

На правах рукописи

КАРАН АЛЕКСЕЙ ДМИТРИЕВИЧ

**ХОЛОДНОЕ НАКАТЫВАНИЕ ЗУБЧАТЫХ И ШЛИЦЕВЫХ  
ПРОФИЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО ЗАЦЕПЛЕНИЯ НА СПЕЧЕННЫХ  
ПОРОШКОВЫХ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗАГОТОВКАХ**

Специальности: 05. 03.05 – технологии и машины  
                                обработки давлением  
                                05.16.06 – порошковая металлургия и  
                                композиционные материалы

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт–Петербург  
2005

Работа выполнена на кафедре «Машины и технология обработки металлов давлением» в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель по специальности 05. 03.05 – технологии и машины обработки давлением:

доктор технических наук, профессор Востров Владимир Николаевич.

Научный руководитель по специальности 05.16.06 – порошковая металлургия и композиционные материалы:

кандидат технических наук, доцент Кузнецов Павел Алексеевич.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор  
Дурнев Василий Дмитриевич,

кандидат технических наук, доцент  
Котов Сергей Анатольевич.

Ведущая организация – ОАО «Красный Октябрь» (г. Санкт-Петербург).

Защита диссертации состоится 17 мая 2005г.

В 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.19 в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу:

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, лабораторно-аудиторный корпус, кафедра «Машины и технология обработки металлов давлением».

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан 16 апреля 2005г.

Ученый секретарь диссертационного  
совета, доктор технических наук,  
профессор

Востров В.Н.

# ХОЛОДНОЕ НАКАТЫВАНИЕ ЗУБЧАТЫХ И ШЛИЦЕВЫХ ПРОФИЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО ЗАЦЕПЛЕНИЯ НА СПЕЧЕННЫХ ПОРОШКОВЫХ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗАГОТОВКАХ

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В современных энергетической, сельскохозяйственной, пищевой и других отраслях машиностроения все шире используются детали, в том числе и с зубчатым профилем, из композиционных пористых материалов. Применение композиционных порошковых материалов позволяет существенно повысить эксплуатационные характеристики изделий: прочность, износостойкость, коррозионную стойкость, термостойкость и другие вследствие использования преимуществ, как порошковых материалов, так и композитов. Технологии изготовления зубчатых профилей методами порошковой металлургии трудоемки, что связано с формированием сложного контура, получением необходимой точности и качества поверхности профиля. Теоретических и систематических экспериментальных исследований данных технологий не проведено. Имеющиеся рекомендации не являются достаточными для разработки расчетных моделей процессов, проектирования промышленных технологий и соответствующего оборудования.

Этим обусловлена актуальность работы, посвященной разработке технологии изготовления зубчатых и шлицевых профилей внутреннего зацепления накатыванием на спеченных пористых биметаллических заготовках.

Цель работы – разработка научно обоснованных методик расчета параметров и основ проектирования процессов объемного формообразования накатыванием зубчатых и шлицевых профилей внутреннего зацепления с модулем от 0,5 до 2,0 мм на спеченных порошковых биметаллических заготовках, разработка и внедрение на этой основе технологий получения данных профилей, обеспечивающих уменьшение трудоемкости, материалоемкости и улучшение качества изделий машиностроения.

Методы исследования. Статистические модели получены методами регрессионного анализа. При реализации экспериментов использованы методы тензометрии и микроанализа. Варианты технологий изготовления пористых зубчатых колес исследованы методами системного анализа.

Достоверность полученных результатов обеспечена применением математической статистики при обработке экспериментальных данных и оценкой адекватности разработанных статистических моделей реальным процессам.

Научная новизна работы заключается в разработке нового способа и научно обоснованных методик проектирования технологий накатывания порошковых биметаллических зубчатых и шлицевых профилей внутреннего зацепления, основанных на результатах выполненных исследований, включающих:

- классификацию способов объемного формообразования пористых зубчатых и шлицевых профилей и методику оценки рациональности их применения

методами системного анализа, на основе которых предложены новые перспективные технологии изготовления пористых биметаллических зубчатых колес и деталей со шлицами внутреннего зацепления, обеспечивающие снижение себестоимости и повышение качества изделия;

- научно обоснованную методику проектирования технологических параметров процесса холодного накатывания внутренних зубчатых и шлицевых профилей с модулем зацепления от 0,5 до 2,0 мм на спеченных пористых биметаллических заготовках, позволившую с использованием математических моделей параметров процессов на стадии разработки технологии осуществить выбор технологических режимов, оборудования и инструмента, определить возможность изготовления и косвенное прогнозирование эксплуатационных характеристик деталей;
- разработанные и реализованные в промышленном производстве технологии изготовления типовых деталей внутреннего зацепления, проектируемые с применением научно обоснованных в диссертации методик расчета и рекомендаций;
- методики и стенды для экспериментального исследования технологий, позволившие установить закономерности процессов формообразования накатыванием внутренних зубчатых и шлицевых профилей и построить статистические модели параметров процесса;
- классификацию, объединяющую показатели качества и дефекты пористых биметаллических зубчатых венцов, формообразованных холодным накатыванием, с помощью которой установлены причины и разработаны способы устранения дефектов.

Практическая ценность и реализация работы. На основе предложенных в диссертации способа, методик расчета и установленных закономерностей процессов формообразования порошковых биметаллических зубчатых профилей внутреннего зацепления, результатов исследования параметров разработаны при личном участии автора новые технологии получения внутренних зубчатых и шлицевых профилей методами холодной объемной штамповки на ряде предприятий сельскохозяйственной и пищевой промышленности. Внедрение технологий обеспечивает уменьшение массы зубчатых колес в 1,3...1,7, повышение прочности и стойкости зубчатых венцов в 1,5...2,0 раза, снижение уровня шумов на 20...30%.

Новая технология может использоваться при производстве машин для обработки пищевых продуктов, льноуборочных, хлопкоуборочных, текстильных и бытовых машин, насосов, электромоторов, часовых механизмов, редукторов роботов, автомобильных коробок передач, деталей космических аппаратов и других, где недопустимо применение смазочных материалов, а также предъявляются высокие требования к уровню шума и габаритно-массовым характеристикам.

Публикации и апробация работы. Материалы работы опубликованы в 7 печатных трудах. Результаты работы доложены и обсуждены на международных и республиканских научно-технических конференциях в Санкт-Петербурге – 2002 г, 2003 г., 2004 г. Работа обсуждена и одобрена на

кафедре «Машины и технология обработки металлов давлением» Санкт–Петербургского государственного политехнического университета в 2004 году.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 разделов, основных выводов, списка литературы из 86 наименований. Содержит 108 страниц машинописного текста, 85 рисунков и 17 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность, сформулирована цель и приведены основные результаты работы.

### 1. СОСТОЯНИЕ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ И ДРУГИХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ПРОФИЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО ЗАЦЕПЛЕНИЯ ИЗ ПОРОШКОВЫХ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ, ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обзор проблем производства конструкционных деталей методами порошковой металлургии показал, что потребность в них превышает 60% общей потребности изделий порошковой металлургии. Стоимость зубчатого колеса из пористого материала составляет 40...45% от его стоимости по традиционной технологии из компактного материала.

Согласно прогнозу специалистов из Европейской Ассоциации Порошковой Металлургии к 2007 году применение порошковых зубчатых колес в автомобильных коробках передач вырастет на 53% по сравнению с 2000 годом. Причем как в ручной, так и в автоматической системе передач.

Процессы формирования внутренних зубчатых профилей резанием являются трудоемкими и малопроизводительными. Трудоемкость их изготовления составляет 70...80% общей трудоемкости обработки детали. Низкая производительность оборудования требует значительного парка станков и больших производственных площадей.

Анализ возможных альтернатив создания изделий сельскохозяйственного, текстильного, пищевого и других отраслей машиностроения показывает, что для решения этих задач наиболее перспективны технологии изготовления деталей внутреннего зацепления из пористых биметаллических материалов, основанные на объемном формообразовании. Систематических исследований данных методов не проведено. На пути их практического освоения сделаны лишь первые шаги.

Поиск новых технических решений по совершенствованию технологии и расширению номенклатуры деталей с зубчатыми, шлицевыми и другими периодическими профилями, изготавливаемых методами объемной штамповки из пористых материалов, затруднен из–за отсутствия классификации.

Подход к процессам получения методами объемной штамповки деталей с периодическими профилями из пористых композиционных материалов как к технологической системе, совершенствование которой происходит во взаимосвязи с основными направлениями работ по экономии ресурсов в

машиностроении, показывает необходимость решения задачи на основе достижений и дальнейшего развития теории и технологии малоотходных процессов объемной штамповки деталей и точных заготовок.

Отмечается, что большой вклад в создание технологий изготовления пористых зубчатых и шлицевых профилей, внесли труды ученых в различных направлениях объемной штамповки порошковых и компактных материалов: Аксенова Л.Б., Богоявленского К.Н., Вострова В.Н., Головина В.А., Дмитриева А.М., Дорофеева Ю.Г., Дорошкевича Е.А., Евстратова В.А., Евстифеева В.В., Иванова К.М., Лясникова А.В., Мертенса К.К., Мишунина В.А., Навроцкого Г.А., Овчинникова А.Г., Оленина Д.Д., Павлова Н.Н., Ренне И.П., Риса В.В., Рудского А.И., Степанского Л.Г., Фаворского В.Е., Целикова А.И., *Lange K., Veldman G., Volkner W., Pasek V., Schmit R.* и многих других.

Благодаря выполненным работам, выявлены основные условия формообразования периодических профилей в зависимости от характера напряженного и деформированного состояний, качества поверхности и других факторов. Предложено несколько гипотез, объясняющих механизм течения металла. На основе феноменологического подхода теории пластических деформаций металлов и экспериментальных исследований для ряда методов объемного формообразования пористых деталей получены зависимости силовых параметров процессов и прочностных свойств изготавливаемых деталей.

Однако возникают новые задачи, связанные, в частности, с расширением номенклатуры пористых биметаллических материалов, деформируемых малоотходными методами объемной штамповки, поиском экономичных и эффективных технологий. Не найдено оптимальное соотношение между критериями цена–качество.

В результате проведенного анализа поставлены основные задачи исследования:

1. Разработать классификацию способов объемного формообразования пористых зубчатых и шлицевых профилей и методику оценки рациональности их применения методами системного анализа, на основе которых предложить новые перспективные технологии изготовления пористых биметаллических зубчатых и шлицевых профилей внутреннего зацепления, обеспечивающие снижение себестоимости и повышение качества изделия.
2. Разработать научно обоснованные методики проектирования технологических параметров процесса холодного накатывания внутренних зубчатых и шлицевых профилей с модулем зацепления от 0,5 до 2,0 мм на спеченных пористых биметаллических заготовках, позволяющих с использованием математических моделей параметров процессов на стадии проектирования технологии осуществить выбор технологических режимов, оборудования и инструмента, оценку возможности изготовления и косвенное прогнозирование эксплуатационных характеристик деталей.

3. Разработать регрессионные модели основных технологических параметров процессов холодного накатывания зубьев на спеченных пористых биметаллических заготовках.
4. Разработать методики и стенды, для экспериментального исследования технологических параметров процессов, с целью установления закономерностей формообразования внутренних периодических профилей на пористых биметаллических заготовках и построения статистических моделей.
5. Разработать классификацию, объединяющую показатели качества и дефекты пористых биметаллических зубчатых венцов, формообразованных холодным накатыванием, с помощью которой установить причины возникновения и предложить способы устранения дефектов.

## 2. РАЗРАБОТКА КЛАССИФИКАЦИИ СПОСОБОВ ОБЪЕМНОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПОРИСТЫХ ДЕТАЛЕЙ С ВНУТРЕННИМИ ПЕРИОДИЧЕСКИМИ ПРОФИЛЯМИ И ВЫБОР МЕТОДА ИЗГОТОВЛЕНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ВНУТРЕННЕГО ЗАЦЕПЛЕНИЯ

Классификация способов изготовления пористых зубчатых колес внутреннего зацепления построена на основе иерархического принципа по признаку вида операции: прессование, штамповка ротационная, штамповка с поступательным движением инструмента, методы резания.

Анализ классификации показал, что технологический процесс объемного формообразования пористых зубчатых колес внутреннего зацепления характеризуется высокими требованиями, предъявляемыми к производительности процесса, качеству, себестоимости изделия и другими показателями эффективности технологии. Задача проектирования данного техпроцесса имеет несколько решений. С точки зрения «внутренних» проблем предприятия технология формообразования детали внутреннего зацепления должна обеспечивать минимум издержек. Для потребителя оптимальным является соотношение цена–качество. Соотношение цена–качество принято в качестве целевой функции при выборе наилучшего способа изготовления пористых деталей с внутренними периодическими профилями.

Потребительские свойства пористых зубчатых венцов и шлицев определяют следующие физико–механические свойства: степень точности зубчатого венца  $F_1$ ; твердость поверхности зубьев  $F_2$ ; усталостная прочность зубьев  $F_3$ ; относительный износ зубчатого венца через 500 часов работы  $F_4$ ; плотность зубьев  $F_5$ ; высота микронеровностей поверхности зубьев  $F_6$ .

Выбор предпочтительного варианта технологического процесса изготовления пористых зубчатых венцов и шлицев выполняем по комплексному критерию качества  $Y$ , построенному на основании частных критериев, характеризующих физико–механические свойства изделия:

$$Y = 0,146 F_1 + 0,173 F_2 + 0,221 F_3 + 0,268 F_4 + 0,066 F_5 + 0,126 F_6 .$$

Формальным решением многокритериальной задачи является множество Парето, в котором на основе компромисса ищется оптимальное решение.

Сравнивались методы формирования пористых зубчатых венцов: 1 – горячее динамическое прессование, 2 – выдавливание, 3 – накатывание, 4 – зубофрезерование, 5 – зубодолбление, 6 – зубопротягивание. Установлено, что эффективными являются два варианта: 2 – выдавливание, 3 – накатывание.

Показатели качества на единицу стоимости для данных вариантов имеют следующие значения:

$$W_2 = 29,18 , \quad W_3 = 40,55 .$$

Таким образом, наилучшим методом изготовления пористых биметаллических профилей внутреннего зацепления по соотношению цена–качество является процесс накатывания. Данный процесс положен в основу разрабатываемой технологии.

Рис. 1. Способ объемного формообразования периодических профилей внутреннего зацепления на пористой биметаллической заготовке  
1 .Накатник; 2. Рабочий слой заготовки; 3. Основа заготовки;  
4. Матрица.



На основании анализа методов формирования пористых периодических профилей разработан способ накатывания внутренних зубчатых профилей на спеченной пористой биметаллической заготовке, с целью расширения технологических возможностей процессов объемной штамповки зубчатых венцов из порошковых материалов и повышения их качества. На способ подана заявка на изобретение.

Согласно предложенному способу (рис. 1), спеченную порошковую биметаллическую заготовку 2–3 устанавливают в матрицу 4. Заготовка 2–3 состоит из двух слоев: 2 – рабочий слой, 3 – основной слой. Рабочий слой 2 выполнен из материала, который обеспечивает необходимые эксплуатационные характеристики зубчатого венца. Основной слой изготавливается из дешевого материала. Зубчатый профиль формируется накатником 1 на внутренней поверхности заготовки 2–3. Накатник 1 совершает планетарное вращение и осевое перемещение. По окончании процесса накатывания зубьев готовую деталь извлекают из матрицы 4.

Одной из основных задач является определение оптимальных значений относительной толщины рабочего слоя  $h_p/h$ , где  $h$  – высота формообразуемого зуба.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХПРОЦЕССА НАКАТЫВАНИЯ ВНУТРЕННИХ ЗУБЧАТЫХ ПРОФИЛЕЙ НА ПОРИСТЫХ СПЕЧЕННЫХ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗАГОТОВКАХ

Исследование основных параметров процессов выполнялось на экспериментальном стенде, выполненном на базе токарного станка 1К62.

Энергосиловые параметры процесса накатывания периодических профилей фиксировались светолучевым осциллографом Н115 с усилительной станцией ТА–5. Тарировка цилиндрических месдоз проводилась образцовым динамометром ДС–30 кН, а кольцевых месдоз – ДС–150 кН. Тензодатчики имели базу 10..15 мм и сопротивление 120..150 Ом + 0,25%.

Контроль точности накатанных профилей велся по параметрам: радиальное биение зубчатого венца  $F_{rr}$  и колебание измерительного межосевого расстояния за один оборот  $F_{ir}$ ". Эксперименты показали, что точность периодических профилей, накатанных на пористых биметаллических заготовках, соответствует 9...10 степени точности по ГОСТ 1643–81, что отвечает требованиям, предъявляемым к черновой обработке зубчатых колес.

Оценка микрогеометрии поверхностей накатника, заготовки и формообразованных зубьев выполнялась на основании анализа профилограммы методом фильтрации. Фильтрация осуществлялась путем построения амплитудного спектра профиля с использованием разложения в тригонометрический ряд Фурье. Непараметрическая оценка профиля включала вычисление и графическое отображение опорной линии профиля, плотности распределения ординат и тангенсов углов ее наклона как в размерной, так и

безразмерной форме. Определение микрогеометрии исследуемых поверхностей выполнялось на измерительно-вычислительном комплексе, изготовленном на базе профилометра-профилографа К-201. Установлено, что показатели качества поверхности накатанных профилей соответствуют  $6a...6b$  классам шероховатости при поверхности зубьев накатников отвечающей  $7b$  классу.

Металлографические исследования проводились с целью выявления дефектов и изучения влияния степени пластической деформации на структуру пористых биметаллических зубчатых и шлицевых венцов. Анализ микроструктуры показал: процесс холодного накатывания оказал значительное влияние на физико-механические свойства формообразованных периодических профилей. Текстура зубчатого венца, имеет значительную неоднородность. Частицы материала имеют форму, отличную от равноосной. Наибольшая разность частиц достигается во впадинах зуба, так как данная область деформируется интенсивнее других. Зерна приобретают форму вытянутой строчной ориентации в тангенциальном направлении. Вследствие пластического течения, происходит дробление окисных пленок, межчастичных включений и образование прочных контактов между частицами.

Исследования показали, что в процессе накатывания зубьев плотность зубчатого венца увеличилась по сравнению с заготовкой на 10...15% и приблизилась к компактной. Относительная плотность достигла 0,90...0,95. Возникающая в процессе формообразования анизотропия материала, способствовала повышению прочности зубчатых и шлицевых венцов и снижению напряжений в зонах их концентрации в процессе эксплуатации.

Механические свойства, отражающие качество зубчатых колес, оценивались по параметрам: износостойкость и прочностные характеристики зубьев, наличие трещин в зубчатом венце и в поверхности раздела материалов рабочего слоя и основы.

Испытания на прочность и износостойкость порошковых биметаллических зубчатых колес изготовленных накатыванием проводились на специализированном стенде.

Испытания показали, что прочность зубчатых венцов изготовленных накатыванием на пористых спеченных заготовках превосходит прочность пористых зубчатых колес, изготовленных методами резания в 1,5...2,0 раза.

За предельную величину износа принята  $\Delta G = 0,05\%$ . Скорость вращения и сила нагружения испытуемых зубчатых колес в процессе экспериментов были одинаковыми. Продолжительность испытаний зубчатых колес 400 часов. К этому времени износ колес асимптотически приблизился к постоянной величине. Ввиду длительности проведения эксперимента получить значение, при котором наступает предельный износ, не удалось. Лучший результат по износоустойчивости среди порошковых биметаллических деталей при работе в условиях отсутствия смазочного материала имели зубчатые колеса с рабочим слоем из материала Д05Н5.

На износостойкость зубчатых профилей существенное влияние оказывают свойства материала заготовки, качество поверхности, точность

формообразованных зубьев и коррозирующее воздействие сопряженной детали. Для улучшения адгезионных свойств, целесообразно увеличить твердость зубчатого венца методами термообработки. Повышению износостойкости способствует пропитка зубчатого венца маслом.

Результаты испытаний, показали, что стойкость накатанных зубчатых колес в 1,4...2,2 раза выше изготовленных резанием. Износостойкость накатанных зубчатых колес удовлетворяет техническим требованиям, так как их срок службы должен составлять не менее двух месяцев непрерывной работы, после чего заменяется весь узел.

Порошковые биметаллические зубчатые колеса с рабочим слоем из РМ225Н, полученные холодным накатыванием, по своим механическим свойствам приближаются к изделиям, изготовленным из компактных углеродистых и низколегированных сталей, и могут применяться в механизмах со средней степенью нагружения.

Качество биметаллических пористых деталей с внутренними зубьями и шлицами, изготовленными накатыванием, представляет собой комплекс параметров, оцениваемых по точности, качеству поверхности, механическим свойствам и эксплуатационным характеристикам зубчатого венца.

Точность зубчатых колес определяется точностью зубчатого венца и величиной осевого облоя. Формообразование неполного профиля зубьев является следствием неправильного выбора внутреннего диаметра заготовки и возможностью течения металла в осевом направлении. Точность зубчатого венца существенно зависит от точности заготовки, инструмента и оборудования, а также жесткости оборудования.

Дефектами качества поверхности зубьев являются: шелушение поверхности зубьев, задиры и превышение высоты микронеровностей допустимой величины.

Трещины в основании зуба могут образоваться на заключительном этапе обработки, когда формообразование зубьев осуществляется не только за счет уплотнения материала, но и обратного выдавливания. При этом возникают значительные растягивающие напряжения в радиальном направлении. Для устранения данного дефекта, необходимо улучшить прочностные характеристики рабочего слоя, изменить режимы прессования заготовки, ее пористости или заменить материал.

Трещины на вершине зуба возникают на начальном этапе его формообразования. Это является следствием возникновения растягивающих напряжений в тангенциальном направлении в области вершины зуба. Устранить дефект можно повышением пластичности материала рабочего слоя.

Возможные дефекты зубчатых венцов, накатанных на пористых биметаллических заготовках, систематизированы. Разработаны методы устранения дефектов.

Анализ дефектов позволил определить область оптимальных значений относительной толщины рабочего слоя  $h_p/h$ , где  $h$  – высота зуба.

При  $h_p/h$  менее 2,0 наблюдаются дефекты поверхности раздела рабочего слоя и основы в виде трещин и расслоения. Причиной является превышение величины растягивающих напряжений на поверхности раздела допустимых значений. Наиболее опасной, с точки зрения разрушения поверхности раздела рабочего слоя и материала основы, является величина  $h_p/h$  в пределах от 0,7 до 1,2. При  $h_p/h \geq 2,0$  разрушения поверхности раздела рабочего слоя и материала основы не замечены.

Рис. 2. Зависимости себестоимости  $C$  пористого биметаллического зубчатого колеса от относительной толщины  $h_p/h$  рабочего слоя  
1. Д05Н5; 2. Д010; 3. РМ 225Н

Себестоимость изделия резко возрастает при  $h_p/h > 3$  и применение биметаллических пористых материалов становится неэффективным.

Следовательно, область оптимальных значений относительной толщины рабочего слоя  $h_p/h$  спеченной порошковой биметаллической заготовки под накатывание зубьев находится в пределах 2,0...3,0.

На графике рис. 2 себестоимость  $C$  зубчатого колеса представлена в нормированном виде.  $C=1,0$  соответствует максимальному значению себестоимости.



#### 4. РЕГРЕССИОННЫЕ МОДЕЛИ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ТОЧНОСТИ И КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ЗУБЧАТЫХ ВЕНЦОВ

Методами планирования эксперимента получены регрессионные модели параметров процесса, влияющих на выбор оборудования и качество изготовленных пористых биметаллических зубчатых колес и деталей со шлицами.

Эксперименты выполненные в главе 3 позволили установить, что на исследуемый процесс существенное влияние оказывают следующие факторы:  $h$  – высота зуба,  $h = 0,4...4,0$  мм;  $S_1$  – величина единичного обжатия заготовки,  $S_1 = 0,02...0,08$  мм;  $\theta_p$  и  $\theta_c$  – относительные плотности пористых материалов соответственно рабочего и основного слоев заготовки,  $\theta = 0,65...0,85$ ;  $E_{2p}$  и  $E_{2c}$  – модули упругости второго рода материалов соответственно рабочего и основного слоев, характеризующие упрочняемость,  $E_2 = 1 \times 10^2...4 \times 10^2$  МПа;  $h_p/h$  – относительная толщина рабочего слоя заготовки,  $h_p/h = 0,5...4,0$ ;  $\sigma_{02}$  – условный предел текучести материала рабочего слоя.

В эксперименте использованы следующие безразмерные комплексы:

$$B_1 = S_1 / m; \quad B_2 = \theta_p / \theta_c; \quad B_3 = E_{2p} / E_{2c}; \quad B_4 = h_p / h$$

Границы интервалов изменения комплексов представлены в таблице 1.

Таблица 1

**Границы интервалов изменения комплексов**

Параметр	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$
$B_{iB}$	0,08	1,0	1,0	4,0
$B_{iH}$	0,02	0,70	0,2	0,2
$B_i^0$	0,05	0,85	0,6	2,1

где

$B_i$  – значение  $i$ -ой переменной в натуральном масштабе измерения;

$B_{iB}$  и  $B_{iH}$  – соответственно верхнее и нижнее значения комплексов;

$B_i^0$  – основной уровень,  $B_i^0 = (B_{iB} + B_{iH})/2$ .

Комплексы преобразовывались в нормированные переменные.

В качестве регрессионных моделей выбраны полиномиальные квазилинейные модели. С данными моделями достаточно хорошо коррелирует план полного факторного эксперимента  $2^4$ . В каждой точке плана эксперимента сделано по три повторных опыта.

Проверка однородности дисперсий экспериментальных данных осуществлялась по критерию Кокрена. Ошибочные опытные данные выявлялись на основании критерия Груббса.

Построены следующие регрессионные модели.

Относительное осевое усилие деформирования:

$$\frac{P_0}{\sigma_{02} m^2} = 2,23 + 2,64 \frac{S_1}{m} + 0,496 \frac{\theta_C}{\theta_P} - 0,152 \frac{E_{2P}}{E_{2C}} - 1,91 \times 10^{-2} \frac{h_P}{h} +$$

$$+ 1,55 \frac{S_1}{m} \frac{\theta_C}{\theta_P} - 1,90 \frac{S_1}{m} \frac{E_{2P}}{E_{2C}}; \quad (4.1)$$

Относительный крутящий момент шпинделя станка:

$$\frac{M_{KP}}{\sigma_{02} m^3} = 1,452 + 2,81 \frac{S_1}{m} - 0,282 \frac{\theta_P}{\theta_C} - 0,143 \frac{E_{2P}}{E_{2C}} - 2,01 \times 10^{-2} \frac{h_P}{h} +$$

$$+ 2,35 \frac{S_1}{m} \frac{\theta_P}{\theta_C} + 0,135 \frac{S_1}{m} \frac{h_P}{h} - 0,78 \frac{E_{2P}}{E_{2C}} \frac{h_P}{h}; \quad (4.2)$$

Колебание измерительного межосевого расстояния за один оборот зубчатого колеса:

$$F_{ir}'' = 109,57 + 112,7 \frac{S_1}{m} + 10,13 \frac{\theta_P}{\theta_C} - 9,62 \frac{E_{2P}}{E_{2C}} - 6,02 \frac{h_P}{h} +$$

$$+ 219,1 \frac{S_1}{m} \frac{\theta_P}{\theta_C} + 97,6 \frac{S_1}{m} \frac{E_{2P}}{E_{2C}} - 56,2 \frac{E_{2P}}{E_{2C}} \frac{h_P}{h}; \quad (4.3)$$

Радиальное биение зубчатого венца:

$$F_{rr} = 123,62 + 160,6 \frac{S_1}{m} + 12,87 \frac{\theta_P}{\theta_C} - 10,75 \frac{E_{2P}}{E_{2C}} - 7,37 \frac{h_P}{h} + 219,4 \frac{S_1}{m} \frac{\theta_P}{\theta_C} +$$

$$+ 84,5 \frac{S_1}{m} \frac{E_{2P}}{E_{2C}}; \quad (4.4)$$

Высота микронеровностей поверхности сформированных зубьев:

$$R_a = 0,38 + 28,41 \left(\frac{S_1}{m}\right)^2 + 0,823 \frac{S_1}{m} \frac{\theta_P}{\theta_C} - 0,352 \frac{S_1}{m} \frac{h_P}{h} + 0,065 \frac{\theta_P}{\theta_C} \frac{E_{2P}}{E_{2C}}. \quad (4.5)$$

Статистические модели адекватны. Погрешности моделей не превышают принятого допустимого значения 15% и являются удовлетворительными.

## 5. ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ХОЛОДНОГО НАКАТЫВАНИЯ ВНУТРЕННИХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ПРОФИЛЕЙ НА СПЕЧЕННЫХ ПОРИСТЫХ БИМЕТАЛИЧЕСКИХ ЗАГОТОВКАХ

На основании проведенных в работе исследований разработана методика расчета технологического процесса накатывания внутренних зубчатых и

шлицевых профилей с модулем зацепления от 0,5 до 2,0 мм на спеченных пористых биметаллических заготовках. Методика позволяет определить оптимальные технологические режимы накатывания зубьев, и их последующую дообработку. Представлены примеры расчета технологических процессов по данному алгоритму.

Предлагаемый технологический процесс изготовления порошковых биметаллических зубчатых колес показан на рис. 3. Технологический процесс представляет собой следующие операции: прессование и спекание заготовки; токарная операция; зубонакатывание; термообработка до HRC 32...36; чистовая зубообработка.

Рис. 3. Технологический процесс изготовления порошкового биметаллического зубчатого колеса внутреннего зацепления

Альтернативой процессу накатывания зубьев на спеченных порошковых заготовках является только процесс выдавливания. Однако, стойкость инструмента для выдавливания в десятки раз ниже стойкости накатника. Все процессы резания, включая протяжку, не могут обеспечить требуемое качество порошковых зубчатых колес, поскольку они выполняются без сдвиговых деформаций.

Качество пористых биметаллических зубчатых колес и деталей со шлицами предопределяется качеством заготовок. Материалами рабочего слоя заготовок выбраны порошки легированной стали РМ 225Н и бронзовые – Д010, Д05Н5. Основой деталей служил порошок низколегированной стали АНС 100.29.



Порошок РМ 225Н (0,7% *C*, 1,1% *Cu*, 2,0% *Ni*, 0,35% *Mo*) обладает механическими свойствами, удовлетворяющими требованиям, предъявляемым к зубчатым колесам со средней степенью нагружения. Бронзовые порошки Д010 (90% *Cu*, 10% *Sn*), Д05Н5 (90% *Cu*, 5% *Sn*, 5,0% *Ni*), наряду с удовлетворительными прочностными свойствами, обладают высокой износостойкостью. Зубчатые колеса с рабочим слоем из Д010 и Д05Н5 целесообразно использовать в малонагруженных передачах, работающих в условиях отсутствия смазки. Например, в пищевой и текстильной промышленности. Применение порошка АНС 100.29 (0,024% *C*) в качестве основы представляет интерес в связи с относительно низкой стоимостью.

Технология изготовления заготовок включала в себя:

- эластостатическое прессование заготовок в пресс-форме на гидравлическом прессе при давлениях от 600 до 1000 МПа, соответствующих требуемой плотности;
- спекание заготовок в электрической печи в защитной среде.

Рекомендуемая относительная плотность заготовок 0,80...0,85.

Выявлена эффективная область применения разработанной технологии и определена номенклатура изделий, производство которых целесообразно на предприятиях АО «Научно-исследовательский институт сельскохозяйственного машиностроения северо-западного региона» (г. Санкт-Петербург) и «Кишиневский завод пищевой промышленности».

Новая технология улучшила эксплуатационные характеристики изделий: относительная плотность зубчатого венца выросла по сравнению с заготовкой на 10...15% и достигла 0,90...0,95; прочность зубьев и износостойкость увеличились в 1,5...2,0 раза; масса зубчатых колес уменьшилась в 1,3...1,7 раза; уровень шумов снизился на 20...30%.

## 6. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Разработаны классификация способов объемного формообразования порошковых зубчатых профилей и методика оценки рациональности их применения методами системного анализа, на основе которых предложены новые перспективные технологии изготовления порошковых биметаллических зубчатых колес и деталей со шлицами внутреннего зацепления, обеспечивающие снижение себестоимости и повышение качества изделия.
2. Разработана научно обоснованная методика проектирования технологических параметров процесса холодного накатывания внутренних зубчатых и шлицевых профилей на спеченных пористых биметаллических заготовках, с использованием которой предложены технологии изготовления зубчатых колес и деталей со шлицами с модулем зацепления от 0,5 до 2,0 мм, применяемые в изделиях сельскохозяйственной и пищевой промышленности, где недопустимо использование смазочных материалов.

3. Разработанная технология изготовления пористых биметаллических деталей с зубьями и шлицами внутреннего зацепления обеспечила повышение прочности и стойкости зубчатых венцов в 1,5...2,0 раза, уменьшение массы зубчатых колес в 1,3...1,7, снижение уровня шумов на 20...30%.
4. На основе методов планирования эксперимента построены регрессионные модели основных технологических параметров процесса накатывания зубьев на спеченных пористых биметаллических заготовках.
5. Разработаны методики и стенды, для экспериментального исследования технологических параметров процессов, с целью установления основных закономерностей формообразования внутренних зубчатых и шлицевых профилей накатыванием на пористых биметаллических заготовках, построения статистических моделей.
6. Разработана классификация, объединяющая показатели качества и дефекты пористых биметаллических зубчатых венцов формообразованных холодным накатыванием, с помощью которой установлены причины возникновения и предложены способы устранения дефектов.

#### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Востров В.Н., В, Каран А.Д. Станки для накатывания зубчатых профилей внутреннего зацепления // *Металлообработка*. – № 1. – 2002. – С. 46–53.
2. Востров В.Н., Кузнецов П.А., Каран А.Д. и др. Накатывание внутренних зубчатых профилей на пористых заготовках // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением*. – № 5. – 2002. – С. 20–26.
3. Каран А.Д., Востров В.Н. Анизотропия свойств биметаллических порошковых шестерен // *XXX Неделя науки СПбГПУ: Матер. н.–т. конф.* – С.–Пб., 2002. – С.37–38.
4. Востров В.Н., Каран А.Д., Кузнецов П.А. и др. Статистические модели параметров процесса накатывания внутренних зубьев на биметаллических пористых заготовках // *Компьютерное моделирование 2003: Труды 4–й межд. н.–т. конф.* – С.–Пб., 2003. – С. 98–100.
5. Каран А.Д., Востров В.Н. Применение в машиностроении зубчатых колес из пористых материалов // *XXXI Неделя науки СПбГПУ: Матер. н.–т. конф.* – С.–Пб., 2003. – С. 46–47.
6. Каран А.Д., Кузнецов П.А. Анализ методов формообразования пористых зубчатых колес // *XXXII Неделя науки СПбГПУ: Матер. н.–т. конф.* – С.–Пб., 2004. – С. 47–48.
7. Кузнецов П.А., Каран А.Д., Данилова Н.В. и др. Выбор на основе системного анализа метода изготовления биметаллических пористых зубчатых колес внутреннего зацепления // *Металлообработка*. – № 1. – 2004. – С. 16–18.

8. Кузнецов П.А., Каран А.Д., Вострова Т.В. Качество зубчатых колес, изготовленных накатыванием на порошковых биметаллических заготовках, и способы устранения дефектов зубчатых колес // Металлообработка. – № 5(23). – 2004. – С. 31–34.