа. Система считает, что

показ был осуществлен, если браузер пользователя загрузил баннер, но сам пользователь может его так и не увидеть, что вероятно, если баннер загружается внизу страницы, а пользователь не прокрутил ее до конца. Или баннер вверху страницы загружается с запозданием и пользователь, не дождавшись его загрузки, прокручивает страницу вниз. Возможна также ситуация, когда пользователь увидел баннер большее количество раз, чем показала система (браузер может закешировать баннер после его первой загрузки и показать еще раз уже на другой странице без обращения к серверу). Реальной мерой количества показов служит AD exposure - реальный показ рекламы, а не просто факт ее загрузки в браузер. Но, к сожалению, такой показатель не поддается программному подсчету.

Данная ценовая модель часто используется для расчета стоимости размещения рекламы на телевидении и радио. Для серверов, продающих показы баннеров, СРМ колеблется от 2 до 50 долларов. Примеры ценовой модели Cost per thousand:

- поисковая система Yandex (www.yandex.ru) - 50 долларов за тысячу показов;
- поисковая система Mail.Ru (www.mail.ru) – 30 долларов за тысячу показов;
- автомобильный сайт Auto.ru (www.auto.ru) - 6 долларов за тысячу показов.

Количеством показов определяется не только стоимость размещения баннеров. Цены на рекламу по электронной почте также рассчитываются на языке СРМ. Например, недельное спонсирование дискуссионного списка рассылки Online Advertising DiscussionList не случайно оценивается в 600 долларов. Список рассылается 5000 подписчиков шесть раз в неделю. Значит, за 600 долларов спонсор получает 30000 "показов" и СРМ списка составляет 20 долларов.

Следует отметить, что средние значения СРМ Web-сайтов в целом выше СРМ других СМИ. На высокие показатели СРМ оказывает влияние то, что реклама в Интернет более точно сфокусирована, а также тот факт, что размещение рекламы в Сети для многих рекламодателей носит экспериментальный характер. Когда крупнейшие рекламодатели сочтут, что Интернет имеет смысл рассматривать наравне с телевидением и газетами, уровень СРМ Web-сайтов будет приведен в соответствие с уровнями СРМ на телевидении и в печати.

3. Стоимость за тысячу кликов. Ценовая модель, при которой рекламодатель платит непосредственно за нажатия на свою рекламу. Не следует путать СРС со стоимостью за посетителя (СРV). Количество кликов может быть больше, чем количество привлеченных посетителей, потери могут составлять до 50%. Клики учитываются на стороне издателя, посетители на стороне рекламодателя.

На сегодняшний день, данная рекламная модель достаточно эффективна для рекламодателя. Для издателя это значительно больший риск по сравнению с продажей показов, поскольку он получит прибыль только при востребованности рекламы. Разумеется, рекламная модель оплаты за клик требует продвинутой системы статистики показов и подсчета кликов посетителей, но также важно понимать, что большую роль имеет честность и порядочность рекламной площадки. Поэтому, выбирая оплату за клик, необходимо учитывать деловую репутацию и надежность издателя, его стремление вести честный бизнес.

Издатели справедливо утверждают, что схема расчетов по количеству кликов нелогична, т.к. их дело донести рекламу до потребителей, за что они и получают деньги. Доходы издателей не должны зависеть от качества креатива баннера или от содержания рекламного предложения, т.к. получается, что одни делают плохие товары и рисуют плохие баннеры, а другие недосчитываются заслуженных денег.

4. Стоимость за тысячу посетителей. Данная ценовая модель аналогична СРС, но более сложно поддается подсчету (учет можно вести только непосредственно на стороне рекламодателя) и поэтому редко используется на практике.

5. Расчет за конкретные действия привлеченных посетителей. Например, расчет может производиться за количество заполненных анкет, подписки на определенные сервисы, заполнение заявок и т.д.

6. Расчет, основанный на продажах привлеченным посетителям. Принцип похож на CPA. При использовании данной модели происходит фиксация не только совершения покупки, но и непосредственно суммы покупки. Соответственно, оплатой является не фиксированная цена действия, а процент от продаж. Примеры ценовой модели Cost per sale:

- интернет-магазин Ozon.ru - платит от 3 до 10% от суммы продаж за привлеченных web-издателем покупателей;

- интернет-магазин Amazon.com - от 5 до 15%.

Сравнивая все вышеописанные ценовые модели, можно сделать следующий вывод: для издателя, наиболее "безопасной" является первая модель (Flat Fee Advertising), менее безопасной – последняя (CPS). Данное утверждение отражено на рисунке 1, где направление стрелки соответствует росту безопасности.

В первом случае (модель Flat Fee Advertising) издатель гарантированно получит за определенное время оговоренную сумму, в случае модели CPM издатель зависит от посещаемости своего сайта, при использовании модели CPC - издатель в дополнение к зависимости от посещаемости сайта зависит еще и от исполнения рекламы и характера предлагаемой услуги, при оплате в зависимости от конечного результата (при использовании моделей CPA и CPS) - как от всех вышеперечисленных факторов, так и непосредственно от уровня реализации в интернет-магазине рекламодателя, конкурентоспособности цен в магазине и от множества других факторов. Но это не означает, что первая модель является для издателя наиболее предпочтительной. Все зависит от сравнительной пропорции цен для каждой из моделей и типа рекламируемого продукта.

Рекламодатель находится в аналогичной ситуации, но для него, с точки зрения "безопасности", ценовые модели нужно расставить в обратном порядке.

При выборе между вариантами рекламных моделей для рекламодателя важно учитывать, что нельзя однозначно утверждать, что одна модель лучше другой из соображений эффективности/цена/качество. Так при выборе оплаты за покупку, когда рекламодатель получает реальную реализацию его товара, нельзя сказать, что оплата за покупку (CPS) выгоднее, чем оплата за показы (CPM). Дело в том, что стоимость оплаты за покупку на несколько порядков выше стоимости оплаты за показы. Поэтому в пересчете стоимости рекламы за показы и стоимости за покупку, может выясниться, что дешевле выбрать именно за показы или наоборот.

В каждом случае важно учитывать широкий ряд факторов - от эффективности рекламной площадки, качества ее аудитории и стоимости рекламы до технических аспектов. Например, можно купить постоянное размещение за небольшие деньги и выбрать хорошее место расположение на сайте, но доступность ресурса будет желать лучшего или полезная аудитория ресурса окажется ничтожно малой. Также, любая рекламная кампания в Интернет должна учитывать не только количественные показатели, но и честность, порядочность рекламной площадки, поскольку для рекламы в Интернет очень важно доверие и надежность в выполнении обязательств.

Все больше и больше специалистов используют "всемирную паутину" в своей повседневной деятельности. Поэтому Интернет можно рассматривать как огромную рекламную площадку для продукции и услуг. Кроме того, в сети Интернет реклама действует длительный срок и круглые сутки, имеет мировую аудиторию, обеспечивая выход на новые рынки сбыта. На сегодняшний день в Республике Беларусь существует довольно серьезная конкуренция в области рекламных услуг. Можно перечислить следующие рекламные агентства, которые предлагают свои услуги в области интернет-рекламы: рекламное агентство Натальи Шабуневич, а Priogi, Золотой ключ, Про-движение, Adliga, Фокус-группа, OLIVERPRINT, Ажур, БитКом и многие другие. В таблице 1 приведены цены на услуги агентства БитКом, которое занимается разработкой и размещением рекламы в сети Интернет.

Таблица 1 – Услуги рекламного агентства БитКом

Услуга	Стоимость
Пакет «Стартовый»: 200 полноценных контактов, т.е. посещений определенной страницы сайта потенциальным клиентом, заинтересованным в ваших товарах или услугах (посещений вашего сайта стоимостью 0,35 у.е. за "клик").	75 у.е.
Пакет «Стандартный»: 500 полноценных контактов (0,30 у.е. за "клик").	150 у.е.
Пакет «Рациональный»: 1200 полноценных контактов (0,25 у.е. за "клик").	300 у.е.
Пакет «Профессиональный»: 2000 полноценных контактов (0,20 у.е. за "клик").	400 у.е.

Таким образом, в результате исследования была выполнена сравнительная характеристика моделей расчета стоимости интернет-рекламы, определены особенности их применения для рекламодателя и издателя. На основании изложенного материала можно сделать вывод, что от выбора ценовой модели во многом зависит эффективность рекламной кампании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Основы маркетинга: Учеб. пособие/Похабов В.И., Тарелко В.В. – Мн.: Выш.шк., 2001.–271 с.; 2. Планирование стратегий интернет-маркетинга/Ральф Ф. Уилсон – М.:Издательский дом Гребенникова, 2003.–264 с.; 3. Реклама в Internet: тонкости, советы, примеры и способы работы.– М.: Познавательная книга плюс, 1999.-176 с.; 4. Успенский И. Энциклопедия Интернет-бизнеса. – СПб.: Питер, 2001. –432 с.: ил.; 5. Хабаров В.С., Барвинок А.В., Рамзаев В.М. "Маркетинг и Интернет". - Москва, 2001.; 6. Холмогоров В. Интернет-маркетинг. Краткий курс. – СПб.: Питер, 2001. – 208 с.: ил.; 7. Энциклопедия Интернет-рекламы - <http://www.book.promo.ru/>

УДК 681.3.04:003.13

Грицук Г.В., Лавренова О.А.

ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ WEB-ПРЕДСТАВИТЕЛЬСТВА

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

В настоящее время происходит активное развитие электронного бизнеса, включающего в себя продажи, маркетинг, финансовый анализ, платежи, поиск сотрудников, поддержку клиентов и партнеров, которые перенесены в Интернет. В силу глобальности Интернета это означает непрерывное общение с каждым поставщиком, партнером и клиентом — и зачастую всех друг с другом. В условиях, когда к Интернету подключены десятки миллионов ПК, когда Интернет стал универсальной деловой средой, соединяющей компании друг с другом и со всей потребительской аудиторией, доступ к методам электронного бизнеса получили все компании, независимо от их размера и возраста.

Какие возможности Интернет предоставляет бизнесу? Первая и самая простая — передача информации о своей продукции и приглашение к сотрудничеству. Следующий уровень — это приложения для электронной коммерции, позволяющие прямо на сайте заказать и оплатить продукцию и услуги, а затем получить их традиционным способом: с помощью транспортной компании или, если это информационные и прочие продукты, имеющие цифровую природу, пересылкой по каналам Интернета [1].

Основой успешного ведения бизнеса является удачное *Web-представительство* — полное и оперативное размещение информации в Интернет, привлечение к ней максимального числа пользователей и обеспечение повторных посещений. *Web-представительство* яв-

ляется инструментом перехода к электронным формам ведения бизнеса. С какой целью создается представительство компании в Интернет, для кого предназначена размещаемая на нем информация и какого рода отдача ожидается - вот главные вопросы, ответы на которые нужно получить перед началом "покорения" Интернет.

В самом общем виде *эффективным* можно считать такой Web-сайт, который:

- ✓ дает полное представление о предлагаемых товарах и услугах;
- ✓ в состоянии довести до посетителей преимущества и выгоды именно этих товаров и услуг;
- ✓ позволяет быстро найти конкретную информацию о характеристиках конкретного товара;
- ✓ предоставляет ясную информацию о способах заказа и оплаты товара [2].

Существуют различные методики оценки реальных показателей работы сайта.

Для *оценки эффективности сайта* могут проводиться следующие мероприятия:

- ✓ определение первоочередных задач Интернет-проекта и изучение соответствия имеющегося сайта этим задачам;
- ✓ проверка достоверности и актуальности представленной на сайте информации;
- ✓ анализ быстродействия системы и скорости доступа к сайту;
- ✓ запросы к поисковым сайтам и каталогам Интернет для нахождения информации о заданном сайте и примерного определения уровня сложности поиска;
- ✓ изучение системы учета посещаемости сайта с использованием ресурсов Интернета и с помощью собственных счетчиков;
- ✓ сведение данных разных систем в единый статистический отчет;
- ✓ проведение исследований о круге читателей, частоте посещения сайта, предпочтениях читателей;
- ✓ получение откликов от посетителей сайта с помощью форума или анкетирования;
- ✓ изучение динамики увеличения или уменьшения числа подписчиков рассылки;
- ✓ выявление наиболее и наименее интересной информации - изучение страниц с максимальной и минимальной посещаемостью;
- ✓ анализ эффективности баннеров;
- ✓ для торговых систем - изучение динамики продаж в зависимости от тех или иных акций, проводимых на сайте;
- ✓ для Интернет-магазинов - оценка непосредственного дохода от продаж с помощью систем заказа on-line [3].

Для выявления положительных и отрицательных аспектов сайта в целом может проводиться *оценка его качества*. Предлагаемая методика основывается на оценке качества Web-сайта по ряду критериев (оценочных показателей), которые характеризуют те или иные аспекты представления информации и возможностей самого сайта. К основным оценочным показателям относятся:

1. Информационное наполнение.

2. подача информации. Этот критерий характеризует то, насколько удобно и понятно изложена информация на сайте, насколько учтены особенности Интернета.

3. Оперативность информации. Оценивается соответствие размещенной на сайте информации текущей ситуации, наличие самых последних данных, новостей отрасли, документов, отсутствие устаревшей информации.

4. Коммуникации. Параметр, характеризующий качество сайта как средства взаимодействия сотрудников фирмы с контрагентами (физическими и юридическими лицами). Эта оценка зависит от наличия и качества реализации таких сервисов как формы обратной связи, онлайн-конференций, FAQ.

5. Дизайн. Этот критерий предназначен для оценки качества оформления страниц и материалов.

6. Удобство использования. Параметр, характеризующий быстроту нахождения и использования информации, ознакомления с ней. Оцениваются средства навигации, возможности средств поиска, удобство структурной организации страниц сайта, интенсивность гиперссылок между материалами сайта.

7. Дополнительные сервисы – предоставление инструментов посетителям для работы с контентом: хранение индивидуальных данных, подписки на новостные рассылки, файловый архив и т.д.

8. Структура сайта – оценка логичности тематического деления контента на разделы и подразделы, оценка их соответствия, правильность разбиения на иерархические уровни.

По каждому из критериев эксперты осуществляют выставление оценок (в диапазоне от 1 до 5), на основании которых формируется интегральный показатель. При найденном интегральном показателе оценки сайта рассчитывается его потенциал. На основании расчета проводится тщательный анализ по всем критериям, и в сайт вносятся необходимые изменения: улучшение подачи информации, разнообразие дополнительных сервисов (добавление форумов для обсуждения разных товаров, внедрение онлайн-консультации для покупателей), оптимизация структуры сайта (сокращение/добавление подразделов, настройка карты сайта) [4].

Любое предприятие, создающее свое Web-представительство, ставит перед собой конкретную цель - получение конечных финансовых результатов, т.е. прибыли. Поэтому в настоящее время актуальным является проведение **оценки экономической эффективности работы Web-сайта**. Под **экономической эффективностью** Интернет-сайта понимают экономический эффект, получаемый конкретным предприятием от владения и эксплуатации сайта как средства коммуникации, т.е. взаимодействия с потенциальными клиентами.

Сложность проблемы этой оценки связана с тем, что для многих предприятий, для которых сайт не является единственным каналом сбыта продукта, нельзя напрямую оценить экономический эффект (для Интернет-компании, чей бизнес полностью основан на распространении товара через Интернет, экономический эффект считается как разность выручки и затрат). Это требует альтернативной разработки методики оценки экономической эффективности сайта как средства коммуникации. Оценка экономической эффективности сайта основывается на поэтапном расчете показателей:

- ✓ пользовательской оценки (V);
- ✓ суммарного коммуникационного эффекта (GCE);
- ✓ коммуникативной значимости сайта с точки зрения продаж (CSVP).

На примере Интернет-магазина Agomat.ru проведена поэтапная оценка экономической эффективности сайта.

1. Пользовательская оценка сайта (V).

С помощью пользовательской оценки производится измерение восприятия пользователями качества сайта как коммуникативного средства.

Для получения пользовательской оценки сайта проводится прямое анкетирование посетителей сайта. Вопрос анкеты: “Как вы оцениваете наш сайт?”. Для замера можно использовать различные шкалы и методики, однако основным критерий выбора конкретной методики состоит в том, что значение пользовательской оценки должно меняться в диапазоне (+1) – 0 – (-1). Т.е. впечатление от сайта может меняться от очень хорошего (что означает успешную коммуникацию) до очень плохого (что означает неудачную коммуникацию), (0) означает нейтральное отношение.

Оценочная шкала для оценки сайта представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Оценочная шкала для оценки сайта

Оценка	Значение оценки	Преобразование i
Очень понравился	3/3	1
Понравился	2/3	0.6
Нормально	1/3	0.3
Затрудняюсь	0	0
Так себе	-1/3	-0.3

Оценка	Значение оценки	Преобразование i
Не понравился	-2/3	- 0.6
Очень не понравился	-3/3	- 1

Расчет пользовательской оценки сайта проводится по формуле

$$V = E_i, \quad (1)$$

где E_i - оценка по каждому респонденту.

2. Суммарный коммуникативный эффект (GCE).

Суммарный коммуникативный эффект, рассчитываемый по формуле (2), характеризует мощность воздействия сайта магазина:

$$GCE = GSR \times V, \quad (2)$$

где GSR – число посещений в анализируемый период.

3. Коммуникативная значимость сайта (CSV).

Коммуникативная значимость сайта показывает, какое значение имеет сайт как средство коммуникации в общей коммуникативной программе компании, что, по сути, представляет долю, занимаемую сайтом в общем объеме коммуникации предприятия. Коммуникативная значимость сайта рассчитывается по формуле (3):

$$CSV = GSR \times V / GC, \quad (3)$$

где GC – общее число всех коммуникаций по всем средствам коммуникации (суммируется целевая аудитория TV, радио и т.д. с числом посещений за период).

4. Коммуникативная значимость сайта с точки зрения продаж (CSVP).

Коммуникативная значимость сайта с точки зрения продаж используется для измерения частоты упоминания Интернет- сайта как средства коммуникации. Суть метода заключается в определении доли упоминания сайта в общем числе названных коммуникаций.

Оценим коммуникативную значимость с точки зрения продаж Интернет-магазина Aromat.ru. Вопрос анкеты: “Откуда Вы получили информацию о нас?” Ответ покупателя 1 – да, 0 – нет. Результаты анкетирования по источникам информации представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты анкетирования по источникам информации

Средства коммуникации g	1-й	2-й	3-й	n-й
TV	1	0	0	1
Радио	1	1	0	0
Журнал-каталог	0	0	0	1
Сайт	1	1	0	0
Знакомые	1	0	1	1

Используя данные по результатам анкетирования, по формуле (4) рассчитывают коммуникативную значимость сайта с точки зрения продаж:

$$CSVP = S(i = 1, \dots, n) / S_g(i = 1, \dots, n). \quad (4)$$

5. Оценка экономической эффективности сайта (ESV) как средства коммуникации.

Данная оценка проводится для предприятия реализующего продукцию (услуги):

ESVP – оценка экономической эффективности сайта с точки зрения продаж, рассчитываемая по формуле (5):

$$ESVP = (CSVP \times V - CS / MB) \times MB. \quad (5)$$

где CS – затраты компании на поддержание и развитие сайта за период;

MB – затраты компании на все средства коммуникации за период.

Таким образом, имея оценку экономической эффективности сайта, можно рассчитать предельную стоимость сайта – сумму затрат на создание и поддержание сайта за период, при которой экономический эффект предприятия от эксплуатации сайта равен нулю. Данный показатель должен также учитываться при разработке ценовой политики компании, разрабатывающей (физически создающей) Интернет-сайт для корпоративных клиентов.

Предельная стоимость сайта может быть рассчитана по формуле (6):

$$MSP = ESVR + CS \quad (6)$$

Результаты оценки экономической эффективности Интернет-магазина Aromat.ru как средства коммуникации представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты поэтапного расчета экономической эффективности сайта

Показатель	Значение
1. Пользовательская оценка сайта (V)	0,3
2. Суммарный коммуникативный эффект (GCE)	300 000
3. Коммуникативная значимость сайта (CSV)	3
4. Коммуникативная значимость сайта с точки зрения продаж (CSVP)	0,4
5. Коммуникативная значимость сайта с точки зрения продаж	920 \$
6. Предельная стоимость сайта (MSP)	1 920\$

Как видно из приведенной методики, оценка экономической эффективности сайта включает показатели, рассчитанные на основе опытных данных (данных опросов), что позволяет проводить расчеты для существующих Интернет-сайтов. Эта оценка может быть недостоверной, поскольку опрашиваемые могут давать уклончивые или нечестные ответы, а также допускать ошибки или пропускать вопросы.

Однако данная методика может использоваться и для определения экономической эффективности сайта, планируемого к созданию. Главной задачей является составление прогноза (плана) по значению ключевых компонентов, а после инвестиций в проект создания сайта, - контроль за выполнением плановых (прогнозных) значений [5].

Таким образом, оценка экономической эффективности работы Интернет-сайта проводится с целью получения конкретных результатов деятельности предприятия. Это дает возможность изучить поведение клиентов и внести в данный сайт необходимые изменения с целью повышения коммерческой отдачи, получаемой от сайта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Основы информатики: Учеб. пособие / А.Н. Морозевич, Н.Н. Говядинова, В.Г. Левашко и др.; Под ред. А.Н. Морозевича. – Мн.: Новое знание, 2003. – 544 с. 2. Успенский И.В. Энциклопедия Интернет-бизнеса. – СПб.: Питер, 2001. – 432 с.: ил.; 3. Разработка Web-сайта и его эффективность - <http://www.np.vspu.ac.ru/show.php?t=1&id=46&st=5>; 4. Электронная коммерция - <http://www.econom.univ.kiev.ua/files/books/NewT/Lecture5.pdf>; 5. Мероприятия для оценки эффективности сайта - <http://www.tatse1.ru/web/index.htm>

АНАЛИЗ И ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ИНТЕРНЕТ-БРЭНДОВ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОЙ КОНКУРЕНЦИИ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Одной из главных движущих сил происходящих сегодня революционных изменений в методах ведения бизнеса являются информационные технологии. Они стали незаменимым средством взаимодействия всех субъектов рынка, инструментом ведения бизнеса, применяемым для осуществления большинства бизнес процессов компаний.

Мы живем в невероятном мире. В мире, где ведутся настоящие маркетинговые войны. Войны, где победа над конкурентом давно уже не определяется одним лишь качеством и ценой. Компании гиганты ежегодно тратят сотни миллиардов долларов в битве за сознание потребителей. Идет война брэндов. Каждый день до нас доносятся отголоски маркетинговых войн между брэндами с экранов телевизора, с динамиков радио, со страниц журналов и газет, рекламных щитов... Парадоксально, но в сегодняшнем мире стоимость брэнда (нематериального актива) может значительно превосходить стоимость всех материальных активов компании. Например, по данным на июль 2006 года суммарная стоимость самых дорогих брэндов мира составляет почти 190 миллиардов долларов: Coca-Cola – \$70 млрд. ; Microsoft - \$65 млрд. ; IBM - \$51 млрд [6].

Брэнд (brand) – это некое впечатление о товаре у потребителей, ярлык, который мысленно наклеивается на товар, восприятие товара потребителем. Процесс создания брэнда и управления им называется брэндингом (branding). **Брэндинг** – наука и искусство создания долгосрочного покупательского предпочтения к определенной товарной марке.

Появление и развитие Интернета привело к созданию отдельной составляющей брэндинга – **интернет-брэндингу**. Это связано с тем, что особенности виртуальной среды требуют использования отличных от традиционных методов развития брэндов [1].

Интернет-брэндинг - это в контексте общей маркетинговой стратегии компании - разработка и осуществление комплекса мероприятий в Интернете, способствующих:

- 1) идентификации того или иного продукта;
- 2) выделению этого продукта из ряда аналогичных конкурирующих продуктов;
- 3) созданию долгосрочного предпочтения потребителей к брэнду.

Многие крупные и известные западные компании вошли в Интернет, активно используя характерные особенности своих традиционных брэндов. В нашем сегменте WorldWideWeb экспансия известных компаний пока только начинается. И хотя свои представительства в Сети имеет все большее количество фирм, практически все они представлены в онлайне значительно слабее, чем в оффлайне.

При этом многие руководители предприятий — как отечественные, так и зарубежные, — до сих пор не отдают себе отчета в том, что формирование и продвижение брэнда в Интернете принципиально отличаются от аналогичных процессов в реальном пространстве. Между оффлайновым и онлайн-брэндингом нельзя ставить знак равенства и переносить привычные методики из традиционной коммерции в электронную. И, переводя свой уже существующий брэнд в Интернет или, что еще сложнее, заново создавая интернет-брэнд, специалисты по маркетингу зачастую сталкиваются с огромными проблемами. По исследованиям, несмотря на то что покупатели хотели бы попробовать продукцию под новой маркой, обычно они все же выбирают уже знакомое название.

Можно привести массу примеров того, как попытки интернет-брэндинга заканчивались только размещением рекламной информации о фирме или продукции в интернетовских баннерах, причем промоутеры этих компаний и товаров искренне считали свою задачу на этом вы-

полненной, а цель — достигнутой. Тем не менее, есть и образцы успешного создания интернет-брендов, к каковым относятся, например, **Amazon.com**, **Barnesandnoble.com**, **Gateway.com**, **eBay.com** и, конечно же, **Google**, который вот уже два года возглавляет большинство самых авторитетных рейтингов мирового web-пространства [4].

Представленные в мировом и отечественном Интернете бренды принято делить на несколько типов (рисунок 1):

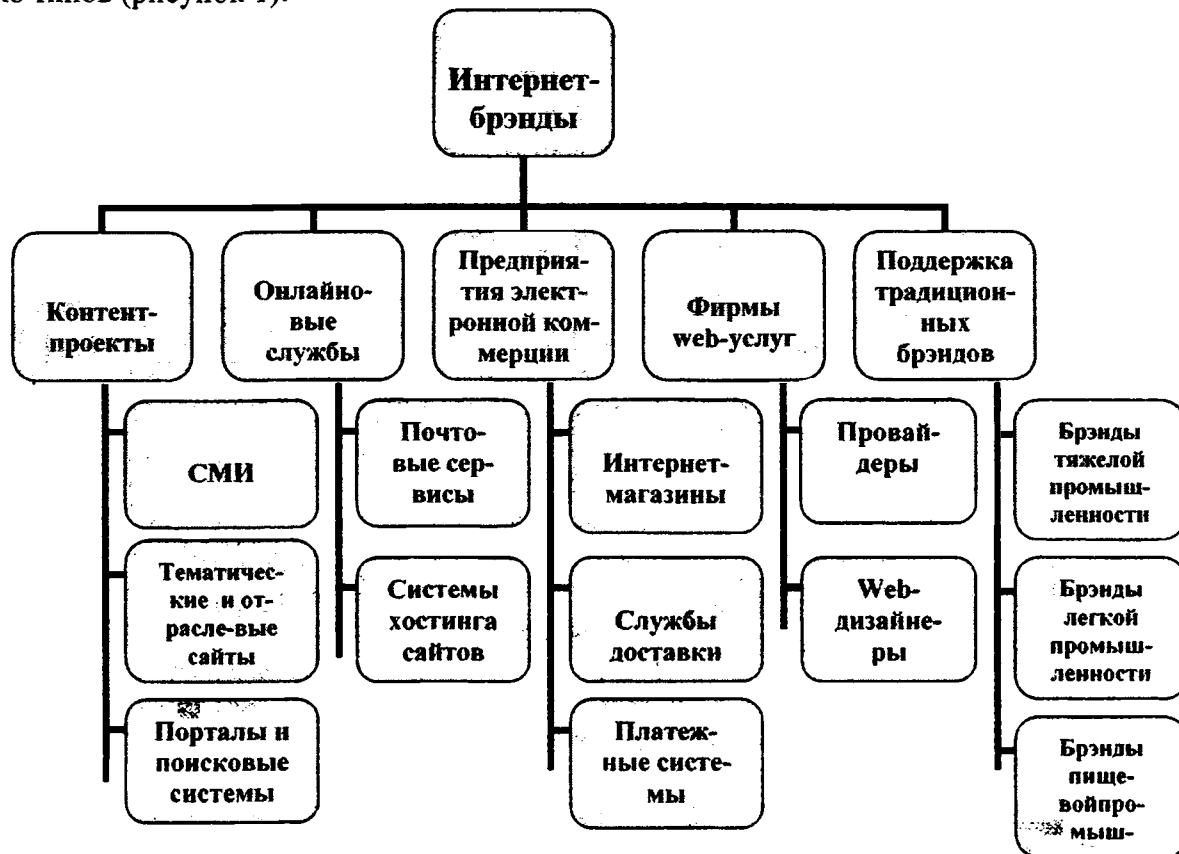


Рисунок 1 – Классификация интернет-брендов

Построение и продвижение бренда в Интернете во многом схоже с процессом создания его традиционного предшественника. Этот процесс можно разделить на две стадии [2]:

1) на первой происходит формирование осведомленности аудитории о бренде (на этом этапе основными задачами являются узнавание пользователями бренда, понимание, к какой категории он относится, и что из себя представляет);

2) на второй фазе в круг задач входит укрепление позиций бренда, усиление лояльности пользователей и более тесное взаимодействие с ними.

Тем не менее Интернет-бренд имеет ряд отличительных особенностей [6]:

- **критерии оценки брендов, отличные от традиционных** — в традиционном окружении популярность торговой марки во многом зависит от ее уникальных характеристик и качеств. Это может быть, например, высокое качество товара, высокий уровень обслуживания клиентов или сервисной поддержки и т. д. В мире Интернета традиционная система оценки качества товаров и услуг уходит на второй план. На первое место выходят критерии, связанные со спецификой коммуникаций в Интернете: объем предоставляемой информации, удобство и простота в работе, возможность использования индивидуальных настроек, удобная система навигации, безопасность и конфиденциальность и др.;

- **активность Интернет-брендов.** В обычном мире процесс формирования бренда происходит, как правило, посредством непрерывного потока информации о продукте, компании. Одним из основных инструментов его создания, в большинстве случаев, являются

средства массовой информации, а это значит, что из-за отсутствия интерактивной связи брэнды пассивны. В противоположность им брэнды в Интернете могут непосредственно взаимодействовать с потребителями, реагировать на их нужды, выстраивать диалог и т. д., то есть существует возможность мгновенного взаимодействия с ним.

- **содержание, а не форма.** В реальности сила и успех торговой марки во многом определяются ее визуальными характеристиками — привлекательностью и запоминаемостью образов и персонажей. В Интернете внешний вид играет второстепенную роль, лишь помогая пользователю воспринимать информацию, а главным остается содержание;

- **большая динамичность интернет-брэндов** связана с быстротечностью времени в Сети. Изменения могут происходить буквально мгновенно, что практически невозможно в традиционном окружении. Если компании «Coca-Cola» пришлось идти более нескольких десятков лет по пути, который в итоге позволил ей стать лидером рынка и одним из самых популярных и известных продуктовых брэндов, то каталогу Yahoo! потребовалось на это всего 5 лет, причем его известность сегодня простирается далеко за пределы Сети.

Названные особенности интернет-брэндов показывают, что на их формирование влияет большое число факторов. **Наиболее существенными являются следующие факторы:**

9. реализация сайта (внешний вид, функциональность), его соответствие ожиданиям, сформированным при рекламном воздействии;

10. эффектность и полнота представления информации о фирме и ее продукции на сайте;

11. качество обслуживания, куда может входить скорость обработки заказов, если предлагается покупка продукта через Интернет, скорость реакции на обращения и т. д.;

12. надежность работы системы, обеспечивающей функционирование сайта и предоставляемых услуг и т. д.;

13. уникальность, как самого решения, осуществленного в Интернете, так и предлагаемых видов сервиса, например, сравнение характеристик продуктов, получаемых преимуществ и т. д.;

14. реальная польза, извлекаемая пользователями.

Как и в реальности, в Интернет различается брэндинг **высокотехнологичных и потребительских товаров**. Традиционные мероприятия брэндинга **потребительских товаров** - это **реклама**. В данном случае проводится реклама не конкретного товара, а торговой марки в целом. Для проведения рекламных кампаний в Интернете имеется масса инструментов, в частности, *блочная реклама* (аналог блочной печатной рекламы или «наружки»), *размещение платных ссылок*;

размещение рекламных текстов — «приписка» в конце исходящих писем при работе с электронной почтой. Сегодня в белорусском Интернете наиболее активны два класса рекламодателей (рисунок 2):

- **предприятия, продвигающие высокотехнологичные товары и услуги, в частности, операторы и салоны мобильной связи, электронные магазины бытовой техники и электроники;**

- **предприятия по оказанию услуг. Наиболее часто через Интернет сегодня продвигаются образовательные курсы, семинары, конференции, программное обеспечение, туризм и отдых, авиабилеты.**

Соотношение этих классов показано на диаграмме:

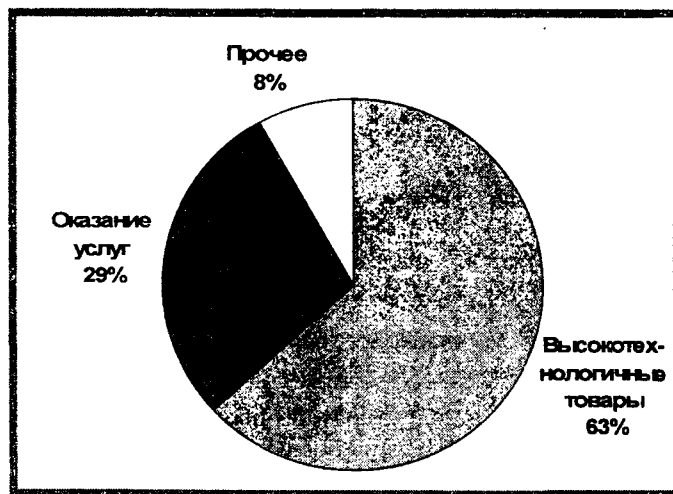


Рисунок 2 – Соотношение рекламодателей

Как правило, небольшие предприятия, будучи не в состоянии позволить себе услуги рекламных агентств, самостоятельно управляют своей маркетинговой стратегией. Они на собственном опыте узнали, что цена контакта с целевой аудиторией в Интернете получается ниже, чем в реальности. Именно они первыми выигрывают от преимуществ рекламы в Интернете.

Для высокотехнологичных товаров ситуация складывается по другому. Для них эффективным методом продвижения брэнда является не реклама, а информация о товаре. Доступность информации, а также интерактивный диалог между продавцом и покупателем и между существующим и будущим покупателем увеличивает ощущение безопасности, доверие покупателя и его предпочтение к товару. Интернет предоставляет широкие возможности для брэдинга высокотехнологичных товаров. Одним из самых эффективных средств является **web-сайт**.

Сегодня отечественные предприятия почти не приходится уговаривать обзавестись собственным Интернет-сайтом. Сайты есть практически у всех крупных и средних предприятий, а его отсутствие уже начинает расцениваться некоторыми потребителями как несерьезность предприятия. Но большинство сайтов, как говорится, «оставляет желать лучшего». В нашей стране на 1 ноября 2006 г. было зарегистрировано 11400 сайтов, из которых предприятиям принадлежит около 3000. Однако лишь незначительное число белорусских сайтов — менее 200 — сделано тремя топовыми профессиональными студиями — **Astronim***, **PixelHead**, **Red Graphic Systems**, разрабатывающими сложные проекты с гарантированным уровнем качества [5].

Студия **Astronim**, дополнительно предоставляющая услуги консалтинга, маркетинга, программирования и рекламы в сети, объявила специальную программу-кампанию «**Капремонт**», в ходе которой производится переделка сайтов белорусских предприятий. Она же запустила первый белорусский брэнд-портал www.bestbrand.by в рамках национального конкурса «Брэнд года». Его можно назвать первым белорусским информационным брэнд-порталом, потому что на нем собрана вся история развития брэндового пространства Беларуси, представлены крупнейшие отечественные торговые марки с характеристиками и описанием. Кроме этого, на портале можно найти полезные статьи и материалы из области строительства брэндов, узнать расписание занятий в Школе Брэндменеджмента. Ключевая информация о конкурсе сгруппирована по трем основным типам запросов пользователей — информация об Оргкомитете и Жюри, сообщения для партнеров и сведения для участников конкурса. Это помогает с легкостью ориентироваться и быстро находить необходимые материалы.

Многие отечественные предприятия накапливают все больше опыта, пытаются определить верный подход к позиционированию своих брэндов. В процессе работы была исследована часть сайтов белорусских промышленных предприятий. (**ЗАО «МАЗ-MAN»**, **ОАО «АМИПАК»**, **ООО «Аивлюкс»**, **СП ООО «Фрост и К»**, **ОАО «Полесье»** и др.). Можно сделать вывод о том, что белорусские предприятия выходят на новый уровень в Сети. Их web-представительства являются многофункциональными, они становятся хорошей имиджевой рекламой их брэндов, что способствует увеличению целевых посетителей и расширению объемов продаж.

В качестве положительного примера развития интернет-брэдинга можно привести **web-сайт СП ЗАО «МАЗ-MAN» Maz-man.by**. Электронное представительство давно стало неотъемлемой частью ежедневной работы и имиджа компании. Брэнд **МАЗ-MAN** созвучен с торговой маркой производимых большегрузных автомобилей. Это значительно улучшает образ компании на внутренних и внешних рынках. Кроме стандартных целей и задач сайт представляет и ряд дополнительных функциональных возможностей. В частности посетители сайта имеют возможность скомпоновать автомобиль, исходя из собственных предпочтений и пожеланий; выбрать его индивидуальную комплектацию и цвет; узнать стоимость автомобиля; отправить заказ на его приобретение прямо на сайте. С момента создания этого сайта количество заказов увеличилось на 60%. Оказалась усовершенствованной работа менеджеров по продажам: сократилось время обработки заказов, отпала необходимость объяс-

нять клиенту все «с нуля». После создания сайта узнаваемость торговой марки значительно возросла, был отмечен рост лояльности потребителей [5].

Успех в Интернет невозможен без сильного брэнда. Поэтому возникает **необходимость разработки нетрадиционных маркетинговых Internet-решений** для проведения специализированного электронного брэндинга. Брэнд нужен предприятию прежде всего для того, чтобы увеличить объем сбыта и иметь возможность назначить более высокую цену за свои товары и услуги, а также привлечь лучших партнеров, улучшить восприятие предприятия среди населения и других предприятий и др.

Таким образом, брэндинг действует косвенно - через улучшение восприятия образа предприятия у потенциальных клиентов, что в конечном счете улучшает все экономические показатели предприятия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Успенский И. «Энциклопедия Интернет-бизнеса.» – СПб.: Питер, 2001. –432 с.:ил.;
2. «Основы маркетинга: Учеб. Пособие»/Похабов В.И., Тарелко В.В. – Мн.: Выш.шк., 2001.– 271 с.;
3. Алексунин В.А. «Электронная коммерция и маркетинг в Интернете» Учебное пособие 2-е изд.- Москва: Дашков и К, 2006.- 213 с.
4. Энциклопедия маркетинга: брэндинг, товарные знаки - <http://www.marketing.cfin.ru/lib-comm/brand/>;
5. Особенности Интернет-брэндинга белорусской продукции - <http://www.satio.by/publications/marketing/67.html>;
6. Брэндинг в Интернете - http://www.bazooka.dp.ua/pages/lib/e-marketing_2002_07.html.

УДК 658.512

Калинкин Г.А.

СОЦИАЛЬНО - ЭКОНОМИЧЕСКАЯ КОНЦЕПЦИЯ РАЦИОНАЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ОСНОВНЫХ ПРОЦЕССОВ ПОТОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ

*Минский институт управления
Минск, Беларусь*

В основе построения любого процесса лежат законы и (или) принципы. В качестве теоретической основы организации производства учеными сформулированы принципы рациональной организации производственных процессов. Многообразие принципов говорит о том, что нередко они сформулированы применительно не к широкому понятию «производственный процесс», а в отношении процессов, осуществляемых в конкретных условиях: в массовом, серийном или единичном производстве, в подразделениях технологической или предметной специализации, на непрерывно-поточных линиях или в гибких производственных системах и т.п. Поэтому мы считаем целесообразным различать основные (общие) и локальные (частные) принципы. Общие присущи всем производственным процессам, независимо от их отраслевой принадлежности, типа производства, форм организации и т.п. Локальные могут проявляться в одних производственных процессах и не быть характерными для других. Анализ показал также, что в известных принципах не находят отражения социальные и психофизиологические факторы.

К общим принципам рациональной организации производственных процессов, прежде всего, мы относим принцип соответствия организации производственного процесса требованиям сохранения здоровья участвующих в нем рабочих (принцип соответствия). Этот принцип реализуется в различных аспектах: путем создания нормальных санитарно-гигиенических условий труда, применения рациональных режимов труда и отдыха, создания благоприятного психологического климата и т.д.

Применительно к поточному производству одним из основных путей реализации этого принципа является установление нормальной напряженности труда рабочих-операторов. Необоснованное регламентирование напряженности труда без учета психофизиологических факторов приводит либо к недоиспользованию производственного потенциала поточной линии, либо к повышенной монотонности и тяжести труда, что вызывает преждевременную усталость рабочего и не позволяет затем восстановить его нормальную работоспособность. Как следствие, это приводит к профессиональным заболеваниям рабочих, а предприятие несет дополнительные убытки из-за допускаемого рабочими производственного брака по причине высокой напряженности труда.

Напряженность труда в поточном производстве регламентируется, как известно, тактом (ритмом) поточной линии. При этом мы предлагаем различать: **расчетный такт**, **нормативный рабочий такт** и **принятый рабочий такт** поточной линии.

Расчетный такт в современной теории принимается в качестве основного норматива поточного производства. Он определяется как отношение эффективного фонда времени работы поточной линии за определенный плановый период к производственной программе запуска в натуральном выражении за тот же период. «Такт является функцией заданной программы выпуска и существенно влияет на выбор технологического процесса, оборудования, оснастки, транспортных средств и т. д. [1, с.146-147]. По мнению Сачко Н.С.: «Под тактом поточной линии понимается средний период времени между выпуском отдельных деталей или изделий на линии. Его величина определяется делением действительного фонда Фдейст времени работы (обычно за год) на максимальную величину Nmax выпуска деталей за все годы эксплуатации поточной линии [2, с.118-119]. Нам представляется, что такой расчет позволяет определить среднюю величину рабочего такта за год максимального выпуска деталей (изделий).

На стадии определения параметров поточной линии расчетный такт применяется для определения числа единиц оборудования (рабочих) на операциях линии. Для расчета других параметров он не применяется. Расчетное число единиц оборудования также можно получить не прибегая к такту по формуле

$$C_{p i} = \frac{N \cdot t_i}{60 F_3} ; \quad (1)$$

где: N - производственная программа, шт.; t_i - норма времени на i -й операции, мин.; F_3 - эффективный фонд времени работы, ч.

Расчет других организационно-технических параметров а также экономических показателей свидетельствует о том, что при этом потенциальные возможности поточной линии искажаются, и расчетный такт не может быть принят в качестве норматива, определяющего регламент ее работы.

В качестве **нормативного рабочего такта** мы предлагаем принять интервал времени, через который периодически осуществляется выпуск предметов производства на операции, имеющей стопроцентную загрузку. Он определяется как максимальное отношения нормы штучного времени к количеству единиц оборудования на соответствующей операции из всех операций процесса.

$$r_{\text{раб}} = \left(\frac{t_i}{C_{\eta}} \right) \max ; \quad (2)$$

где: C_{η} - принятое число единиц оборудования на i -й операции.

Нормативный рабочий такт определяет регламент функционирования непрерывно-поточной или прямоточной линии, исходя из научно обоснованных норм труда, и не зависит ни от производственной программы, ни от фонда времени работы, а только от соотношения норм штучного времени и количества единиц оборудования на операциях. Нормативный рабочий такт является функцией научно обоснованной нормы труда. Только в частном случае расчетный такт может совпадать с нормативным рабочим тактом.

Принятый рабочий такт - это такт, с которым фактически работает поточная линия в определенный период времени. Он может совпадать с нормативным. Однако, как показывает опыт, принятый рабочий такт устанавливается исходя из сложившейся производственной ситуации. На конвейерных поточных линиях он регламентируется скоростью конвейера, которая при необходимости может быть изменена в определенном интервале. На прямоточных линиях такт определяется работой на самой непроизводительной операции и может быть изменен за счет интенсификации труда, что также имеет место в реальном производстве.

От того, какой такт принят при функционировании поточной линии, зависит, по какому принципу организован производственный процесс. Например, конвейерное производство может быть организовано по двум взаимоисключающим принципам 1. «Конвейер управляет рабочими». 2. «Рабочие управляют конвейером».

Первый принцип реализуется на поточной линии, когда принятый рабочий такт не соответствует нормативному и может быть изменен по причинам, не зависящим от рабочих. Другими словами, регламент труда рабочих диктуется конвейером. «Конвейер управляет рабочими». Сегодня, как и раньше, конвейер работает в соответствии с этим принципом, потому что невозможно вдруг изменить десятилетиями сложившиеся подходы к организации конвейерного производства. На практике укоренилось мнение, что такт поточной линии, а, следовательно, скорость конвейера можно изменять в зависимости от производственной программы, заданной на тот или иной календарный период. Поэтому отставания от задания в предыдущие смены компенсируют за счет увеличения скорости конвейера в последующие смены, что приводит к повышению напряженности труда и, как следствие, к утомляемости рабочих и производственному браку. Принцип «Рабочие управляют конвейером» может быть реализован при работе с нормативным рабочим тактом. Это значит, что скорость конвейера а, следовательно, и напряженность труда регламентируются нормами труда рабочих. Такт не может быть меньше научно обоснованной нормы времени. Следовательно, такт потока не зависит ни от производственной программы, ни от фактически отработанного времени. В течение любого периода работы он должен оставаться неизменным, а следовательно, остается постоянной и напряженность труда. Таким образом, такт и скорость конвейера регламентируются научно обоснованными нормами труда рабочих на операциях конвейера. «Рабочие управляют конвейером». Мы здесь применяем этот принцип в том смысле, что рабочий опосредствованно «управляет» конвейером, т.к. скорость конвейера устанавливается исходя из требований рациональной организации труда рабочих.

Регламентация работы поточной линии в соответствии с нормативным рабочим тактом требует разработки научно обоснованных норм времени на операциях с учетом не только технических возможностей рабочего места, но и социальных и психофизиологических факторов [3]. Кроме того, должен быть установлен научно обоснованный режим труда и отдыха в течение рабочей смены. Между тем, наш анализ показывает, что качество норм труда в реальном производстве часто не соответствует этим требованиям. По свидетельству нормировщиков некоторых заводов операционные нормы времени на поточных линиях пересматривались, как правило, с целью регулирования оплаты труда. Поэтому принимать их за основу для определения нормативного рабочего такта неправомерно. Если норма времени на операции поточной линии является научно обоснованной, то она не должна превышать норматива рабочего такта, либо кратной ему величины. Это означает, что при нормальном функционировании поточной линии коэффициент выполнения норм не может быть больше единицы. Если на каких-либо операциях этот показатель окажется меньше единицы, то это будет свидетельствовать об отклонениях от условия синхронности операций и о наличии перерывов ожидания.

Одним из основных принципов системного подхода является принцип альтернативности, который означает обязательность проработки нескольких вариантов возможных решений для достижения цели, стоящей перед системой.

В теории организации производства этот принцип не сформулирован. Между тем, на базе одного, а, тем более, нескольких приемлемых технологических процессов можно спро-

ектировать ряд вариантов организации производственного процесса для изготовления определенного вида продукции. Эти процессы будут различаться как по организационно-техническим параметрам, так и по экономическим показателям.

Таким образом, применительно к производственным процессам принцип альтернативности означает обязательность рассмотрения возможных (альтернативных) вариантов организации производственного процесса, создаваемых на базе одного или нескольких технологических процессов.

К альтернативным вариантам организации многооперационного производственного процесса мы относим те, в которых одна или несколько операций загружены на 100%, и на всех операциях принято минимально необходимое количество единиц оборудования (рабочих мест).

Удобным механизмом реализации принципа альтернативности в организации производственных процессов является разработанный автором пошаговый метод поиска альтернативных вариантов организации многооперационных процессов, осуществляемых в производственных подразделениях предметной специализации (одно- и многопредметных, непрерывно-поточных и проточных линиях, предметно-замкнутых участках).

Алгоритм поиска альтернативных вариантов включает:

- определение первого (исходного) варианта. В исходном варианте на каждой операции принимается по одной единице оборудования. Рабочий такт равен максимальному значению нормы штучного времени из всех операций процесса.

- определение второго варианта. Во втором варианте количество оборудования увеличивается на единицу на той операции (или операциях), на которой норма штучного времени равна такту в первом варианте. Рабочий такт во втором варианте и во всех последующих определяется по максимальному отношению нормы штучного времени к количеству единиц оборудования на соответствующих операциях.

- третий вариант определяется аналогично на базе второго, а каждый последующий – на базе предыдущего.

Таким образом, “шагая” от предыдущего к последующему, можно определить ряд альтернативных вариантов. Количество шагов зависит от поставленной цели и ограничивающих условий.

На основе пошагового метода автором разработаны методики поиска альтернативных и выбора оптимального варианта организации производственных процессов, осуществляемых на однопредметных и многопредметных поточных линиях. Таким образом, принцип альтернативности реализуется путем применения пошагового метода поиска альтернативных вариантов. В свою очередь пошаговый метод реализуется в методиках поиска оптимального варианта организации поточных линий [4].

К основным (общим) принципам следует отнести также принцип оптимальности. **Принцип оптимальности означает, что из всех альтернативных вариантов организации производственного процесса должен быть выбран лучший по заданному критерию с учетом ограничивающих условий.**

Принцип оптимальности требует, во-первых, создания оптимальной организационно-технической базы производственного процесса и, во-вторых, обеспечения оптимального функционирования этой базы. Создание оптимальной организационно-технической базы, включающей комплекс необходимых средств и рациональный регламент их функционирования, создает необходимые потенциальные возможности для организации оптимального процесса. Однако негативное воздействие различных производственных факторов может привести к отклонениям от заданного регламента работы. Это обстоятельство вызывает необходимость разграничить следующие понятия:

- оптимальная организационно-техническая база производственного процесса;
- оптимальное функционирование организационно-технической базы;
- оптимальный производственный процесс, в котором объединяются первых два понятия.

Критерий оптимальности – это определяющий признак, на основании которого производится сравнительная оценка возможных решений (альтернатив) и выбор наилучшего. В каких бы условиях ни осуществлялся производственный процесс, конечной его целью является удовлетворение потребностей общества с минимальными затратами живого и овеществленного (прошлого) труда. Поэтому экономичность является основным критерием оптимальности организации производственных процессов. К такому выводу в той или иной интерпретации приходят многие известные экономисты.

К локальным (частным) принципам рациональной организации поточного производства различными авторами, как правило, относятся следующие принципы: принцип прямо-точности, непрерывности, параллельности, пропорциональности, ритмичности. Некоторые авторы дополняют этот перечень: принцип (признак) гибкости [1], специализации [5], пар-тионности [2], синфазности [6] и др.

Очевидно, следовало бы ограничиться минимально достаточным количеством принципов, исключая при этом избыточные. Например, М.Л.Файнгольд и Д.В.Кузнецов считают: «Рационально организовать (гармонизировать) производственный процесс – значит придать ему свойства пропорциональности, непрерывности и синфазности». При этом «...синфазность достигается при условии обеспечения начала и окончания финишных и пер-вых операций непосредственно следующих друг за другом, но распределенных в простран-стве, различных ЧПП» [6].

По нашему мнению, если бы в реальном производстве удалось реализовать принцип непрерывности, то это означало бы создание «идеального» потока, а следовательно, необходи-мость в реализации других принципов отпала бы. Но в дискретном производстве, как из-вестно, обеспечить непрерывность процесса невозможно. Поэтому вместо принципа непре-рывности целесообразно ввести **принцип максимального приближения к непрерывности процесса.**

Принципы прямо-точности, параллельности и пропорциональности реализуются на стадии проектирования технологических и производственных процессов. Их реализация соз-дает условия для реализации при работе поточной линии принципа максимального прибли-жения к непрерывности процесса и принципа ритмичности.

Таким образом, к локальным принципам рациональной организации поточного произ-водства мы относим принципы: пропорциональности, параллельности, прямо-точности, а также ритмичности и максимального приближения к непрерывности процесса.

В заключение следует отметить, что в современных условиях интересы работодателя и рабочего совпадают в той части, что оба они по-своему заинтересованы в максимально возможном выпуске продукции. Поэтому регламентация работы поточных линий в режиме нормативного рабочего такта по понятным причинам сегодня не найдет поддержки на мно-гих предприятиях. К сожалению, стремление больше заработать отодвигает на задний план заботы о собственном здоровье, нормальном, гармоничном образе жизни, продолжительно-сти жизни и т.д. Если государство обеспечило нормальный уровень жизни работающего гра-жданина, то оно, по нашему мнению, должно законодательно уберечь его от бездумного стремления к обогащению за счет своего здоровья.

ЛИТЕРАТУРА

1. Организация и планирование машиностроительного производства (производствен-ный менеджмент): Учебник / К.А.Грачева, М.К.Захарова, Л.А.Одинцова и др.; Под ред. Ю.В.Скворцова, Л.А.Некрасова.- М.: Высш. шк., 2003.-470с.: ил. 2. Сачко Н.С. Организация и оперативное управление машиностроительным производством : учебник / Н.С.Сачко. - Мн.: Новое знание- 2005. - 636с. : ил. 3. Локтев В.Г. Нормирование труда: состояние, про-блемы, перспективы. - Мн.: БГЭУ, 2000. - 230с. 4. Калинин Г.А. Организация производ-ственных процессов предметной специализации: Монография.– Мн.: Ин-т упр. и предприн., 2001.– 159 с. 5. Яркина Т.В. Основы экономики предприятия [Электрон. ресурс] - Режим

доступа: [http://www .aup.ru/books/m64/3_1.htm](http://www.aup.ru/books/m64/3_1.htm). 6.Файнгольд М.Л., Кузнецов Д.В. Основы расчета длительности производственного цикла (методология и теория) / Под научной ред. М.Л. Файнгольда. - Владимир: Издательство ВГПУ, 2001.- 63 с.

УДК 338.24

Ефименко А.Г.

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К УПРАВЛЕНИЮ ПРОИЗВОДСТВОМ

*Могилевский государственный университет продовольствия
Могилев, Беларусь*

Преобразования, произошедшие в экономике Республики Беларусь в последние десятилетия, привели к необходимости создания новой системы управления в различных сферах экономики, в том числе в машиностроительном производстве. В современном управлении различают три основных направления деятельности: техническую деятельность по созданию и освоению, применению в производстве прогрессивных видов материалов, техники, технологий. Задача менеджера - искать способных людей и обеспечивать им творческие условия (создание инновационных групп, отделов, венчурные отделения); управленческую деятельность по координации действий, обеспечению упорядоченности и согласованности производственных процессов; управленческую деятельность по организации действий организации на рынке товаров и услуг (система стратегического управления и тактика деятельности организации на рынке).

Необходимо отметить, что на современном этапе достаточно широкое распространение получили подходы к управлению на основе принципов логистики. Интерес к проблемам логистики в Республике Беларусь на современном этапе возрос, что нашло отражение в увеличении числа публикаций по вопросам логистической концепции управления экономикой, в том числе машиностроительным производством.

Существует несколько десятков определений логистики. Логистика (логистические технологии) – это деятельность (с соответствующим научным сопровождением) в конкурентной рыночной среде, направленная на эффективное управление, планирование и обеспечение материальных и соответствующих им информационных и денежных потоков [9].

В зарубежной литературе понятие «логистика» чаще всего трактуется как процесс управления движением и хранением сырья, компонентом и готовой продукции в хозяйственном обороте. Наиболее полное определение дано А.Н. Радник [8] «Логистика» - (Logistics) – наука о планировании, контроле и управлении транспортированием, складированием и другими материальными и нематериальными операциями, совершаемыми в процессе доведения сырья и материалов до производственного предприятия, внутризаводской переработки сырья, материалов и полуфабрикатов, доведения готовой продукции до потребителя в соответствии с интересами и требованиями последнего, а также передачи, хранения и обработки соответствующей информации». Данное определение дает понятие о логистике как сфере деятельности и раскрывает ее содержательную сторону. Чаще всего встречаются такие определения: производственная, коммерческая и сбытовая, транспортная, информационная логистика. В работе приводится классификация всех видов и типов логистики по трем признакам: функциональному, ресурсному и отраслевому.

Современная концепция логистики рассматривается как эффективный мотивированный подход к управлению материалопотоком с целью снижения издержек производства. Эта концепция принимается за основу экономической стратегии организации, когда логистика используется как орудие в конкурентной борьбе и рассматривается как управленческая логика для реализации планирования, размещения и контроля над материальными, финансовыми и трудовыми ресурсами. На наш взгляд, концепция логистики – система взглядов на повы-

шение эффективности функционирования производства на основе оптимизации материальных, сервисных потоков, которая реализуется на основе системного подхода.

По мнению Ю.М. Неруш [7] логистика рассматривается в двух аспектах: управленческом и технологическом. При организации управления снабжением продвижение материального потока и обеспечение сбыта являются предметом организационного управления. При совершенствовании технологий транспортных перевозок, складского хозяйства, информационного обеспечения, планирования и контроля оптимизируются затраты на эффективное функционирование каждой из этих служб, оптимизация затрагивается предметом технологического процесса.

В концепции менеджмента под логистикой необходимо понимать совокупность способов и методов управления товарными потоками по логической цепочке. Выделяют несколько функциональных областей логистики: закупочную, связанную с обеспечением производства материалами, производственную и сбытовую. При этом необходимо отметить, что составной частью каждого из выше названных видов логистики и связующим звеном в единой технологической цепочке является транспорт. Логистика имеет множество направлений, и выделение одного из них существенно меняет смысл и содержание самого определения, с другой – объект логистики можно рассматривать с разных точек зрения, с позиции маркетолога, финансиста, менеджера.

В целом, необходимо отметить, что логистическая концепция начинает широко применяться к управлению производством в целях интеграции отдельных агентов процесса товародвижения в единую систему, способную быстро и эффективно доставить необходимый товар потребителю. Однако, логистическая концепция, концентрируясь на материально-техническом аспекте товародвижения не рассматривает проблемы согласования различных экономических интересов агентов рынка, что крайне важно в обеспечении эффективного функционирования машиностроительного производства как единой системы.

Важной задачей является создание организационных структур логистики. А.А. Чеботаяв [9, с.105] отмечает, что «организационные структуры логистики будут тогда считаться завершенными, когда в конкретном звене управления будет определена конечная цель и выделены функциональные подразделения и службы с четким распределением полномочий и ответственности для каждого в отдельности управленческого сотрудника».

Обычно при логистическом подходе к управлению на транспорте предполагается решение следующих задач [1, 2, 6,7]:

- выбор вида и типа транспортных средств;
- совместное планирование транспортных процессов со складскими и производственными процессами;
- согласование работы различных видов транспорта;
- определение рациональных маршрутов доставки грузов.

В. С. Лукинский, В. И. Бережной, Е. В. Бережная, И. А. Цвиринько [5] предлагают выделить заготовительную, внутрипроизводственную и распределительную логистику.

Основные задачи заготовительной логистики могут быть сформулированы следующим образом: прогнозирование и планирование материальных ресурсов; оптимизация номенклатуры потребляемых материальных ресурсов; управление запасами на складах; организация закупок и завоза материалов; организация хранения материалов на складах; разработка программ экономии материальных ресурсов и контроль за их выполнением; контроль за исполнением сметы затрат на снабжение и т.д.

Основные задачи внутрипроизводственной логистики включают: прогнозирование и планирование выполнения производственной программы (основное производство); управление техническим обслуживанием и ремонтом подвижного состава (вспомогательное производство); экономическая оценка продукции; оперативное управление основным и вспомогательным производством; контроль за количеством и качеством продукции и т.д.

Распределительная логистика как функция соответствует сбыту, т.е. стадии воспроизводственного процесса. К основным задачам распределительной логистики можно отнести:

выбор вида и типа транспортных средств; совместное планирование транспортных процессов на различных видах транспорта; определение рациональных маршрутов; совместное планирование транспортного, складского и производственного процессов и т.д.

Развитие экономики рыночного типа предполагает наличие неопределенности ситуации, в которой предприятию приходится осуществлять свою деятельность. Влияние среды, в которой находится предприятие велико, и не учитывать это влияние практически невозможно.

Современные рыночные подходы на природу экономической деятельности определяются двумя позициями: потребителей и производителей. Как правило, обе позиции совмещаются в одном объекте (или субъекте), участвующем в рыночных отношениях. С этой точки зрения, организация является самостоятельным производителем продукции и одновременно потребителем массы необходимых ресурсов, следовательно, зависимо от многого, что не включено в производственный процесс, например, транспортных услуг. Кроме всего прочего, результативность деятельности организации определяется и состоянием самого производства, его организацией и управлением, и другими сугубо индивидуальными приемами, правилами, принципами деятельности.

Обычно подобное деление применяется в маркетинговой теории и практике, где большая система, в которой функционирует машиностроительная организация, как элемент, называется средой. Внутренней средой, как частью последней, выступает собственное производство, управление, иерархия, организация, учет и контроль, и т.д. – то есть то, что может быть серьезно изменено под воздействием внутренних решений руководства, та сфера, на которую предприятие может серьезно влиять [3].

Но другая область, к влиянию которой организация может только приспособиться, изменяя что-либо в собственной стратегии, тактике и производстве, более обширна, а влияние ее на деятельность предприятия особенно велико, поскольку устанавливает законодательные, правовые, экономические, политические, научно-технические и прочие барьеры. Эту область принято называть внешней средой [4].

Среда с выделенными областями может иметь как материальное (в виде материальных ресурсов: машин, зданий, оборудования, сырья, материалов и т.д.) представление, так и в виде нематериальных ресурсов (в виде информации). Информации отводится значительная роль в стратегии развития отрасли, внедрению современных информационных технологий во все сферы деятельности машиностроительного производства. Информатизация рассматривается как средство, способствующее решению основных задач отрасли – увеличение объемов и качества продукции, повышение конкурентоспособности транспорта на рынке услуг, сокращение издержек.

Информатизация дает прочный ресурсный базис для решения таких вопросов, как реорганизация производственных и организационно-управленческих структур отрасли с целью повышения качества и снижения себестоимости перевозок; создание условий для применения высокоэффективных транспортных технологий и технических средств, логистических, транспортно-распределительных и терминальных систем; переход к механизму рыночного саморазвития отрасли при целевой государственной поддержке социально важных услуг; расширение и укрепление взаимодействия машиностроительного производства с другими субъектами экономики.

Современной базой управления логистическими процессами для руководителя является использование трех подходов: научного, системного и моделирования процессов. Научный подход должен базироваться на наблюдениях за проблемой (сбор и анализ полученной информации), следующий шаг связан с формированием гипотезы, то есть установлением зависимости между компонентами проблемы по данным наблюдений, и проверкой гипотезы.

Принципиальная новизна системного подхода к управлению организацией состоит в том, что она рассматривается как внутрипроизводственная логистическая система на макро- и микроуровне. На микроуровне выступают в качестве элементов макрологистических систем, они обеспечивают ритм работы этих систем и являются источниками материального производства. На микроуровне организации как внутрипроизводственные логистические

системы представляют собой ряд подсистем, находящихся в отношениях и связях друг с другом, образующих определенную целостность, единство. Эти подсистемы обеспечивают входение материального потока в систему, прохождение внутри нее и выход из системы. В соответствии с концепцией логистики построение внутрипроизводственных логистических систем должно обеспечивать возможность постоянного согласования и взаимной корректировки планов и действий снабженческих, производственных и сбытовых звеньев внутри организации.

В рамках данного исследования представляет интерес моделирование процессов. Можно выделить следующие классы экономико-математических моделей.

Поиск «транспортного центра». Решение сетевых транспортных задач (выбор схемы сети, пункта применения новых дорог и др.) сводилось к тем или иным приемам нахождения «транспортного центра», неразрывно связанного с экономикой прилегающих районов.

Линейное программирование. В задачах линейного программирования условия, налагаемые на область допустимых значений переменных, определяются системой линейных неравенств или равенств, при этом искомая величина является также линейной функцией тех же переменных. Сущность линейного программирования наиболее ярко характеризует решение так называемой «транспортной задачи». Однако линейное программирование дает оптимум данного статического состояния, а не оптимум процесса изменения плана перевозок или развития транспортной сети. Поэтому были разработаны специальные методы, позволяющие сгладить этот недостаток.

Динамическое программирование позволяет отразить динамику управляемых процессов. Процесс поиска оптимума в динамическом программировании всегда разворачивается от «конца» к «началу», т. е. от последнего шага к первому. Каждый последующий шаг планируется так, чтобы он приносил наибольший выигрыш.

Целочисленное программирование по общей постановке задач совпадает с линейным программированием с той только особенностью, что искомые переменные по своей экономической (или физической) природе могут принимать дискретные значения, выражаемые в целых числах. Типичной для этого вида программирования является задача оптимального распределения персонала. Условия целочисленности переменных серьезно усложняет решение задачи.

Задача *параметрического программирования* отличается от задач линейного программирования по существу лишь вариацией величин параметров системы.

Методы *сетевого планирования* эффективны в том случае, если работа состоит из множества звеньев (заданий) и необходимо определить, как наилучшим образом распределить исполнителей, ресурсы и т. д., чтобы выполнить работу в возможно более короткий срок или с минимальными затратами. На практике все задачи оптимизации сетевых моделей можно разделить на три типа: оптимизация ресурсов при заданных сроках выполнения разработки; минимизация времени выполнения разработки при ограниченных ресурсах; минимизация уровня потребления ресурсов при ограниченных сроках выполнения разработки.

Ряд важных задач, связанных с прогнозированием объема производства, оценкой ее динамики, анализом производственно-хозяйственной деятельности, нормированием труда, решаются с использованием аппарата *теории вероятностей и математической статистики*.

Показатели, характеризующие результаты деятельности организаций, обычно оказываются связанными друг с другом не функционально, а корреляционно. Такого рода связи изучает один из разделов математической статистики, называемый *корреляционным анализом*, с помощью которого разрабатываются прогнозы, анализируются результаты производственно-хозяйственной деятельности, проверяются различные экономические гипотезы.

Вопросам совершенствования функционирования системы с применением детерминистско-оптимального подхода к принятию управленческих решений в большинстве случаев обеспечивает значительный экономический эффект. Экономико-математические модели позволяют выбирать варьируемые показатели плана из условий экстремума мер его эффективности (например, дохода, прибыли, издержек); Решения, принятые на их основе, учитывают

возможность изменения состояния и функционирования организаций, что является условием повышения эффективности. Однако чтобы решить задачу развития машиностроительного производства, мало получить модель. Задачу необходимо расчленить на ряд локальных задач, вместе составляющих общую систему функционирования машиностроительного производства.

Наиболее приемлем *вероятностно-адаптивный подход* к моделированию развития машиностроительного производства как экономической системы в современных условиях хозяйствования. Ему присущи все достоинства детерминистски - оптимального подхода. Он предусматривает создание человеко-машинных систем планирования, позволяющих более полно и эффективно использовать в процессе планирования опыт и интуицию специалистов-плановиков. При этом учитывается некоторая неопределенность наших знаний о будущем, делается выбор наиболее адаптивных вариантов планов, производится персонализация плана как системы взаимосвязанных решений, проявляется внимание к организационным проблемам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бауэрсокс, Д. Логистика, интегрированная цепь поставок / Д. Бауэрсокс, Д. Клосс; под ред. Д. Бауэрсокс. – М.: ЗАО «Олимп-Бизнес», 2001. – 172 с.
2. Гаджинский, А.М. Основы логистики / А.М. Гаджинский. – М.: ИВЦ «Маркетинг», 1996. – 122 с.
3. Галабурда, В.Г. Транспортный маркетинг / В.Г. Галабурда, В.С. Деружинский. – М.: ИВЦ «Маркетинг», 1994 – 174 с.
4. Дедков, П.С. Общая сельскохозяйственная, общая транспортная политика Европейского Союза / П.С. Дедков, К. Алибер. - Минск: БГЭУ, 2003. – 100 с.
5. Лукинский, В.С. Логистика автомобильного транспорта: концепция, методы, модели / В.С. Лукинский, В.И. Бережной, Е.В. Бережная; под ред. В.С. Лукинского. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 280 с.
6. Миротин, Л.Б. Логистика: управление в грузовых транспортно – логистических системах / Л.Б. Миротин. – М.: Юристъ, 2002. – 414 с.
7. Неруш, Ю.М. Логистика / Ю.М. Неруш. - М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003.- 495 с.
8. Радник, А.Н. Логистика: терминологический словарь / А.Н. Радник. – М.: Экономика, 1995. – 252 с.
9. Чеботаев, А.А. Логистика. Логистические технологии / А.А. Чеботаев. – М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К⁰», 2002. – 172 с.

УДК 621.01

Анципорович П.П., Акулич В.К., Дворянчикова А.Б., Дубовская Е.М.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ МАШИННОГО АГРЕГАТА
В ЛАБОРАТОРНОМ ПРАКТИКУМЕ ПО ТЕОРИИ МЕХАНИЗМОВ И МАШИН**

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Динамическое исследование машинного агрегата проводится при выполнении курсового проекта. При этом ставится задача определения постоянной составляющей приведенного момента инерции, необходимой для обеспечения вращения главного вала машины с заданным коэффициентом неравномерности вращения.

Используемая традиционная методика [1, 2] не позволяет провести отдельный анализ влияния массово-геометрических характеристик привода и исполнительного механизма машины на неравномерность вращения звена приведения. Она не позволяет также выявить отдельного влияния сил технологического сопротивления (вида выполняемой операции) и сил движущих (типа приводного двигателя). Это во многом ограничивает использование математического моделирования для реализации многовариантного численного эксперимента в процессе схемной проработки автоматизированных технологических комплексов.

Объем курсового проектирования не позволяет расширить перечень изучаемых вопросов. Эту проблему можно решить, моделируя динамику машинного агрегата в лабораторном практикуме по теории механизмов и машин. Подготовлены лабораторные работы, содержащие методические разработки и программное обеспечение, с помощью которых имеется возможность установить влияние на неравномерность вращения следующих факторов:

- а) массово-геометрической характеристики привода;
- б) массово-геометрической характеристики исполнительного механизма;
- в) механической характеристики выполняемой операции.

Для решения задачи исследования отдельного влияния геометрических, массовых, кинематических и силовых характеристик машины и выполняемой операции технологического процесса предлагается угловую скорость определять по формуле

$$\omega_{1i} = \sqrt{\frac{2(T_{cp} + \Delta T_i^{cp})}{I_{Pi}}}, \quad (1)$$

где I_{Pi} - приведенный момент инерции машины;

T_{cp} - среднее значение кинетической энергии;

ΔT_i^{cp} - отклонение кинетической энергии от среднего значения.

Величина T_{cp} находится как среднее интегральное значение кинетической энергии за цикл установившегося движения (рис. 1)

$$T_{cp} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} T d\varphi. \quad (2)$$

Текущее значение кинетической энергии может быть вычислено по формуле

$$T_i = T_0 + \Delta T_i, \quad (3)$$

где T_0 - кинетическая энергия в начале цикла;

∪

$$T_0 = \frac{I_{\Pi 0} \omega_{10}^2}{2},$$

ΔT_i - изменение кинетической энергии.

На основании уравнения движения звена приведения в энергетической форме [I] имеем

$$\Delta T_i = A_{\partial i} + A_{c i} = \int_0^{\varphi_i} (M_{\Pi}^{\partial} + M_{\Pi}^c) d\varphi_1,$$

- где $A_{\partial i}$ - работа движущих сил;
 $A_{c i}$ - работа сил сопротивления;
 $A_{\partial i} + A_{c i}$ - алгебраическая сумма работ;
 M_{Π}^{∂} - приведенный момент движущих сил;
 M_{Π}^c - приведенный момент сил сопротивления.

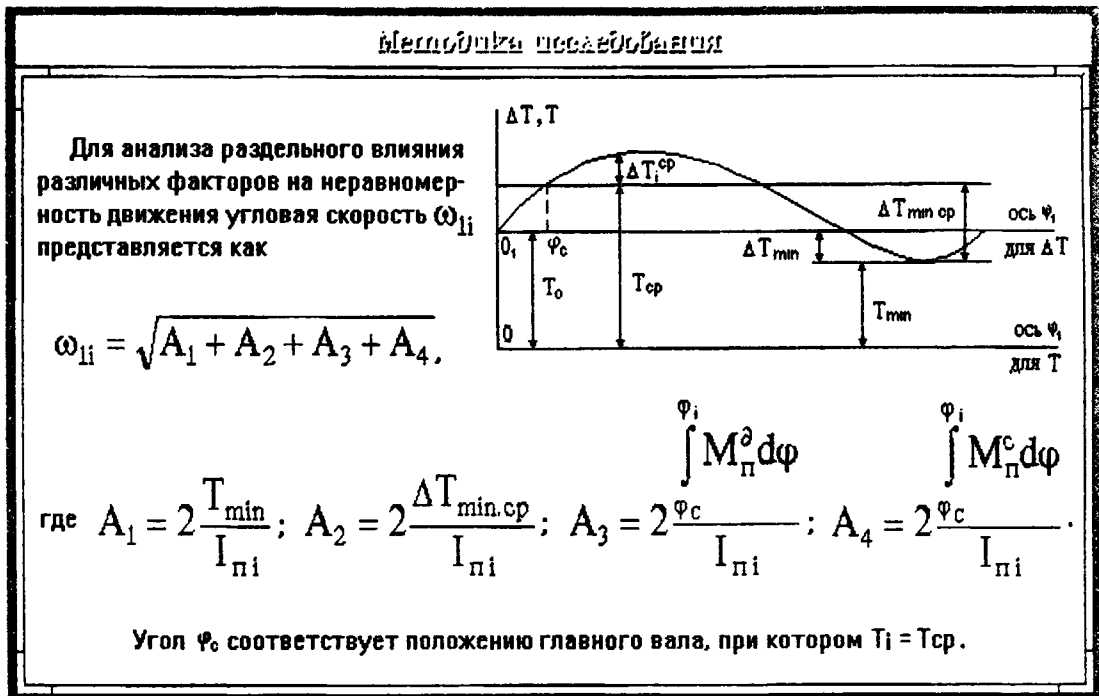


Рисунок 1. График функции $T = T(\varphi_1)$ кинетической энергии машины от угла φ поворота главного приводного вала машины.

Из рис. 1 видно, что выражение $T_i = T_0 + \Delta T_i$ можно представить следующим образом:

$$T_i = T_{\min} + \Delta T_{\min cp} + A_{c-i}^{\partial} + A_{c-i}^c, \quad (4)$$

- где T_{\min} - минимальное значение кинетической энергии машины;
 $\Delta T_{\min cp}$ - разность между средним и минимальными значениями кинетической энергии;

$$\Delta T_{\min cp} = T_{cp} - T_{\min}, \quad (5)$$

A_{c-i}^{∂} - работа движущих сил на интервале $[\varphi_c, \varphi_i]$,

$$A_{c-i}^{\partial} = \int_{\varphi_c}^{\varphi_i} M_{\Pi}^{\partial} d\varphi_1, \quad (6)$$

A_{c-i}^c - работа сил сопротивления на интервале $[\varphi_c, \varphi_i]$,

$$A_{c-i}^c = \int_{\varphi_c}^{\varphi_i} M_{\Pi}^c d\varphi_1. \quad (7)$$

Угол φ_i соответствует угловому положению приводного вала, при котором $T_i = T_{cp}$.

Тогда выражение (1) для определения угловой скорости звена приведения можно представить в следующем виде:

$$\omega_{1i} = \sqrt{(\Delta\omega_{1i})^2 + (\Delta\omega_{2i})^2 + (\Delta\omega_{3i})^2 + (\Delta\omega_{4i})^2}, \quad (8)$$

где

$$(\Delta\omega_{1i})^2 = \frac{2T_{min}}{I_{\Pi i}}, \quad (9)$$

$$(\Delta\omega_{2i})^2 = \frac{2\Delta T_{min cp}}{I_{\Pi i}}, \quad (10)$$

$$(\Delta\omega_{3i})^2 = \frac{2 \int_{\varphi_c}^{\varphi_i} M_{\Pi}^d d\varphi_1}{I_{\Pi i}}, \quad (11)$$

$$(\Delta\omega_{4i})^2 = \frac{2 \int_{\varphi_c}^{\varphi_i} M_{\Pi}^c d\varphi_1}{I_{\Pi i}}. \quad (12)$$

Уравнения (8) - (12) позволяют провести анализ раздельного влияния динамических характеристик машины и выполняемой технологической операции на неравномерность вращения главного приводного вала.

Как видно из уравнения (9), функция $\Delta\omega_{1i} = \Delta\omega_{1i}(\varphi_1)$ определяет влияние «внутренней» динамики машины. Здесь T_{min} - постоянное значение кинетической энергии всех звеньев механизмов с постоянными передаточными отношениями (винт-гайка, шестерня-рейка, ременная передача, коробки скоростей с круглыми зубчатыми колесами и т.п.), т.е. эта величина учитывает массовые и кинематические характеристики привода. Величина $I_{\Pi i}$ определяется суммой двух слагаемых $I_{\Pi i} = I'_{\Pi} + I''_{\Pi}$. Здесь $I'_{\Pi} = const$ - приведенный момент инерции всех звеньев машины от двигателя до звена приведения. $I''_{\Pi} = I''_{\Pi}(\varphi_1)$ является периодической функцией с периодом τ . Таким образом, формула (9) позволяет судить о влиянии значения I'_{Π} и амплитудного значения функции $I''_{\Pi} = I''_{\Pi}(\varphi_1)$ на неравномерность движения звена приведения. Если $(I''_{\Pi})_{max} < I'_{\Pi}$ и T_{min} - достаточно большое число, то колебание амплитудных значений величины $\Delta\omega_{1i}$ будет несущественным.

Из формулы (10) и рис. 1 следует, что величина $\Delta T_{min cp}$ характеризует превышение значения средней кинетической энергии T_{cp} над ее минимальным значением T_{min} . Поэтому числитель формулы (10) есть постоянное число. Знаменатель же переменный. Это означает, что амплитудные значения функции $\Delta\omega_{2i}$ будут меньше амплитудных значений функции $\Delta\omega_{1i}$. Их значения определяются соотношением значений T_{min} и $\Delta T_{min cp}$.

Разница в физическом смысле величин T_{mi} и $\Delta T_{min\ cp}$ состоит в том, что приращение кинетической энергии определяется алгебраической суммой работ сил движущих и сопротивления. Величина же T_{mi} определяется только массами (моментами инерции) и скоростями центров масс звеньев (угловыми скоростями звеньев).

Формулы (11), (12) дают возможность судить о раздельном влиянии сил движущих (M_{II}^o) и сопротивления (M_{II}^c) на неравномерность вращения главного приводного вала.

Таким образом, раздельный анализ зависимостей (9) - (12) позволяет судить о динамике машины раздельно по силовым и массовым ее характеристикам. Сравнения зависимостей (9)-(12) полезно проводить по их амплитудным значениям между собой, а также сравнением их с амплитудными значениями зависимости (8).

В соответствии с вышеизложенным разработана программа «Динамика технологических машин», используемая в лабораторном практикуме, позволяющая исследовать зависимость неравномерности вращения главного вала машины от следующих факторов:

- а) массово-геометрической характеристики привода;
- б) массово-геометрической характеристики исполнительного механизма;
- в) механической характеристики выполняемой операции.

В качестве показателя неравномерности вращения главного вала машины выбран коэффициент неравномерности его вращения.

Пользователю предоставлена возможность использования двух режимов работы - демонстрационного, при котором показ влияния вышеназванных факторов производится с использованием заранее заложенных в программу данных, и исследовательского, когда пользователь самостоятельно вводит интересующие его параметры и при необходимости распечатывает результаты расчетов. Кроме того, результаты расчетов могут сохраняться.

Программа предназначена для инженерно-технических работников, выполняющих проектные работы, в процессе которых требуется исследовать характер вращения главного вала машины, а также для студентов, изучающих курсы теории механизмов и машин, проектирования схем технологических машин и манипуляторов, прикладной механики.

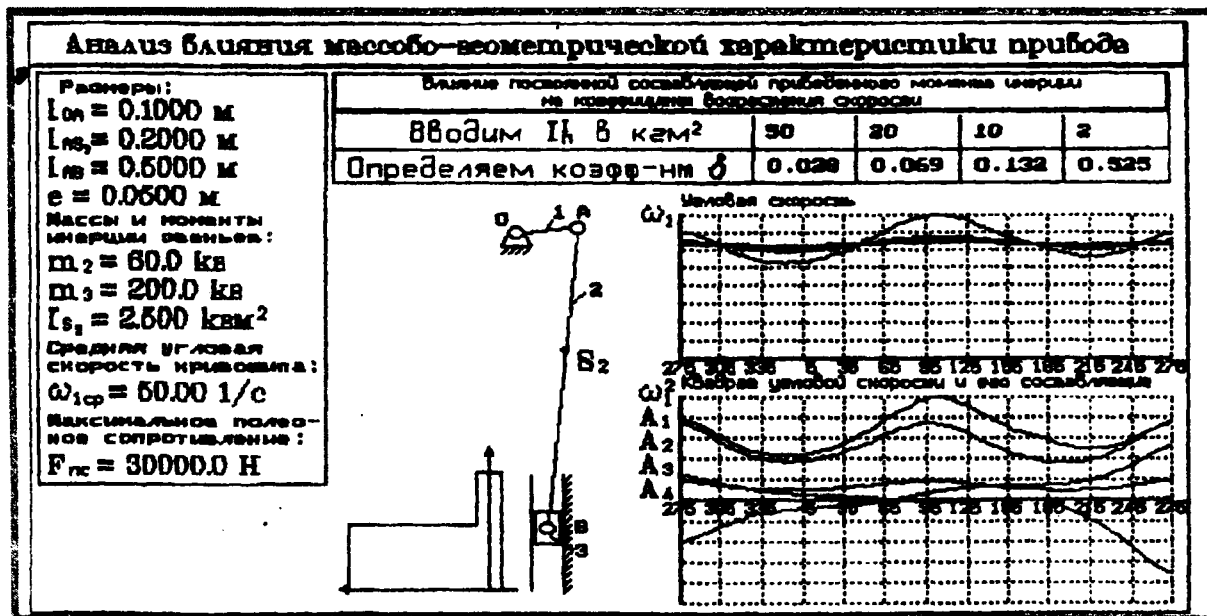


Рисунок 2- Пример вывода результатов исследования

ЛИТЕРАТУРА

1. Артоболовский И.И. Теория механизмов и машин. - 4-е изд., перераб. и доп. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. -640 с. 2. Анципорович П.П., Акулич В.К., Дворянчикова

А.Б., Дубовская Е.М. Динамика машин и механизмов в установившемся режиме движения.- БНТУ, 2004. – 41с. 3. Анципорович П.П., Акулич В.К. Теория механизмов и машин: Учебная программа для высших учебных заведений: Рег. № ТД – Т.024 – БНТУ, 2004. – 10 с.

УДК 681.3

Анципорович П.П., Алейникова О.И., Булгак Т.И., Луцко Н.Я.

КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ В ДИСЦИПЛИНЕ «ИНФОРМАТИКА»

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

В настоящее время для повышения эффективности инженерного труда при проектировании и конструировании машин в качестве рабочего инструмента все шире применяются высокотехнологичные компьютерные рабочие станции, оснащенные специальным программным обеспечением. Использование их требует изменения принципов подготовки специалистов. На начальном этапе основы применения информационных технологий и понимание их места в инженерной деятельности закладываются в курсе «Информатика».

Названный курс излагается студентам машиностроительного факультета в течение первых четырех семестров (лекции – 68 часов, лабораторные работы – 102 часа, курсовое проектирование). Лабораторные работы, выполняемые в трех семестрах, служат для закрепления теоретического материала и посвящены основам алгоритмизации задач, программированию, изучению ОС Windows и ее приложений, таких как текстовый процессор Word, электронные таблицы Excel, СУБД Access, математическая система MathCad, AutoCad и Internet [1-5]. Курсовая работа, выполняемая в четвертом семестре, подводит итог изучения дисциплины.

При подготовке заданий на курсовое проектирование требовалось учесть потребность выполняемых разработок в последующей учебной и профессиональной деятельности. Насыщенными, с точки зрения математического моделирования и объемности расчетов, являются такие дисциплины как теоретическая механика, механика материалов, теория механизмов и машин, теория обработки материалов. Учитывая вышесказанное, были обновлены задания на курсовое проектирование [6], посвященные вопросам математического моделирования, численного исследования энергетических и силовых характеристик рабочих процессов, моделирования движения звеньев машин, силового расчета кинематических цепей, расчета параметров зубчатых колес, создания баз данных машиностроительного инструмента и оборудования.

При выборе изучаемых объектов или процессов учитывались следующие факторы:

1) базированность задач на ранее изученных или изучаемых в момент проектирования дисциплинах, таких как «Математика», «Физика», «Теоретическая механика», «Теория механизмов, машин и манипуляторов», «Механика материалов» и т. д.;

2) возможность выдачи заданий с различным уровнем сложности в зависимости от подготовленности студентов. Так более простыми являются задачи, связанные с определением параметра объекта или процесса. Например, «Определение среднего квадратического отклонения профиля при исследовании шероховатости поверхности», «Разработка базы данных. Двухтавр», «Определение удлинения стержня конической формы» и т. д. Выполнение сложных заданий связано с исследованием процессов, проведением вычислительных экспериментов, позволяющих сделать выводы об оптимальных режимах их функционирования. К последним можно отнести такие задания, как «Исследование угловой скорости главного вала машины», «Определение параметров зубчатого колеса со смещением», «Исследование движения тела, брошенного под углом к горизонту, с учетом различных видов сопротивления», «Исследование прогиба балки в зависимости от нагрузки» и др.;

3) максимальное использование при выполнении заданий численных методов, изученных в дисциплине «Информатика» (интерполирование, численное интегрирование, решение нелинейных уравнений, численного интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений и их систем), принципов создания и обработки баз данных;

4) умеренная трудоемкость заданий, не перегружающая студента и позволяющая обеспечить качественное консультирование.

Курсовая работа содержит следующие разделы:

Введение.

1. Постановка задачи.
2. Математическая модель объекта или процесса.
3. Алгоритм решения задачи.
4. Схема алгоритма решения задачи.
5. Таблица идентификаторов.
6. Текст программы на алгоритмическом языке Паскаль.
7. Результаты решения задачи.
 - 7.1. Распечатка результатов.
 - 7.2. Графическое представление результатов.
8. Анализ результатов.
9. Литература.

При выполнении курсовой работы допускается использование студентом различных технологий решения задач. Так студенты, обладающие глубокими знаниями в области современных информационных технологий, могут реализовать построенный алгоритм в виде документа, созданного с использованием электронных таблиц Excel. Он содержит название изучаемого объекта или процесса; перечень параметров, являющихся исходными данными, с указанием наименования, технического обозначения, заданных числовых значений и единиц измерения; формулы, построенные для определения промежуточных и результирующих параметров; вычисленные значения. По полученным результатам строятся диаграммы Excel, отображающие характер изменения изучаемых зависимостей. Для улучшения восприятия материалов выполняется форматирование отдельных ячеек, их диапазонов и диаграмм.

Еще больше возможностей предоставляет математическая система MathCad. Например, решение задачи Коши может быть реализовано различными методами. Расчеты дополняются графическими зависимостями. Такие построенные в Excel и MathCad программно-вычислительные комплексы позволяют студенту проводить вычислительный эксперимент, более глубоко анализировать результаты, делать необходимые выводы.

Задачи, связанные с обработкой баз данных, также могут быть решены с использованием Excel и СУБД Access. В них студент создает структуру исходной таблицы и заполняет ее требуемыми по постановке задания данными. С помощью построенных запросов осуществляет выборку из заданной таблицы объектов, удовлетворяющих определенным критериям, и создает формы для отображения информации.

Умение применять современные технологии учитывается при защите курсовой работы.

Использованная методика курсового проектирования стимулирует работу студентов, стремление развивать интеллектуальный уровень и профессиональные навыки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Информатика. Учебная программа для высших учебных заведений. / П.П. Анципорович, Н.Я. Луцко. – Рег.№ ТД – Т.026/тип. 16.12.2004. – 7с.
2. Информатика: учебно-методическое пособие к лабораторным работам для студентов машиностроительных специальностей. В 4 ч. Ч. 1 / П.П. Анципорович, О.И. Алейникова, Т.И. Булгак, Н.Я. Луцко. – Мн.: БНТУ, 2003. – 54с.
3. Информатика: учебно-методическое пособие к лабораторным работам для студентов машиностроительных специальностей. В 4 ч. Ч. 2 / П.П. Анципорович, О.И. Алейникова, Т.И. Булгак, Н.Я. Луцко. – Мн.: БНТУ, 2004. – 23с.
4. Информатика: учебно-

методическое пособие к лабораторным работам для студентов машиностроительных специальностей. В 4 ч. Ч. 3 / П.П. Анципорович, О.И. Алейникова, Т.И. Булгак, Н.Я. Луцко. – Мн.: БНТУ, 2004. – 78с. 5. Информатика: учебно-методическое пособие к лабораторным работам для студентов машиностроительных специальностей. В 4 ч. Ч. 4 / П.П. Анципорович [и др.]. – Мн.: БНТУ, 2005. – 75с. 6. Информатика. Курсовое проектирование: методическое пособие / П.П. Анципорович [и др.]. – Мн.: БНТУ, 2006. – 84с.

УДК [17+37]: 378 (476)

Клименко В.А.

ФИЛОСОФСКО-ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ГУМАНИЗАЦИИ И ГУМАНИТАРИЗАЦИИ ОБРАЗОВАНИЯ В ВЫСШЕЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ ШКОЛЕ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Современный специалист должен обладать не только глубокими специальными знаниями, умениями и навыками по определенной профессии или специальности, но и представлять собой социально и духовно развитую личность, обладающую интеллектом, высоким творческим потенциалом, способным постоянно накапливать новые знания и постоянно самосовершенствоваться.

Если вести речь о современном инженере, то он должен обладать также качествами, необходимыми ему для осуществления деятельности в качестве руководителя различного уровня (мастера, начальника участка, руководителя предприятия и т.д.) При этом в качестве основных составляющих компетентности современного руководителя в научной литературе выделяются следующие: стратегические (глобальное и системное мышление, способность предвидения и решать проблемы и др.); функциональные (умение принимать решения, гибкость и выносливость в работе, инициативность и т.д.); профессиональные (специальное высшее образование, опыт линейной и штабной работы, знание иностранных языков, наличие работы в большинстве функциональных областей); управленческие (организаторские способности, ответственность, обладание силой убеждения, поведение руководителя на основе ситуационно-стилевой адаптации и т.д.); социальные (способность работать в команде, способность мотивировать, разрешать конфликты, к обучению и нововведениям, личное обаяние и др.) [1, с. 5].

Немаловажное значение в деятельности современного инженера играют также его личностные качества (динамизм, мобильность, деловитость, ответственность и др.) Более того, в настоящее время такие личностные качества специалиста, как мировоззренческая компетенция, широта взглядов, умение работать на стыке различных сфер науки и техники, наличие корпоративной культуры, умение работать в команде, приобретают особую значимость. На наш взгляд, подготовка современного инженера именно с такими профессиональными и личностными качествами позволит ему в будущем успешно адаптироваться на производстве, быстро включиться в систему экономических и социальных отношений, в целом эффективно интегрироваться в общество.

В формировании ключевых компетенций современного специалиста, прежде всего общественно-социальных, культурно-духовных, познавательных (образовательных), одна из ведущих ролей принадлежит гуманитарному образованию. Целью гуманитарного образования является формирование у обучающихся новых, подлинно гуманных ценностей, опирающихся на философские, нравственные, эстетические и духовные основы и позволяющие человеку ощущать социально и духовно свободной личностью, которая способна и имеет право выбора новых идеалов, убеждений и мировоззрения. Кроме того, гуманитарное образование не только формирует научное мировоззрение, ценностные ориентации и жизненные позиции

личности, но и дает возможность усвоить и реализовать в своей жизнедеятельности ценности национальной и мировой культуры, развить свои творческие способности, расширить свой внутренний мир.

Гуманитаризация образования тесно связана с таким понятием как «гуманизация». Гуманизм (лат. *humanus* – человеческий) – мировоззрение, рассматривающее человека как высшую ценность, защищающее его свободу и всестороннее развитие. Еще в трудах Цицерона оно выделялось как характерное явление для мышления и социальной практики античности и представляло «гуманистическое» состояние эстетически завершенной, культурной и нравственной эволюции «подлинно человеческого» индивида [2, с. 214].

Гуманизм, прежде всего, означает человечность человека: любовь к людям, высокий уровень психологической терпимости, мягкость личности всех других людей, любовь к ним и служение им. Гуманизм предполагает признание личностью в качестве ценности личности всех других людей, любовь к ним и служение им. В конечном счете, понятие гуманизм оформляется как система ценностных ориентаций, в центре которых лежит признание человека в качестве высшей ценности.

При такой трактовке гуманизм получает значение общественного идеала. Человек рассматривается как высшая цель общественного развития, в процессе которого обеспечивается создание необходимых условий для полной реализации всех его потенций, достижение гармонии в социально-экономической и духовной сфере жизни, наивысшего расцвета конкретной человеческой личности. Таким образом, с позиции гуманизма, конечная цель воспитания состоит в том, чтобы каждый человек смог стать полноценным субъектом деятельности, познания и общения, то есть свободным, самостоятельным существом, ответственным за все происходящее в этом мире. Поэтому в качестве главной цели учебно-воспитательного процесса выступает не только подготовка высококвалифицированного специалиста, но и формирование способностей к постоянному саморазвитию и самореализации.

Если рассматривать историко-культурные аспекты гуманизации образования, то следует отметить, что принципы гуманистически ориентированного образования формируются в философской традиции. Именно здесь находят свое обоснование идеи свободы, творчества, саморазвития, как всеобщие общечеловеческие ценности и как педагогические императивы. В Античной философии наиболее глубоко проблему оснований гуманистического образования изучает Сократ, который исходит из признания приоритетности в деле воспитания внутренних факторов (наследственность и воля субъекта) перед внешними (влияние среды и осознанное влияние другого человека). Сократ утверждает, что «все – и хорошее, и плохое – порождается в теле и во всем человеке душой» («Хармид», 156-е). Сократ призывает человека к самопознанию как единственно возможному пути совершенствования. Цель же совершенствования человека – становление морального объекта, стремящегося к добродетели и следованию моральному закону.

Эпоха возрождения формирует педагогический идеал индивидуальности, человека творца, что находит отражение в ярчайших произведениях живописи, скульптуры и других видах искусства. Просвещенческий гуманизм основан на рациональном обосновании естественных прав человека на свободу и уважение достоинства личности. В этот период философ Э. Кант формирует категорический императив – всеобщий нравственный принцип, врожденный человеку, который регулирует его отношения с другими людьми. Суть кантовского императива сводится к следующим основополагающим принципам: а) «поступай по отношению к другому человеку так, как хочешь, чтобы он поступал по отношению к тебе»; б) «поступай так, чтобы ты всегда относился к человечеству и в своем лице, и в лице всякого другого также как к цели и никогда не относился бы к нему только как к средству». Именно эти кантовские гуманистические принципы выступают основой отношений учителя и ученика в образовательном процессе.

Э. Кант формирует основные цели гуманной педагогики: «Развивающемуся человеку предстоит заменить отвращение к ненависти ненавистью к отвратительному и бессмысленному и в нем необходимо также вызвать и укрепить: идущее из глубины души, а не показное;

способность к адекватной самооценке и сохранению своего достоинства, а не к погоне за мнениями окружающих; стремление к добросовестности, стремление во всем не казаться, но быть; умение ценить поступки и дела, а не слова и эмоции; рассудок, а не чувствительность; жизнерадостность, а не злобливость, ровное расположение духа, а не угрюмость, запуганность и мрачное ханжество» [3, с. 39].

Гуманистические идеи просвещения находят свое продолжение в идеях гуманистически ориентированных философов, психологов и педагогов XX века. Наибольшую значимость в этом направлении получили идеи Роджерса, Юнга, Маслоу, Олпорта, Фромма и др., в которых основными понятиями выступают «самоактуализация», «саморазвитие». К.Г. Юнг понимал самоактуализацию индивида как конечную цель развития личности, достижение единства ее сторон. Исходя из такого подхода основными гносеологическими установками гуманистической психологии выступают следующие (А. Маслоу): 1) человека нужно изучать как единое, уникальное, организованное целое; 2) позитивный личностный рост и самосовершенствование раскрывает внутреннюю природу человека; 3) признание творчества – универсальной и несотъемлемой функции человека – основным объяснительным принципом гуманистической природы человека [2, с. 214]. Таким образом, личность признается как зрелая, уникальная и целостная система, которая представляет самоактуализировавшегося человека. Исходя из идей гуманистической психологии К. Роджерс предлагает отказаться от системы формального образования, уйти от отметок, научных степеней как мерила компетентности, грамотности человека. По его мнению, обучение должно быть преобразовано в путь человеческого опыта через нестандартные открытые формы непрерывного образования. Таким образом, в основе такого явления, как гуманизация образования лежит методологическая посылка субъективно-гуманистической направленности развития общества. Исходя из этого принципа гуманизация образования направлена против отчуждения человека от его сущности и является основным инструментом превращения человека из средства в цель.

В целом, в философско-педагогических концепциях гуманистической направленности можно выделить следующие принципы гуманистического образования:

- принцип свободы – как возможности для обучающихся реализовать свой внутренний потенциал в соответствии с собственной волей и потребностями в саморазвитии;
- свободы выбора как право учащегося реализовывать свою субъективность через самоопределение в принятии решений;
- использования мотивационных ресурсов образования – как приоритет развития внутренних побудителей деятельности обучающихся перед внешними стимулами;
- отказа от всех форм манипуляции учащимся, в том числе от наказания и отметок;
- развитие опыта как средства личностного роста и включения учащегося в существующую культуру;
- индивидуальности целеполагания – как проектирование личных целей обучающимися в ходе образовательной деятельности;
- народности образования – как право учащегося на воспитание в контексте культуры, ценностей, религии своего народа.

Таким образом, гуманизация образования тесно связана с его субъектом – обучаемым (преподавателем) и обучающимся (студентом) и направлена на них. Цель гуманизации – развитие личности, учет всех ее интересов. И в этом аспекте она совпадает со стратегической целью модернизации образовательной системы страны – формирование разносторонней гармоничной личности. Для достижения этого одним из основных средств выступает гуманитаризация образовательного процесса, направленная на формирование гуманитарной культуры, гуманитарных знаний, гуманистического мировоззрения и т.д., без которых невозможно представить развитие личной зрелости студентов. Исходя из этого, основными принципами гуманитаризации образования в высшей технической школе выступают следующие [4, с. 159]:

Личностно-ролевой подход к организации образования посредством деятельности развития студентов как активных субъектов учебно-воспитательного процесса, личностного общения преподавателей и студентов.

Интеграция социально-гуманитарных и специальных дисциплин с целью повышения уровня духовной культуры студентов, формирование у студентов понимания содержания знаний, ценности профессии, профессиональной деятельности, а значит и всей человеческой деятельности.

Создание в учебном заведении творческой созидательной атмосферы.

При этом данная проблема должна рассматриваться исходя из цели всего образовательного и воспитательного процесса в вузе: формирование общечеловеческих, культурных ценностей наряду с получением профессиональных знаний, умений и навыков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ганэ В.А., Соловьева С.В. Структуризация групп качеств компетентности руководителя XXI в. // Экономика и управление. 2006. №3. С. 3-10. 2. Большой энциклопедический словарь: философия, социология, религия, эзотеризм, политэкономия / главный науч. ред. и сост. Ю.С. Солодовников. Минск: МФЦП, 2002. 3. Колеченко А.К. Энциклопедия педагогических технологий. СПб, 2001. 4. Белова Е.И. Некоторые аспекты гуманитаризации и гуманизации высшего образования // Наука и образование на пороге III тысячелетия: Тезисы докл. Межд. конгресса (г. Минск, 3-6 октября 2000 г.). В 2-х книгах. Кн.1. Минск, 2000.

УДК 371.132

Баранова А.С.

РОЛЬ ИНТЕРАКТИВНЫХ МЕТОДОВ ОБУЧЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ПОДГОТОВКИ ПЕДАГОГОВ.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Интерактивные методы (англ. Interaction- взаимодействие) — методы обучения, основанные на высокой интенсивности общения, требующие коммуникативного обеспечения каждого участника интеллектуального действия. Они развивают способность понимать другого, подчеркивают значимость личного опыта каждого участника, обеспечивают поиск нового, разнообразие видов деятельности, способов общения.

В процессе реализации интерактивных методов формируются группы единомышленников на основе выбора определенной позиции. Интерактивная игра «Группа единомышленников» предполагает вопрос и варианты ответов. Участники группы единомышленников обмениваются мнениями, обосновывают свой выбор. Каждая новая проблема может создать новую группу единомышленников, где наряду с интеллектуальным развитием в процессе выбора позиции и ее аргументации происходит своеобразная психологическая защита каждого участника игры в результате поддержки участников деятельности группы. Эмоциональный и психологический комфорт способствует снятию стресса, неуверенности, происходит более интенсивное интеллектуальное развитие, развивается инноватика, так как создаются благоприятные условия для рождения и реализации новых идей.

Интерактивный метод смыслотворчества «Алфавит» развивает оперативное мышление. С каждой буквы алфавита называется понятие (идея, ассоциация, термин, фраза), раскрывающее смысл обсуждаемой проблемы. Затем выбираются слова — понятия (идеи, ассоциации, термины, фразы), получившие большее число выборов, на основе чего также создается своеобразная группа единомышленников, в которой рождение инновационных идей

происходит в более благоприятных условиях и потому более продуктивно. Развитие инноватики способствует благоприятный психологический климат, своеобразная релаксация участников группы, их хорошее настроение, творческое самочувствие, высокий интеллектуальный тонус.

Для развития научно-инновационной сферы можно использовать интерактивный метод «Трансфер понятий». Участникам предлагаются понятия из различных областей знаний для лучшего осмысления, разрешения и совершенствования исследуемой проблемы.

В качестве интерактивного можно рассматривать метод анализа инновационных предложений. Участники разбиваются на различные группы: а) идеалисты, которые предлагают сумасшедшие, дерзкие, космические, невероятные, фантастические идеи; б) критики, которые критически оценивают предложенные идеи; в) реалисты, которые творчески комбинируют идеи идеалистов и критиков с целью их реального применения на практике.

Для развития инновационных идей полезна игра «Иной взгляд», в ходе которой предлагается проблема для обсуждения. Затем выдвигаются контрпроблемы, контраргументы, контридеи. В результате формируются группа единомышленников высказывающих близкие идеи или группа антагонистов, предлагающих противоположные суждения. Участники групп защищают свои идеи, приводят аргументы, находят компромисс или создают теории, которые могут параллельно сосуществовать, опровергать друг друга или быть частным случаем какой-либо теории. Интерактивные методы могут соответствовать этапам развития научной идеи. Существуют следующие этапы развития научной идеи: этап формирования инновационных предложений; этап анализа идеи; явления, их свойств, закономерностей, особенностей процесса преобразования и опытно-конструкторской работы; этап анализа свойств объекта и поиска применения на практике; этап анализа возможностей технологии; этап получения продукта, результата; этап возникновения нового продукта, новой идеи. В соответствии с этими этапами можно сформировать группы ученых, теоретиков (этап формирования инновационных предложений), группу конструкторов (этап опытно-конструкторской работы), группу аналитиков (этап анализа возможностей технологии), группу реализаторов (этап получения, реализации продукта), группу новаторов (этап создания нового товара, новой идеи). Содержание инновационного обучения должно включать ознакомление с организационными формами инновационной деятельности, с методами создания инноваций, ведущих к возникновению нового продукта, технологии, идеи.

Целью интерактивного «Метода выборки» является определение участников, которые потенциально готовы к инновационной деятельности и хотели бы ей заниматься. Среди различных вопросов, которые предлагаются участникам игры, встречаются вопросы, связанные с инновацией, инновационной деятельности. Вопросы могут быть следующие:

Кто уже проснулся?

Кто любит новое, новшество?

Кто жаждет деятельности?

У кого хорошее настроение?

У кого есть что-то голубое (серое) в одежде?

У кого коричневая обувь?

Кто хотел бы узнать что-то новое?

Кто хотел бы ознакомиться с новыми идеями?

Кто неудовлетворен состоянием образования (науки, культуры, экономики, технического прогресса и т.д.)?

Кто узнал что-то новое и хотел бы поделиться с другими?

Кто удовлетворен новшествами в области науки (образования, экономики, культуры, техники)?

Кто любит общение?

Кто имеет много друзей?

Кто ценит достижения интеллекта?

Кто знает о новейших достижениях науки (культуры, экономики)?

Кто одет в строгий костюм?

У кого зимой день рождения?

Кто знаком с инновационными идеями?

С.С. Кашлев в качестве ведущих признаков и инструментов интерактивного взаимодействия выделил диалог, мыследеятельность, смыслотворчество, межсубъектные отношения, свободу выбора, ситуации успеха, позитивность, оптимистичность оценивания, рефлекссию. Он также представил классификацию интерактивных методов обучения: методы создания благоприятной атмосферы, организации коммуникации; методы обмена деятельностью; методы исследовательности; методы смыслотворчества; методы рефлексивной деятельности; интегративные методы (интерактивные игры) [1].

В качестве интерактивного можно также использовать метод «Заверши фразу». Цель метода — максимальное выяснение смысла и сущности инновационной деятельности. В качестве отправных точек мышления могут быть использованы фразы: «инновация — это...», «инновационные проекты — это...», «научно-инновационная сфера — это...», «инновационно-ориентированное образование — это...», «научно-инновационная деятельность — это...». В таком же ключе могут быть рассмотрены следующие понятия: инновационные предложения, инновационные группы, творчество, инновационная сфера, инновационное управление, управление научно-инновационным развитием, инновационная политика, специалист инновационного типа, инновационные проекты, целевые инновационные группы, научно-инновационная деятельность, инновационная восприимчивость, генератор инноваций, интернационализация инновационной деятельности, инновационный процесс, инновационное управление персоналом, инновационный менеджмент, инновационные подходы, инновационные факторы, инновационные управления, инновационные технологии, инновационный потенциал, научно-инновационная деятельность, инновационные образовательные технологии, педагогическая инноватика, инновационная сфера, инновационное средство, инновационные образовательные технологии, современные инновационные технологии, инновационные умения, инновационные методы. В ходе интерактивного обсуждения эти понятия обогащаются новым смыслом и глубоким содержанием. Возможен также вариант этого метода. Участникам игры предлагается подумать над тем, какие из предложенных термины, понятия относятся к области теории науки, а какие ближе к практической деятельности. Работа над понятиями может углубиться путем сравнения двух терминов. Например, в ходе коллективного обсуждения выясняется, что инновация — это создаваемые (осваиваемые) новые или усовершенствованные технологии, организационно-технические решения производственного, административного, педагогического, коммерческого характера, способствующие созданию новых технологий, товарной продукции, образовательных или иных услуг. Инновационная деятельность — деятельность, направленная на практическое освоение результатов научных исследований и разработок, повышающих эффективность технологического или педагогического процесса.

В процессе интеллектуально-коммуникативной атаки рождаются новые смыслы, новые идеи, подходы.

Научно инновационная сфера требует развития мыслительной деятельности специалистов. Смысл мыследеятельности состоит в эффективной организации индивидуальной мыслительной деятельности личности. Эффективная организация мыследеятельности личности заключается в рациональном выполнении различных мыслительных операций (анализ, синтез, сравнение, обобщение, классификация, выделение существенных признаков, кодирование и декодирование информации, определение ошибок в умозаключениях, выборочное кодирование, комбинирование и сравнение, аналогии с элементами новизны, создание интерактивных образов). Важную роль также играет продуктивный обмен результатами мыслительной деятельности между участниками интерактивного общения, разнообразие видов, форм, методов мыслительной, познавательной деятельности; сочетание индивидуальных и групповых форм работы, создание проблемно-поисковой ситуации, смыслотворчество и рефлексия.

Понятие смысловторчества является относительно новым для педагогики, но для формирования инновационной личности необходима ее ориентация именно на смысловторчество. С.С. Кашлев определяет смысловторчество как «процесс создания субъектом деятельности нового значения, содержания чего-либо через призму своей индивидуальности». [1,79] Смысловторчество является процессом создания личностью своего индивидуального смысла о чем-либо в окружающей действительности, о самом себе. А. Мотейко отмечает, что сущность творческого процесса заключается в реорганизации имеющегося опыта или формировании на его базе новых комбинаций. [3,9] Инновационная деятельность предполагает процесс специфической оригинальной деятельности осуществляемой по своему индивидуальному замыслу. Здесь большое значение имеет деятельность не по образцу, не по шаблону. Решающим является качественно новое видение предмета, явления, процесса. Поиск личной значимости тех или иных явлений, действий является сверхценным и остро востребованным. Интерактивные методы обучения способствует наделению смыслом объектов познания, реализуют право личности делать это по собственному усмотрению соотносясь со своими идеалами, ценностными ориентациями, мотивами деятельности. По мнению И.С. Алексеева, повторение образца выступает как способ «подключения» индивида к культуре, тогда как создание нового смысла рассматривается как вклад индивида в культуру, обогащения «смыслового фонда».

Совершенствование интерактивных методов обучения с целью развития инновационных умений является актуальнейшей задачей педагогической науки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кашлев С.С. Интерактивные методы обучения педагогике. — Мн.: Выш.шк., 2004.-176с.
2. Кашлев С.С. Современные технологии педагогического процесса. — Мн.: Университетская, 2001.-95 с.
3. Матейко А. Условия творческого труда. — М., 1970.

РЕФЕРАТЫ

УДК 621.914.1

Баршай И.Л., Алифанов А.В., Фельдштейн Е.Э. Гончаров С.П., Моделирование влияния иглофрезерования на формирование наклепа // Машиностроение – Мн., 2007 – Вып. 23 - С.

В статье представлены результаты исследований моделирование влияния параметров режима иглофрезерования на формирование наклепа по обработке конструкционных сталей 20ХНЗА и 25ХГМ. Разработанные математические модели позволяют прогнозировать и оптимизировать величину наклепа поверхностного слоя деталей из указанных марок сталей при иглофрезеровании. Ил. 2. Табл. 1. Библиогр. 6.

УДК 621.7

Баршай И.Л., Бирич А.В., Гончаров С.П., Фельдштейн Е.Э. Формирование геометрической структуры поверхности при иглофрезеровании деталей из чугуна // Машиностроение. – 2007. – Вып. 23. – С.

Рассмотрено влияния процесса иглофрезерования на формирование топографии поверхности деталей из чугунов марок ВЧ50, СЧ15 и СЧ20. Установлено, что в процессе обработки происходит снижение высотных параметров шероховатости. Рис. 3. Табл. 1.

УДК 621.7/.9.048.7:621.373.826

Войтович И.И., Баршай И.Л. Перспективы комбинированной обработки лазерным излучением и поверхностным пластическим деформированием // Машиностроение. – Мн., 2007. – Вып.23. – С.

Рассмотрены особенности лазерной термообработки металлов. Приведены некоторые способы комбинированной обработки с лазерным излучением. Подробно рассмотрен метод комбинированной обработки лазерным излучением и поверхностным пластическим деформированием. – Ил.2. Табл.1. Библиогр.5.

УДК 621.771.63

Исаевич Л.А., Малекян М.М. Анализ и сравнение различных устройств и способов прокатки полос переменной по длине толщины // Машиностроение. – Мн., 2007. – Вып. –С.

Рассмотрены четыре группы устройства для получения полос переменной по длине толщины, которые включают в себя гидрокопировальную прокатку, автоматическую прокатку с контрольными системами, прокатку на профилированной оправке, прокату полос с использованием кулачков.

УДК 621.771

Щукин В.Я., Исаевич Л.А., Кожевникова Г.В. Скорости течения металла и деформации в пластической области при поперечной прокатке // Машиностроение. – Мн., 2007. – Вып.23. – С.

Рассмотрены особенности поля линий скольжения при поперечной прокатке. – Ил. 3. Табл. 1. Библиогр. 3.

УДК 621.833

Кане М.М. Развитие представлений о надежности технологических систем и методах её оценки // Машиностроение. – Мн., 2007. – Вып.23. – С.

Рассмотрены цели и методы оценки надежности технологических систем, раскрыты понятия «надежность технологического процесса», «надежность технологической операции», «надежность технологической системы», приведена классификация показателей надежности технологических систем. Табл.1. Библиогр.10.

УДК 621.833

Кане М.М. А.И. Медведев, А.Т. Ковальков. Рентгенографические исследования микродеформаций кристаллической решетки и размеров блоков мозаики легированных конструкционных сталей на операциях зубошевингования и химико-термической обработки (ХТО) цилиндрических шестерен // Машиностроение. – Мн., 2007. – Вып.23. – С.

Рассмотрены результаты рентгенографического исследования микродеформаций кристаллической решетки $\Delta a/a$, размеров блоков мозаики D и остаточных напряжений σ_2 легированных конструкционных сталей на смежных операциях шевингования и химико-термической обработки (ХТО). Установлены закономерности изменения данных параметров на указанных операциях, что открывает возможности управления ими при обработке цилиндрических зубчатых колес. –Ил.3.Табл.2. Библиогр.4.

УДК 621.791

Фельдштейн Е.Э. Закономерности плазменной резки стальных плит// Машиностроение. – Мн., 2007. Вып. 23. – С.

Рассмотрено влияние скорости перемещения плазменной горелки, силы тока, расстояния сопла от поверхности плиты из стали 18G2A и его диаметра на погрешности поверхности реза. Получены уравнения регрессии для расчета погрешностей реза на основе дробных факторных планов. Минимальная ширина реза зафиксирована для изношенного сопла при относительно небольшой силе тока, однако более правильную форму реза обеспечивает новое сопло. Желательно также иметь минимальное расстояние горелки от поверхности реза. Высота заусенцев уменьшается при уменьшении скорости перемещения горелки и увеличении диаметра нового сопла. – Ил.6. Табл.3. Библиогр. 1.

УДК 621.923

Кривко Г.П., Черей Д.А. Особенности конструирования приводных валков для группового суперфиниширования бочкообразных роликов. //Машиностроение. – Мн., 2007. – Вып. 23. – С.

Рассмотрены особенности конструирования приводных валков для группового суперфиниширования бочкообразных роликов. Определена конструкция приводных валков для одновременного суперфиниширования двух бочкообразных несимметричных роликов по методу качания брусков по дуге окружности.–Ил.3. Табл.1. Библиогр.2.

УДК 621.762.

Дудяк А.И., Сахнович Т.А. Измельчение и активация порошка системы $Al_2O_3 - Al_2TiO_5$ с целью оптимизации параметров технологического процесса // Машиностроение. – мн. 2007. – вып.23. – с.

Рассмотрены особенности активации и измельчения порошка системы $Al_2O_3 - Al_2TiO_5$. Установлено, что атриторная обработка сухим способом позволяет получать порошки с более развитой поверхностью, а это приводит к стабилизации технологического процесса получения керамики и повышает ее прочностные характеристики. – Ил. 2. Табл. 1. Библиогр. 3.

УДК 621.723

Иващенко С.А., Койда С.Г. Оптимизация технологического процесса нанесения покрытий из нитрида титана на изделиях из алюминиевых сплавов. // *Машиностроение*. – Мн. 2007. – вып.23. – с.

В статье рассматривается применение метода линейной шаговой регрессии для оптимизации технологических режимов нанесения вакуумно-плазменных покрытий из нитрида титана на изделиях из сплава Д16. – Табл. 5. Библиогр. 5

УДК 621.785

Ивашко В.В., Вегера И.И., Синцов С.И. Исследование и разработка процесса электротермического упрочнения дисков со сложной геометрической поверхностью // *Машиностроение*. – Мн., 2007. – Вып.23. – С.

Изучено влияние скорости нагрева на механические свойства стали 45 в закаленном и отпущенном состоянии. Определены оптимальные режимы скоростной термической обработки стали 45. Разработана технология и опытно-экспериментальное оборудование для поверхностного упрочнения токами высокой частоты конусных поверхностей дисков, работающих на износ и контактную усталость. – Ил.3 . Библиогр.4.

УДК 621. 923.

Хейфец М.Л., Чемисов Б.П., Грецкий Н.Л., Толстиков С.К. Формирование ферропорошковых покрытий в пульсирующем электромагнитном поле / // *Машиностроение*. – Мн., 2007. – Вып. 23. – С.

Предложена принципиальная электрическая схема подключения установки для электромагнитной наплавки, позволяющая исследовать влияние фазового угла смещения между напряжением, питающим электромагнитную катушку, и напряжением, питающим сварочный трансформатор на стабильность формирования покрытий ферропорошками в электромагнитном поле. Установлено, что наиболее благоприятные условия для максимального переноса ферропорошков на поверхность детали, очистки рабочего зазора от продуктов эрозии в твердой фазе и от частиц зерен ферропорошка складываются под действием вибрации полюсного наконечника, когда частота и фаза следования импульсов напряжений в цепях технологического тока и электромагнитной катушки совпадают. – Ил. 7. Табл. 1. Библиогр. 8.

УДК 621.791.72

Кардаполова М. А., Дьяченко О. В. Установление корреляционных зависимостей между интенсивностью изнашивания, фазовым составом и микротвердостью покрытий на основе железа после лазерного легирования. // *Машиностроение*. – Мн., 2007. – Вып.23. – С.

Выбраны параметры оптимизации структуры и свойств покрытий на основе железа, после лазерного легирования ТаВ, МоВ, В₄С. Построены регрессионные модели, связывающие технологические параметры процесса с комплексом физико-механических и эксплуатационных характеристик формируемых покрытий. Проведен корреляционный анализ полученных зависимостей.

УДК 621.733.74

Савчик В.А., Дьяченко О.В., Василенко А.Г. Исследование адгезионной прочности порошков на железной основе // *Машиностроение*. – Мн., 2007. – Вып.23. – С.

Рассмотрено исследование адгезионной прочности порошков на железной основе. Приведена методика определения прочности штифтовым и клеевым методами, рекомендованы режимы лазерной обработки. – Ил.3 Табл.2.

УДК 621.793, 621.787

Шматов А.А., Девойно О.Г. Низкотемпературное термохимическое упрочнение инструмента // Машиностроение.- Мн., 2007.-Вып.23.- С.6

В работе представлен новый низкотемпературный метод поверхностного упрочнения стального инструмента путем его химической обработки в специально приготовленной водной суспензии на базе нанокарбидов (нанонитридов) титана (минимальная температура процесса 130°C). Изучены структура и свойства полученных тонкопленочных покрытий. Термохимические покрытия существенно повышают эксплуатационную стойкость режущего и штампового инструмента. – Ил.2. Табл.1. Библ.6.

УДК 621.793, 621.787

Шматов А.А., Девойно О.Г. Низкотемпературное термохимическое упрочнение инструмента // Машиностроение.- Мн., 2007.-Вып.23.- С.6

В работе представлен новый низкотемпературный метод поверхностного упрочнения стального инструмента путем его химической обработки в специально приготовленной водной суспензии на базе нанокарбидов (нанонитридов) титана (минимальная температура процесса 130°C). Изучены структура и свойства полученных тонкопленочных покрытий. Термохимические покрытия существенно повышают эксплуатационную стойкость режущего и штампового инструмента. – Ил.2. Табл.1. Библ.6.

УДК 621.785.53, 621.793.4

Шматов А.А., Федотов Ф.О. Многокомпонентные диффузионные карбидные покрытия на чугунах // Машиностроение.- Мн., 2007.-Вып.23.- С.6

В работе изучены структура и свойства многокомпонентных карбидных покрытий, полученных на сером чугуне методом химико-термической обработки. Проведена оптимизация процессов получения карбидных покрытий в шести трехкомпонентных системах на основе: Cr-Ti-V, Cr-Ti-Mn, Cr-Ti-Mo, Cr-V-Mo, Cr-V-Mn и Cr-V-Nb. Разработанные карбидные покрытия существенно повышают эксплуатационную стойкость чугунных изделий. – Ил.4. Библ.4.

УДК 621.793

Коробейников В.В., Соколов И.О., Володько А.С. Исследование износостойкости оплавленных и неоплавленных газотермических покрытий из композиций на основе самофлюсующихся материалов // Машиностроение. – Мн., 2007. – Вып.26. – С.

Проведены исследования износостойкости оплавленных и неоплавленных газотермических покрытий из композиций на основе самофлюсующихся материалов на машине торцевого трения. Даны рекомендации по выбору различных покрытий в зависимости от назначения деталей – Ил. 3. Табл. 2. Библиогр. 5.

УДК 621.923.7

Киселева Н.А. Разработка высокоэффективных технологий металлообработки – вклад в инновационное развитие Республики Беларусь / Ю.В. Синькевич, С.И. Моисеенко // Машиностроение. – Мн., 2007. – Вып.23. – С.

В статье рассматриваются основные тенденции развития Республики Беларусь в свете инновационных технологий. Аргументирована необходимость создания таких звеньев инновационной цепочки, как научные идеи и научные разработки. Изложены возможности новых точных методов обработки (на примере электроимпульсного полирования), а также трудности на пути их исследования и внедрения. Акцентировано внимание на необходимости внедрения инновационных методов, позволяющих создавать конкурентоспособную продукцию.

УДК 621. 771

Щукин В.Я., Исаевич Л.А., Кожневникова Г.В. Современное оборудование поперечно-клиновой прокатки // Машиностроение. – Мн., 2007. – Вып.23. – С.

Рассматриваются мировые тенденции экономического развития оборудования и технологий поперечно-клиновой прокатки. Дан сравнительный анализ всего оборудования поперечно-клиновой прокатки, выпускаемого в мире. – Ил. 3. Табл. 1. Библиогр. 2.

УДК 658.52.011.56.012

Свирский Д.Н. Использование биоаналогий в проектировании компактных систем машиностроительного производства // Машиностроение. – Мн., 2007 – Вып. 23 – С.

Показана возможность использования закономерностей явлений живой природы при проектировании эффективных производственных систем для машиностроительных предприятий. Предложены средства реализации компьютерной поддержки проектных процедур на основе нейросетевой технологии и генетического алгоритма. – Ил. 3. Библиогр. 4.

УДК 621.9.044+621.06-52

Романюк С.И., Якимович А.М. Обеспечение высокоскоростного фрезерования средствами системы управления // Машиностроение. – Мн., 2007. – Вып.23. – С.

Дано определение понятию "высокоскоростное фрезерование" (HSM). Сформулированы проблемы HSM при линейно-кусочной аппроксимации. Описаны требования к системам управления станков для высокоскоростной обработки. Рассмотрено применение цифровых приводов. – Библиогр.5.

УДК 621.313.84

Литвинов Е.А., Карпович С.Е., Агранович А.А. Моделирование перемещений платформы манипуляционного механизма с шестью степенями свободы средствами MATLAB/Simulink // Машиностроение. – Мн., 2007. – Вып.23. – С.

Рассмотрен манипуляционный механизм с шестью степенными свободы. Проанализированы движения подвижной платформы механизма, разработана и реализована в среде MATLAB/Simulink математическая модель расчета положения подвижной платформы. Описан интерфейс разработанной программы интерактивного моделирования. – Ил.3. Библиогр.4.

УДК 621.313.84

Карпович С.Е., Поляковский В.В., Жарский В.В., Агранович А.А. Анализ и предотвращение коллизий планарных позиционеров в системе перемещений Трипланар // Машиностроение. – Мн., 2007. – Вып.23. – С.

Рассмотрена система перемещений Трипланар с шестью степенными свободы. Рассмотрена проблема коллизий, возникающих в ней при совместной работе трех планарных позиционеров. Разработана программа интерактивной визуализации на основе предложенного алгоритма анализа и предотвращения коллизий. – Ил.3. Библиогр.3.

УДК 621.313.84

Дайняк И.В., Жарский В.В., Озер В.П. Планарный привод с механизмом ограничения разворота // Машиностроение. – Мн., 2007. – Вып.23. – С.

Рассмотрен планарный позиционер на базе линейных шаговых двигателей как основной элемент современных систем перемещений. Проанализированы силовые характеристики планарного позиционера, зависящие от угла разворота в плоскости движения. Предложен механизм ограничения разворота, построенный на специальном пантографном устройстве, позволяющий повысить ускорение перемещений в 1,2...1,5 раза при сохранении метрологических точностных характеристик. – Ил.3. Библиогр.8.

УДК 004.891

Романюк Г.Э., Романюк С.И., Криволапов Д.М. Создание экспертной системы средствами СУБД Access // Машиностроение. - Мн., 2007. - Вып. 23. - С.

Рассмотрено применение возможностей СУБД Access для создания экспертной системы без использования языков логического программирования. На примере показано создание модели диагностической экспертной системы. - Ил. 1. Табл. 3. Библиогр. 3

УДК 658.512.22

Аверченков В.И., Беспалов В.А. Разработка специализированной САПР гидроцилиндров // Машиностроение. – Мн., 2007. – Вып. 23. – С

В статье рассмотрены вопросы параметрического проектирования технических элементов гидропривода транспортных машин. Дано описание разработанных программных модулей для автоматизации процедур параметрического проектирования гидроцилиндров. – Ил.3. Библиогр.2.

УДК 658.51

Горюшкин А.А. Программный метод выбора минимальной длительности цикла обслуживания технологического оборудования промышленным роботом // Машиностроение. – Мн., 2007. – Вып.23. – С.

Рассмотрен программный метод выбора минимальной длительности цикла обслуживания технологического оборудования промышленным роботом. – Ил. 3.

УДК 621.91.04

Данилов В.А., Киселев Р.А. Колебания в обрабатывающей системе при обработке торцовых зубчатых контуров // Машиностроение. – Мн., 2007 – Вып. 23. – С.

Проведен причинно-следственный анализ возникновения колебаний в обрабатывающей системе при обработке торцовых зубчатых контуров по методу непрерывного деления. Рассмотрено влияние колебаний на качество обработки пазов, методы повышения виброустойчивости обрабатывающей системы и гашения колебаний. – Ил. 3. Библиогр. 3.

УДК 621.91.04

Данилов В.А., Селицкий А.Н. Анализ и реализация схем обработки некруглых поверхностей // Машиностроение. – Мн., 2007. – Вып. 23.- С.

Рассмотрены схемы механической обработки некруглых поверхностей с упрощенной кинематикой. Приведены кинематическая схема специального станка, работающего по методу кинематического профилирования, и инструментальная наладка для обработки некруглых валов на этом станке. – Ил. 2. Табл.2.Библиогр. 4.

УДК 621.921.02-05

Лебедев В.Я., Сидоренко В.А. Анализ акустической эмиссии ротационного токарного резца // Машиностроение. – Мн., 2007. – Вып. 23. – С.

Исследованы спектры колебаний ротационных резцов на разделенных опорах при точении в широком диапазоне режимов резания. Установлено влияние геометрии режущего лезвия на интенсивность колебаний в различных направлениях и показано, что необходимо конструировать резец с учетом направления действия силы резания. Обоснована возможность оптимизации геометрии ротационного инструмента на основе анализа акустической эмиссии при резании. – Ил.2. 4 Библиогр.4.

УДК 621.9.02-589.22

Лебедев В.Я., Сидоренко В.А. Влияние скорости и направления касательного движения при ротационном точении на качество обработанной поверхности // Машиностроение. – Мн., 2007. – Вып.23. – С.

С использованием специального устройства для принудительного вращения режущей части ротационного резца в процессе точения исследованы некоторые особенности качества обработанной поверхности при различных скоростях и направлениях касательного движения. На основе выявленных зависимостей сформулированы рекомендации по применению и дальнейшему исследованию процесса ротационного резания. Ил.4. Библиогр.6.

УДК 621.762.

Дудяк А.И., Сахнович Т.А. Исследование режущих и физико-механических свойств композиционного материала на основе эльбора с целью оптимизации его фазового состава // Машиностроение. – Мн. 2007. – Вып.23. – С.

Исследованы режущие и физико-механические характеристики композиционного материала на основе эльбора в зависимости от количества связующего материала. Установлено оптимальное соотношение между связующим материалом и эльбором. – Табл. 1. Библиогр.2

УДК 621.993.187

Шагун В.И. Влияние параметров конструкции метчика на отклонение половины угла профиля резьбы в чугуне // Машиностроение. – Мн., 2007. – Вып.23. – С.

Изложены результаты экспериментальных исследований, которые выявили, что в зависимости от параметров конструкции метчика и способа нарезания резьбы отклонения половины угла профиля резьбы М16×2 колеблются от 0 до 100 минут на нормированном стандартном участке резьбы. Приведены причины погрешностей и рекомендации по повышению точности резьбообработки. – Ил.4. Библиогр.4.

УДК 621.993-187

Чарторийский А.В., Шагун В.И. Влияние параметров конструкции метчика на отклонение половины угла профиля резьбы в стали. // Машиностроение. – Мн., 2007. – Вып.23. – С.

Изложены результаты исследований, выполненной по оригинальной методике, которые выявили, что в зависимости от параметров конструкции метчика и способа нарезания резьбы отклонения половины угла профиля резьбы М16×2 колеблются от нуля до 4° на нормированном стандартном участке резьбы. Главная причина отклонений – разбивание резьбы под действием осевых сил резания и внешних осевых сил. – Ил.7. Библиогр.2.

УДК 621.993.1

Чарторыйский А.В. Конструкция метчика для сквозных отверстий // Машиностроение. – Мн., 2007. – Вып.23. – С.

Предложена конструкция метчика для нарезания резьбы, которая позволяет выводить стружку через специальное отверстие расположенном в метчике. Данная конструкция предложена для повышения точности нарезаемой резьбы метчиком в сквозных отверстиях. – Ил.8.

УДК 621.941.025

Барановский В.В., Якимович А.М. Режущий инструмент для безотходного получения рабочих поверхностей теплообмена резанием // Машиностроение. – Мн., 2007. – Вып.23 – С.

Рассмотрены существующие методы получения ребер на поверхности теплообменных аппаратов. Разработана новая конструкция режущего инструмента. – Ил.5. Библиогр. – 5.

УДК 621.9

Ажар А.В. Моделирование надежности сборных торцовых фрез // Машиностроение. – Мн., 2007. – Вып. 23. – С.

Установлено, что сборная торцовая фреза с точки зрения надежности может быть представлена в виде системы параллельно-последовательного типа с активным резервом. Этот резерв не преднамеренный, а вызван конструктивной избыточностью инструмента в связи с возрастающими требованиями к росту производительности при обработке.

В соответствии с принятой моделью надежности критерий отказа торцовой фрезы будет зависеть от величины «ломающей подачи», приводящей к поломке режущего элемента. В зависимости от принятой подачи на зуб этот критерий может представлять собой выход из строя более одного последовательно идущего друг за другом зуба.

Как показывает анализ предложенной модели надежности и практика эксплуатации торцовых фрез повысить их надёжность с точки зрения безотказности инструмента можно путём увеличения количества резервных элементов. При этом изменение конструкции фрезы с целью увеличения ее надёжности должно быть обосновано с точки зрения технико-экономических показателей процесса механической обработки для конкретных условий. – Ил.4. Библиогр.6.

УДК 621.787

Ловшенко Ф.Г., Ловшенко Г.Ф., Хабибуллин А.И. Глубокое сверление отверстий в дисперсно-упрочненных медных сплавах// Машиностроение. – Мн., 2007. –Вып.23.-С.

Дан краткий анализ проблем, возникающих при глубоком сверлении отверстий малого диаметра в дисперсно-упрочненных материалах на основе меди. Предложены мероприятия по повышению эффективности процесса резания.- Табл.1. Библиогр.3.

УДК 674.05.621.9.02.

Раповец В. В., Бурносков Н. В. Моделирование процесса формирования пилопродукции технологической щепы на фрезерно-брусующих станках // Машиностроение.– Мн., 2007. – Вып. 23. – С.

В статье рассмотрены способы формирования пилопродукции и технологической щепы при переработке древесины на фрезерно-брусующих станках. Проведен анализ основных технологических схем формообразования пилопродукции при агрегатных способах переработки тонкомерной древесины. Предложена усовершенствованная экспериментальная установка для моделирования процесса резания.– Ил.3. Табл.1. Библиогр.4.

УДК 621.793

Фельдштейн Е.Э. *Разновидности и возможности современных покрытий режущих инструментов // Машиностроение. – Мн., 2007. Вып. 23. – С.*

В статье рассмотрены разновидности современных покрытий, наносимых на режущие инструменты, их состав и свойства. На примере покрытий типа VALINIT показана эффективность использования покрытий для различных видов обработки и обрабатываемых материалов. Правильный выбор покрытия позволяет повысить стойкость инструмента до 75 раз при снижении стоимости обработки в 2 раза. – Ил.6. Табл. 1. Библиогр. 2.

УДК 621.882.082.1

Мойсейчик Е.А. *Прочность растянутых болтов соединений строительных конструкций // Машиностроение.- Мн., 2007.- Вып.23.-С.*

Приведены данные по экспериментальному определению прочности болтов.

Показано, что пригодность болтов для соединений строительных конструкций следует определять по данным их испытаний по программе «В» ГОСТ 1759.4-87.

УДК 629.113-587

Дубовик Д.А. *Моделирование криволинейного движения колесных машин // Машиностроение. – Мн., 2007. – Вып.23. – С.*

Предложены нелинейные функциональные зависимости для расчета углов поворота рулевого и управляемых колес, обеспечивающие более высокую сходимость расчетных значений с экспериментальными данными. Приводятся результаты их использования на примере моделирование криволинейного движения внедорожной машины МЗКТ-79091 при выполнении маневра "смена полосы движения".

УДК 621.833.06

Лустенков М.Е. *Разработка динамической модели планетарной шариковой передачи на основе структурно-матричного метода // Машиностроение. – Мн., 2007. – Вып.23. – С.*

Рассмотрены вопросы динамического анализа планетарных передач с телами качения. Описан принцип работы планетарного шарикового зацепления. Исследован характер движения тел качения, выполняющих функции сателлитов. Получены уравнения, описывающие колебательные процессы в многомассовой системе. – Ил. 3. Табл.1. Библиогр. 4.

УДК 621.793

Спиридонов Н.В., Сокоров И.О., Коробейников В.В., Пилецкая Л.И. *Определение максимальной удельной нагрузки в паре «опорная поверхность вала – втулка подшипника» // Машиностроение. – Мн., 2007. – Вып. 23. – С.*

Приведена методика для расчета максимальной удельной нагрузки в паре трения «опорная поверхность вала – втулка подшипника». Определена максимальная удельная нагрузка в зависимости от изменения угла контакта, вследствие изнашивания элементов пары, для валов различной массы. – Ил.4, Библиогр.3.

УДК 519.28:620.171

Богданович А.В., Андрияшин В.А., Тюрин С.А., Воробьев В.В., Еловой О.М., Замятин В.О., Комиссаров В.В. *Новые методы испытаний моделей силовых систем машин и оборудования // Машиностроение. – Мн., 2007. – Вып.23. – С.*

В докладе описаны методы и технологии износоусталостных испытаний моделей наиболее широко распространенных компонентов современных машин и оборудования – силовых систем. Важным достоинством описанных методов является то, что они обеспечивают проведение ускоренных лабораторных испытаний типичных моделей – по основным видам комплексного износоусталостного повреждения. –Ил.8. Библиогр.8.

УДК 621.94.084

Жмайлик В.А., Захарик А.М., Захарик Ал.М., Гоман А.М., Солитерман Ю.Л., Комиссаров В.В., Сосновский Л.А. Анализ прочностной надежности шестерен главной пары ведущего моста автомобилей семейства МАЗ-5440 // Машиностроение. – Мн., 2007. – Вып. 23. – С.

Рассмотрены результаты теоретических и экспериментальных исследований по прогнозированию надежности и долговечности зубчатых зацеплений, а также определению сопротивления материалов зубчатых колес контактной и изгибной усталости. Показано, что решение данной задачи возможно при комплексном использовании трех различных методов – Ил. 4. Табл. 3. Библиогр. 10.

УДК 539.3

Журавков М. А., Щербаков С. С. Сопряженное напряженное состояние силовой системы ролик/кольцо в условиях контактного взаимодействия и изгиба// Машиностроение. – Мн., 2007. – Вып.23. – С.

Рассматривается напряженное состояние силовой системы ролик/кольцо при контактном взаимодействии ролика и кольца и изгибе последнего. Такое напряженное состояние было названо сопряженным, чтобы подчеркнуть его особенность.

Распределение контактных напряжений было получено на основе численного интегрирования решений задач Буссинеска и Черрути по области распределения эллиптического контактного давления. Напряженное состояние при изгибе кольца получено на основе теории изгиба.

Сопряженное напряженное состояние в силовой системе ролик/кольцо получено путем суперпозиции полей напряжений, обусловленных как действием нормальных и касательных эллиптически распределенных контактных усилий, так и изгибом кольца. Проанализировано изменение напряженного состояния по сравнению с решением как чисто контактной задачи, так и задачи чисто объемного деформирования.

Приведены результаты конечноэлементного компьютерного моделирования напряженного состояния системы ролик/ кольцо. – Ил. 3. Табл. 3. Библиогр. 10.

УДК 539.3

Щербаков С. С. Опасные объемы как меры поврежденности // Машиностроение. – Мн., 2007. – Вып.23. – С.

Особый класс механических систем, которые называют силовыми, характеризуется тем, что их напряженно-деформированное состояние обусловлено как полем напряжений вызванных контактным взаимодействием элементов системы, так и полем напряжений, вызванных общими нагрузками (изгиб, растяжение-сжатие, кручение и т.д.). Такое напряженное состояние в общем случае трехмерно. Поэтому при усталостном нагружении повреждения образуются не в одной лишь точке или опасном сечении, а в некотором объеме. Такие объемы были названы опасными.

В настоящей работе предложен общий метод определения опасных объемов и поврежденности типичных силовых систем. На примере контактного взаимодействия двух де-

формируемых твердых тел показано формирование опасных объемов в условиях трехмерного напряженного состояния. – Ил. 3. Табл.1. Библиогр.4.

УДК 539.43

Еловой О.М. Оценка характеристик износоусталостного повреждения в локальных зонах испытываемой модели силовой системы // Машиностроение. – Мн., 2007. – Вып.23. – С.

Рассмотрен оригинальный способ изучения кинетики износоусталостного повреждения локальных точек (зон) модели силовой системы. Введены понятия локальных характеристик износоусталостного повреждения. Показано, что они нестационарны в пределах одного цикла и представляют собой случайный процесс. Предложено семейство локальных кривых контактной усталости, построенных по критерию предельного дискретного износа. – Ил. 5, Табл.1. Библиогр.6.

УДК 625.143

Сосновский Л.А., Матвеев В.И., Кебилов А.А. Критерий механического состояния стали и его экспериментальная апробация при оценке критического состояния рельсов // машиностроение. – мн., 2007. – вып.23. – с.

Предложен критерий механического состояния стали, базирующийся на взаимосвязи предела контактной усталости, предела выносливости при изгибе, предела прочности и твердости. Установлены значения этих характеристик, определяющие переход стали в критическое состояние по критерию сопротивления усталости – как при контактном, так и при изгибном нагружении. Разработана методика оценки механического состояния рельсовой стали. Выполнены экспериментальные исследования нетермоупрочненных рельсов типа Р50 после длительной эксплуатации в условиях Минского метрополитена. Изучен характер распределения твердости по поверхности качения головки рельса, установлены характерные зоны ее деформирования. Выполнены микроструктурные исследования материала рельсов в поверхностной зоне контакта с колесом. В ходе выполненных экспериментов получены подтверждения разработанного критерия. – Ил. 3. Табл. 1. Библиогр. 16.

УДК 519.28:620.171

Сосновский Л.А., Щербаков С.С. Анализ трения в силовой системе // Машиностроение. –Мн., 2007. –Вып.23. –С.

Изложены три подхода к анализу трения в силовой системе. Согласно первому подходу устанавливается комплексный показатель трения (или индекс трения), определяемый как соотношение циклического напряжения и удельной силы трения; величину, обратную индексу трения, называют параметром трения в силовой системе. Согласно второму подходу сила и коэффициент трения определяют, используя обобщенный закон Гука, с учетом деформаций, обусловленных как контактной, так и внеконтактной нагрузками, а также температуры. Согласно третьему подходу, коэффициент трения в силовой системе определяют как функцию проскальзывания – с учетом действия как контактной, так и внеконтактной нагрузок. Показано, что коэффициент трения в силовой системе, как правило, больше или меньше (в зависимости от условий нагружения) традиционного коэффициента трения (при качении или скольжении) в паре трения. Дано экспериментальное подтверждение этого вывода. – Ил.2. Библиогр.7.

УДК 620.178.16

Костюченко А.А., Бордовский А.М., Воробьев В.В. Особенности деформирования и разрушения труб нефтепроводов // Машиностроение. –Мн., 2007. –Вып.23. –С.

Проведено испытание натурной крупномасштабной трубной шлети внутренним давлением. Разрушение произошло со следующей особенностью: образование и развитие продольной (вдоль образующей трубы) трещины шло не по сварному шву, как это обычно бывает, а по протяженному пятну коррозионного повреждения. Такого рода повреждения обнаруживаются только после длительной (порядка 30 лет) эксплуатации нефтепровода. Отсюда следует важнейшее с практической точки зрения заключение: прогнозирование остаточной долговечности линейно части нефтепровода после срока амортизации должно выполняться, прежде всего, по критерию коррозионно-механической и коррозионно-эрозионной усталости. –Ил.6. Библиогр.2.

УДК 539.538

Махутов Н.А., Сосновский Л.А. Динамика, прочность и износостойкость машин и оборудования // Машиностроение. –Мн., 2007. –Вып.23. –С.

Изложена методология трибофатики – науки о закономерностях износоусталостного повреждения силовых систем. Отмечено, что неучет таких закономерностей ведет к неправильной оценке работоспособности силовых систем по критериям сопротивления усталости и износостойкости. Актуальным является подход, согласно которому ведется анализ динамики, прочности, износостойкости современных машин и оборудования в их органической взаимосвязи. Отличается своевременность и полезность включения курса «Основы трибофатики» в учебные планы технических университетов. –Ил.4. Табл.2. Библиогр.8.

УДК 621.878

Пахарев Д. В., Соломевич П. А., Кравчук А. С., Карпыза С. А. Исследование кинематики рабочего оборудования экскаватора-погрузчика нового поколения// Машиностроение. - Мн., 2007. - Вып. 23-С.

Разработана кинематическая модель погрузочно-экскаваторного оборудования в соответствии со стандартами: СТБ ИСО 7131-2001; SAE J49 Revised APR80. - Ил. 3. Табл. 2. Библиогр. 5.

УДК 621.825.5

Николаев В.А., Дворянчиков Д.А. Влияние коэффициента динамической чувствительности на проектирование привода машинного агрегата // Машиностроение. – Мн., 2007. – Вып. 23. – С.

Зная значения максимального момента срабатывания предохранительной муфты в рассматриваемой точке, можно решить вопрос о постановке муфты в данном месте или переносе его в менее динамичную зону привода. – Ил. 2.

УДК 629.113.65

Пирч А.И., Саболевский А.К., Астахов Э.И. Определение параметров подвеса маховика физической модели автомобиля с маховичным двигателем // Машиностроение. – Мн. 2006. – Вып.23. – С.

Рассмотрены динамические нагрузки на корпус маховика, возникающие при движении модели автомобиля при различных углах. Определены параметры подвеса корпуса маховика к раме модели. – Ил.2

УДК 621.01

Гарах В.А., Астахов Э.И. Динамический анализ нагруженности подшипников рычажного механизма стенда для испытания гусениц // *Машиностроение*. – Мн., 2007 – Вып.23. – С.

Показана методика динамического силового расчёта рычажного механизма стенда с определением реакций в подшипниках от действия внешних сил сопротивления гусениц, сил веса и инерционных нагрузок. Даны рекомендации по результатам анализа полярных диаграмм нагруженности подшипников. – Ил. 3. Библиогр.3.

УДК 621.1; 621,7.

Зубко С.А. Характер развития трещины при испытании стального образца на усталость. // *Машиностроение* -- Мн., 2007 – Вып. 23 – С.

Описан характер развития трещины в процессе испытания стального образца на усталость. Методом голографической интерферометрии отображена зона деформации в вершине растущей трещины усталости в стальном образце. При критическом напряжении происходит скачкообразный рост трещины на величину зоны деформаций в вершине трещины. С увеличением нагрузки цикл повторяется. -- Ил.3. Библиогр. 3.

УДК 539.3

Василевич Ю.В., Остриков О.М. Способ расчета полей смещений у клиновидного двойника // *Машиностроение*. – Мн. 2007. – Вып. 23. – С.

Разработана дислокационная модель клиновидного двойника, на основании которой предложен способ расчета полей смещений при условии непрерывного распределения двойникующих дислокаций на двойниковых границах. – Ил.3 Библиогр. 11.

УДК 548.24

Остриков О.М., Василевич Ю.В. Анализ напряженного состояния у вершины клиновидного механического двойника // *Машиностроение*. – Мн., 2007. – Вып. 23. – С.

На основании дислокационной мезоскопической модели исследовано напряженное состояние у вершины клиновидного двойника. Показано, что напряжения существенно зависят от баланса плотностей двойникующих дислокаций на противоположных двойниковых границах. – Ил. 3. Библиогр.2.

УДК 621.38.049.76

Колешко В. М., Гулай А. В., Гулай В. А. Моделирование токопереноса в туннельных сенсорных МДМ-наноструктурах // *Машиностроение*. — Мн., 2007. — Вып. 23. — С.

Выполнен анализ механизмов токопереноса в туннельных МДМ-наноструктурах. Изложен процесс получения туннельных сенсорных МДМ-наноструктур на основе оксидов редкоземельных элементов. Рассчитаны электрофизические параметры туннельных сенсорных МДМ-наноструктур в зависимости от их топологии и условий эксперимента. — Ил. 3. Табл. 1. Библиогр. 4.

УДК 621.762

Жданович Г.М., Бобруйко Ю.П., Якацук Ф.Ф. Деформационный механизм уплотнения порошкового тела // *Машиностроение*. – Мн., 2007. – Вып.23.- С.

Получена общая зависимость площади относительного контактного сечения от плотности, описывающая деформационный механизм уплотнения порошкового тела, который учитывает упругую, пластическую и структурную (межчастичную) компоненты деформации. Представленное аналитическое выражение позволяет с высокой точностью определять параметры технологических процессов получения порошковых изделий сложной формы. – Библиогр.2.

УДК 621.313.04

Аваков С.М. Методика определения способности обнаружения изолированных дефектов при автоматическом контроле оригиналов топологии на фотошаблонах методом сравнения с проектными данными // Машиностроение. – Мн., 2007. – Вып.23. – С.

Предложена методика определения обнаружительной способности для оборудования автоматического контроля оригиналов топологии, позволяющая точно определить количество испытаний, необходимых для подтверждения вероятности обнаружения дефектов. – Ил.3. Табл.2. Библиогр.4.

УДК 539.2+621.385.833.2

Трушко А.В., Чижик С.А., Кузнецова Т.А., Шкадаревич А.П., Курганович А.М., Городкин Г.Р., Глеб Л.К. Контроль шероховатости оптических поверхностей методом атомно-силовой микроскопии // Машиностроение. – Мн., 2007. – Вып.23. – С.

Методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) исследовались поверхности оптических призм, обработанных по магнитореологической полировальной технологии различными суспензиями; модифицированных многослойным покрытием; а также после эксплуатации в лазерном резонаторе. Были определены параметры шероховатости и выявлены единичные дефекты оптических поверхностей. Показана эффективность комплексного АСМ контроля при оптимизации режимов технологии получения оптических поверхностей. – Ил.4. Табл.1 Библиогр.6.

УДК 669.071

Мойсейчик Е.А. Макроструктура арматурных стержней // Машиностроение.-Мн., 2007.-Вып.23.- С.

Исследована макроструктура арматурных стержней производства РУП БМЗ и Челябинского МК. Установлено, что прокат арматурный имеет слоистое строение с 5-ю соосно расположенными слоями, имеющими различные механические свойства, а арматурный стержень можно рассматривать как композитный стержень со слоистой структурой. Величины микротвердости слоев, измеренные в поперечных и продольных сечениях одного и того же стержня, отличаются между собой. – Ил.7. Табл.2. Библиогр. 3.

УДК 539.3

Неумержицкая Е.Ю. Метод расчета тепловых режимов охлаждения однородных пластин // Машиностроение. – Мн., 2007. – Вып.23. – С.

Разработан метод расчета тепловых режимов охлаждения однородных пластин с разными коэффициентами теплоотдачи на поверхностях. – Библиогр.1.

УДК 539.376

Стеликов Н.Е. Кинетическое моделирование ползучести при кручении // Машиностроение. – Мн., 2007. – Вып.23. – С.

Развита кинетическая теория ползучести для кручения на основе моделирования изменения распределения касательных напряжений по сечению во времени. – Ил. 3. Библиогр.9.

УДК 519.865

Похабов В.И., Кличевская В.Е. *Планирование логистического управления промышленным предприятием // Машиностроение. – Мн., 2007. – Вып.23. – С.*

Рассмотрена методика оптимизации движения и использования материального потока. Предложена модель планирования материального потока и организационная структура логистического управления предприятием. Предложен показатель оценки эффективности материального потока с позиции логистики. – Ил. 2. Табл.2.

УДК 658.51

Стельмах Е.В., Торская И.В. *Роль стратегических ресурсов в деятельности промышленного предприятия // Машиностроение. – Мн., 2007. – Вып.23. – С.*

Рассмотрены и разграничены понятия ресурсов производственной системы и ее стратегических ресурсов. На основе системного анализа определены подходы к выявлению стратегических ресурсов предприятия и показана необходимость оценки их качества. Дана классификация стратегических ресурсов производственной системы. Проанализированы производственно-технологические и организационно-инновационные ресурсы на РУП «Минский тракторный завод». Ил. 1. Библиогр. 4.

УДК 658:339.137

Торская И. В., Мацыха Е. В. *Оптимизация товарного портфеля промышленного предприятия как фактор роста его конкурентных преимуществ // Машиностроение. – Мн., 2007. – Вып.23. – С.*

Рассмотрено понятие товарного портфеля предприятия, цели его оптимизации. Рассмотрены инструменты, позволяющие позиционировать предприятие в бизнес-пространстве, спрогнозировать желаемое состояние и выявить направления дальнейшего развития. С помощью ряда моделей стратегического позиционирования предложены варианты по оптимизации товарного портфеля РУП «МТЗ» и обоснованию его конкурентной стратегии. – Ил. 1. Табл. 3. Библиогр. 5.

УДК 681.3.01:339.138

Волченков А.А., Лавренова О.А. *Анализ инструментов Web-сайта для работы с интернет-аудиторией // Машиностроение. – Мн., 2007. – Вып.23. – С.*

Выполнен анализ задач, решаемых на современном этапе с помощью Web-сайта. Выполнена классификация современных инструментов для работы с Интернет-аудиторией. Определены особенности использования инструментария. – Ил.1 Библиогр.4.

УДК 681.3.01:339.138

Червяк Е.А., Лавренова О.А. *Особенности применения моделей расчета стоимости интернет-рекламы// Машиностроение. – Мн., 2007. – Вып.23. – С.*

Рассмотрены особенности ценовых моделей интернет-рекламы. Определены особенности применения моделей расчета стоимости интернет-рекламы с точки зрения издателя и рекламодателя. – Ил. 1. Табл.1 .Библиогр.6.

УДК 681.3.04:003.13

Грицук Г.В., Лавренова О.А. Оценка экономической эффективности работы Web-представительства // Машиностроение. – Мн., 2007. – Вып.23. – С.

Рассмотрены методы оценки эффективности Интернет-сайта и их значение для деятельности предприятия. Проведен расчет оценки экономической эффективности сайта как средства коммуникации. – Табл.3. Библиогр.5.

УДК 681.3.01:339.138

Повжик М.И., Лавренова О.А. Анализ и особенности формирования Интернет-бренда в условиях современной конкуренции// Машиностроение. - Мн., 2007. – Вып.23. – С.

Рассмотрены особенности ведения брендинга в Интернет, его отличительные особенности и факторы, оказывающие влияние на формирование брендов. Проведен анализ сайтов белорусских промышленных предприятий и их роль в формировании положительного образа. – Ил. 2. .Библиогр.6.

УДК 658.512

Калинкин Г.А. Социально - экономическая концепция рациональной организации основных процессов поточного производства в машиностроении // Машиностроение. - Мн., 2007. - Вып.23. - С.

Предложено различать основные (общие) и локальные (частные) принципы организации производственных процессов. В качестве основных (общих) сформулированы принципы: соответствия, альтернативности и оптимальности. Принцип соответствия организации производственного процесса требованиям сохранения здоровья участвующих в нем рабочих (принцип соответствия) реализуется в поточном производстве посредством установления нормальной напряженности труда рабочих-операторов. Предлагается различать: расчетный такт, нормативный рабочий такт и принятый рабочий такт. Показано, что расчетный такт, как функцию производственной программы, неправомерно применять в качестве норматива для регламентирования работы поточной линии. Предлагается регламентировать работу поточной линии в соответствии с нормативным рабочим тактом, как функцией научно обоснованной нормы труда. Это позволит организовать производственный процесс по принципу «Рабочие управляют конвейером» и тем самым решить на предприятии важнейшую социальную проблему. Реализация сформулированных автором принципов альтернативности и оптимальности с учетом критериев и ограничений позволяет создавать экономически эффективные производственные процессы.

УДК 338.24

Ефименко А.Г. Современные подходы к управлению производством // Машиностроение. – Мн., 2007.- Вып. 23. – С.

Рассмотрены современные подходы к управлению машиностроительным производством на основе принципов логистики. Современной базой управления логистическими процессами для руководителя является использование экономико – математических моделей. - Библиогр.9.

УДК 621.01

Анципорович П.П., Акулич В.К., Дворянчикова А.Б., Дубовская Е.М. Моделирование динамики машинного агрегата в лабораторном практикуме по теории механизмов и машин // Машиностроение. – Мн., 2007. – Вып. . – С.

В статье излагается методика определения закона движения главного приводного вала технологической машины с учетом раздельного влияния динамических характеристик приводного двигателя и исполнительного механизма, а также механической характеристики технологического процесса. Предлагаемая методика может быть использована для математического моделирования динамики машинного агрегата при установившемся режиме движения с целью реализации многовариантного численного эксперимента в процессе схемного проектирования. Разработано соответствующее программное обеспечение, которое используется в лабораторном практикуме по теории механизмов и машин для студентов инженерно-технических специальностей БНТУ. – Ил. 2. . Библиогр. 3.

УДК 681.3

Анципорович П.П., Алейникова О.И., Булгак Т.И., Луцко Н.Я. Курсовое проектирование в дисциплине «Информатика» // Машиностроение. – Мн., 2007. – Вып.23. – С.

Изложены принципы разработки заданий и методика курсового проектирования по дисциплине «Информатика». – Библиогр.6.

УДК [17+37]:378(476)

Клименко В.А. Философско-педагогические основы гуманизации и гуманитаризации образования в высшей технической школе //Машиностроение.-2007.-Вып. 23.

В статье рассмотрена роль гуманитарного образования в формировании ключевых компетенций современного специалиста, выявлены основные принципы гуманизации и гуманитаризации обучения в высшей технической школе.

Научное издание

МАШИНОСТРОЕНИЕ

РЕСПУБЛИКАНСКИЙ МЕЖВЕДОМСТВЕННЫЙ
СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

Выпуск 23

Ответственный за выпуск А.И. Бачанцев
Технический редактор М.И. Гриневиц
Компьютерная верстка Н.В. Руднева

Подписано в печать 16.10.2007.

Формат 60×84¹/₈. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 52,74. Уч.-изд. л. 20,89. Тираж 70. Заказ 1146.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.

ЛИ № 02330/0131627 от 01.04.2004.

220013, Минск, проспект Независимости, 65.