ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «ЛУГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ВЛАДИМИРА ДАЛЯ»

На правах рукописи

Hm

БЕЛОЗИР ИРИНА ИВАНОВНА

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СВОБОДНОГО ДОРНОВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК ИЗ ПОРОШКОВЫХ МЕДНО-ТИТАНОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Специальность 2.6.4 – Обработка металлов давлением

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: Рябичева Людмила Александровна Доктор технических наук, профессор

Луганск 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1	
ОБРАБОТКА ПОЛЫХ ЗАГОТОВОК МЕТОДОМ ДОРНОВАНИЯ	11
1.1 Общая характеристика процессов дорнования	11
1.2 Особенности процесса дорнования отверстий в спечённых пористых	
заготовках	23
1.3 Моделирование процесса дорнования	25
1.4 Остаточные напряжения в заготовках, возникающие при дорновании	32
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1	35
ГЛАВА 2	
ВЫБОР НАПРАВЛЕНИЯ И МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ	
СВОБОДНОГО ДОРНОВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОЛЫХ	37
2.1 Выбор материала и образцов для исследований	37
2.2 Технологический процесс изготовления образцов для	
экспериментальных исследований свободного дорновния	39
2.3 Теоретические обоснование свободного дорнования образцов из	
порошкового медно-титанового материала	43
2.3.1 Использование теории пластичности порошкового материала	43
2.3.2 Использование метода конечных элементов для моделирования	
операции свободного дорнования	45
2.4 Приборы, аппаратура и методики исследований	47
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2	48
ГЛАВА 3	
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОБОДНОГО ДОРНОВАНИЯ	
ПОРОШКОВЫХ ПОРИСТЫХ ЗАГОТОВОК	50
3.1 Общие положения	50
3.2 Анализ напряженно-деформированного состояния, плотности,	
остаточных напряжений, силы	51

3.2.1 Напряженно-деформированное состояние при различной исходной	
пористости материала	51
3.2.2 Относительная плотность полого цилиндра	55
3.2.3 Остаточные напряжения при различной исходной пористости	
материала полых цилиндров	57
3.2.4 Зависимость силы дорнования от исходной пористости материала	
полого цилиндра	61
3.3 Анализ дорнования порошкового полого цилиндра с различными	
геометрическими параметрами	64
3.3.1 Дорнование порошкового полого цилиндра с разной степенью	
толстостенности	64
3.3.2 Дорнование порошкового полого цилиндра с разной относительной	
высотой	70
3.4 Исследование влияния технологических параметров на дорнование	
пористого полого цилиндра	75
3.4.1 Влияние величины натяга	75
3.4.2 Влияние величины угла заборного конуса дорна	80
3.5 Дефекты при свободном дорновании полого цилиндра из порошкового	
материала	85
3.5.1 Образование наплывов	85
3.5.2 Искажение формы и изменение наружного диаметра	91
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3	94
ГЛАВА 4	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ	
ПАРАМЕТРОВ СВОБОДНОГО ДОРНОВАНИЯ ПОРОШКОВЫХ	
ПОРИСТЫХ ЗАГОТОВОК	98
4.1 Общие сведения	98
4.2 Влияние пористости, степени толстостенности, относительного натяга и	
угла заборного конуса инструмента на силу дорнования	99
4.3 Исследование структурной неоднородности и деформационного	

упрочнения образцов после дорнования	103
4.4 Анализ качества образцов после свободного дорнования	107
4.5 Шероховатость поверхности и точность изготовления образцов	117
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4	119
ГЛАВА 5	
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ СВОБОДНОГО ДОРНОВАНИЯ	
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОЛЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ ПОРОШКОВЫХ	
МАТЕРИАЛОВ	122
5.1 Общие положения	122
5.2 Технологический процесс изготовления заготовки втулки	123
5.3 Технологический процесс изготовления заготовки втулки с фланцем из	
порошкового материала	132
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 5	142
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	144
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	146
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	147
ПРИЛОЖЕНИЕ А	160
ПРИЛОЖЕНИЕ.Б	161

введение

Актуальность темы. В настоящее время цилиндрические порошковые детали типа «втулка» широко используются в машиностроении, станкостроении, тепловозостроении и других отраслях промышленности. В частности, в тормозных системах тепловозов применяются порошковые пористые втулки, обеспечивающие долговечность узлов и эффективную смазку при работе. Возрастает роль ресурсосберегающих технологий обработки давлением, которые при определённых условиях деформирования позволяют улучшить качество и повысить износостойкость продукции. В связи с этим разработка и применение способов повышения эксплуатационных свойств изделий из металлических материалов за счёт применения операций поверхностного пластического деформирования является актуальным.

При конструировании полых заготовок, втулок, фланцев и других деталей машин, имеющих соосные цилиндрические поверхности различного диаметра с различной толщиной стенок, необходима разработка операций, позволяющих получить поверхность отверстия высокой точности и прочности при минимальной шероховатости. В настоящее время получили развитие способы улучшения таких деталей обработкой давлением порошковых заготовок. Порошковая композиция объединяет свойства разных материалов. Применение доделочных операций деформирования при изготовлении деталей из порошкового материала позволяет управлять их микроструктурой и получать заданные свойства. К таким операциям относится поверхностное пластическое деформирование, в частности дорнование, которое позволяет получить необходимую плотность и твёрдость внутреннего слоя отверстия в детали. Известно применение различных видов дорнования деталей из компактных материалов. Однако, для порошковых деталей таких данных недостаточно.

Российские учёные внесли значительный вклад в развитие теории и практики поверхностного пластического деформирования. Работы А.М. Дмитриева, А.Л. Воронцова, Ю.Г. Дорофеева, В.Ю. Дорофеева, А.М. Кузнецова, В.Н. Кокорина, Ю.Г. Проскурякова, А.М. Розенберга, О.А. Розенберга, Н.А. Шестакова, Ю.Г. Шнейдера, И.И. Янченко и др. подтверждают положительное влияние поверхностной пластической деформации на качество изделий. Однако весьма мало данных о влиянии

поверхностной пластической деформации, в частности дорнования, на эксплуатационные свойства изделий из порошковых материалов.

Целью работы является повышение эксплуатационных свойств цилиндрических порошковых деталей типа «втулка» из медно-титанового материала на основе разработки технологии свободного дорнования тонко- и толстостенных заготовок.

Задачами исследований являются

1. На основе компьютерного моделирования свободного дорнования порошковых пористых заготовок установить и проанализировать распределение напряжений и деформаций, остаточных напряжений, силы дорнования.

2. Установить оптимальные геометрические размеры заготовок и инструмента, позволяющие выполнить и получить качественные заготовки свободным дорнованием.

3. Определить зависимости энергосиловых параметров свободного дорнования порошковых заготовок с различной пористостью от размеров заготовки, натяга дорнования, угла заборного конуса.

4. Экспериментально проверить полученные моделированием результаты и оценить изменение микроструктуры, микротвердости и твёрдости порошковых заготовок после свободного дорнования.

5. Разработать математические модели относительного уширения, относительного укорочения; уменьшения диаметра отверстия в результате упругого последействия; силы дорнования в зависимости от степени толстостенности; относительного натяга; угла заборного конуса дорна.

6. Разработать технологические процессы и оснастку для свободного дорнования порошковых заготовок, в результате которых можно изготовить деталь с повышенными эксплуатационными свойствами поверхностного слоя отверстия.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования является технология свободного дорнования цилиндрических порошковых медно-титановых заготовок деталей типа «втулка». Предметом исследования является влияние напряженно-деформированного состояния и исходной пористости на изменение плотности, остаточных напряжений и

силы свободного дорнования порошковых медно-титановых заготовок.

Тематика работы

Выносимые на защиту результаты соответствуют следующим направлениям исследований паспорта научной специальности 2.6.4: п.1 «Исследование и расчёт деформационных, скоростных, силовых, температурных и других параметров разнообразных процессов обработки давлением металлов, сплавов и композитов»; п.2 «Исследование способов, процессов и технологий обработки давлением металлов, сплавов и композитов с помощью методов физического и математического моделирования»; п.3 «Исследование структуры, механических, физических, магнитных, электрических и других свойств металлов, сплавов и композитов в процессах пластической деформации».

Научная новизна работы

1. Определено влияние напряженно-деформированного состояния в поверхностном слое отверстия на физико-механические свойства заготовок из порошкового медно-титанового материала при свободном дорновании. Установлено, что уменьшение исходной пористости материала приводит к росту интенсивности напряжений, увеличению силы дорнования, ширины уплотненного слоя, уменьшению относительной пористости.

2. Установлено, что для порошковых заготовок из медно-титановых материалов максимальные по величине на образующей поверхности являются остаточные окружные и осевые напряжения, которые увеличиваются при уменьшении пористости и увеличении степени толстостенности, что влияет на рост твердости и улучшение эксплуатационных свойств.

3. Сила дорнования возрастает с увеличением степени толстостенности и высоты заготовки, что обусловлено структурной деформацией большего объёма материала. При этом плотность поверхностного слоя отверстия изменяется незначительно. Увеличение натяга и угла заборного конуса приводит к увеличению силы дорнования за счёт большого гидростатического сжатия, интенсивности напряжений и деформаций. При этом уменьшается ширина уплотнённого слоя и изменяется характер пластической деформации, возможен срез металла.

4. Получены математические модели расчета относительного уширения, относительного укорочения, уменьшения внутреннего диаметра отверстия, силы дорнования от технологических параметров порошковой заготовки и инструмента, позволяющие выбрать высоту и диаметр, угол заборного конуса и натяг для получения качественной заготовки после свободного дорнования.

Практическая значимость

Работа выполнена в рамках НИР БМ-1-23 «Создание материалов со специальными свойствами».

Разработаны оптимальные параметры технологии свободного дорнования заготовки из порошкового медно-титанового материала: заготовка с исходной пористостью 15 %: величина натяга 0,2 мм, угол заборного и обратного конуса 4°.

Разработана методика оценки качества заготовки и силы после свободного дорнования, основанная на регрессионных зависимостях следующих параметров: относительного уширения, относительного укорочения, уменьшения диаметра отверстия вследствие упругого последействия, силы дорнования от натяга, степени толстостенности и угла заборного конуса дорна.

Разработаны технологические процессы свободного дорнования порошковых заготовок тонкостенных и толстостенных деталей типа «втулка» и «втулка с фланцем». В результате этих процессов происходит уплотнение и упрочнение поверхностного слоя отверстия шириной до 2 мм. Микротвердость поверхности увеличивается до 580 МПа, пористость уменьшается в два раза до 7 %, металлоемкость снижается на 30%, износостойкость повышается на 15%, а трудоемкость изготовления деталей сокращается в 1,2 раза.

Материалы диссертационной работы используются в учебном процессе ЛГУ им. В. Даля на кафедре материаловедения при подготовке специалистов по направлениям 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов» профиль «Композиционные и порошковые материалы, покрытия» и 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов» магистерская программа «Функциональные материалы, покрытия».

Результаты работы переданы в технический отдел ООО «ЛУГАМАШ».

Полученные результаты рекомендуется использовать на предприятиях машиностроения при разработке технологических процессов изготовления деталей из порошковых материалов.

Методология и методы исследования

При исследовании напряженно-деформированного состояния свободного дорнования использованы положения теории пластичности пористых тел. Компьютерное моделирование выполнено с помощью метода конечных элементов в программном комплексе Deform-3D. Экспериментальная часть работы выполнена по общепринятым и специализированным методикам. Для анализа эксперимента использованы методы статистической обработки и полного факторного эксперимента.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Результаты исследования напряженно-деформированного состояния, относительной пористости, гидростатического давления, остаточных напряжений и величины усилия свободного дорнования порошковых материалов.

2. Результаты анализа структурообразования и упрочнения внутренней поверхности отверстия заготовки, позволяющие повысить эксплуатационные свойства.

3. Математические модели расчёта относительного уширения, относительного укорочения, уменьшения диаметра отверстия в результате упругого последействия и силы дорнования.

4. Технологии свободного дорнования тонкостенных и толстостенных порошковых заготовок.

Апробация результатов исследований

Выводы и рекомендации диссертации получены путём применения научных методов анализа и теоретических положений, результатами экспериментальных исследований, сопоставлением результатов теории и эксперимента, это обеспечивает достоверность и новизну диссертации

Основные результаты диссертации доложены и одобрены на следующих научных конференциях:

VI, VII международной научно-практической конференции (Луганск, 2023,

2024); XXIX Международной научно-практической конференции (Пенза, 2023); XXX международной научно-технической конференции (Севастополь-Донецк, 2023); Проблемы технического и технологического обеспечения инновационного развития машиностроения (Махачкала, 2023); VII научно-технической конференции с международным участием (Алчевск, 2023); XXXI Международной научно-технической конференции (Донецк, 2024); VIII Международной научно-технической конференции (Каспийск, 2024).

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы автором самостоятельно или в соавторстве в 18 научных работах, из них 4 статьи опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 2 статьи опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК МОН ЛНР для публикации основных результатов диссертационных исследований, 3 статьи в научных журналах, 9 докладов на научных конференциях.

Структура диссертации. Диссертация состоит из оглавления, введения, пяти глав, выводов по каждой главе, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, 2 приложений. Работа изложена на 161 страницах машинописного текста, из которых 132 страниц основного текста, содержит 73 рисунка, 7 таблиц. Список литературы содержит 119 наименований.

ГЛАВА 1

ОБРАБОТКА ПОЛЫХ ЗАГОТОВОК МЕТОДОМ ДОРНОВАНИЯ

1.1 Общая характеристика процессов дорнования

Для повышения качества деталей машин применяют различные операции обработки металлов давления (ОМД), которые направлены на улучшения прочностных и эксплуатационных свойств деталей. К таким операциям относятся раздача и дорнование. Раздача заключается в увеличении внутреннего диаметра полых труб (ГОСТ 18970-84). Дорнование направлено на увеличение, упрочнение и повышение износостойкости внутреннего диаметра отверстия (ГОСТ 18296-72). В серийном и массовом производстве дорнование применяется как метод размерно-упрочняющей обработки металлов [1, 2]. При выполнении процесса дорнования припуск не удаляется из отверстия, как при механической обработке, а вытесняется частично в сторону торцов отверстия детали.

Исследования процесса дорнования проводились известными учеными: А.М. Дмитриевым, А.Л. Воронцовым, А.М. Кузнецовым, В.Н. Кокориным, Н.А. Шестаковым, И.И. Янченко, Ю.Г. Проскуряковым, А.М. Розенбергом, О.А. Розенбергом, Ю.Г. Шнейдером и др. В результате исследований выявлены основные закономерности и технологические возможности процесса дорнования. Также рассмотрено его применение для обработки отверстий различных диаметров.

Для выполнения дорнования применяются рабочие инструменты, такие как шары и дорны, которые могут быть выполнены в форме протяжек и прошивок. Дорны классифицируются на однозубые и многозубые. Дорны изготавливают как цельными с диаметром по наружной поверхности до 10 мм, так и составными при превышении указанного диаметра. Конструкция составных дорнов представляет собой оправку, оснащённую зубчатыми элементами, изготовленных в форме колец [3-5].

При выборе дорнов необходимо учитывать диаметр обрабатываемого отверстия. Для отверстий диаметром более 10 мм используется дорн-протяжка. Для обработки отверстий диаметром менее 10 мм применяются дорн-прошивка, а также специальные шары, которые проталкиваются через обрабатываемое отверстие с помощью стержня-толкателя [6, 7].

Для производства дорнов обычно применяются твёрдые сплавы [8-10], обладающие высокой стойкостью к износу инструмента и предотвращающие явление схватывания между материалом инструмента и обрабатываемой деталью. Оптимальные эксплуатационные характеристики имееют дорны из твёрдых сплавов группы ВК, таких как ВК8 и ВК15 [11, 12]. В деталях из цветных сплавов [8-10] отверстия обрабатывают стальными дорнами. Долговечность и износостойкость дорнов создаётся нанесением на рабочую поверхность дорна специального покрытия такого как нитрид титана (TiN) или карбид вольфрама (WC) [13, 14].

Дорны могут быть изготовлены в форме шара, тора или двух усечённых конусов, соединённых цилиндрической лентой у их больших оснований. В промышленном производстве наиболее распространены дорны, выполненные в виде двух усечённых конусов, благодаря их технологичности. Углы рабочего и обратного конусов, обозначаемые как α и α_1 , выбираются одинаковыми. Величина данных параметров подбирается с учётом минимизации затрат энергии, требуемой для осуществления операции дорнования [11].

Пластическое деформирование материала осуществляется с помощью рабочей части конуса, тогда как его обратная сторона обеспечивает плавный выход дорна из сформированного отверстия. Цилиндрическая лента дорна, соединяющая конусы, способствует повышению точности обработки отверстия.

Для различных условий обработки угол заборного конуса в среднем составляет $\alpha = 3...5^{\circ}$. Для определения ширины цилиндрической ленточки применяют эмпирическую формулу $b = 0,35d^{0,6}$, обычно она выбирается в пределах b = 1...3 мм. При обработке вязких материалов рекомендуется использовать больший угол заборного конуса α и меньшей шириной ленточки [15]. Для обеспечения требуемых

характеристик рабочей части дорна важна высокая степень шероховатости поверхности в диапазоне от 0,01 до 0,08 микрометров. Достижение такой шероховатости осуществляется посредством операций точного шлифования и полирования. В производственном процессе применяются инструменты, оснащённые рабочей поверхностью с регулярным микрорельефом, что позволяет эффективно контролировать параметры шероховатости и обеспечивать необходимую точность обработки [16, 17].

В работе А.Л. Воронцова [18] представлен процесс дорнования заготовок из компактных материалов. Теоретические и экспериментальные данные показали, что высота заготовки после дорнования не изменяется. Это позволило определить наружный диаметр заготовки из условия равенства площадей поперечного сечения. Установлены остаточные напряжения заготовки, удельная сила дорнования, интенсивность деформаций и напряжений. Экспериментальные исследования установили: оптимальный угол конусности дорна зависит от коэффициента трения, деформации и толщины стенки заготовки. Для толстостенных заготовок (R > 1,2) рекомендуется угол 10° и выше для снижения расхода инструментальной стали, однако это увеличивает высоту штампового пространства. Для тонкостенных заготовок (R < 1,2) оптимальный угол может составлять 4—6°. Для точного определения оптимального угла необходимо учитывать условия эксплуатации и параметры заготовки.

Результатом дорнования является увеличение диаметра и точности отверстия, уменьшение начальной шероховатости, а также деформационное упрочнение поверхностного слоя, формируемое за счёт сжимающих остаточных напряжений [11, 19-21]. Дорнование повышает износостойкость и усталостную прочность элементов конструкции, особенно в зонах с ослабленными участками, где присутствуют отверстия как источники концентрации напряжений; укрепляет прессовые соединения и стабилизирует работу подвижных посадок; увеличивает статическую устойчивость цилиндров, работающих при значительных внутренних давлениях [8, 22-27].

Для отделочной обработки цветных сплавов, которые трудно поддаются обработке резанием из-за наростообразования, дорнование является рациональным способом обработки.

Обработка отверстий в деталях дорнованием бывает поверхностная и объёмная. В случае поверхностной обработки происходит пластическая деформация слоя материала, который непосредственно контактирует с инструментом. Поверхностное дорнование может заменить такие процессы, как выглаживание, хонингование, шлифование, раскатывание отверстий и др. Точность обработанной поверхности после поверхностного дорнования соответствует 6...9 квалитету, а шероховатость – Ra < 0.32 мкм [1, 28].

В процессе объёмного дорнования происходит пластическая деформация всей поверхности обрабатываемой детали. Этот метод обработки успешно заменяет черновую расточку при работе с трубными заготовками, такими как гильзы и длинные цилиндры [28].

Дорнование в зависимости от расположения обрабатываемой детали может быть свободным и дорнованием в обойме (несвободным). Отличием свободного дорнования от дорнования в обойме является условие деформации наружной поверхности детали.

Для обработки трубчатых заготовок с целью получения деталей, таких как корпуса гидро- и пневмоцилиндров, гильзы, кольца и втулки, в различных механизмах, широко используется метод свободного дорнования. При выполнении свободного дорнования отсутствует ограничение наружной поверхности заготовки. Свободного дорнования применяется для заготовок с толщиной стенки ($D_o/d_o > 1,2$) [27]. Применение данного вида обработки для тонкостенных заготовок ($D_o/d_o \le 1,2$) часто не обеспечивает интенсивное выглаживание обрабатываемых поверхности стей вследствие низких нормальных напряжений в зоне контакта дорн – заготовка.

Обработка отверстий может осуществляться по схеме сжатия, растяжения или осевого заневоливания, выбор схемы определяется конструктивными особенностями (длиной, жёсткостью и продольной устойчивостью деталей) [11].

Свободное дорнование относительно коротких заготовок ($L_o/d_o < 5$, где $L_0 -$

длина обрабатываемой детали) выполняют по схеме сжатия, при выполнении дорнования заготовка опирается входным торцом на опору. Выбор схемы дорнования определяется областью их использования на практике [11].

Обработка длинных заготовок ($L_o/d_o > 5$) выполняется по схеме растяжения или осевого заневоливания, данная схема применяется при повышенных требованиях к прямолинейности образующей, а также для обработки деталей с малой жёсткостью. В этих схемах деталь опирается на фланец, бурт или фиксируется с помощью резьбы. Осевое ограничение при обработке предотвращает осевое укорочение детали [11]. В процессе деформации деталь подвергается натяжению между двумя опорами, что способствует стремлению оси отверстия к прямолинейному направлению [4].

Для уменьшения деформационных нагрузок, предотвращения сцепления инструмента с обрабатываемым материалом, повышения точности и улучшения качества поверхностного слоя отверстий рекомендуется использовать метод дорнования с применением смазочных материалов [3, 5, 8-9, 15, 21, 22-30]. При обработке изделий из цветных металлов, углеродистых и низколегированных конструкционных сталей рекомендуется использовать смазочные материалы на масляной основе, такие как MP-1, MP-2, MP-3 и MP-7. Кроме того, применяются композиции этих жидкостей с различными добавками, включая дисульфид молибдена, графит, серу, тальк и другие компоненты.

В процессе дорнования деталей из медных сплавов применяются минеральные масла, такие как АМГ-10, а также эмульсионные составы. Очищенный керосин эффективно применяется при дорновании деталей из чугуна. Смазывающие жидкости особенно важны при обработке деталей из высоколегированных, нержавеющих и жаропрочных сталей и сплавов, которые склонны к адгезионному взаимодействию [11].

Технологические параметры характеризующие дорнования являются: натяг, мм; относительный натяг; сила дорнования и осевая составляющая силы деформирования; скорость дорнования, м/мин, а также геометрическими характеристиками дорна.

Натяг определяется как разница между начальными номинальными диаметрами контактирующих поверхностей дорна d и обрабатываемого отверстия d_0 в поперечном сечении $i = d - d_0$. В случае многозубого дорнования используется суммарный натяг Σ i. Относительный натяг при дорнировании определяется как отношение величины натяга к соответствующему исходному или, реже, итоговому размеру отверстия заготовки. Параметры натяга оказывают значительное влияние на напряженно-деформированное состояние детали и качество обработки. Их значения варьируются в диапазоне от 0,5 до 20% от диаметра отверстия в зависимости от условий проведения операции. [1, 7, 9]. Увеличение суммарного натяга снижает натяг на зуб, улучшая поверхностный слой и повышая точность отверстий.

Увеличение натяга до определённого значения приводит к снижению параметра шероховатости R_z . Чрезмерное увеличение натяг приводит к разрушению смазочной плёнки и адгезии частиц обрабатываемого материала с дорном, что в свою очередь вызывает уменьшение параметра шероховатости поверхности [15, 23].

Величина силы дорнования зависит от следующих параметров: размеров обрабатываемой заготовки, физико-механических свойств материала, величины натяга, геометрии инструмента, а также от характеристик и закона трения на контактных поверхностях. Кроме того, влияние оказывают и другие взаимосвязанные параметры. [2, 21, 29]. В процессе дорнования сила, действующая на инструмент, может быть представлена как сумма двух составляющих: осевой P_0 и радиальной P_r . Осевая сила осуществляет работу A₁, направленную на преодоление сил трения и пластическую деформацию микронеровностей обрабатываемого материала. Радиальная сила (P_r) увеличивает диаметр заготовки, выполняя работу A₂ по раздаче или объёмной деформации, а также работу A₃ по изгибу стенок заготовки $A_r = A_1 + A_2 + A_3$.

Величина силы дорнования определяется экспериментальным или расчётным методом в зависимости от технологических параметров процесса. При использовании многозубых дорнов сила дорнования значительно увеличивается при вхождении каждого нового зуба в отверстие и резко уменьшается при его выходе из отверстия на противоположном торце. При обработке отверстий однозубыми дорнами сила дорнования практически пропорциональна относительному натягу.

Расчёт силы осуществляется с использованием математических моделей, основанных на различных подходах теории обработки металлов давлением. [5, 31-33]. В данной области известны теоретические исследования Ю.Г. Проскурякова, В.Л. Колмогорова, В.И. Стрижака, Б.А. Попова и других авторов. [27]. При разработке расчётных формул введены упрощающие допущения, типичные для анализа задач объёмного напряжённого состояния. Полученные зависимости описывают связь между силой дорнования и величиной натяга, а также параметрами дорна и трубчатой заготовки. В частности, Ю.Г. Проскуряков [21] для расчёта силы дорнования стальных втулок рекомендует выражение:

$$P = (K_1 + K_2)F + K_{\partial on}F_1,$$
(1.1)

где *K*₁ – коэффициент, учитывающий основные деформации металла с учётом внешнего трения;

*K*₂ – коэффициент, учитывающий силы трения по цилиндрической ленточке дорна;

*K*_{*don*} – коэффициент, учитывающий дополнительные деформации из-за их неравномерности при дорновании.

Они определяются следующим образом:

$$K_{1} = \frac{\sigma(1+\mu/tg\alpha)}{1-\mu \cdot tg\alpha} \ln\left(1+\frac{i}{d_{0}}\right), \quad K_{2} = \frac{2\sigma\mu}{d}b, \quad K_{oon} = 0,28\sigma(2tg\alpha+\mu), \quad (1.2)$$

где *σ* – истинное сопротивление деформированию материала втулки;

µ – коэффициент трения со смазкой;

α – угол заборного конуса дорна (в рад).

В формулу (1.3) также входят площади давления и зоны дополнительных сдвигов, которые, соответственно, равны:

$$F = \frac{\pi \left(D^2 - d^2 \right)}{4}, \ F_1 = \frac{\pi \left(D_s^2 - d^2 \right)}{4}.$$
(1.3)

Альтернативный метод оценки силы дорнования основывается на применении эмпирических зависимостей, полученных в ходе экспериментальных исследований процессов дорнования. По результатам исследований О.А. Розенберга с сотрудниками получено уравнение [9]:

$$P = 0,83\sigma dS_0^{1,44} d_0^{-0,66} i_0^{-0,72} \left(\sum_{n=0}^{1,22} - i_n^{1,22}\right), \tag{1.4}$$

где *S*₀ – исходная толщина стенки втулки;

 Σi , i_n – общий натяг дорнования и натяг на один зуб, соответственно.

В работе [6] представлены результаты исследования влияния натяга на силу дорнования отверстий малого диаметра. Эксперименты проводились на образцах из различных материалов: стали 45, 20, 10880, меди М1, дюралюминия Д16Т и сурьмянистого свинца ССу3. Для обработки отверстий использовались однозубые дорны-прошивки, изготовленные из твёрдого сплава марки ВК8 и легированной стали ШХ15. Твёрдость этих инструментов по шкале HRC варьировалась в диапазоне от 62 до 64. Конструкция дорнов включала углы заборного и обратного конусов, равные 6°, а также цилиндрическую ленточку шириной 1 мм. Натяг дорнования варьировался в диапазоне от 0,003 до 0,11 мм. С помощью компьютерной обработки экспериментальных данных получены эмпирические зависимости для расчёта силы дорнования:

– при обработке стальными дорнами: $P = 0,993 \cdot HB \cdot d_0 \cdot i^{0,5};$

— при обработке твердосплавными дорнами: $P = 1,092 \cdot HB \cdot d_0 \cdot i^{0,5}$; где НВ — твёрдость материала образца по Бринеллю.

Скорость перемещения инструмента при дорновании слабо влияет на износ инструмента, энергосиловые параметры обработки и качество обработанной поверхности [9, 34]. Выбор скорости обработки определяется техническими характеристиками используемого оборудования и допустимым уровнем тепловыделения. Для материалов с высокой вязкостью скорость дорнования должна быть ограничена диапазоном 5–7 м/мин. Соблюдение этого режима способствует предотвращению налипания обрабатываемого металла к инструменту [2].

Геометрия рабочей поверхности дорна определяется углом заборного конуса α . Этот параметр является ключевым, так как именно заборной частью инструмента осуществляется основная деформация обрабатываемого материала. Увеличение угла α приводит к возрастанию амплитуды и высоты волны вне контактной деформации заготовки, что вызывает значительные искажения поперечного сечения. Особенно ярко выраженный торцевой эффект наблюдается при обработке коротких заготовок.

Величина угла α оказывает значительное влияние на интенсивность процессов дорнования и качество поверхностного слоя отверстия. Неправильный выбор данного угла может привести к увеличению силы, действующей на обрабатываемую поверхность, что вызывает осевой сдвиг её поверхностных слоёв. Это, в свою очередь, приводит к разрушению смазочной плёнки в зоне контакта дорна с заготовкой, что может стать причиной возникновения надиров и царапин на обработанной поверхности. [38]. Для оптимального выбора угла заборного конуса необходимо учитывать следующие параметры: материал обрабатываемой заготовки, величину натяга, коэффициент трения на контактной поверхности дорна и заготовки, начальный диаметр отверстия и др.

Угол заборного конуса α оказывает значительное влияние на интенсивность и характер сил, возникающих при дорновании, в зависимости от перемещения дорна.

В исследовании [21] приведены данные о динамике изменения силы свободного дорнования втулок с начальными диаметрами $d_o = 30$ мм и $D_o = 64$ мм, изго-

товленных из стали 45, при натяге i = 0,12 мм. Анализ проводился с использованием дорнов, имеющих различные углы α . При использовании дорна с углом $\alpha = 27$ наблюдается резкое увеличение силы при входе дорна в отверстие, а при его выходе зависимость силы имеет скачкообразный характер. Применение дорна с углом $\alpha = 10^{\circ}$ изменение силы происходит более равномерно. Высокие значения силы свидетельствуют о значительном расходе энергии на пластическое деформирование металла в осевом направлении. С уменьшением угла α интенсивность изменения силы дорнования снижается. При $\alpha = 2^{\circ}$ зависимость силы становится постоянной.

Величина натяга оказывает значительное влияние на характер изменения силы дорнования при фиксированном угле α . При малых натягах наблюдается плато на кривой, отражающее силу дорнования в центральной части втулки, которое отсутствует при больших натягах. Аналогичные результаты были получены в исследовании [35], где изучался процесс дорнования отверстий с натягом *i* = 0,04 мм в полых толстостенных цилиндрах из алюминиевого сплава Al6082 (аналог AД35T) с использованием однозубых конических дорнов, имеющих различные углы заборного конуса α .

К геометрическим характеристикам заготовок, влияющим на процесс дорнования, относится степень толстостенности, определяемая отношением диаметра наружной поверхности к диаметру отверстия D_o/d_o , и относительная длина заготовки L_o/d_o .

Исследованиями установлено, что при увеличении степени толстостенности трубчатых заготовок происходит рост необходимого деформирующего усилия и величины контактного давления. Происходит более интенсивное сглаживание первоначальных микронеровностей и деформационное упрочнение поверхностного слоя металла, что приводит к формированию сжимающих остаточных напряжений.

В результате исследований выявлено, что с увеличением степени толстостенности трубчатых заготовок возрастает необходимое деформирующее усилие и величина контактного давления. Также наблюдается более выраженное сглаживание начальных микронеровностей и деформационное упрочнение поверхностного слоя металла, в котором формируются остаточные сжимающие напряжения [7, 11, 16,

21, 36].

В литературе [8, 22] экспериментально установлено, что при обработке отверстий методом дорнования в заготовках с относительной длиной $L_o/d_o \approx 2$ и относительным натягам около 1%, при степени толстостенности $D_o/d_o < 3$ увеличивается силы дорнования и контактное давления. При $D_o/d_o \ge 3$ эти параметры остаются неизменными. В случае толстостенных заготовок с $D_o/d_o \ge 3$ наружная область всегда находится в упругом состоянии, а вытесняемый из отверстий металл преимущественно смещается в виде наплывов на торцы.

При анализе влияния толщины стенок заготовок на процесс дорнования, рассмотренного в работах [8, 22], предлагается разделить обрабатываемые заготовки на две основные категории: с «конечной» толщиной стенок ($D_o/d_o < 3$) и с «бесконечной» толщиной стенок ($D_o/d_o \ge 3$).

В работах [11, 38] проведены экспериментальные исследования процесса дорнования деталей типа втулок, изготовленных из сталей марок 20 (НВ 1300 МПа) и 45 (НВ 1700 МПа). Диаметр отверстий $d_0 = 2,16, 2,27$ и 5 мм, степень толстостенности $D_o/d_o = 2,3...9,5$, величина относительного натяга при дорновании достигала 15 %. Процесс дорнирования выполнялся по схеме одноциклового сжатия с применением дорнов из твёрдого сплава ВК8 с углами рабочего и обратного конусов 6°. Исследование показало, что при увеличении степени толстостенности деталей (при $D_o/d_o \ge 3$) и величины натяга наблюдается увеличение силы дорнования. Причём это увеличение тем больше, чем больше натяг дорнования, в отличие от случаев дорнования с малыми натягами [7]. В ходе анализа экспериментальных данных получено эмпирическое уравнение для расчёта силы одноциклового дорнования отверстий в полых цилиндрах, изготовленных из углеродистых сталей с твёрдостью НВ в диапазоне от 1300 до 1700 МПа:

$$P = 0,045 \left(HB\right)^{0.793} i^{0.674} d_0^{0.85} \ln \frac{D_0}{d_0}.$$
 (1.5)

Исследование [36] влияния относительной длины заготовок на силу дорнования выявило, что при увеличении отношения L_o/d_o до 4 сила дорнования возрастает, а дальнейшее увеличение длины заготовок не приводит к изменению этой силы.

В работах [36, 37] установлено, что окружная остаточная деформация на внешней поверхности заготовок, подвергающихся обработке методом дорнирования, возрастает с уменьшением их толщины и увеличением натяга. При этом величина данной деформации практически не зависит от относительной длины заготовок. Дорнование заготовок с отношение $D_o/d_o = 2-5$ и увеличением натяга, претерпевают объёмные пластические деформации. Объёмные деформации возникают уже при относительном натяге 4,7% для полых цилиндров из углеродистой стали с $D_o/d_o = 3$, а при натяге 13 % — для полых цилиндров из тех же сталей с $D_o/d_o = 7,5$.

Таким образом, дорнование представляет собой результативный способ финишной и упрочняющей обработки отверстий, который находит широкое применение в различных отраслях промышленности. Этот способ обработки подходит для обработки коротких заготовок из компактных сталей ($L_o/d_o < 5$) по схеме сжатия. Для длинных заготовок ($L_o/d_o > 5$) или заготовок с низкой жёсткостью используется растяжение или осевое заневоливание. Свободное дорнование трубчатых заготовок ограничено толщиной стенок $D_o/d_o > 1,2$. Для заготовок с тонкими стенками $D_o/d_o \le 1,2$ требуется использование обойм для повышения интенсивности выглаживания.

Параметры натяга и угол заборного конуса дорна значительно влияют на силу дорнования и качество обработки отверстий в компактных материалах. Оптимальный угол заборного конуса $\alpha_{O\Pi T} = 3...5^{\circ}$ минимизирует силу дорнования. Для однозубых дорнов сила дорнования прямо пропорциональна натягу и достигает максимума при средних и больших значениях, снижаясь при уменьшении натяга. При малых углах заборного конуса (2°) сила дорнования снижается плавно.

Комплексные исследования процесса дорнования спечённых трубчатых заго-

товок в зависимости от их пористости и параметров дорнования ранее не проводились. Существуют лишь экспериментальные работы [40-41], посвящённые калибровке отверстий в металлокерамических втулках, но их результаты не были должным образом систематизированы и теоретически обоснованы из-за отсутствия подходящих моделей для описания пластического деформирования спечённых пористых материалов и возможностей численного моделирования.

1.2 Особенности процесса дорнования отверстий в спечённых пористых заготовках

В рамках анализа литературы, посвящённой вопросам дорнования, выявлено, что значительная часть исследований сосредоточена на обработке отверстий в изделиях из компактных сталей. Однако в машиностроении активно используются детали из порошковых сталей и цветных металлов, такие как подшипники скольжения, втулки, ролики, для которых важна высокая прочность внутренней поверхности отверстий [42-45].

Структура и характеристики порошковых материалов оказывают значительное влияние на механические и физико-химические свойства пористых изделий, а также определяют их функциональное назначение. Пониженные эксплуатационные показатели спечённых материалов по сравнению с компактными материалами обусловлены их повышенной пористостью, наличием инородных включений и неоднородностью структуры.

Деформационное упрочнение, вызванное пластической деформацией, наблюдается как в пористых, так и в компактных металлах. В пористых материалах упрочнение происходит не только из-за изменения пористости, но и вследствие упрочнения материала, обусловленного накоплением пластических деформаций.

Спечённые пористые заготовки подвергаются упрочнению с помощью механических методов, включая объёмную и поверхностную холодную пластическую деформацию. Объёмные методы обработки давлением не позволяют достичь необходимой структуры изделия, поэтому применяются методы поверхностного упрочнения порошковых заготовок. Эти методы описаны в литературе [46].

Механические методы упрочнения включают наклёп контактной поверхности пористой заготовки [24] и полное устранение пористости в её поверхностных слоях. Особое внимание уделяется параметрам скольжения деформирующего инструмента относительно детали с натягом [47], а также способам обкатывания поверхности с применением шариков [48]. Упрочнение материалов, как правило, происходит направлено, что приводит к возникновению деформационной анизотропии в результате пластической деформации.

Металлопорошковые заготовки для втулок изготавливают прессованием в жёсткой матрице или радиальным уплотнением с последующим спеканием в вакууме или защитной атмосфере [49]. Однако эти методы не обеспечивают точных размеров из-за упругого последействия и усадки материала [50] при спекании. Для улучшения механических свойств и качества рабочих поверхностей применяют деформирующее протягивание, которое калибрует и упрочняет изделия.

В отличие от обработки компактных металлов методом деформирующего протягивания, порошковые втулки демонстрируют способность изменять свой объем, что открывает возможности для их обработки при значительных ограничениях кинематических параметров течения материала. Это достигается благодаря увеличению внутреннего диаметра втулки при сохранении фиксированного наружного диаметра, что приводит к её деформации.

Дорнование цилиндрической втулки из спечённого пористого материала улучшает её геометрию и механические свойства поверхностного слоя, полученного холодной пластической деформацией. Однако экспериментальные данные не позволяют точно предсказать толщину упрочнённого слоя, распределение плотности и микротвёрдости при заданных условиях. Необходимо теоретическое обоснование для решения этой задачи.

Для этого необходимо провести анализ напряженно-деформированного состояния при пластической деформации и уплотнения материала у поверхности при дорновании на основе решений уравнений современных теорий пластичности пористых тел, учитывающих возможность уплотнения пористой среды. Это позволит контролировать распределение плотности и степени упрочнения по сечению стенки

пористой втулки. Применение этих методов на практике обеспечит производство втулок или роликов с заданными характеристиками.

1.3 Моделирование процесса дорнования

Математические модели статически неопределимых осесимметричных задач локального нагружения кольцевых областей трубчатых заготовок в процессе дорнования характеризуются высокой степенью сложности [27]. Это вызвано необходимостью совместного интегрирования системы дифференциальных уравнений равновесия с условием пластичности.

В работах [51-53 и др.] для анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) при локальном деформировании осесимметричных элементов решается упругопластическая задача. Однако необходимо помнить, что при деформировании заготовок из порошковых материалов объем упругой деформации незначителен, что приводит к неточности решения теоретических задач.

В последнее время для моделирования деформирования в технологических процессах используется метод конечных элементов (МКЭ). Этот метод обладает рядом математических и вычислительных преимуществ [54, 55]. МКЭ разработан для исследования напряженно-деформированного состояния упругих тел и с момента своего создания применялся параллельно с развитием теоретических основ механики. Он используется для моделирования задач теории пластичности, ползучести и других механических процессов [56, 57].

Метод конечных элементов (МКЭ) представляет собой численный метод решения дифференциальных уравнений в частных производных. Основная идея метода заключается в разделении исследуемой области на конечное количество подобластей, называемых конечными элементами, которые имеют простую геометрическую форму. В пределах каждого конечного элемента искомые функции аппроксимируются с помощью полиномов. Коэффициенты полиномов определяются на основе значений искомых функций в узлах элементов. Задача сводится к вычисле-

нию значений этих функций в точках сетки, покрывающей рассматриваемую область. Аппроксимация функций приводит к преобразованию задачи о стационарности функционала в задачу поиска экстремума функции нескольких переменных. Условия экстремума формулируются как система алгебраических уравнений, которая известна как система уравнений, лежащих в основе метода конечных элементов.

Для моделирования процессов свободного дорнования цилиндрических отверстий в трубчатых заготовках методом конечных элементов (МКЭ) необходимо учитывать геометрические параметры исследуемой области, включая наружный и внутренний диаметры цилиндра, а также его высоту. Физико-механические характеристики материала заготовки играют существенную роль в процессе обработки. Также требуется установить закономерность трения на контактной зоне между дорном и заготовкой, а помимо этого — задать геометрические параметры самого дорна.

В результате численного анализа строится графическое изображение смещений узлов конечно-элементной сетки, а также данные о расчётных параметрах в каждой узловой точке. К таким параметрам относятся интенсивности деформаций и напряжений, радиальные и осевые смещения, радиальные, окружные, осевые и сдвиговые деформации, радиальные, осевые, окружные и касательные напряжения, остаточные деформации и остаточные напряжения после снятия нагрузки [27].

С использованием специализированных программных комплексов на вычислительной технике возможно проведение виртуальных численных экспериментов с требуемой точностью.

Большинство коммерческих пакетов для инженерного анализа [58–61] применяют численные методы решения систем дифференциальных уравнений, основанные на методе конечных элементов. Для этого используют различные программные комплексы, такие как Deform 2D/3D, Ansys/LS-Dyna и ABAQUS. Однако, эти разработки в основном выполняли для анализа деформирования компактных материалов.

В работе [11] представлено моделирование процесса дорнования с использованием метода конечных элементов и программного комплекса DEFORM. Исследование включало анализ влияния величины натяга на силу дорнования, напряжённодеформированное состояние, распределение повреждений в материале вокруг отверстия, а также конечные форму и размер отверстия после обработки. Моделирование проводилось в упругопластической постановке. Погрешность расчётных значений силы дорнования относительно экспериментальных данных не превысила 10 %.

В работах [62, 63] показано свободное дорнование образцов из порошковой меди. Изучено влияние пористости и изменение силы свободного дорнования с использованием жесткопластическое модели деформирования.

В исследовании [64] с использованием программного пакета Ansys установлено влияние радиального натяга дорнования на локальное напряженно-деформированное состояние полосы из алюминиевого сплава 1163 толщиной 5 мм и диаметром отверстия $d_o = 8$ мм. Получены характеристики остаточных напряжений, проанализированы дефекты дорнования.

В статье [65] анализируется геометрия очага деформации и формулируются задачи конечно-элементного моделирования контактных напряжений при упругопластическом деформировании составного цилиндра методом дорнования.

В настоящее время существует ограниченное количество теоретических исследований, посвящённых процессу дорнования трубчатых заготовок из пористого материала, а также оценке физико-механического состояния упрочнённой внутренней поверхности. Среди них можно выделить лишь две работы, авторами которых являются О.А. Розенберг с сотрудниками [9].

В работе [64] представлены исследования радиального деформирования порошковых втулок при их протягивании с одновременным упрочнением внутренней поверхности. В работе [66] предложена модель для анализа эволюции плотности и накопленной деформации в твёрдой фазе, основанная на теории пластичности пористых тел. В работе [67] для исследования процесса упрочнения пористых втулок

методом многократного протягивания по внутреннему диаметру использовался пакет ABAQUS. Отличительной особенностью работ является применение гидростатической составляющей напряжённого состояния, что предотвращало разрушение изделия.

Упомянутые исследования [67] не охватывают изучение влияния исходной пористости материала, а также таких ключевых параметров, как натяг, угол заборного конуса и геометрия заготовки, на процесс свободного дорнования трубчатых заготовок из порошковых материалов.

В работах [68, 69] и других представлены различные формулировки задач теории течения пористых тел на основе метода конечных элементов. Одной из ключевых особенностей данных задач является использование теории течения для пластически сжимаемых тел [68]. Выбор математических моделей для описания материала осуществляется с учетом его физико-механических характеристик и условий проведения технологических процессов.

Упругопластическая модель деформируемого материала применяется для описания поведения материалов в условиях, когда при малых нагрузках они проявляют упругие свойства. При увеличении нагрузки в материале возникают области пластической деформации. Для анализа таких задач принимается гипотеза о несжимаемости материала [70].

Жесткопластическая модель деформируемого материала используется для анализа поведения порошковых пористых сред, в которых упругая деформация незначительна, а преобладает структурная деформация, характеризующаяся перемещением частиц с целью уплотнения материала [70].

Существует множество математических моделей упругопластического деформирования материалов, основанных на теории течения при комбинационном изотропно-кинематическом упрочнении [70-73]. Эти модели находят применение при решении задач, связанных с особенностями деформирования конкретных элементов конструкций. Экспериментальные данные подтверждают эффективность данных моделей для широкого спектра конструкционных сталей и сплавов при различных режимах нагружения. В рамках этих моделей предполагается, что материал

является однородным и изначально изотропным. В процессе упругопластического деформирования в нем может возникать только деформационная анизотропия. Относительное изменение объёма ε_{ij} мало и является упругой деформацией, пропорциональной гидростатическому давлению I_1 :

$$\varepsilon_{ij} = 3KI_1, \tag{1.6}$$

$$I_1 = \sigma_{cp} = \frac{1}{3}(\sigma_z + \sigma_r + \sigma_\theta), \qquad (1.7)$$

$$K = \frac{E}{1 - \nu'} \tag{1.8}$$

где К – коэффициент объёмного сжатия;

 σ_{cp} – среднее нормальное напряжение или гидростатическое давление;

Е – модуль Юнга;

ν – коэффициент Пуассона.

Тензор приращений деформаций $d\varepsilon_{ij}$ представляет собой суммой тензоров приращений упругих $d\varepsilon_{ij}^{e}$ и пластических $d\varepsilon_{ij}^{p}$ деформаций:

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p. \tag{1.9}$$

Приращение компонент пластической деформации определяется ассоциированным с условием текучести законом пластического течения [70]:

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}},\tag{1.10}$$

где $d\lambda \ge 0$ – некоторый скалярный множитель;

f(σ_{ij}) – бесконечно малый пластический потенциал.
Для несжимаемых материалов:

$$\frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} = 0. \tag{1.11}$$

Выражение (1.11) применяется при анализе течения среды в пространстве главных напряжений, что типично для осесимметричных задач и находит широкое применение в практических расчетах.

Упругопластическая модель материала применяется в обработке давлением порошковых материалов, что позволяет определить распределение напряжений и деформаций. Однако эта модель, разработанная для несжимаемых материалов, не обеспечивает корректного описания характеристик порошковых пористых материалов. Это существенно ограничивает её применимость при анализе процессов получения высокоплотных изделий.

В теории пластичности для несжимаемых материалов применяется переход от скоростей деформаций к деформациям. Этот переход допустим при условии, что все компоненты тензора напряжений изменяются пропорционально какому-либо монотонно возрастающему параметру. Однако для пористых материалов такой переход неприменим, что ограничивает использование упругопластической модели для описания пластического уплотнения.

В связи с ограничениями стандартной упругопластической модели при описании деформации пористых материалов в современной теории пластичности порошкообразных пористых сред разрабатываются два основных направления:

- феноменологический подход, основанный на экспериментальных исследованиях кривых течения пористых материалов. Этот метод предполагает изучение свойств материалов без детального учёта их микроструктуры;

- структурно-феноменологический подход, который включает создание физической модели деформируемого тела с учётом его структурных особенностей. Затем проводится экспериментальная проверка определяющих соотношений, что позволяет рассматривать процесс деформирования пористых материалов в контексте механики структурно неоднородных сред [70].

В теории пластичности порошковых и пористых материалов разработана концепция жесткопластического тела, в рамках которой упругие деформации не учитываются, поскольку структурные изменения происходят параллельно с ними. Это позволяет использовать определяющие уравнения для материалов, подверженных пластическому уплотнению, основываясь на скоростях деформаций, а не на компонентах тензора напряжений [74].

Определяющие соотношения моделей жесткопластического тела рассматриваются в рамках теории упрочняющегося пластического тела с сингулярными поверхностями нагружения, имеющими вид кругового цилиндра бесконечной длины, и вписанной в этот цилиндр шестигранной призмы (в соответствии с условиями Мизеса и Треска). Общий вид условия пластичности сжимаемого жесткопластического тела имеет вид [70, 75]:

$$f(I_1, J_2, I_3) = 0, (1.12)$$

где *I*₁ – гидростатическое давление или первый инвариант тензора напряжений, характеризуется тем, что при любом преобразовании системы координат остаётся неизменным;

*J*₂ – второй инвариант девиатора напряжений, характеризует касательные напряжения и определяется как их интенсивность;

*I*₃ – третий инвариант тензора напряжений.

Второй инвариант девиатора напряжений определяется как

$$J_2^2 = \frac{1}{2} s_{ij} s_{ij}, \tag{1.13}$$

где *S_{ij}*- компоненты девиатора напряжений;

 $s_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_{cp} \delta_{ij}$, σ_{ij} – компоненты тензора напряжений.

Ассоциированный закон течения даёт для скоростей деформации вдоль главных направлений выражение [70]:

$$e_i = \lambda[\varphi(\sigma_i - \sigma) + 2\psi I_1] = \lambda(\varphi S_i + 2\psi I_1), \quad (i = 1, 2, 3)$$
(1.14)

где *S_i* – главные компоненты девиатора напряжений;

λ – множитель Лагранжа.

Для решения краевой задачи деформируемый объём дискретизируется конечнымиэлементами. При этом используются соотношения, связывающие напряжения и скорости деформаций в конечном элементе с узловыми значениями скоростей перемещений и средних нормальных напряжений. Параметры и зависимости между напряжённым и деформированным состояниями определяются для каждой стадии нагружения пластически сжимаемого тела. Критерием адекватности подбора этих параметров является выполнение условия пластичности.

1.4 Остаточные напряжения в детали, возникающие при дорновании

В процессе дорнования в заготовках формируются значительные макронапряжения, обусловленные неоднородностью пластических деформаций по толщине стенки [15, 17 20-21]. Область материала вокруг отверстия подвергается интенсивной пластической деформации, в то время как остальная часть заготовки испытывает упругие или незначительные пластические деформации. При снятии деформирующего усилия происходит разгрузка различных участков металла. Пластически деформированные слои, прилегающие к поверхности отверстия, создают препятствия для релаксации упруго деформированных зон. [11, 21]. В результате взаимодействия этих участков возникают остаточные напряжения после прохода деформирующего инструмента. Остаточные напряжения также могут быть вызваны силами трения между дорном и поверхностью отверстия, способствующими сдвиговым деформациям в приповерхностном слое металла [11].

В стальных заготовках после дорнования отверстий максимальные окружные остаточные напряжения σ_{θ} [11, 21, 76] могут достигать предела текучести или пре-

вышать его. В зависимости от параметров процесса (относительный натяг, соотношение диаметров цилиндра и отверстия) формируются как сжимающие, так и растягивающие остаточные напряжения. Сжимающие напряжения возникают при малом натяге (менее 1 %) и характерны для малоуглеродистых сталей [7, 9]. Растягивающие напряжения могут появляться при большом натяге (более 1–1,5 %) и характерны для прочных материалов. Увеличение натяга приводит к росту абсолютных значений остаточных напряжений. Для цилиндров с $D_o/d_o \ge 3$ возникают сжимающие напряжения, которые увеличиваются с ростом D_o/d_o [77, 78].

В поверхностном слое осевые остаточные напряжения могут изменяться в зависимости от параметров процесса деформирования. Одноцикловое дорнование цилиндров с отношением $D_o/d_o \le 1,5$ и увеличении натяга возможно создание растягивающих напряжений [11]. Уменьшение натяга до 1–1,5 % от диаметра отверстия, формируют сжимающие напряжения. На величину осевых напряжений влияет смазывание и угол заборного конуса дорна. К уменьшению осевых сжимающих напряжений приводит снижение трения и уменьшение угла заборного конуса. В работе [4] показано, что с увеличением степени толстостенности D_o/d_o втулок осевые остаточные напряжения возрастают. Снижение осевых напряжений обеспечивается переходом от схемы дорнования со сжатием к растяжению заготовки на 15– 30 % [11].

На внутренней и наружной поверхности отверстия цилиндров радиальные остаточные напряжения равны нулю, а в остальной части они являются сжимающими [7, 76]. Радиальные и окружные остаточные напряжения пропорциональны пределу текучести материала детали. В некоторых случаях величина окружных остаточных напряжений может приближаться к пределу текучести или даже превышать его [7, 11, 77].

Остаточные напряжения в поверхностном слое, контактировавшем с дорном, играют ключевую роль в формировании качества поверхности и оказывают значительное влияние на эксплуатационные характеристики деталей. Эти напряжения существенно воздействуют на износостойкость, усталостную прочность, предел упругости, сопротивление хрупкому разрушению, контактную жёсткость и коррозионную стойкость [7, 11, 21, 27].

Установлено, что поверхностные сжимающие остаточные напряжения повышают долговечность деталей, особенно в зонах концентрации напряжений при знакопеременных нагрузках. Дорнование создаёт сжимающие остаточные напряжения у поверхности отверстия и уменьшает вероятность образования микродефектов, таких как субмикроскопические трещины, надрезы и концентраторы напряжений [21, 79]. Дорнование увеличивает усталостную прочность алюминиевых сплавов в 2–6 раз, а иногда до 10–11 раз [80, 81], и титановых сплавов в 1,7–2,2 раза [82]. Исследования [11, 69, 82] показывают, что дорнование замедляет распространение усталостных трещин.

В работах [7, 11, 83] исследовано влияние параметров дорнования полых цилиндров из компактных сталей на микротвёрдость наклёпанного слоя. Увеличение натяга дорнования приводит к росту микротвердости и толщины упрочнённого слоя, который охватывает стенку цилиндра в большей степени при увеличении его толщины. Рост числа циклов обработки усиливает упрочнение. Увеличение степени толстостенности D_o/d_o от 3,2 до 10 приводит к росту контактных давлений и пластических деформаций, при этом увеличивается микротвердости деформированного слоя.

Экспериментально исследовано влияние обработки дорнами с разными углами заборного конуса на физико-механические и эксплуатационные свойства спечённых полых цилиндрических заготовок из порошковой стали ПА-ЖГр3 [84]. Установлено, что поверхностная микротвердость увеличивается незначительно с ростом степени деформации, тогда как глубина слоя с повышенной микротвердостью растёт значительно. Для достижения заданного качества отверстий в изделиях из порошковых материалов методом поверхностного пластического деформирования требуется определить оптимальную степень деформации и размеры инструмента.

Остаточные напряжения после дорнования трубчатых заготовок из компактных материалов зависят от натяга дорнования i или $\sum i$, степени толстостенности

 D_o/d_o и механических свойств материала [7, 11, 21]. Увеличение компонентов остаточных напряжений происходит при увеличении степени толстостенности, натяга и числа циклов дорнования (или зубьев дорна) [11, 21]. При дорновании спечённых полых цилиндров из железного порошка в обойме наблюдалось увеличение толщины слоя с повышенной микротвердостью при увеличении натяга дорнования. Упрочнение пористых заготовок при свободном дорновании требует дополнительного исследования.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1

Дорнование является эффективным способом отделочно-упрочняющей обработки отверстий. Дорнование заготовок по схеме сжатия проводят для сравнительно коротких заготовок из компактных сталей ($L_o/d_o < 5$). Длинные заготовки, длина которых превышает отношение ($L_o/d_o > 5$), а также заготовки с недостаточной жёсткостью, подвергаются обработке по схеме, предусматривающей растяжение или осевое заневоливание.

Сила дорнования деталей, изготовленных из компактных материалов, определяется физико-механическими характеристиками материала, параметрами заготовки, геометрией инструмента, величиной и характером трения на контактных поверхностях, а также другими факторами. Для деталей из таких материалов установлены оптимальные значения этих технологических параметров, которые обеспечивают эффективное и качественное выполнение операции дорнования.

Установлено, что на процесс свободного дорнования заготовок из компактных материалов влияют геометрические параметры заготовок. При дорновании полых цилиндров из компактных материалов с применением значительных натягов, со степенью толстостенности $D_o/d_o \ge 3$, наблюдается значительное увеличение деформирующей силы. Увеличение силы дорнования происходит при увеличении натяг дорнования, в отличие от случаев дорнования с малым натягом (до 1%). Относительная высота заготовок L_o/d_o также оказывает влияние на величину деформирующей силы и формирование наплывов металла на торцах цилиндров.

4. Проведено множество исследований процесса дорнирования отверстий в заготовках из компактных материалов с применением методов компьютерного моделирования. Компьютерное моделирование не учитывает неоднородный характер микроструктуры характерный для порошковых пористых заготовок, в основном используется упругопластическая модель материала.

5. Работ, в которых проводилось моделирование процесса дорнования отверстий в заготовках из порошкового пористого материала очень мало. В имеющихся работах не рассматриваются вопросы влияния исходной пористости материала, а также основных параметров процесса (геометрии заготовки, параметров инструмента) на характеристики свободного дорнования таких материалов.

6. Остаточные напряжения после дорнования трубчатых заготовок из компактных материалов определяются, в основном, натягом дорнования, степенью толстостенности, а также механическими свойствами материала заготовок. Однако упрочнение материала пористых заготовок при свободном дорновании требует изучения.
ГЛАВА 2

ВЫБОР НАПРАВЛЕНИЯ И МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ СВОБОДНОГО ДОРНОВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОЛЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

2.1 Выбор материала и образцов для исследований

Среди многообразия номенклатуры машиностроительных деталей значительное место занимают втулки, используемые в станках, автомобилях, тракторах, вагонах, тепловозах, различного вида конвейерах и приспособлениях. Они применяются в качестве подшипников скольжения, направляющих, корпусов и т.п. Втулки предназначены для работы в условиях вращательного, колебательного и линейного движения. Гладкие втулки предназначены только для работы с радиальными нагрузками. Втулки с фланцем могут выдерживать радиальные и осевые нагрузки в одном направлении. Наиболее широкое применение нашли гладкие цилиндрические втулки с отношением высоты детали к её наружному диаметру Hд/Dд = 0,5-2,5.

Втулки изготавливают по квалитетам IT8, IT9 по наружному диаметру и IT9, IT10 по внутреннему диаметру из чугунов марок СЧ15 – СЧ32, КЧ35-10, АЧС-2, сталей марок 20, 20Г, 40, 20ХГТ, бронз ОЦС 5-5-6, ОЦС 6-6-3 и др. механической обработкой заготовок с припусками на обработку 2,0-3,5 мм. Коэффициент использования металла колеблется в пределах от 0,35 до 0,72.

Для исследования процесса свободного дорнования заготовок из порошковых материалов использовали образцы втулок, изготовленные методами порошковой металлургии из порошка, стабилизированного медного марки ПМС-1 (ГОСТ 4960-2017) легированного порошком титана марки ВТ1-0 (ОСТ 1.90013-81). Порошок ПМС-1 получают электролитическим методом, его частицы имеют дендритную форму, номинальную величину 0,1 мм и следующий химический состав (таблица 2.1).

		Приме						
Марка	Медь, не менее, %	Железо	Свинец	Мышьяк	Сурьма	Кислород	Сернокислые соединения ме- таллов в пере- счете на ион SO4	ылага, е более, %
ПМС-1	99,5	0,02	0,05	0,005	0,01	0,30	0,01	0,05

Таблица 2.1 – Химический состав материала образцов, (ГОСТ 4960-2017)

Насыпная плотность медного порошка составила 1700 кг/м3, что соответствует нормам, указанным в ГОСТ 4960-2017.

Для повышения износостойкости втулок медный порошок смешивали с порошком титана ВТ1-0, массовая доля которого составила 6 %. В таблице 2.2 дан химический состав порошка титана.

Таблица 2.2 – Химический состав порошка титана ВТ1-0 (ОСТ 1.90013-81)

Массовая доля, %													
не менее		не более											
Ti	Al	Fe	Si	С	0	N	Н	прочие примеси, включая Ni, Cu, Cr, Mn					
98,28	0,7	0,3	0,10	0,007	0,20	0,04	0,010	0,03					

Насыпную плотность порошковой смеси меди и титана находили согласно ГОСТ 19440-94. Ее значение равно 1650 кг/м3 при содержании титана 6 %. Плотность порошковой медно-титановой смеси составила 8474,6 кг/м3.

На Рисунке 2.1 показан чертёж заготовки втулки, применяемой для экспериментальных исследований.



Рисунок 2.1 – Эскиз порошковой втулки

2.2 Технологический процесс изготовления образцов для экспериментальных исследований свободного дорнования

Образцы для экспериментальных исследований дорнования изготовляли по следующей методике. Перед приготовлением навесок порошок просеивался на вибросите сквозь сетку 0045К (ГОСТ 6613-86). Взвешивание навесок производили на весах ВЛКТ-500 (ГОСТ 24104-2001) с точностью ±0,0005 г.

Массу навесок компонентов смеси определяли исходя из массы образцов и требуемого их содержания в смеси по формуле [45]:

$$m_i = m_{CM} \cdot X_i \tag{2.1}$$

где *m*_{см} - масса порошковой смеси, г;

 X_i - долевое содержание компонентов в смеси, %.

Массу порошковой смеси рассчитывали исходя из объёма и плотности образца по формуле [45]:

$$m_{CM} = V \cdot \rho_{CM} \cdot \Theta, \qquad (2.2)$$

где V – объем образца, м³;

 $ho_{\rm CM}$ – плотность порошковой смеси кг/м³;

 Θ – относительная плотность заготовки, определяемая по формуле:

$$\Theta = 1 - \frac{\theta}{100},\tag{2.3}$$

где θ – необходимая пористость заготовки, %.

Плотность порошковой смеси рассчитывали по формуле аддитивности [45]:

$$\rho_{CM} = \frac{100\%}{\frac{X_{Cu}}{\rho_{Cu}} + \frac{X_{Ti}}{\rho_{Ti}}}$$
(2.4)

где X_{Cu} - содержание меди в смеси, %; плотность меди ρ_{Cu} =8940 кг/м³;

 X_{Ti} - содержание титана в смеси, %; плотность титана ρ_{Ti} =4505 кг/м³.

Взвешивание навесок производили на весах ВЛКТ – 500 (ГОСТ 24104-2001) с точностью ±0,0005 г.

На рисунке 2.2 показана блок-схема технологического процесса изготовления образцов втулки для свободного дорнования. Смешивание компонентов порошковой смеси определённого состава выполняли механическим методом.

Заготовки втулки получали односторонним прессованием на гидравлическом прессе модели ПД-476 силой 1600 кН в штампе [85], схема которого показана на Рисунке 2.3. В полость между матрицей 4 и упором 1 засыпали приготовленную навеску порошка (Рисунок 2.3, а). На следующем этапе выполняли прессование заготовки пуансоном 6. Нижний пуансон 2 выталкивал готовую заготовку 5. Для каждой серии экспериментов путём варьирования массы навески получали заготовки с разными геометрическими размерами и пористостью 6, 15, 24 %. Плотность образцов, соответственно, составила 7966,1 кг/м³, 7203,4 кг/м³, 6440,7 кг/м³. На Рисунке 2.3, 6 показано фото лабораторного штампа.

После прессования заготовки спекали в печи со скоростью 3 °С/мин по ступенчатому режиму: нагрев до температур 100...120°С, 200...220°С, 300...320°С, 400...420°С, 500...520°С и 600...620°С с выдержкой при каждой температуре 30 мин., подъём до температуры спекания 920°С и выдержка 3 ч. Спекание производили в среде генераторного газа [86]. Режим спекания выбран с учётом физико-химических процессов, обуславливающих формирование контактов между частицами порошка и повышение плотности заготовок [50].









б

схема штампа – а; фото – б

1 – упор; 2 – нижний пуансон; 3 – нижняя плита; 4 – матрица; 5 – заготовка; 6 – верхний пуансон

Рисунок 2.3 – Схема штампа и фото для прессования порошковых полых заготовок по односторонней схеме в закрытой матрице После спекания заготовок выполняли контроль размеров измерением их высоты и диаметров микрометром МК-25-1 (ГОСТ 6507-90) с точностью ±0,005 мм, величину пористости определяли по формуле:

$$\theta = 1 - \frac{\rho}{\rho_k},\tag{2.5}$$

где *р* – плотность заготовки после спекания;

 ρ_k – плотность компактного материала.

Свободное дорнование выполняли в экспериментальном штампе (Рисунок 2.4), установленном на гидравлическом прессе модели ПД-476 силой 1600 кН. Полую заготовку 3 устанавливали на матрицу 5. Опускался дорн 2, закрепленный на стержне 1. После дорнования дорн 2 поднимался вверх, и с помощью пружины 6 образец выталкивался из матрицы 5.





б

схема штампа –а; фото штампа – б

1 – стержень; 2 – дорн в верхнем положении; 3 – полая заготовка; 4 – дорн в нижнем положении; 5 – матрица; 6 – пружина

Рисунок 2.4 – Схема штампа –а и фото штампа – б для свободного дорнования

После свободного дорнования исследовали микроструктуру и механические свойства полученных образцов втулки.

2.3 Теоретические обоснование свободного дорнования образцов из порошкового медно-титанового материала

2.3.1 Использование теории пластичности порошкового материала

Для моделирования использовали вариант теории пластичности, предложенный в работах [71, 87-88]. В его основе лежит представление о пластическом потенциале, как о функции компонентов тензора напряжений, которому в пространстве напряжений соответствует гладкая, выпуклая и замкнутая поверхность. На основе многочисленных экспериментальных и теоретических исследований он может быть представлен в форме [1]:

$$F = \frac{\tau^2}{\varphi} + (1+m)^2 \frac{\left(p + \frac{m}{m+1}\bar{\rho}\sigma_s\sqrt{\psi}\right)}{\psi} - \bar{\rho}\sigma_s \tag{2.6}$$

где $p = \frac{1}{3}\sigma_{ij}\delta_{ij}$ - гидростатическое давление; $\tau = \sqrt{(\sigma_{ij} - p\delta_{ij})(\sigma_{ij} - p\delta_{ij})}$ - интенсивность касательных напряжений.

Пористость θ или относительная плотность $\bar{\rho}$ связаны между собой соотношением $\bar{\rho} = 1 - \theta$.

Функции пористости согласно описываются:

$$\varphi = (1 - \theta)^2, \ \psi = \frac{2}{3} \frac{(1 - \theta)^2}{\theta},$$
 (2.7)

Параметр *m* характеризует уровень дефектности контактов в порошковой заготовке. Данный показатель оказывает влияние на различие значений сопротивления материала при проведении испытаний на растяжение и сжатие. Кроме того, параметр σ_s определяет напряжение течения в твёрдой фазе пористого материала [89].

Интенсивность скоростей деформации сдвига:

$$H = \sqrt{\frac{2}{3}}\sqrt{(e_z - e_r)^2 + (e_r - e_\theta)^2 + (e_\theta - e_z)^2} = 2\lambda\psi\sqrt{J_2},$$
 (2.8)

Найдём скалярный множитель Лагранжа в ассоциированном законе течения:

$$\lambda = \frac{H}{2\psi\sqrt{\sigma_{cp}}}.$$
(2.9)

Уравнение для скоростей деформации (2.10) запишется как:

$$\frac{e_i}{H} = \frac{I}{2\sqrt{J_2}} \left(S_i + \frac{2\varphi \cdot I_1}{\psi} \right), \quad (i = 1, 2, 3), \tag{2.10}$$

а скорость изменения объёма, вызванная формоизменением:

$$e = e_z + e_r + e_\theta = \frac{3\varphi H \sigma_{\rm cp}}{\psi \sqrt{J_2}}.$$
 (2.11)

При нулевой пористости $\phi = 0$, $\psi = 3$, соответственно (2.9), (2.10), (2.11) также будут совпадать с обычными уравнениями теории пластического течения Леви-Мизеса.

Так как объем материала изменяется за счёт изменения объёма пор:

$$e = \frac{1}{1-\theta} \frac{d\theta}{dt},\tag{2.12}$$

то из (2.11) получим:

$$\frac{d\theta}{dt} = (1 - \theta) \frac{3\varphi H \sigma_{cp}}{\psi \sqrt{J_2}}.$$
(2.13)

Уравнение (2.13) является кинетическим уравнением изменения пористости порошкового материала в процессе его пластической деформации [70].

В программном комплексе Deform 10.2 был создан материал, механические характеристики которого соответствуют медно-титановому сплаву. Модуль Юнга

для этого материала составляет 128 ГПа, а коэффициент Пуассона - 0,34. Кривые упрочнения для медно-титанового материала при различных скоростях деформации представлены в виде таблицы [88]. Условие текучести материала определяется по теории течения Мизеса.

При дорновании напряжения на контактной поверхности заборного конуса дорна и заготовки обычно превышают величину напряжения текучести σ_s материала детали или соизмеримы с ним. Для описания трения использовали закон трения Зибеля $\tau_f = m\sigma_s$, где m – фактор трения [90, 91]; для процессов холодной деформации при наличии принимали m = 0.08 [28].

2.3.2 Использование метода конечных элементов для моделирования операции свободного дорнования

Программный комплекс DEFORM-2D/3D, разрабатываемый компанией Scientific Forming Technologies Corporation (США) с 1980-х годов, широко применяется ведущими мировыми научно-исследовательскими институтами и промышленными предприятиями для моделирования процессов обработки материалов. Пакет DEFORM-3D имеет модульную структуру, в которую входят три основных модуля: подготовки исходных данных (Preprocessing), решения (Solver), и обработки, и вывода результатов моделирования (Postprocessing).

Математические модели в программном комплексе DEFORM-3D основаны на континуальной теории пластического течения как горяче- так и холоднодеформированных тел, с помощью которой можно предсказать поведение материалов при различных напряженно-деформированных состояниях.

Для исследования свободного дорнования использовали детали типа тел вращения – цилиндрические трубчатые заготовки, при компьютерном моделировании процесса дорнования для которых введён термин «порошковый полый цилиндр». Сетка на расчётной области генерировалась автоматически со сгущением (окном плотности) в зоне наиболее интенсивной деформации материала.

В программном комплексе DEFORM-3D кривые деформационного упрочнения пористого материала строятся на основе кривых упрочнения материала твёрдой фазы с учётом текущего уровня пористости. Эти данные задаются в виде таблицы.

Для проведения моделирования база материалов DEFORM-3D была дополнена материалом Cu+Ti, для определения реологических свойств которого были использованы кривые упрочнения (Рисунок 2.5) из справочника [55], полученные испытаниями на сжатие при комнатной температуре.



Рисунок 2.5 – Кривые деформационного упрочнения медно-титанового материала при комнатной температуре и скорости деформации [91]

Физические и механические свойства материалов в DEFORM-3D описывается в виде графиков изменения параметров, построенных при помощи задания массивов данных или в виде формул. Данные о напряжении текучести из справочника оцифровывались и переводились в табличную форму с помощью свободно распространяемой утилиты Graph2Digit. После чего табличный массив копировался в шаблон создания материала в базе материалов пакета DEFORM-3D.

В работе изучали энергосиловые параметры свободного дорнования, локальное уплотнение материала, характеристики напряженно-деформированного состояния и формоизменение цилиндрической полой заготовки в зависимости от ее исходной пористости, натяга дорнования, угла заборного конуса, геометрических параметров заготовки.

2.4 Приборы, аппаратура и методики исследований

Давление при выполнении дорнования определяли по манометру на гидравлическом прессе модели ПД-476 силой 1600 кН. Затем рассчитывали силу дорнования, используя величину площади поршня пресса и величину давления. Плотность после дорнования структурно-неоднородного медно-титанового материала определяли портативным плотномером DA 130, который снабжён специальным щупом (диапазон измерений: 0,001...2,000 г/см³, относительная погрешность измерений: ±0,001 г/см³). Применение портативного плотномера даёт возможность определить изменение плотности во внутреннем поверхностном слое и непосредственно в теле полого образца.

Исследование микроструктуры выполняли на шлифах, вырезанных из тела полого цилиндра и поверхностного слоя, упрочнённого дорнованием. Шлифы изготавливали по стандартной методике – шлифованием и полированием, затем травили в реактиве № 11 [92] на основе хлорного железа (FeCl₃) для выявления границ зёрен. Микроструктуру изучали на растровом электронном микроскопе РЭММА – 102.

Твёрдость образцов определяли согласно ГОСТ 9012–59 на приборе Бринелля HPO–250. В качестве индентора применяли шарик закаленной стали диаметром 5 мм, который вдавливался с силой P = 2500 Н. Продолжительность выдержки составила 30 с. Диаметр отпечатка измеряли при помощи микроскопа МИМ–7 с предельной погрешностью $\pm 0,001$ мм.

Микротвердость определяли на приборе ПМТ-3 в соответствии с ГОСТ 9450-76 по ширине стенки полых образцов с интервалом от 0,5 до 1 мм измерением диагонали отпечатка при вдавливании алмазной пирамиды под действием нагрузки 20 г в полированную поверхность зерна.

Геометрические размеры образцов до деформирования и после, упругое радиальное расширение образцов определяли микрометрами МК-25-1 и МК-50-1 (ГОСТ 6507-90) с точностью до ± 0,005 мм. Упругое осевое увеличение образцов определяли по ГОСТ 2068-70.

В результате проведённых экспериментальных исследований были определены остаточные деформации образцов, возникающие при дорновании отверстий. Анализ включал оценку окружных деформаций на внутренней и наружной поверхностях, а также осевой деформации наружной поверхности. Вычисление указанных деформаций осуществлялось с применением соответствующих соотношений:

$$\frac{d-d_0}{d_0}; \frac{D-D_0}{D_0}; \frac{L-L_0}{L_0},$$
(2.14)

где *d*, *D*, *L* - соответственно средние диаметры отверстия и наружной поверхности образцов и их высота после дорнования отверстий;

 d_0 , D_0 , L_0 - те же размеры образцов до дорнования отверстия.

На всех этапах экспериментальных исследований, включая изготовление образцов, обработку экспериментальных данных, определение плотности, микротвердости, силы дорнования и геометрических размеров образцов, применялись методы математической статистики. Обработка данных осуществлялась на ПЭВМ с использованием стандартных программных пакетов, таких как Mathematica 3.0 и STATISTICA.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

1. Определён материал для исследований - медный порошковый материал марки ПМС-1, легированный пороком титана марки ВТ1-0. Разработан экспериментальный технологический процесс, включающий прессование порошковых полых цилиндров, спекание, свободное дорнование порошковой полой заготовки. Спроектирован и изготовлен инструмент, выбрано оборудование. Поставлена задача теоретических исследований, в результате которых должен быть выполнен анализ напряженно-деформированного состояния при различной исходной пористости материала полой заготовки

2. Рассмотрен и обоснован метод конечных элементов, который используется для теоретического анализа систем уравнений, описывающих пластическое течение металла с учётом закона трения на контактных поверхностях, заданной геометрии и свойств заготовки и инструмента, параметров процесса, начальных и граничных условий получить распределение напряжённо-деформированного состояния, пористости, плотности порошкового пористого материала.

3. Выбрано программное обеспечение DEFORM-3D, которое позволяет определить поведение материалов при различных напряженно-деформированных состояниях. Для анализа напряженно-деформированного состояния и эволюции пористости при свободном дорновании пористой полой заготовки использовали модель заготовки, на котором показана конечно-элементная модель заготовки.

4. Рассмотрены приборы, аппаратура и методики исследований для анализа качества образцов, получаемых свободным дорнованием. Для статистической обработки экспериментальных данных использованы стандартные программные пакеты «MathCAD 11» и «STATISTICA 6».

ГЛАВА 3

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОБОДНОГО ДОРНОВАНИЯ ПОРОШКОВЫХ ПОРИСТЫХ ЗАГОТОВОК

3.1 Общие положения

При конструировании полых заготовок, втулок, фланцев и других деталей машин, имеющих соосные цилиндрические поверхности различного диаметра с различной толщиной стенок, важным является разработка операций, позволяющих получить поверхность отверстия высокой точности и прочности при минимальной шероховатости.

Ключевое различие между деталями, изготовленными из компактных и порошковых материалов, заключается в исходной пористости последних. При дорновании необходимо получить поверхностный слой в отверстии заготовки, который должен иметь необходимую плотность и должен быть упрочнённым. При этом для получения заготовки с уплотнённым и упрочнённым внутренним слоем необходимо стремиться к минимальным энергозатратам.

Рассматриваем технологию свободного дорнования по схеме сжатия полого цилиндра, изготовленного из медного порошкового материала марки ПМС-1, легированного порошком титана марки ВТ1-0. Характеристика исходной заготовки: внутренний диаметр $d_o = 9,8$ мм, наружный диаметр $D_o = 28$ мм, высота $L_o = 20$ мм [96].

Параметры дорна: дорн однозубый, диаметр по ленточке d = 10 мм; ленточка шириной b = 1 мм; угол заборного конуса $\alpha = 4^{\circ}$; угол обратного конуса $\alpha_1 = 4^{\circ}$; в месте перехода конической части дорна в цилиндрическую кромка скруглена до R = 0,2 мм. Натяг дорнования составлял $i = d - d_0 = 0,2$ мм.

В процессе дорнования напряжения на контактной поверхности заборного конуса дорна и обрабатываемой поверхности обычно превышают напряжения те-

кучести σ_S материала или сравнимы с ним Поэтому для описания трения на контактной поверхности заборного конуса дорна и детали используем закон трения Зибеля $\tau_f = m\sigma_s$, где m – фактор трения [93, 94, 96]; для процессов холодной деформации при наличии смазки следует принимать m = 0.08 [28].

При выполнении теоретического исследования свободного дорнования порошкового пористого полого цилиндра методом компьютерного моделирования решали следующие задачи:

- анализ напряженно-деформированного состояния, плотности, остаточных напряжений, силы;

- анализ дорнования порошкового полого цилиндра с различными геометрическими параметрами;

- анализ дорнования порошкового полого цилиндра с различными геометрическими параметрами дорна;

- анализ условий образования дефектов при свободном дорновании полого цилиндра из порошкового материала.

3.2 Анализ напряженно-деформированного состояния, плотности, остаточных напряжений, силы

3.2.1 Напряженно-деформированное состояние при различной исходной пористости материала

Компоненты тензора напряжений описывают напряжённое состояние точки в деформированной области. Интенсивность напряжений σ_i описывает касательное напряжение на элементарной площадке, одинаково ориентированной относительно главных осей напряжений, что позволяет сравнить изменение напряжений при дорновании полого цилиндра в различных условиях. Иначе, интенсивность напряжений характеризует наличие пластической деформации, когда интенсивность напряжений достигает предела текучести $\sigma_i = \sigma_s$ [24].

При свободном дорновании полых цилиндров различной пористости на образующей поверхности наблюдается распределение интенсивности напряжений (Рисунок 3.1) по ширине стенки. Профили интенсивности напряжений по ширине стенке полого цилиндра показаны на Рисунке 3.2 а.

Анализ картины распределения интенсивности напряжений σ_i показал, что уменьшение исходной пористости до 6 % приводит к увеличению данного показателя до 230 МПа (Рисунок 3.1 а). Рост исходной пористости снижает интенсивность напряжений, и для пористости 24 % она составляет 140 Мпа. При исходной пористости 6% наблюдается максимальный очаг деформации, который переходит в очаг уплотнения.



а – 6 %; б – 15 %; в – 24 %



Анализ кривых интенсивности напряжений σ_i в очаге деформаций полого цилиндра по ширине стенки x с различной исходной пористостью показал, что ход кривых одинаковый различие заключается в величине у образующей поверхности (Рисунок 3.2, а). Для пористости 6 % ширина очага составляет 1,9 мм, при 15 % -1,5 мм, а при 24 % - 1,1 мм. Уменьшение исходной пористости приводит к увеличению очага деформации. Очевидно, для получения высокой плотности при большой исходной пористости объём структурной деформации недостаточен. Характеристикой упрочнения пластически деформированного слоя заготовки является распределение по ширине слоя интенсивности напряжений σ_i после обработки. В работе [95] экспериментально показано, что ход кривых распределения твёрдости по ширине механически упрочнённого слоя соответствует изменению интенсивности напряжений в слое. В контексте пластического деформирования, интенсивность напряжений в материале отражает повышенный предел текучести. Таким образом, интенсивность напряжений [96] после дорнования характеризует степень упрочнения внутреннего слоя полого цилиндра.





Рисунок 3.2 – Профили интенсивности напряжений и изменение гидростатического сжатия в очаге деформации при исходной пористости

При выполнении деформирования пористых материалов важным параметром является гидростатическое давление σ_{cp} характеризующее изменение объёма полого цилиндра. Для пористых материалов выполняется закон постоянства массы, в связи с тем, что при деформировании изменяется объём пор и закон постоянства объёма не выполняется (Рисунок 3.2, б). Гидростатическое давление обеспечивает сжимающие напряжения у образующей поверхности, по мере удаления от данной поверхности показатель уменьшается, для пористости 6 % гидростатическое давление из сжимающего переходит в растягивающее. Величина гидростатического

сжатия даёт возможность проследить переход очага деформации в очаг уплотнения [9]. Уменьшение исходной пористости материала приводит к увеличению гидростатического сжатия и, соответственно, увеличению очага деформации и плотности.

При увеличении гидростатического давления наблюдается рост сжатия для всех значений пористости исходного полого цилиндра в пределах определенной области деформации, которая переходит в зону уплотнения. Таким образом, гидростатическое давление способствует уплотнению материала на внутренней поверхности отверстия цилиндра [96].

На скорость течения материала u (Рисунок 3.3, а) и на интенсивность деформации ε_i (Рисунок 3.3, б) влияют напряжения в очаге деформации. При дорновании полого цилиндра с исходной пористостью 6% наблюдается наиболее высокая скорость течения материала по ширине x стенки [96]. Увеличение пористости материала, приводит к демпфированию интенсивности напряжений (Рисунок 3.2) и, соответственно, скорости течения материала (Рисунок 3.3, а). При увеличении исходной пористости наблюдается уменьшение очага деформации (Рисунок 3.3, б).



1-6 %; 2-15 %; 3-24 % пористость

Рисунок 3.3 – Изменение скорости течения – а и интенсивности деформации – б в очаге при дорновании полого цилиндра с исходной пористостью материала

Таким образом, установлено, что при дорновании в области контакта дорна и поверхности полого цилиндра образуется очаг деформации, переходящий в очаг

уплотнения. С уменьшением начальной пористости материала увеличивается гидростатическое сжатие, что приводит к росту очага деформации и способствует его уплотнению. Чем дальше от образующей отверстия полого цилиндра, тем меньше интенсивность напряжений, деформаций и скорость течения материала. Эти величины приближаются к значениям характерным для материала до свободного дорнования.

3.2.2 Относительная плотность полого цилиндра

В зоне контакта дорна с внутренней поверхностью полого цилиндра формируется объёмно-напряжённое состояние, приводящее к образованию очага деформации, который впоследствии трансформируется в очаг уплотнения [9]. Свободное дорнование приводит к уплотнению и упрочнению внутренней поверхности отверстия при постоянной исходной пористости наружной поверхности полого цилиндра.

На Рисунке 3.4 показано изменение относительной плотности ρ_r по высоте *z* полого цилиндра. Наибольшая относительная плотность и равномерность распределения по образующей поверхности наблюдается для полого цилиндра с исходной пористостью 6%.

Распределение относительной плотности по ширине стенки полого цилиндра с исходной пористостью материала 6 % и 15 % приведено на Рисунке 3.5. Свободное дорнование полого цилиндра пористостью 6 % приводит к увеличению относительной плотности на внутренней поверхности цилиндра и составляет $\rho_r = 0,99$. При дорновании полых цилиндров с исходной пористостью 15 % относительная плотность составляет $\rho_r = 0,93$ [97].



1-6%; 2-15%; 3-24%

Рисунок 3.4 – Распределение относительной плотности по высоте внутренней поверхности после дорнования полого цилиндра с исходной пористостью материала

Процесс уплотнения на начальной стадии носит локальный характер. Поверхности материала, находящиеся на значительном удалении от зоны контакта цилиндра с дорном, остаются неуплотненными, а в области контакта происходит интенсивное уплотнение. В результате на начальной стадии формируется зона повышенной плотности. По мере дальнейшего деформирования уплотнение распространяется на новые участки материала, сопровождаясь значительным увеличением относительной плотности в зоне первичного уплотнения (см. Рисунок 3.5).





Рисунок 3.5 – Распределение относительной плотности в полом цилиндре с исходной пористостью материала

Следовательно, увеличение относительной плотности внутренней поверхности полого цилиндра после дорнования зависит от его исходной пористости. При уменьшении исходной пористости наблюдается более интенсивный рост относительной плотности на внутренней поверхности полого цилиндра. При исходной пористости 6% относительная плотность достигает значения 0,98.

3.2.3 Остаточные напряжения при различной исходной пористости материала полого цилиндра

В рамках механики сплошных сред поверхностный слой порошковой заготовки рассматривается как область, обладающая механическими характеристиками, отличными от параметров основного объема материала. Эти отличия возникают вследствие различий в структуре, фазовом составе и химическом строении. Толщина и состояние данного слоя зависят от химического состава заготовки, условий технологической обработки, а также от факторов эксплуатации. Одним из ключевых показателей состояния поверхностного слоя выступают остаточные упругие напряжения, сохраняющиеся в материале после устранения внешнего воздействия.

Точность изготовления компонентов и качество их поверхности во многом определяются уровнем остаточных напряжений и деформаций, формирующихся в ходе дорнования.

На Рисунке 3.6 показаны эпюры остаточных окружных σ_{θ} , радиальных σ_r и осевых σ_z напряжений по ширине стенки полого цилиндра различной исходной пористости. Анализ эпюр остаточных напряжений показал, что ход кривых одинаковый, различие заключаются в величине у образующей поверхности и распределению по ширине стенки. После дорнования отверстий в полых цилиндрах наблюдаются сжимающие остаточные напряжения, величина которых увеличивается с уменьшением пористости исходного материала.

Исследования показали окружные остаточные напряжения в поверхностном слое являются сжимающими, по абсолютной величине они максимальны на поверхности отверстия. Их величина тем больше, чем меньше исходная пористость

материала.

Так, после дорнования полых цилиндров с исходной пористостью 6 % и 15 % остаточные окружные сжимающие напряжения на внутренней поверхности превышают предел текучести и составляют 100 МПа и 85 МПа соответственно. Увеличение исходной пористости полого цилиндра до 24 % приводит к уменьшению остаточных сжимающих окружных напряжений до 30 МПа.







Остаточные радиальные напряжения по ширине полого цилиндра являются сжимающими, они равны нулю на внутренней и внешней поверхности цилиндра [97] и достигают экстремума на расстоянии 1,1-1,6 мм от образующей отверстия.

Уменьшение исходной пористости заготовки приводит к увеличению величины радиальных напряжений.

Осевые остаточные напряжения являются максимальные по своей величине. На внутренней поверхности цилиндра они имеют сжимающий характер, а по мере удаления от оси отверстия переходят в растягивающие. При пористости материала 6% переход от сжимающих к растягивающим напряжениям происходит на расстоянии 3 мм от оси отверстия. Для пористости 15% этот переход наблюдается на расстоянии 2,1 мм, а для пористости 24% - на расстоянии 1,8 мм. С увеличением пористости материала с 6% до 24% остаточные осевые напряжения уменьшаются с 210 МПа до 43 МПа соответственно.

Изображение распределения интенсивности остаточных напряжений по ширине стенки полого цилиндра с различной исходной пористостью после проведения процесса дорнования показано на Рисунке 3.7. График распределения интенсивности остаточных напряжений по ширине стенки цилиндра представлен на Рисунке 3.8, а.

На Рисунке 3.7 представлено распределение остаточных напряжений по ширине стенки полого цилиндра при различной начальной пористости после дорнования. График интенсивности остаточных напряжений по ширине и высоте цилиндра показан на Рисунке 3.8, а. Наибольшая интенсивность остаточных напряжений зафиксирована для цилиндров с начальной пористостью материала 6%. Она уменьшается по мере удаления от образующей отверстия. Отметим, что при разной исходной пористости перелом на кривых зависит от расстояния, от образующей отверстий и находится в пределах 1,1-1,8 мм.

Величина интенсивности остаточных напряжений σ_i на Рисунке 3.8, а находится в хорошем согласии с данными о напряжении текучести σ_s пористых меднотитановых образцов, подвергнутых осадке при комнатной температуре, полученными в работе [98].

Графики на Рисунке 3.8, б подтверждают равномерность распределения остаточных напряжений на внутренней поверхности отверстия полого цилиндра (по его ширине), что соответствует и распределению относительной плотности (Рисунок

3.4). Такое распределение напряжений должно способствовать равномерному упрочнению внутренней поверхности отверстия полого цилиндра.



Рисунок 3.7 – Картина интенсивности остаточных напряжений после дорнования полого цилиндра с исходной пористостью



остаточных напряжений цилиндра: по ширине стенки - а; по высоте полого - б

1-6%; 2-15%; 3-24%

Рисунок 3.8 – Распределение интенсивности остаточных напряжений по ширине стенки и по высоте полого цилиндра с различной исходной пористостью

Исследование показало, что при дорновании полых цилиндров различной исходной пористости в очаге деформации образуются сжимающие остаточные напряжения. По мере удаления от очага деформации эти напряжения уменьшаются. При уменьшении исходной пористости полого цилиндра наблюдается увеличение величины остаточных напряжений.

3.2.4 Зависимость силы дорнования от исходной пористости материала полого цилиндра

Сила дорнования передается деформируемому участку полого цилиндра через поверхность непосредственного контакта с движущимся дорном. Она может быть представлена в виде трех основных составляющих. Первая составляющая, направленная на формообразование, определяется как произведение давления на проекцию контактной поверхности на плоскость, перпендикулярную направлению действия деформирующей силы. Вторая составляющая представляет собой силу трения, возникающую на поверхности заборного конуса дорна и направленную вдоль оси движения инструмента. Эта сила зависит от давления, действующего на контактной поверхности зуба дорна и заготовки. Третья составляющая связана с устранением пористости материала. Полная сила дорнования равна сумме всех составляющих, включающих силы сопротивления деформированию, силы трения и силы, затрачиваемой на устранение пористости материала [99].

На рисунке 3.9 представлены результаты исследования изменения силы дорнования в зависимости от перемещения дорна в полом цилиндре с различной пористостью материала цилиндра: 6%, 15% и 24%. При дорновании отверстия в цилиндре из компактного материала наблюдается рост силы до максимального значения 2400 Н при перемещении дорна на 12 мм, за которым следует её монотонное уменьшение. Очевидно, увеличение силы дорнования происходит при увеличении объёма очага деформации [100]. После достижения максимальной точки движения дорна наблюдается уменьшение силы дорнования, обусловленное уменьшением объема деформированного материала.

Увеличение пористости материала снижает силу дорнования и приводит к появлению плато на кривых 3, 4 (Рисунок 3.9). При этом кривые близко находятся друг от друга, что характеризует уменьшение зависимости силы дорнования от исходной пористости полого цилиндра. Дорнование полого цилиндра пористостью 6% по свойствам приближается к компактному материалу и на расстоянии 13 мм от образующей отверстия наблюдается максимум равный 1150 H, как и у компактного материала [100].



1- компактный, 2 – 6 %, 3 – 15 %, 4 – 24 %

Рисунок 3.9 – Сила дорнования при перемещении дорна в полом цилиндре с исходной пористостью материала

Объяснение изменения силы дорнования можно получить при анализе эволюции очага деформации и изменения гидростатического давления (см. Рисунок 3.10). На Рисунке 3.10, а показано внедрение дорна в поверхность полого цилиндра.

Максимальный очаг деформации на кривой 3 (Рисунок 3.9) показан на Рисунке 3.10, б. Величина гидростатического сжатия возрастает до 420 МПа

Рисунок 3.10, в характеризует уменьшение гидростатического сжатия до 330 МПа при выходе дорна из отверстия.

Сила дорнования полого цилиндра пористостью 6% затрачивается на преодоление сопротивления деформированию твёрдой фазы, а с пористостью 15 и 24 % на выполнение структурной деформации и последующее преодоление сопротивления деформированию твёрдой фазы [100] за счёт чего создаётся плато на кривых. Абсолютная величина давления на контактной поверхности в процессе дорнования изменяется незначительно, в пределах 10% [102]. Это приводит к практически постоянной силе дорнования (Рисунок 3.10, а). Размеры очага деформации достигают максимального значения при максимальной силе дорнования (Рисунок 3.10, б). На выходе дорна из полой цилиндрической заготовки сохраняется очаг деформации, который влияет на формирование наплывов (Рисунок 3.10, в).



а – на стадии внедрения дорна; б – на стадии максимальной силы; в – на выходе дорна
 Рисунок 3.10 – Картина эволюции гидростатического сжатия в очаге деформации при дорновании полого цилиндра из порошкового материала пористостью 15 %

Фаза пор приводит к возникновению упругой составляющей и структурной деформации. Степень деформации зависит от начальной пористости материала. При низкой пористости зависимость силы от перемещения дорна аналогична зависимости для компактного материала и имеет выраженный максимум. С увеличением пористости кривая силы теряет выраженный максимум [100] и приобретает платообразный характер, что свидетельствует о распространении зоны деформации по высоте отверстия. С ростом силы очаг деформации увеличивается в объёме и сохраняется после извлечения дорна из отверстия. Максимальная величина гидростатического сжатия соответствует максимальному значению силы дорнования.

Таким образом, сила дорнования зависит от начальной пористости полого ци-

линдра. При малых значениях пористости эта зависимость сильно ощутима и затрачивается на преодоление сопротивления твёрдой фазы. С ростом пористости зависимость уменьшается, и сила дорнования затрачивается на выполнение структурной деформации и последующего преодоления сопротивления деформированию твёрдой фазы.

3.3 Анализ дорнования порошкового полого цилиндра с различными геометрическими параметрами

3.3.1 Дорнование порошкового полого цилиндра с разной степенью толстостенности

Степень толстостенности полого цилиндра оценивается отношением D_0/d_o , где D_0 – наружный диаметр, d_0 - исходный внутренний диаметр. Для моделирования выбран полый цилиндр с размерами: исходный внутренний диаметр $d_0 = 9,8$ мм, наружный диаметр $D_0 = 16, 22, 28$ и 40 мм, длина $L_o = 20$ мм, отношение D_o/d_o составляло 1,63; 2,24; 2,86; 4,08. Натяг дорнования составлял 0,2 мм. Материал – медно-титановая порошковая заготовка с исходной пористостью 15 %.

Изменение интенсивности напряжений в очаге деформации при различной степени толстостенности приведено на Рисунке 3.11. Следует обратить внимание, что только на малом расстоянии от образующей отверстия x интенсивность напряжений отличается, далее она практически одинакова и не зависит от степени толстостенности, что свидетельствует об аналогичных процессах, происходящих в пористом материале.



Рисунок 3.11 – Изменение интенсивности напряжений в очаге деформации по ширине стенки при степени толстостенности



a - 1,63; 6 - 2,86



На Рисунке 3.12 и 3.13 показано, что при свободном дорновании полого цилиндра с начальной пористостью 15% и натягом 0,2 мм не удаётся достичь максимальной плотности материала. При степени толстостенности 1,63 относительная плотность составляет 0,92, а размер очага уплотнения равен 1,7 мм. При степени толстостенности 2,24 размеры очага уплотнения несколько увеличиваются [100]. Влияние степени толстостенности цилиндра на уплотнение материала в зоне отверстия проявляется только при малых значениях степени толстостенности, таких как 1,63 и 2,24. Для цилиндров с толстостенностью более 2,24 уплотнение практически [89] постоянно (Рисунок 3.13).



1 - 1,63; 2 - 2,24; 3 - 2,86; 4 - 4,08

Рисунок 3.13 – Профили относительной плотности по ширине стенки при отношении D_0/d_0

На Рисунке 3.14 показано изменение силы дорнования полого цилиндра в зависимости от перемещения дорна при отношении $D_o/d_o = 1,63$; 2,24; 2,86 и 4,08. На всех кривых присутствует плато, что соответствует стадии равномерной деформации по перемещению дорна. С ростом степени толстостенности сила дорнования растёт и при $D_o/d_o > 2,24$ происходит сгущение кривых. Сила изменяется незначительно в пределах 590-610 H, что подтверждает уменьшающуюся зависимость силы дорнования от степени толстостенности полого цилиндра, начиная с определённой величины $D_o/d_o > 2,24$.

Изменение силы дорнования в зависимости от [100] степени толстостенности согласуется с данными по интенсивности напряжений в очаге деформации (Рисунок 3.11). Интенсивность напряжений отличается только на малом расстоянии от образующей отверстия, далее она практически одинакова и не зависит от степени толстостенности.



Рисунок 3.14 – Изменение силы дорнования в зависимости от перемещения дорна при отношении D_0/d_0

Для анализа отличий в силе дорнования заготовок с разной степенью толстостенности [89] определяли абсолютное изменение их объёма в результате дорнования: $\Delta V = V_1 - V_2$, где V_1 , V_2 – исходный и конечный объём материала заготовки [89]. Очевидно, что ΔV – есть уменьшение объёма фазы пор при дорновании. Установлено, что объём уплотнённого материала увеличивается с ростом отношения D_o/d_o до 2,24 (Рисунок 3.15). Причём, характер этой зависимости одинаков для цилиндров с различной степенью толстостенности, т.е. уплотнение материала при дорновании увеличивается также до этой величины степени толстостенности. При этом возрастает и сила дорнования. При $D_o/d_o>2,24$ изменение объёма для любой степени толстостенности практически одинаково, поэтому уплотнение материала происходит при одинаковой силе дорнования (кривые 3, 4 на Рисунке 3.14).

Дорнование заготовок с существенно отличающейся степенью толстостенности сопровождается пластической деформацией различного характера. На Рисунке 3.16 приведена картина радиальных смещений материала в стенке полого цилиндра.



Рисунок 3.15 – Изменение объёма полого цилиндра в зависимости от степени толстостенности и исходной пористости



Рисунок 3.16 — Радиальные смещения металла в стенке полого цилиндра при $D_{o}\,/\,d_{o}$

На Рисунке 3.17 показаны эпюры остаточных напряжений после дорнования полого цилиндра со степенью толстостенности $D_o/d_o = 1,63$ и 2,86, исходной пори-

стостью материала 15 % и натягом дорнования i = 0,2 мм. При обеих степенях толстостенности ход кривых напряжений одинаков, но отличаются по абсолютной величине.

При степени толстостенности 1,63 максимальная абсолютная величина окружных сжимающих напряжений достигает 40 МПа в очаге уплотнения. В зоне растяжения они увеличиваются до 35 МПа. При степени толстостенности 2,86 окружные сжимающие напряжения по абсолютной величине равны 84 МПа, а их трансформации в растягивающие не происходит. Отсюда следует, что окружные напряжения при меньшей ширине стенки изменяются более равномерно, что влияет на процесс уплотнения и упрочнение материала. Радиальные напряжения для обеих степеней толстостенности изменяются практически одинаково. Их величина очень слабо зависит от размеров стенки цилиндра. Абсолютная величина осевых напряжений больше у цилиндра с большей толстостенностью.

Остаточные радиальные напряжения в полых цилиндрах разной степени толстостенности имеют сжимающий характер по всей ширине стенки. Максимальная величина радиальных напряжений для цилиндра с $D_o/d_o = 1,63$ достигается на расстоянии примерно 1,3 мм от образующей отверстия и равна 6 МПа. У цилиндра с $D_o/d_o = 2,86$ абсолютная максимальная величина 13 МПа также соответствует ширине в 1,3 мм. Радиальные напряжения также уплотняют материал; их распределение, показанное на Рисунке 3.17, соответствует формированию очага уплотнения, показанного на Рисунках 3.12 и 3.13.

Осевые остаточные напряжения в полых цилиндрах с различной шириной стенки имеют сходный характер.

Выполненное моделирование дорнования полого цилиндра из порошкового материала показало, что при увеличении степени толстостенности полых цилиндров, сила дорнования растёт, что связано с деформацией большего объёма материала. Рост силы дорнования и объёма уплотнённого материала происходит до значения степени толстостенности $D_0/d_0 = 2,24$, после чего эти параметры остаются практически постоянными. В таком случае полые цилиндры с $D_0/d_0 < 2,24$ следует

относить к тонкостенным. При $D_0/d_0 > 2,24$ процесс деформации отличается, поэтому такие полые цилиндры рекомендуется относить к толстостенным [103].



a – 1,63; 6 – 2,86

Рисунок 3.17 – Эпюры остаточных окружных – 1, радиальных – 2 и осевых – 3 напряжений по ширине стенки полого цилиндра с D_0/d_0

Максимальная величина относительной плотности материала $\rho_r = 0,91 - 0,92$ достигается на внутренней поверхности цилиндра при $D_o/d_o < 2,24$ и остаётся постоянной при большей степени толстостенности [89]. При этом ширина очага уплотнения достигает до 2 мм.

Таким образом, окружные и осевые остаточные напряжения, которые обеспечивают уплотнение и упрочнение пористого материала зависят от степени толстостенности. Для толстостенных цилиндров абсолютные значения остаточных напряжений оказываются более высокими.

3.3.2 Дорнование порошкового полого цилиндра с разной относителной высотой

Для моделирования дорнования порошкового полого цилиндра с разной относительной высотой выбран полый цилиндр из порошкового медно-титанового материала с исходной пористостью 15 %. Размеры цилиндра: исходный внутренний диаметр $d_o = 9,5$ мм, наружный диаметр $D_o = 28$ мм, высоты $L_o = 20$ мм и 60 мм. Относительная высота L_o/d_o составила 2,11 и 6,32. Натяг дорнования 0,5 мм.

Результаты расчётов по жесткопластической модели уплотняемого материала демонстрируют отсутствие заметных различий в зависимости силы дорнования от перемещения дорна при различных значениях относительной высоты цилиндра (Рисунок 3.18). Однако наблюдается различие в величине силы дорнования [96, 104]. Для цилиндра с относительной высотой $L_o/d_o = 2,11$ её максимальная величина составляет 1660 H, при относительной высоте $L_o/d_o = 6,32$ она возрастает до 1930 H. Очевидно, это связано с большим объёмом материала, участвующим в деформировании и уплотнении.



Рисунок 3.18 – Изменение силы дорнования в зависимости от перемещения дорна при относительной высоте полого цилиндра L_0/d_0

На Рисунке 3.19 представлено изменение относительной плотности материала по ширине стенки цилиндра в зависимости от его высоты. Анализ данных показывает, что относительная высота полого цилиндра не оказывает влияния на формирование зоны уплотнения при дорновании. В обоих случаях максимальная относительная плотность материала наблюдается на внутренней поверхности цилиндра и составляет 0,94 при исходной плотности материала 0,85. Размер очага уплотнения также одинаков, его ширина равна 4 мм [104].



Рисунок 3.19 – Изменение относительной плотности по толщине стенки полого цилиндра с относительной высотой L_o/d_o

На Рисунке 3.20 показано распределение остаточных окружных, радиальных и осевых напряжений по ширине стенки полого цилиндра с относительной высотой $L_o/d_o = 2,11$. Как видно, наибольшую величину имеют окружные и осевые напряжения, которые обеспечивают уплотнение и упрочнение материала. В меньшей степени в этом процессе участвуют радиальные напряжения. При этом очаг деформации имеет незначительный объем. Следовательно, напряжения по своей величине в разных сечениях полого цилиндра будут отличаться. Это же касается и очага уплотнения [104].

При относительной высоте цилиндра $L_o/d_o = 6,32$ величина окружных напряжений меньше и составляет 40-50 МПа в зоне отверстия, однако она распределена вдоль образующей отверстия более равномерно (Рисунок 3.21). Очаг деформации смещается к верхнему торцу по мере перемещения дорна. Радиальные и осевые напряжения занимают больший объём материала.

На Рисунке 3.22 приведены эпюры остаточных окружных, радиальных и осевых напряжений в стенке полого цилиндра с различной относительной высотой, ход кривых аналогичен эпюрам остаточных напряжений, полученным ранее.


окружные – а, радиальные – б; осевые – в

Рисунок 3.20 – Распределение остаточных напряжений по толщине стенки полого цилиндра при относительной высоте $L_o/d_o = 2,11$



окружные – а; радиальные – б; осевые – в

Рисунок 3.21 – Картина распределения остаточных напряжений по ширине стенки полого цилиндра при относительной высоте $L_o/d_o = 6,32$



окружные – 1; радиальные – 2; осевые – 3 Рисунок 3.22 – Эпюры остаточных напряжений по ширине стенки полого цилиндра с относительной высотой L_o/d_o

Таким образом, при дорновании полого цилиндра с большой относительной высотой сила дорнования больше в связи с большим объёмом металла, участвующим в деформации. Относительная плотность полого цилиндра не зависит от его высоты и достигает 0,94 при ширине очага уплотнения 4 мм [104].

Распределение остаточных напряжений зависит от высоты цилиндра. Эта зависимость отличается тем, что при малых высотах очаг деформации и уплотнения меньше, а при большой высоте он растянут по всей внутренней поверхности. При этом наибольшую величину имеют окружные и осевые напряжения. Величина окружных и радиальных остаточных напряжений зависит от высоты заготовки; для полого цилиндра с $L_o/d_o = 6,32$ они примерно в два раза меньше, чем в цилиндре с $L_o/d_o = 2,11$. Величина осевых напряжений в зоне отверстия одинакова.

Относительная плотность по внутренней поверхности полого цилиндра после дорнования одинакова распределена для относительной высоты 2,11 и 6,32, её величина достигает $\rho_r \approx 0.94$. Ширина очага уплотнения достигает ≈ 4 мм [104].

3.4 Исследование влияния технологических параметров на дорнование пористого полого цилиндра

3.4.1 Влияние величины натяга дорнования

Для исследования влияния величины натяга при дорновании был выбран полый цилиндр, изготовленный из порошкового медно-титанового материала с начальной пористостью 15%. Высота цилиндра $L_o = 20$ мм, наружный диаметр D_o = 28 мм. Натяг дорнования определялся исходным внутренним диаметром полого цилиндра $i = d - d_0$. В таблице 3.1 приведены параметры, включая начальный внутренний диаметр цилиндров, относительный натяг и характеристики применяемой конечно-элементной сетки.

<i>d</i> ₀ , мм	і, мм	<i>i/d</i> ₀ , %	Кол-во КЭ	Кол-во узлов
9,8	0,2	2,0	1532	1589
9,5	0,5	5,3	1546	1621
9,2	0,8	8,7	1556	1630

Таблица 3.1 – Параметры модели заготовки

На Рисунке 3.23 показано изменение силы при дорновании полого цилиндра с различным натягом. При относительном натяге 2% сила дорнования составляет 510 H, а при натяге 5,3% - 1600 H. На кривых наблюдается плато.

График на Рисунке 3.24 объясняет полученные данные. При относительном натяге 2 % изменение объёма не происходит. При увеличении относительного натяга до 5,3 % изменение объёма составляет 85 мм3. При относительном натяге 8,7 % изменение объёма составляет 105 мм3. Дальнейшее увеличение относительного натяге более 8,7 % приводит к уменьшению изменения объёма. Очевидно, при относительном натяге 2 % при перемещении дорна практически не происходит уплотнения и деформации (Рисунок 3.23, кривая 1). При увеличение объёма материала, участвующем в процессе деформации. В результате происходит уплотнение материала.



Рисунок 3.23 – Сила дорнования полого цилиндра в зависимости от перемещения дорна при относительном натяге

При относительном натяге 8,7%, на кривой отсутствует плато, что свидетельствует о достижении максимальной плотности материала. Дальнейшее увеличение натяга не приводит к изменению плотности. Изменение объема материала полого цилиндра в процессе дорнования способствует его уплотнению (Рисунок 3.24, 3.25). При натяге 2%, максимальная относительная плотность материала не достигается. На поверхности отверстия она составляет 0,93, а ширина зоны уплотнения равна 1,8 мм. При увеличении натяга до 5,3%, относительная плотность на поверхности отверстия возрастает до 0,94, а ширина зоны уплотнения увеличивается до 4,6 мм. При натяге 8,7%, относительная плотность остается на уровне 0,94, а ширина зоны уплотнения достигает максимального значения 5,6 мм.

Увеличение относительного натяга более 8,7% не приводит к увеличению относительной плотности, но приводит к увеличению ширины очага деформации, следовательно, увеличивается упрочнение (Рисунок 3,25, в).

Распределение плотности на внутренней поверхности полого цилиндра после процесса дорнования (Рисунок 3.25, а) демонстрирует, что при относительном натяге 2% относительная плотность остается практически постоянной на большей части высоты цилиндра. С увеличением относительного натяга наблюдается менее равномерное распределение относительной плотности по высоте цилиндра [104].



Рисунок 3.24 – Изменение объёма материала полого цилиндра после дорнования в зависимости от относительного натяга



а – 2 %; б – 5,3 %; в – 8,7 %

Рисунок 3.24 – Картина распределения относительной плотности после дорнования с относительным натягом



по ширине стенки – а; по высоте образующей отверстия – б 1 – 2 %; 2 – 5,3 %; 3 – 8,7 %



Как было указано ранее, интенсивность остаточных напряжений в пластической зоне после дорнования можно рассматривать как увеличение предела текучести материала заготовки в области отверстия. При дорновании с относительным натягом 5,3 % и более наблюдается значительное повышение интенсивности остаточных напряжений, что приводит к увеличению предела текучести материала в области отверстия примерно в три раза по сравнению с исходным состоянием. Этот эффект аналогичен упрочнению материала и соответствует характеристикам компактного упрочнённого материала (Рисунок 3.26).

Ширина упрочнённого слоя в зависимости от величины натяга аналогична закономерности, характерной для очага уплотнения. Напряжённое состояние в упрочнённом слое определяется распределением степени деформации по его ширине (Рисунок 3.26, б) в соответствии с кривой деформационного упрочнения пористой заготовки $\sigma_i(\varepsilon_i)$.

Ход кривых остаточных напряжений при различных величинах относительного натяга несколько отличается от рассмотренных выше (Рисунок 3.27).



интенсивность напряжений – а; интенсивность деформаций - б 1 – 2 %; 2 – 5,3 %; 3 – 8,7 %

Рисунок 3.26 – Изменение интенсивности остаточных напряжений и остаточных деформаций по толщине стенки полого цилиндра после дорнования с относительным натягом

С увеличением относительного натяга возрастает величина окружных сжимающих напряжений. При этом с повышением натяга окружные напряжения из сжимающих по мере удаления от образующей переходят в растягивающие.

Радиальные напряжения достигают минимальных абсолютных значений при относительном натяге 2 %. С увеличением относительного натяга абсолютные значения радиальных напряжений возрастают, а осевые напряжения неизменными.

Сила дорнования возрастает при увеличении натяга, что приводит к увеличению ширины уплотнения в области отверстия полого цилиндра. Дорнование с относительным натягом более 8,7% не оказывает значимого влияния на относительную плотность материала.

Увеличение относительного натяга приводит к увеличению интенсивности остаточных напряжений и остаточных деформаций после дорнования. С увеличением относительного натяга возрастают остаточные сжимающие окружные, радиальные и осевые напряжения. Наименьшие по абсолютной величине радиальные напряжения наблюдаются при минимальном относительном натяге, составляющем 2%. Величина относительного натяга не оказывает влияния на осевые напряжения.



окружные – 1; радиальные – 2; осевые – 3

Рисунок 3.27 – Эпюры остаточных напряжений по ширине стенки полого цилиндра после дорнования с относительным натягом

3.4.2 Влияние величины угла заборного конуса дорна

Рабочим инструментом при дорновании отверстий является дорн. Угол заборного конуса имеет важное значение в конструкции этого инструмента, так как именно на него приходится основная деформация при первичном контакте с заготовкой. От величины угла заборного конуса зависит не только сила дорнования, но и качество поверхности заготовки. При небольшом угле требуется большая сила дорнования, что может привести к сдвигу поверхностных слоёв металла и ухудшению качества поверхности. Если угол слишком большой, заборная часть дорна может просто проскользнуть в отверстие, не выполнив необходимую работу, которая приходится на рабочий конус. В таком случае дорн может повести в отверстии, так как вся деформация будет происходить только в области цилиндрической ленточки, что приведёт к выходу инструмента из строя.

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что для дорнования наиболее эффективны инструменты с конусообразным профилем [105].

Увеличение угла заборного конуса приводит к росту коэффициента трения и относительного натяга, что, в свою очередь, зависит от механических свойств материала.

Для моделирования выбран полый цилиндр из порошкового материала с исходной пористостью 15 %. Размеры цилиндра: исходный внутренний диаметр $d_o =$ 9,5 мм, наружный диаметр $D_o = 28$ мм, высота $L_o = 20$ мм. Моделирование выполняли для дорнов с углом заборного конуса $\alpha = 2^\circ$, 4°, 6°, 10° и 15°. Угол обратного конуса принимали равным углу заборного, $\alpha_1 = \alpha$. Натяг дорнования равен 0,5 мм.

Величина силы дорнования минимальна для дорна с углом заборного конуса *α* = 4° (Рисунок 3.28), что характерно и для дорнования отверстий в деталях из литой стали [21].



Рисунок 3.28 – Изменение силы дорнования полого цилиндра дорном с углом заборного конуса

Сила дорнования дорном с углом заборного конуса α = 150 имеет резкий подъём при входе дорна в отверстие, а при выходе его из отверстия - спад. Такой

характер кривой может быть объяснён тем, что при больших углах заборного конуса происходит не радиальное сжатие или осевое смещение, а резание инструментом с отрицательным передним углом с образованием стружки, что особенно опасно для порошковых материалов [106].

Моделирование показывает, что по мере увеличения угла заборного конуса α происходит рост относительной плотности материала на внутренней стенке полого цилиндра практически до компактного состояния [106], а её распределение по высоте цилиндра становится более равномерным (Рисунок 3.29, а). При этом, с ростом угла α ширина уплотнённого слоя уменьшается (Рисунок 3.29, б).



по высоте образующей отверстия – а; ширине стенки – б 1 – 2°; 2 – 4°; 3 – 6°; 4 – 10°; 5 – 15°

Рисунок 3.29 – Изменение относительной плотности цилиндра после обработки дорном с углом заборного конуса

Различная величина относительной плотности материала на внутренней поверхности полого цилиндра объясняется разным характером распределения и величиной гидростатического сжатия в очаге уплотнения (Рисунок 3.30).

Хотя при величине угла $\alpha = 4^{\circ}$ гидростатическое давление на контактной поверхности (165 МПа) намного ниже, чем при $\alpha = 15^{\circ}$ (349 МПа), напряжение достигает нуля на большем расстоянии от образующей отверстия: 4,7 мм и 3,6 мм, соответственно. Это приводит к тому, что при малых углах заборного конуса уплотнение материала распространяется на несколько большую ширину, но на внутренней стенке полого цилиндра относительная плотность материала меньше.

Различие в величине гидростатического давления в очаге деформаций приводит к значительным отличиям в интенсивности деформаций и интенсивности напряжений в окрестности отверстия после дорнования (Рисунок 3.31).



Рисунок 3.30 – Изменение гидростатического давления в очаге деформации по ширине стенки полого цилиндра при обработке дорном с углом заборного конуса



интенсивности деформаций – а; интенсивность напряжений – б

 $1 - 4^{\circ}; 2 - 10^{\circ}; 3 - 15^{\circ}$

Рисунок 3.31 – Изменение интенсивности деформаций и напряжений по ширине стенки полого цилиндра после обработки дорном с углом заборного конуса

На рисунке 3.32 показано интегральное изменение объёма заготовки в резуль-

тате дорнования, а также изменение работы, которую необходимо затратить на дорнование в зависимости от угла заборного конуса дорна. С ростом угла увеличивается объём материала, участвующего в уплотнении и деформации и затраченная на этот процесс работа.

При угле заборного конуса 15⁰ процесс дорнования идёт более равномерно. Однако, большая силы дорнования указывает на значительное пластическое перемещение металла в направлении движения дорна. При угле заборного конуса 4⁰ сила меньше, т.к. уменьшаются объёмы смещённого металла.



объём материала – 1; работа на дорнование – 2

Рисунок 3.32 – Изменение объёма материала заготовки после дорнования и работа, затраченная на дорнование в зависимости от угла α

Повышение угла заборного конуса дорна до 15° вызывает увеличение силы дорнования до 3000 Н и относительной плотности материала до 0,99. Это достигается за счет увеличения гидростатического давления, а также повышения интенсивности напряжений и деформаций. Однако, при этом уменьшается ширина уплотнённого слоя и изменяется характер пластической деформации, возможен срез металла [96].

Моделирование показывает, что дорнование отверстий в заготовках из пористых материалов дорнами с большими углами заборного конуса обеспечивает уплотнение материала на поверхности отверстия до практически компактного состояния с высоким упрочнением, при этом уменьшается ширина уплотнённого слоя.

Исследования показали, что пластическим состоянием металла можно управлять за счёт конструктивных и геометрических параметров инструмента, что обеспечивает качество уплотнения и внутренней поверхности полого цилиндра.

3.5 Дефекты при свободном дорновании полого цилиндра из порошкового материала

3.5.1 Образование наплывов

При входе и выходе дорна из отверстия образуются наплывы металла на свободной поверхности заготовки разных размеров и объёмов. Для сталей максимальная величина наплыва составляет 0,15 мм при натяге 3 %. Наибольшую высоту наплывы имеют у образующей отверстия, причём на выходном торце эта высота и объём наплывов оказывается в несколько раз больше, чем на входном [96].

При свободном дорновании заготовок из порошковых материалов, очевидно, размеры наплывов будут зависеть от структурной неоднородности материала, параметров заготовки – степени толстостенности и относительной высоты, параметров инструмента – угла заборного конуса и величины натяга.

Рассмотрим результаты моделирования величины наплывов от особенностей дорнования порошковых материалов.

Наличие исходной пористости у полого цилиндра влияет на напряжения текучести, а, следовательно, на перемещение металла как в радиальном, так и в осевом направлении. Наибольшую высоту наплывы имеют у образующей отверстия, причём на выходном торце эта высота и объём наплывов оказывается в несколько раз больше, чем на входном.

На Рисунке 3.33 показано изменение высоты наплывов металла в зависимости от образующей отверстия на верхнем и нижнем торцах полого цилиндра разной

исходной пористостью. Как видно, и у компактного, и у порошкового материала высота наплыва на верхнем торце цилиндра меньше, чем на нижнем. У компактного материала на верхнем торце высота наплыва составляет 200 мкм, на нижнем торце 275 мкм. Высота наплывов порошкового материала меньше: на верхнем торце при пористости 15 % она равна 55 МПа, на нижнем торце 110 МПа. По мере входа дорна в отверстие высота наплывов изменяется неравномерно: сначала она максимальная, а затем снижается и далее остаётся постоянной. Это значит, что в первый момент дорнования металл сначала смещается навстречу дорну, а потом увлекается им вследствие сил трения по направлению движения дорна. По мере выхода дорна из отверстия наибольшая высота наплывов на выходном торце дорна монотонно увеличивается [107].



верхний торец - а; нижний торец - б

1 – компактный медно-титановый материал; 2 – 6 %; 3 – 15 %; 4 – 24 %

Рисунок 3.33 – Изменение высоты наплывов металла на расстоянии от образующей отверстия на торцах полого цилиндра с исходной пористостью

На рисунке 3.34 показана эволюция наплыва на нижнем торце полого цилиндра. Наблюдается рост высоты нижнего наплыва у компактного материала на расстоянии 14 мм и 18 мм с 50 до 150 мм (Рисунке 3.34, а). Высота наплыва составляет 3 мм. По мере движения дорна вниз высота наплыва увеличивается за счёт пластического смещения металла. На Рисунке 3.34, б показана высота нижнего наплыва компактного и порошкового материала с различной пористостью. Наибольшая высота нижнего наплыва после дорнования составляет 300 мкм у компактного материала. С появлением исходной пористости высота нижнего наплыва уменьшается, чем больше пористость, тем меньше высота.

Как показано в работе [7], для сталей высота наплывов зависит от степени толстостенности и высоты цилиндра. На Рисунке 3.35 показана эта зависимость при натяге 0,2 мм. Чем больше степень толстостенности, тем больше высота наплывов. При этом нижний наплыв имеет наибольшую высоту. Так, при степени толстостенности 4,08 высота нижнего наплыв равна 107 мкм и уменьшается до нуля на расстоянии от образующей отверстия равном 3,8 мм [107].



а – компактный материал, ход дорна: 1 – 14 мм; 2 – 18 мм; б - после дорнования при исходной пористости: 1 – компактный материал; 2 – 6 %; 3 – 15 %; 4 – 24 %

Рисунок 3.34 – Изменение высоты наплывов металла на расстоянии от образующей отверстия на нижнем торце полого цилиндра

Таким образом, чем больше исходная пористость полого цилиндра, тем меньше металла уходит в наплыв вследствие меньшего сопротивления при радиальном перемещении частиц. Чем больше степень толстостенности, тем больше высота наплыва, особенно на нижнем торце полого цилиндра.

Относительная высота полого цилиндра практически не влияет на высоту наплывов (Рисунок 3.36). Высота наплыва для любой высоты полого цилиндра

практически одинакова.



1 - 1,63; 2 - 2,24; 3 - 2,86; 4 - 4,08

Рисунок 3.35 – Изменение высоты верхнего наплыва – а; нижнего наплыва – б на расстоянии от образующей отверстия на торцах полого цилиндра со степенью толстостенности D_0/d_0



верхний наплыв – а; нижний наплыв – б

Рисунок 3.36 – Изменение высоты верхнего и нижнего наплыва на расстоянии от образующей отверстия на торцах полого цилиндра с относительной высотой L_o/d_o

В работе исследовали влияние натяга на высоту наплывов на торцах при дорновании полого цилиндра из порошкового материала. Высота верхнего наплыва с увеличением натяга увеличивается и для 8,7 % составляет 115 мкм (Рисунок 3.37, а). При этом протяжённость его составляет более 5 мм. При дорновании с натягом 2 % высота равна 60 мкм и протяжённость его составляет 4 мм [107].



верхний наплыв – а; нижний наплыв – б 1 – 2 %; 2 – 5,3 %; 3 – 8,7 %

Рисунок 3.37 – Изменение высоты верхнего и нижнего наплыва на расстояния от образующей отверстия после дорнования с относительным натягом

Высота нижнего наплыва для всех случаев натяга больше и составляет 320 мкм при натяге 8,7 % (Рисунок 3.37, б). Но протяжённость нижних наплывов меньше до 3,5 мм. Очевидно, на формирование наплыва на нижнем торце полого цилиндра оказывает влияние диаметр отверстия в опоре приспособления для дорнования, поэтому его протяжённость ограничена по сравнению с верхним наплывом. Отсюда следует, что для пористых материалов, чем больше натяг, тем больше металла уходит в наплыв [96].

Обработка отверстий в полых цилиндрах дорнами с различными углами заборного конуса влияет на формоизменение наплыва после дорнования. С увеличением угла заборного конуса наплывы материала на верхнем торце полого цилиндра уменьшаются (Рисунок 3.38, а) и при больших значениях угла полностью исчезают [107], что видно на Рисунке 3.39. При этом высота наплыва металла на нижнем торце увеличивается с увеличением угла заборного конуса (Рисунок 3.38, б).



верхний наплыв – а; нижний наплыв – б

$1 - 2^{\circ}; 2 - 4^{\circ}; 3 - 6^{\circ}$

Рисунок 3.38 – Изменение высоты верхнего и нижнего наплыва на расстоянии от образующей отверстия на торцах полого цилиндра после обработки дорном

с углом заборного конуса



 $a - 4^{\circ}; 0 - 15^{\circ}$

Рисунок 3.39 – Осевые смещения металла после дорнования инструментом с углом заборного конуса

3.5.2 Искажение формы и изменение наружного диаметра

Наличие структурной неоднородности в медно-титановом порошковом материале приводит к искажению наружного диаметра полого цилиндра (Рисунок 3.40). Характер распределения радиальных перемещений наружной стенки отверстия, вследствие которого увеличивается наружный диаметр цилиндра по высоте, является неравномерным. Это проявляется у компактного материала. С ростом исходной пористости полого цилиндра до 15 % неравномерность роста наружного диаметра цилиндра практически исчезает. Это связано с ростом объёма структурной деформации, в результате которой происходит перемещение частиц в поры.

Изменение наружного диаметра полого цилиндра зависит от степени толстостенности. При малой степени толстостенности (1,63) наружный диаметр искривляется, чему является причина структурная деформация (Рисунок 3.41, а). С увеличением степени толстостенности изменение наружного диаметра идёт более равномерно. При малой величине относительной высоте наружный диаметр полого цилиндра увеличивается от 115 мкм до 70 мкм [107]. При большей величине относительной длины эта зависимость более сложная (Рисунок 3.41, б).



1 – компактный материал; 2 – 6 %; 3 – 15 %; 4 – 24 %
 Рисунок 3.40 – Увеличение наружного диаметра по высоте полого цилиндра с исходной пористостью



Рисунок 3.41 – Увеличение наружного диаметра по высоте полого цилиндра при различной степени толстостенности и относительной высоте

С увеличением относительного натяга увеличивается искажение и размер наружного диаметра полого цилиндра (Рисунок 3.42, а). При относительном натяге 2 % увеличение диаметра составляет 39 мкм и распределяется равномерно по длине полого цилиндра [107].

С увеличением угла заборного конуса дорна также увеличивается наружный диаметр и чем больше угол, тем больше искривление по наружному диаметру (Рисунок 3.42, б).

Таким образом, установлено, что на формообразование наплывов на верхнем и нижнем торцах, а также на искажение формы и изменение наружного диаметра полого цилиндра оказывают влияние структурная неоднородность материала, параметры заготовки – степень толстостенности и относительная высота, параметры инструмента – угла заборного конуса и величины натяга.

Установлено, что, чем больше исходная пористость полого цилиндра, тем меньше материала теряется в наплыв вследствие меньшего сопротивления при радиальном перемещении частиц. С увеличением степени толстостенности, увеличивается высота наплыва, особенно на нижнем торце полого цилиндра. Относительная высота полого цилиндра практически не влияет на высоту наплывов.



Рисунок 3.42 – Увеличение наружного диаметра по высоте полого цилиндра после дорнования в зависимости от величины натяга и угла заборного конуса

Установлено, что параметры инструмента также влияют на высоту наплывов. Чем больше натяг, тем больше размеры наплывов на нижнем и верхнем торцах полого цилиндра. С увеличением угла заборного конуса наплывы материала на верхнем торце полого цилиндра уменьшаются и при больших значениях угла полностью исчезают. При этом высота наплыва металла на нижнем торце увеличивается с увеличением угла заборного конуса [107].

С ростом исходной пористости полого цилиндра до 15 % неравномерность роста наружного диаметра цилиндра практически исчезает. Это связано с ростом объёма структурной деформации, в результате которой происходит перемещение частиц меди в поры. При малой степени толстостенности (1,63) наружный диаметр искривляется, чему является причина структурная деформация. С увеличением степени толстостенности изменение наружного диаметра идёт более равномерно. При малой величине относительной высоты наружный диаметр полого цилиндра увеличивается. При большей величине относительной высоты эта зависимость более сложная.

С увеличением относительного натяга увеличивается искажение и размер наружного диаметра полого цилиндра. С увеличением угла заборного конуса дорна

также увеличивается наружный диаметр и чем больше угол, тем больше искривление по наружному диаметру.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

1. При свободном дорнировании полых цилиндров наблюдается следующая закономерность: с уменьшением исходной пористости материала возрастает интенсивность напряжений и деформаций, а также увеличиваются размеры очага деформации и значения напряжений, что приводит к увеличению интенсивности уплотнения. В результате относительная плотность материала возрастает до 0,99. Величина остаточных напряжений зависит от величины интенсивности напряжений. С уменьшением пористости эти показатели увеличиваются. Максимальную абсолютную величину имеют окружные и радиальные напряжения, которые обеспечивают уплотнение материала и, очевидно, его упрочнение.

2. Установлено, что при увеличении степени толстостенности полых цилиндров сила дорнования растёт, что связано со структурной деформацией большего объёма материала. Рост силы дорнования происходит до значения степени толстостенности $D_o/d_o < 2,24$, выше которой сила практически остаётся постоянной. Интенсивность напряжений у образующей отверстия различна для полых цилиндров со степенью толстостенностью $D_o/d_o < 2,24$, с увеличением степени толстостенности данный показатель постоянный. Для степени толстостенности менее 2,24 изменение объёма материала различное, для степеней толстостенности более 2,24 изменение объёма материала одинаково, это объясняет одинаковую силу дорнования. Предлагается порошковые полые цилиндры с $D_o/d_o < 2,24$ относить к тонкостенным, при $D_o/d_o > 2,24$ цилиндры рекомендуется относить к толстостенным. Максимальная величина относительной плотности материала $\rho_r = 0.91 - 0.92$ достигается на внутренней поверхности цилиндра при $D_o/d_o < 2,24$ и остаётся постоянной при большей степени толстостенности. При этом ширина очага уплотнения достигает до 2 мм. Наиболее зависимыми от степени толстостенности по абсолютной величине являются радиальные и осевые остаточные напряжения, обеспечивающие уплотнение и упрочнение пористого материала. Абсолютная величина остаточных напряжений у толстостенных цилиндров больше.

3. Увеличение относительной высоты до 6,32 при дорновании полого цилиндра приводит к увеличению силы дорнования. Относительная плотность полого цилиндра не зависит от его высоты и достигает 0,94 при ширине очага уплотнения 4 мм. Распределение остаточных напряжений зависит от высоты цилиндра. Эта зависимость отличается тем, что при малых высотах остаточные напряжения сконцентрированы в центральной части образца, а при большой высоте они растянуты по всей внутренней поверхности. При этом наибольшую величину имеют окружные и осевые напряжения. Величина окружных и радиальных остаточных напряжений зависит от высоты заготовки; для полого цилиндра с $L_o/d_o = 6,32$ они примерно в два раза меньше, чем в цилиндре с $L_o/d_o = 2,11$. Величина осевых напряжений в зоне отверстия одинакова. Дорнование по схеме сжатие необходимо проводить при относительной высоте заготовки не более 2,11, данные рекомендации необходимо выполнять для предотвращения искривление наружного диаметра и образование двойной бочки при дорновании.

4. Установлено, что увеличение относительного натяга при дорновании полого цилиндра приводит к увеличению силы дорнования, относительной плотности материала в зоне отверстия и интенсивности остаточных напряжений и деформаций. При этом увеличение относительного натяга свыше 8,7 % не приводит к дополнительному увеличению относительной плотности материала. Величина остаточных окружных напряжений с увеличением натяга увеличиваются, радиальные остаточные напряжения наименьшие по абсолютной величине при натяге 2%, а осевые напряжения не зависят от натяга. Выявлено, что увеличение угла заборного конуса дорна до 15° приводит к увеличению силы дорнования до 3000 H и относительной плотности до 0,99, за счёт большого гидростатического сжатии и интенсивности напряжений и деформаций. Однако при этом уменьшается ширина уплотнённого слоя и изменяется характер пластической деформации, возможен срез металла.

5. Выявлено, что параметры заготовки и инструмента оказывают значительное влияние на искажение формы, изменение наружного диаметра и образование наплывов на верхнем и нижнем торцах полого цилиндра. Установлено, что с увеличением исходной пористости полого цилиндра количество материала, теряемого в наплывах, уменьшается из-за снижения сопротивления радиальному перемещению частиц. Относительная высота полого цилиндра не оказывает существенного влияния на высоту наплывов.

6. С увеличением степени толстостенности заготовки высота наплывов возрастает, особенно на нижнем торце. Увеличение натяга приводит к увеличению наплыва на нижнем и верхнем торце заготовки. С увеличением угла заборного конуса наплывы материала на верхнем торце полого цилиндра уменьшаются и при больших значениях угла полностью исчезают, высота наплыва металла на нижнем торце увеличивается с увеличением угла заборного конуса.

7. Установлено, что с ростом исходной пористости до 15 % рост наружного диаметра цилиндра исчезает, это связано с ростом объёма структурной деформации в результате перемещения частиц меди и титана в поры. При степени толстостенности 1,63 форма цилиндра искривляется. С увеличением степени толстостенности изменение формы идёт более равномерно. При малой величине относительной высоты наружный диаметр полого цилиндра увеличивается. При большей величине относительной высоты эта зависимость более сложная. С увеличением относительного цилиндра искажение формы и размер наружного диаметра полого цилиндра. Увеличение угла заборного конуса дорна также увеличивает наружный диаметру.

8. Моделирование показало, что оптимальными параметрами для выполнения свободного дорнования медно-титановых порошковых пористых заготовок является применение заготовки с исходной пористостью 15 %, величиной натяга 0,2 мм, углом заборного и обратного конуса 4 градуса для тонкостенных и толстостенных заготовок. При данных параметрах сила дорнования достигает 650 Н при равномерном распределении относительной плотности 0,93 по внутренней поверхности ши-

риной 1,5 мм. Использование данных параметров обеспечивает минимальные энергозатраты и равномерное распределение уплотнения и упрочнения по внутренней поверхности заготовки за счёт сжимающих остаточных напряжений, превышающих предел текучести.

ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СВОБОДНОГО ДОРНОВАНИЯ ПОРОШКОВЫХ ПОРИСТЫХ ЗАГОТОВОК

4.1 Общие сведения

На основании теоретического анализа и компьютерного моделирования процесса свободного дорнования (глава 3), а также с учётом требований к параметрам технологического процесса для порошковых пористых заготовок типа «полый цилиндр» (образец), для экспериментального исследования выбраны следующие параметры:

- изменение силы дорнования в зависимости от пористости, степени толстостенности заготовок, относительного натяга и угла заборного конуса инструмента;

 исследование структурной неоднородности и деформационного упрочнения образцов после дорнования;

- анализ качества образцов после свободного дорнования;

- анализ шероховатости поверхности и точности изготовления заготовок.

Основной рабочей частью дорна является заборная поверхность, осуществляющая работу пластического деформирования заготовок. Образующие конусной заборной поверхности дорнов наклонены к продольной оси инструмента под углом α . В [21] установлено, что при дорновании отверстий в стальных втулках с увеличением угла α от 0 до 18° сила дорнования монотонно растёт, а затем уменьшается. Моделирование дорнования образцов из медно-титанового порошкового материала показало аналогичную зависимость максимальной силы дорнования от угла заборного конуса при обработке пористых заготовок (Рисунок 3.28).

В данной главе рассмотрены экспериментальные зависимости силы дорнования от натяга дорнования i = 0, 2...0, 8мм (относительный натяг a = 2...8, 7 %), степени толстостенности образцов $\beta = 1, 6...2, 8$ и величины угла заборного конуса дорна $\alpha = 4...15^{\circ}$. Исследованы изменения микроструктуры упрочнённого слоя, а

также распределение микротвёрдости *H*_µ и плотности материала по ширине стенки заготовки.

4.2 Влияние пористости, степени толстостенности заготовок, отностельного натяга и угла заборного конуса инструмента на силу дорнования

Экспериментальное исследование влияния исходной пористости заготовок $\theta_o = 6, 15, 24\pm0,05$ % на силу дорнования выполняли на образцах, имеющих высоту $L_o = 20\pm0,2$ мм, диаметр отверстия $d_o = 9,8$ мм, относительный натяг $i/d_o = 0,02$. На Рисунке 4.1 показана зависимость силы дорнования от исходной пористости образцов. С ростом пористости сила дорнования уменьшается также интенсивно, как и получено при моделировании. Максимальная сила получена при дорновании образцов из компактных материалов. При пористости 15 % она составила 550 Н. При этом относительная плотность образцов составила 0,93.

Экспериментальное исследование влияния степени толстостенности D_o/d_o на силу дорнования выполняли на образцах, имеющих исходную пористость $\theta 0 = 15\pm0,05$ %, высоту $L_o = 20\pm0,2$ мм, внутренний диаметр $d_o = 9,8$ мм, относительный натяг $i/d_o = 0,02$. Степень толстостенности образцов D_o/d_o задавали их наружным диаметром $D_o = 16, 22, 28$ и 40±0,05 мм, соответственно она имела значения $D_o/d_o = 1,63; 2,24; 2,86$ и 4,08.

На Рисунке 4.2 приведено сравнение расчётных (Рисунок 3.14) и экспериментальных максимальных величин силы дорнования образцов в зависимости от степени толстостенности. Эксперимент подтвердил результаты моделирования: вначале наблюдается существенный прирост силы дорнования по мере увеличения степени толстостенности заготовок с 1,63 до 2,24, после чего прирост силы постепенно замедляется и начиная с $D_o/d_o = 2,86$, она становится практически постоянной. Это свидетельствует о правильности расчётных величин.



экспериментальная - 1, расчётная - 2

Рисунок 4.1 – Максимальная сила дорнования в зависимости от исходной пористости образцов при относительном натяге $i/d_o = 0,02$ дорном с d = 10 мм и $\alpha = 4^\circ$



экспериментальная – 1; расчетная – 2

Рисунок 4.2 - Изменение силы дорнования в зависимости от степени толстостенности заготовок при дорновании с относительным натягом $i/d_o = 0.02$ дорном с d = 10 мм и $\alpha = 4^{\circ}$:

Расхождение между экспериментальными и расчётными величинами силы дорнования образцов с различной степенью толстостенности не превышает 10 %. Исследование влияния величины относительного натяга на силу дорнования выполняли на полых образцах с исходной пористостью $\theta_o = 15\pm0,05$ %, высотой $L_o = 20\pm0,05$ мм, наружным диаметром $D_o = 28\pm0,05$ мм, внутренним диаметром $d_o = 9,8$; 9,5 и 9,2 мм. Относительный натяг составил 2,0; 5,3 и 8,7 %.

Дорнование выполняли со скоростью 2 мм/с по схеме сжатия за один цикл однозубым дорном из стали P6M5 (HRC = 62...64) с диаметром по ленточке d = 10

мм, шириной ленточки b = 1 мм и равными углами заборного и обратного конуса α = $\alpha_1 = 4^{\circ}$.

На Рисунке 4.3, а показаны экспериментальные кривые изменения силы дорнования в зависимости от перемещения дорна для различных величин относительного натяга.



относительный натяг: 1 – 0,02; 2 – 0,053; 3 – 0,087 - а; 1 - экспериментальная; 2 - расчётная - б Рисунок 4.3 – Изменение экспериментальной силы дорнования в зависимости от перемещения дорна при различном относительном натяге и сравнение экспериментальной и расчётной силы дорнования

Чем больше величина относительного натяга, тем больше сила дорнования, что связано с увеличением объёма материала, участвующего в деформации. Как и при компьютерном моделировании при относительном натяге 0,02 на кривых наблюдается плато, что свидетельствует о равномерном деформировании малого объёма пористой заготовки. С ростом величины относительного натяга протяжённость плато уменьшается вследствие увеличения объёма материала, участвующего в деформации. Сила дорнования достигает 2550 Н [108].

Сравнение расчётных и экспериментальных максимальных величин силы дорнования показывает рост силы дорнования с увеличением натяга по закону, близкому к линейному (Рисунок 4.3, б). Расхождение экспериментальных величин и данных, полученных с помощью моделирования МКЭ, не превышает 15 %.

Для экспериментального подтверждения характера зависимости силы дорнования пористых образцов от угла заборного конуса дорна α использовали дорны с $\alpha = 4, 10$ и 15° диаметром по ленточке d = 10 мм, шириной ленточки b = 1 мм. Величина натяга дорнования во всех случаях была равной i = 0,5 мм; соответственно образцы имели исходный внутренний диаметр $d_o = 9,5$ мм и наружный $D_o = 28\pm0,05$ мм.

На Рисунке 4.4 приведено сравнение расчётных и экспериментальных максимальных величин силы дорнования в зависимости от угла заборного конуса дорна [108].



экспериментальная – 1 и расчётная – 2

Рисунок 4.4 – Изменение силы дорнования в зависимости от угла заборного конуса при дорновании с относительным натягом *a* = 5,3 %

Экспериментальные исследования показали значительный рост силы дорнования при увеличении угла заборного конуса дорна с 4° до 15°, что характерно и при дорновании отверстий в деталях из компактных сталей [21].

Таким образом, экспериментально подтверждена зависимость силы дорнования от технологических параметров – натяга, угла заборного конуса; характеристик заготовки – степени толстостенности и исходной пористости. Получено, что с увеличением натяга и угла заборного конуса сила дорнования увеличивается. С увеличением степени толстостенности и уменьшением исходной пористости заготовки сила дорнования также увеличивается. Расхождение экспериментальных и расчётных данных в среднем составляет 10 %.

4.3 Исследование структурной неоднородности и деформационного упрочнения образцов после дорнования

В результате процесса свободного дорнования пористых полых образцов происходит изменение состояния их внутренней поверхности. Пористость стала менее выраженной, а внутренняя структура приобрела уплотненный вид при сохранении пористого наружного слоя. На рисунке 4.6 изображена микроструктура внутренних и наружных слоев образца, подвергнутого пластической деформации в процессе дорнования. Исследования проводились с применением растрового электронного микроскопа РЭММА-102.

В рамках исследования структурных характеристик изучены образцы, полученные методом дорнования пористых заготовок с начальной пористостью 15%. Процесс дорнования осуществлялся с использованием дорна диаметром 10 мм и относительным натягом 2,0%. Угол заборного конуса дорна составлял 4°. Для микроструктурного анализа были подготовлены шлифы с внутренних и внешних поверхностей заготовок, ориентированных вдоль вертикальной оси.

После спекания пористых образцов при температуре 900–920 °С в среде генераторного газа исходная микроструктура демонстрирует наличие зёрен меди, дисперсных частиц титана и пористых включений. (Рисунок 4.5). В материале наблюдается значительная разнозернистость и пористость. Неоднородность размеров зерен обусловлена неравномерным протеканием процесса статической рекристаллизации во время спекания, что, в свою очередь, связано с неравномерным распределением напряжений, возникающих при прессовании пористого исходного образца. После процесса спекания средний размер зерна меди составляет 30–31 мкм, а средний размер частиц титана — 55 мкм. Значение средней твёрдости по методу Бринелля составляет 83 HB.



Рисунок 4.5 – Микроструктура образцов после спекания, х4000

Микроструктура внешнего слоя образца после дорнования представлена на рисунке 4.6, а. Дорнование вызывает лишь незначительные изменения в микроструктуре внешних слоев заготовки. Эти изменения обусловлены гидростатическим сжатием и дроблением зерен, что происходит из-за локального увеличения внутренних напряжений. Средний размер зерна 25-28 мкм, а средняя твердость по Бринеллю 83-85 HB.

После проведения дорнования на внутреннем слое образца наблюдаются искажения формы зёрен, их раздробленность и отсутствие пор (см. рисунок 4.6, б). Зёрна в этом слое имеют вытянутую форму в направлении движения дорна, что обусловлено осевым течением металла. Также отмечается размытие границ зёрен, вызванное высокой степенью деформации, и отсутствие пор. Средняя величина зерна составляет 6–8 мкм, а средняя твёрдость по Бринеллю находится в диапазоне 100–115 HB.

Упрочнение поверхностного слоя иследовали измерением микротвердости по ширине на образцах различной пористости.

Изменение микротвердости по ширине стенки при различной пористости образца приведено на Рисунке 4.7. Каждая точка на графиках отражает среднее арифметическое значение, полученное не менее чем из десяти измерений.

С увеличением исходной пористости образцов наблюдается снижение микротвердости. Основной причиной является наличие остаточной пористости. Зона упрочнения распространяется на поверхностный слой, ширина которого составляет 1,6 мм при пористости 24% и 2,5 мм при пористости 6%.



внешний слой – а, внутренний слой – б Рисунок 4.6 - Микроструктура образца при увеличении х 4000

С увеличением ширины стенки повышается микротвёрдость упрочнённого слоя. На Рисунке 4.7, б показано распределение микротвёрдости по ширине стенки отверстия для различных степеней толстостенности: D_o/d_o 1,63, 2,24 и 2,86. Эти данные соответствуют изменениям остаточных напряжений (Рисунок 3.17) и объёма материала по ширине стенки (Рисунок 3.15).

При увеличении относительного натяга наблюдается рост микротвёрдости упрочнённого слоя и его ширина. На Рисунке 4.7 представлено изменение микротвёрдости по ширине стенки для различных значений относительного натяга: 2,0%, 5,3% и 8,7%. Увеличение микротвердости объясняется увеличением объёма металла, вовлечённого в пластическую деформацию (см. Рисунок 3.24), ростом интенсивности напряжений и деформаций (Рисунок 3.26), а также увеличением остаточных напряжений в зоне деформации (Рисунок 3.27).

Микротвердость и ширина упрочненного слоя зависят от параметров пористости [90], степени толстостенности и относительного натяга. При повышении исходной пористости образцов происходит снижение микротвердости и уменьшение ширины упрочненного слоя.



а – при различной исходной пористости: 1 – 6 %; 2 – 15 %; 3 – 24 % - б – при различной степени толстостенности 1 - 1,63; 2 - 2,24; 3 - 2,86; в – при различной величине относительного натяга: 1- 2,0 %; 2 – 5,3 %; 3 – 8,7 %

Рисунок 4.7 – Зависимость микротвердости по ширине стенки образца

Для уменьшения разницы напряжений между деформированным и недеформированным слоем проводили отжиг при температуре 500-550 °C. В результате выполнения отжига происходит незначительное увеличение величины зерна по всей ширине образца и уменьшение твердости по Бринеллю и микротвердости. Средние значения твёрдости по Бринеллю во внутренних слоях отверстия составили 100– 115 HB, а на внешних слоях образца — 83–85 HB.

4.4 Анализ качества образцов после свободного дорнования

Для разработки математической модели, описывающей влияние технологических факторов на качество образцов, был применён метод полного факторного эксперимента. В данной модели число исследуемых факторов составляет три, что обусловило выбор плана полного факторного эксперимента типа 2³. В качестве целевых параметров для анализа были выбраны:

относительное уширение $\delta = (D_{\text{max}} - D_0)/D_0$;

относительное укорочение $\lambda = (L - L_0)/L_0$;

уменьшение диаметра отверстия в результате упругого последействия $\Delta = d - d_{o\delta p}$; сила дорнования *P*;

факторы технологии:

относительный натяг $a = i/d_0 \cdot 100\%$;

степень толстостенности образцов $\beta = D_0/d_0$;

угол заборного конуса дорна α .

В исследовании [99] проведен регрессионный анализ характеристик заготовки, изготовленной из порошковой меди марки ПМС-1.

Зависимости целевых параметров от основных факторов процесса аппроксимировали уравнениями регрессии степенного вида:

$$\delta = \delta_0 a^{\delta_1} \beta^{\delta_2} \alpha^{\delta_3}, \tag{4.1}$$

$$\lambda = \lambda_0 a^{\lambda_1} \beta^{\lambda_2} \alpha^{\lambda_3}, \qquad (4.2)$$

$$\Delta = \Delta_0 a^{\Delta_1} \beta^{\Delta_2} \alpha^{\Delta_3}, \qquad (4.3)$$

$$P = P_0 a^{p_1} \beta^{p_2} \alpha^{p_3}, \tag{4.4}$$

где δ_0 , δ_1 , δ_2 , δ_3 , λ_0 , λ_1 , λ_2 , λ_3 , Δ_0 , Δ_1 , Δ_2 , Δ_3 , p_0 , p_1 , p_2 , p_3 – параметры модели.

Действительные значения факторов на основном уровне определяются по

следующей формуле:

$$x_{k0} = \frac{x_{k\min} + x_{k\max}}{2},$$
(4.5)

где *x_{kmin}*, *x_{kmax}* – натуральное значение нижнего и верхнего уровня *k*-го фактора. Получим:

$$x_{1och} = \frac{2,1+8,6}{2} = 5,35\%; x_{2och} = \frac{1,7+2,7}{2} = 2,2; x_{3och} = \frac{4,1+14,9}{2} = 9,5^{\circ}.$$

Интервалы варьирования факторов определим [109]:

$$\Delta x_{k} = \frac{x_{k \max} - x_{k \min}}{2},$$

$$\Delta x_{1} = \frac{8, 6 - 2, 1}{2} = 3,35\%; \Delta x_{2} = \frac{2, 7 - 1, 7}{2} = 0,6; \Delta x_{3} = \frac{15 - 4}{2} = 5,5^{\circ}.$$
(4.6)

Кодирование факторов осуществлялось на основе выражения из [97]:

$$X_{k} = \frac{2(\lg x_{k} - \lg x_{k\max})}{\lg x_{k\max} - \lg x_{k\min}} + 1.$$
(4.7)

После кодирования факторы принимают следующие значения: +1 соответствует верхнему уровню, -1 — нижнему уровню, а 0 — основному (нулевому) уровню, который представляет собой центр интервала, где планируется проведение эксперимента. В таблице 4.1 представлены натуральные значения факторов процесса, рассчитанные ранее.
Veopy	Факторы процесса в единицах измерения			
уровни	<i>a</i> , %	β	α, град.	
Верхний	8,6	2,7	15	
Нижний	2,1	1,7	4	
Основной	5,35	2,2	9,5	
Интервал варьирования	3,35	0,6	5,5	
Кодовые обозначения	X_{I}	X_2	X3	

Таблица 4.1 – Исследуемые факторы в натуральных значениях

В таблице 4.2 представлен полный план матрицы планирования для проведения полного факторного эксперимента, соответствующий данным эксперимента.

Номер	Значения факторов			К	Комбинация произведений			
точки	в кодовых обозначениях		факторов					
плана	X_{0}	X_l	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	$X_1 X_2 X_3$
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1

Таблица 4.2 – План матрицы планирования эксперимента

Матрица планирования обладает свойством ротатабельности. Это означает, что математическая модель, построенная на основе полученных экспериментальных данных, обеспечивает одинаковую точность предсказания значений параметра оптимизации во всех направлениях, равноудаленных от центра плана.

Для оценки возможности аппроксимации функций отклика использовались уравнения вида (4.1)–(4.4). Проверка адекватности линейной модели проводилась путем анализа гипотезы адекватности. Результаты эксперимента были представлены в виде полиномиальных зависимостей.

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{23} X_2 X_3 + b_{123} X_1 X_2 X_3, \quad (4.8)$$

где У – логарифм целевого параметра.

Данные опытов обрабатывали по стандартной методике [98].

1. На основе трёх параллельных измерений при заданных комбинациях факторов (таблица 4.2) были рассчитаны средние значения целевых параметров, а также дисперсии для каждого отдельного эксперимента, всего эксперимента и ошибки коэффициентов регрессии. Для этого использовались соответствующие математические выражения:

$$\overline{Y}_{i} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^{n} Y_{ij}, \ s_{i}^{2} = \frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^{n} \left(Y_{ij} - \overline{Y}_{i} \right)^{2}, \ S^{2} \left(Y \right) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} s_{i}^{2},$$

$$S_{b} = \sqrt{\frac{S^{2} \left(Y \right)}{Nm}}, \ m = 3, \ N = 8,$$
(4.9)

где *i* – номер точки плана;

j – номер параллельного измерения в данной точке.

2. Коэффициенты линейного уравнения регрессии (4.8) были определены с использованием соответствующих математических соотношений:

$$b_{0} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \overline{Y_{i}}, \ b_{1} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} X_{1i} \overline{Y_{i}}, \ b_{2} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} X_{2i} \overline{Y_{i}}, \ b_{3} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} X_{3i} \overline{Y_{i}},$$

$$b_{12} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} X_{1i} X_{2i} \overline{Y_{i}}, \ b_{13} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} X_{1i} X_{3i} \overline{Y_{i}}, \ b_{23} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} X_{2i} X_{3i} \overline{Y_{i}},$$

$$b_{123} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} X_{1i} X_{2i} \overline{X_{3i}} \overline{Y_{i}}.$$
(4.10)

3. Для проверки однородности дисперсий был применён критерий Кохрена при уровне значимости 0,05:

$$G = \frac{s_{i\max}^2}{\sum_{i=1}^N s_i^2} < G_T.$$
 (4.11)

Во всех экспериментальных исследованиях гипотеза об однородности дисперсий была принята.

4. Значимость коэффициентов регрессии оценивалась с использованием критерия Стьюдента при уровне значимости 0,05.

$$t_u = \frac{|b_u|}{S_b} > t_T. \tag{4.12}$$

Незначимые коэффициенты уравнения регрессии принимали равными нулю.
5. Адекватность построенной математической модели оценивалась с использованием критерия Фишера при уровне значимости 0,05.

$$F = \frac{S_{a\partial}^2}{S^2(Y)} < F_T, \tag{4.13}$$

предварительно определив дисперсию адекватности:

$$S_{\rm ad}^2 = \frac{m}{N-g} \sum_{i=1}^{N} \left(\bar{Y}_i - \tilde{Y}_i \right)^2, \tag{4.14}$$

где *g* – число значимых коэффициентов в уравнении регрессии (4.8);

 $ilde{Y}_i$ – расчётное значение функции отклика, найденное по уравнению регрессии в *i*-м опыте.

Все регрессионные параметры были вычислены с использованием математического программного обеспечения MathCad 15.

В результате анализа экспериментальных данных были установлены зависимости четырёх целевых параметров от факторов, характеризующих процесс свободного дорнования. Линейные модели регрессионных уравнений в кодированной форме представлены следующим образом:

относительное уширение:

$$Y_{\delta} = -2,076 + 0,308X_1 - 0,346X_2 + 0,08X_3; \tag{4.15}$$

относительное укорочение:

$$Y_{\lambda} = -2,358 + 0,279X_1 - 0,369X_2 + 0,125X_3; \tag{4.16}$$

уменьшение внутреннего диаметра отверстия в результате упругого последействия:

$$Y_{\Delta} = 0,624 + 0,232X_1 - 0,106X_2 - 0,137X_3; \tag{4.17}$$

сила дорнования:

$$Y_P = 3,117 + 0,286X_1 - 0,077X_2 + 0,141X_3.$$
(4.18)

В регрессионные уравнения (4.15)–(4.18) подставляются выражения, связывающие кодированные переменные с их натуральными значениями, согласно формуле (4.7). Далее проводится операция возведения в степень, в результате чего удаётся получить эмпирические формулы, описывающие зависимость изучаемых параметров от основных факторов технологического процесса. относительное уширение:

$$\delta = 9,18 \cdot 10^{-3} \frac{a^{1,023} \alpha^{0,278}}{\beta^{2,846}}; \tag{4.19}$$

относительное укорочение:

$$\lambda = 4,63 \cdot 10^{-3} \, \frac{a^{0.928} \alpha^{0.437}}{\beta^{3.038}}; \tag{4.20}$$

уменьшение внутреннего диаметра отверстия, мкм:

$$\Delta = 8,15 \frac{a^{0.771}}{\beta^{0.871} \alpha^{0.478}}; \tag{4.21}$$

максимальная сила дорнования, кН:

$$P = 0,076a^{0.952}\beta^{0.632}\alpha^{0.49}.$$
(4.22)

Анализ выражения (4.19) демонстрирует линейный характер зависимости относительного уширения образцов от относительного натяжения (Рисунок 4.8, а), а также слабое влияние угла заборного конуса дорна. При увеличении степени толстостенности наблюдается значительное снижение относительного уширения образца (Рисунок 4.9, б). С учётом, что $\beta \sim D_o$, абсолютная величина относительного уширения уменьшается с ростом наружного диаметра $\Delta D \sim 1/D_o^{1,846}$.

Выражение (4.20) отражает линейную зависимость показателя относительного укорочения от величины натяга, а также демонстрирует более заметное уменьшение этого параметра при возрастании степени толстостенности. При увеличении угла заборного конуса дорна наблюдается более выраженное укорочение образцов по сравнению с изменением их наружного диаметра. Графическое отображение зависимости укорочения от двух переменных при фиксированном значении третьей приведена на Рисунке 4.9.

Расчёт изменения внутреннего диаметра отверстия проводился с использованием выражения (4.21). На Рисунке 4.10 показано, как данный параметр изменяется в зависимости от двух факторов при неизменной третьей переменной. Влияние упругого последействия приводит к уменьшению внутреннего диаметра, при этом по мере увеличения натяга и угла заборного конуса скорость изменения этого диаметра уменьшается.

Для вычисления силы дорнования применено выражение (4.22). Соответствующая зависимость силы дорнования от двух факторов при фиксированном значении третьего отображена на Рисунке 4.11. Выявлено, что при росте относительного натяга, угла заборного конуса и степени толстостенности происходит увеличение силы дорнования.



а – от относительного натяга и степени толстостенности при фиксированном значении угла заборного конуса $\alpha = 4^{\circ}$; б – от угла заборного конуса и степени толстостенности при относитель-

ном натяге a = 5,3% (i =0,5 мм)





а - от относительного натяга дорнования и степени толстостенности при фиксированном значении угла заборного конуса α = 4°; б – от угла заборного конуса и степени толстостенности при

относительном натяге а = 5,3% (і =0,5 мм)

Рисунок 4.9 – Зависимость относительного укорочения



а - от относительного натяга дорнования и степени толстостенности при фиксированном значении угла заборного конуса α = 4°; б – от угла заборного конуса и степени толстостенности при относительном натяге а = 5,3% (i =0,5 мм); в – от относительного натяга дорнования и угла заборного конуса при фиксированной степени толстостенности β = 2,2
 Рисунок 4.10 – Зависимость уменьшения внутреннего диаметра отверстий



а - от относительного натяга дорнования и степени толстостенности при фиксированном значении угла заборного конуса α = 4°; б – от угла заборного конуса и степени толстостенности при относительном натяге а = 5,3% (i =0,5 мм); в – от относительного натяга дорнования и угла заборного конуса при фиксированной степени толстостенности β = 2,2
 Рисунок 4.11 – Зависимость силы дорнования

В связи с тем, что различие в химическом составе заготовок из порошковой меди марки ПМС-1 [99] и заготовок из медного порошка марки ПМС-1 легированного 6 % титанового порошка марки ВТ0-1 не значительная. Эта разница учтена в показателях степени, которая несколько выше, а поверхности (Рисунок 4.8-4.11), представленные на рисунках отличаются в пределах 3%.

Сравнение экспериментальных данных с результатами компьютерного моделирования выявило расхождение в пределах 10-15%. Этот факт свидетельствует об адекватности разработанных математических моделей, описывающих зависимость целевых функций от технологических факторов, в теоретическом контексте.

4.5 Шероховатости поверхности и точность изготовления образцов

При исследовании шероховатости и точности образцов, изготовленных из порошковых материалов, учитывали, что образцы получены прессованием порошка в закрытой матрице. Такая обработка дает возможность получить поверхность высокого качества с *Ra* до 0,1 мкм. Точность образцов из порошковых материалов определяется учетом упругого последействия и имеет больше значение.

Контроль шероховатости образцов, полученных свободным дорнованием, осуществляли согласно ГОСТ 2789-73 путём сравнения с эталонами шероховатости вырезанной внутренней поверхности и наружной поверхности. Эксперименты показали, что уменьшение пористости приводит к улучшению качества внутренней поверхности. В результате свободного дорнования снижается параметр шероховатости поверхности *Ra* отверстий. При исходной пористости заготовок получена следующая шероховатость: при 6 % - 0,89 мкм; при 15 % - 1,4 мкм; при 24 % - 2,1 мкм. Это можно объяснить тем, что при свободном дорновании заготовок с большей пористостью на поверхность отверстия выходят открытые поры и ее шероховатость увеличивается.

Влияние режимов дорнования и степени толстостенности полых заготовок на шероховатость отверстий подробно исследовано в работах [11]. Установлены зависимости параметра шероховатости Ra отверстий от степени толстостенности заготовок при свободном дорновании с различными натягами. Выявлено, что с увеличением степени толстостенности происходит значительное снижение параметра шероховатости обработанных отверстий. Это обусловлено ростом контактных давлений по мере увеличения степени толстостенности цилиндров. Влияние натяга

при свободном дорновании на показатель шероховатости обработанных отверстий не установлено.

Таким образом, для обеспечения наименьшей шероховатости поверхности обрабатываемых дорнованием отверстий в полых заготовках представляется целесообразным использовать заготовки с закрытыми порами, обработанными дополнительно давлением, что выполняется в процессе прессования порошка. Применение свободного дорнования с малым натягом обеспечивает малую шероховатость отверстий.

В результате исследований установлено, что дорнование заготовок пористостью 6 % приводит к уменьшению шероховатости и уменьшению класса шероховатости до 6-7 класса, снижению квалитета до IT6. Дорнование заготовок втулок пористостью 15 % обеспечивает 7 класс шероховатости (тонкое шлифование) и снижение квалитета точности до IT6. Заготовки пористостью 24 % после выполнения дорнования имеют класс шероховатости 8, квалитет IT7.

На точность порошковых заготовок влияет точность прессового оборудования, стабильность упругого последействия при холодной штамповке и изменение объёма в процессе спекания. Для изготовления заготовок втулок матрица была изготовлена по квалитетам IT6, IT7, стержень – по квалитетам IT5, IT6. Рабочие поверхности матрицы, пуансона и стержня были обработаны с шероховатостью не менее Ra = 0,1 мкм согласно ГОСТ 2789-73 и дополнительно отполированы до зеркального блеска. Это обеспечивает высокую износостойкость и гарантирует высокое качество поверхности прессовки. Высокая точность изготовления пресс-форм является критическим фактором, необходимым не только для получения заготовок с заданными размерами, но и для предотвращения дефектов, которые могут возникнуть из-за перекосов.

Точность отверстий оценивали по величине разброса их диаметров $\Delta_d = d_{\max} - d_{\min}$, где d_{\max} , d_{\min} соответственно максимальные и минимальные диаметры в выборке из не менее чем 10 образцов.

В результате изготовления порошковых заготовок втулок точность диамет-

ральных размеров соответствует квалитетам IT6, IT7. В результате выполнения спекания точность изделий снижается, и она соответствует квалитетам IT7, IT8 (точной механической обработки).

При расчете рабочих инструментов штампа для свободного дорнования учитывали величину упругого последействия. Для сплавов на основе меди, легированных никелем, титаном, по данным работы [110], величина упругого последействия $\Delta d/d_0$ составила 0,0025-0,003. На эту величину увеличиваем диаметр рабочей части дорна ($\Delta d = 0,0245$ мкм).

После выполнения свободного дорнования заготовок втулок исследована точность и шероховатость отверстий в зависимости от исходной пористости 6, 15 и 24 %. Свободное дорнование заготовок выполняли дорном с d = 10 мм, относительным натягом $i/d_0 = 0,02$, углом заборного конуса $\alpha = 4^\circ$.

Для измерения внутреннего диаметра отверстия использовался нутромер индикаторный модели НИ 10–18 с цифровым отсчётом и ценой деления 0,01 мм. Наружный диаметр заготовки определялся с помощью микрометра МК-25-1 с точностью до 0,005 мм. Измерения проводились в средней части образца и на расстоянии примерно 2 мм от его концов. Результаты измерений усреднялись для получения окончательного значения диаметра.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

1. Экспериментально подтверждена зависимость силы дорнования от технологических параметров – натяга, угла заборного конуса; характеристик заготовки – степени толстостенности и исходной пористости. Получено, что с увеличением натяга и угла заборного конуса сила дорнования увеличивается. С увеличением степени толстостенности, уменьшением исходной пористости заготовки сила дорнования увеличивается. Расхождение экспериментальных и расчётных данных в среднем составляет 10 %.

2. Микротвердость и ширина упрочненного слоя определяются пористостью,

степенью толстостенности, относительным натягом и углом заборного конуса. Увеличение начальной пористости образцов ведет к снижению микротвердости и уменьшению ширины упрочненного слоя. В то же время, повышение степени толстостенности, относительного натяга, угла заборного конуса способствует увеличению микротвердости и расширению упрочненного слоя.

3. Отжиг незначительно уменьшает внутренние напряжения и на микроструктуру материала, приводя к изменению размеров зёрен по всей поверхности заготовки. Это снижает твёрдость по Бринеллю и микротвёрдость. На внутренних слоях твёрдость составляет 100–115 HB, а на внешних слоях — 83–85 HB.

4. В результате выполнения регрессионного анализа экспериментальных данных установлено, что с увеличением относительного натяга происходит линейный рост величины относительного уширения образцов. При этом влияние угла заборного конуса дорна на данный параметр незначительно. Повышение степени толстостенности оказывает заметное понижающее воздействие на относительное уширение. Показатель относительного укорочения демонстрирует почти линейную зависимость от значения натяга: чем больше степень толстостенности, тем сильнее выражено укорочение. Увеличение угла заборного конуса сопровождается менее выраженным эффектом укорочения по сравнению с изменением уширения. В процессе релаксации напряжений наблюдается уменьшение внутреннего диаметра отверстия, причём интенсивность этого изменения снижается по мере роста относительного натяга и угла заборного конуса. Также установлено, что усилие дорнования увеличивается пропорционально росту натяга, угла заборного конуса и степени толстостенности образца.

5. Установлена точность и шероховатость поверхности отверстия после свободного дорнования. Показано, что для обеспечения наименьшей шероховатости поверхности целесообразно использовать заготовки с закрытыми порами, обработанными дополнительно давлением, что выполняется в процессе прессования порошка. Применение свободного дорнования с малым натягом обеспечивает малую шероховатость отверстий. Точность заготовок после дорнования соответствует квалитету IT7.

6. При сравнении экспериментальных данных с параметрами, рассчитанными на основе компьютерного моделирования, обнаружено расхождение в пределах 10–15%. Это свидетельствует об адекватности экспериментальной модели по отношению к теоретической.

ГЛАВА 5

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ СВОБОДНОГО ДОРНОВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОЛЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

5.1 Общие положения

Технологический процесс изготовления цилиндрических полых заготовок из порошковых материалов состоит из следующих операций: изготовление пористых заготовок прессованием, спекание, формообразование и последующее свободное дорнования для получения поверхностного слоя отверстия высокой плотности и прочности.

В работе [111] рассматриваются инновационные технологические процессы, включающие холодную объёмную штамповку деталей из высокопрочных сплавов и сталей. Также исследуется производство высокопрочных деталей методами прямого формования на прессах из порошковых композиций с последующим спеканием и холодной объёмной штамповкой из спечённых порошковых заготовок на основе железа.

В последнее время находят применение втулки, полученные из порошковых материалов на основе железа и меди. Известны работы П.А. Кузнецова [112] по изготовлению втулок эластостатическим прессованием. Разработана методика выбора рационального технологического варианта эластостатического прессования композиционных слоистых втулок из порошкового материала.

В тормозных системах тепловозов применяются пористые втулки. Они должны иметь пористость 13-15 %, обладать высокой коррозионной стойкостью, выдерживать давление 2,5-3 МПа, коэффициент трения при скольжении по стали без смазки 0,12, со смазкой 0,07-0,1. На предприятии ООО «ЛУГАМАШ» изготавливаются втулки из бронзы марки Бр ОЦС4-4-4 (ГОСТ 5017-2006) методом обрабатки резанием.

Компьютерным моделированием и экспериментально подтверждено, что при отношении $D_o/d_o < 2,24$ заготовки по условиям свободного дорнования относятся к тонкостенным. Если это отношение $D_o/d_o > 2,24$, то к толстостенным. Эта особенность должна учитываться при разработке технологии изготовления полых порошковых заготовок.

Исследованиями показано, что свободное дорнование заготовок из порошковых материалов может применяться для заготовок с относительной высотой L_o/d_o не более 2,11 (глава 3.5.2). В противном случае на заготовке образуется двойная бочка, что приводит к браку.

Технологический процесс изготовления тонкостенных деталей упрощается тем, что прессование заготовки из порошка, т.е. получение исходной заготовки с отверстием, происходит непосредственно в одном штампе, затем заготовка отправляется на спекание, дорнование и окончательную обработку.

При изготовлении толстостенных заготовок в технологический процесс вводится операция формоизменения, которая может осуществляться выдавливанием, пуансоном, не заходящим в полость матрицы и другими схемами деформирования.

Результаты экспериментальных и теоретических исследований свободного дорнования порошковых полых заготовок использованы при разработке технологических процессов изготовления цилиндрических полых деталей из порошковых материалов.

Как показало компьютерное моделирование, после выполнения свободного дорнования в упрочнённом поверхностном слое наблюдаются высокие остаточные сжимающие напряжения, которые обеспечивают повышение твёрдости и микротвёрдости материала. Отжиг, проведённый после выполнения свободного дорнования, несколько уменьшает остаточные напряжения. Данный факт учтён при разработке технологического процесса.

5.2 Технологический процесс изготовления заготовки втулка

На основании проведённых исследований, требований, предъявляемых к изделию, разработана технология изготовления заготовки втулка из медно-титанового порошкового материала, включающая операции: холодное прессование порошковой пористой заготовки, спекание, свободное дорнование и отжиг. На Рисунке 5.1 показан чертёж заготовки с указанием дорнования внутренней поверхности.



Рисунок 5.1 – Чертёж заготовки втулка

Расчёт размеров медно-титановой пористой заготовки выполняли по методике работы [45]. При этом учитывали, что её пористость должна быть в пределах 15 %. Массу детали определяли по формуле:

$$M_{\mathcal{I}} = V_{\mathcal{I}} \rho_{\kappa} (1 - \theta), \qquad (5.1)$$

где V_{Π} - объем детали, м³;

 ρ_{κ} – плотность медно-титанового материала, кг/м³;

 θ - пористость в долях единицы.

Навеску порошковой шихты для получения пористой заготовки рассчитывали, используя выражение (5.2), по формуле [45]:

$$M_{\mu} = K_1 K_2 M_{\mathcal{A}}, \qquad (5.2)$$

где $K_1 = 1,005 - 1,01$ - коэффициент, учитывающий потери порошка при прессовании [45];

 $K_2 = 1,01 - 1,03$ - коэффициент, учитывающие потери порошка при спекании [45].

При расчёте размеров заготовки учитывали равенство масс заготовки и детали. Объем заготовки определяли по формуле:

$$V_3 = V_{\mathcal{A}} \frac{\Theta_{\mathcal{A}}}{\Theta_3}, \tag{5.3}$$

где $\Theta_{\mathcal{I}}$, Θ_3 - относительная плотность детали и заготовки.

Высоту, наружный и внутренний диаметры заготовки принимали равными размерам детали с учётом припусков. В таблице 5.1 приведены основные характеристики заготовки втулки.

Таблица 5.1 – Характеристика пористой полой заготовки втулки

Материал	Масса заго-	Пористость	Диаметр заго-	Высота заго-
	товки, кг	заготовки, %	товки, мм	товки, мм
Медно-титановый поро-	0.028	15	19	20
шок	0,028	15	10	20

Размеры инструмента, определяли следующим образом. Максимальный D_{\max} и минимальный D_{\min} размеры матрицы для штамповки пуансонами, не заходящими в полость матрицы, находили по формуле [45]:

$$D_{1_{\max}} = D_{\max} - l_k,$$

$$D_{1_{\min}} = D_{\min} - l_k,$$
(5.4)

где D_{1max}, D_{1min} - максимальный и минимальный диаметр детали, мм;

 $l_{\boldsymbol{k}}$ - изменение размеров детали после извлечения из штампа, мм.

При определении размеров полости матрицы учитываются изменение размеров при спекании, упругое последействие готовой детали, а также упругое последействие пористой заготовки [45]. Относительная величина упругого последействия в радиальном направлении составила 0,129 %. Изменение диаметра заготовки после извлечения из штампа l_k составляет 0,023 мм.

Минимальный размер полости матрицы $D_{1_{\min}}$ выбирали с учётом износа и назначали допуск на размер по квалитету *H*7.

Высоту матрицы рассчитывали по формуле, исходя из конструктивных соображений, согласно схеме деформирования:

$$h_M = h_{\mathcal{A}} + B \quad , \tag{5.5}$$

где h_{II} – высота детали, мм;

В - изменение высоты детали после извлечения из матрицы с учётом упругого последействия, мм.

Относительная величина упругого последействия в направлении выдавливания втулки составила 0,339 %, а изменение высоты детали 0,061 мм.

Диаметр стержня для формообразования отверстия определяли из выражения [113, 114]:

$$d_{1_{\text{max}}} = d_{\text{max}} + C,$$

$$d_{1_{\text{min}}} = d_{\text{min}} + C,$$
(5.6)

где $d_{1\min}, d_{1max}$ - минимальный и максимальный размеры внутреннего диаметра детали, мм;

C - увеличение размера после извлечения из штампа, принимали равным l_k , мм.

Диаметр стержня с учётом износа назначали по максимальному расчётному размеру d_{1max} .

После спекания уточняли внутренний диаметр пористой заготовки с учётом условия гарантированного зазора между стержнем и стенкой заготовки при загрузке в матрицу штампа [113, 114]:

$$d_{CII\min} = d_{1\min} + A,$$

$$d_{CII\min} = d_{1\min} + A,$$
(5.7)

где $d_{1\min}, d_{1max}$ - минимальный и максимальный размеры стержня, формирующего отверстие, мм;

А – припуск, обеспечивающий гарантированный зазор при загрузке заготовки в матрицу штампа, принимали равным 0,5 [113, 114], мм.

Размеры пористой заготовки после спекания определяли с учётом усадки из выражений [113, 114]:

$$D_{\Pi P} = D_{C\Pi} + G,$$

$$d_{\Pi P} = d_{C\Pi} + G,$$

$$h_{\Pi P} = h_{C\Pi} + G,$$

(5.8)

где G - усадка при спекании, мм.

На основании опытных данных усадка при спекании составила:

по наружному диаметру – 0,15 мм;

по внутреннему диаметру – 0,15 мм;

по высоте – 0,8 мм.

Инструмент для холодного прессования пористой заготовки рассчитывали следующим образом. Диаметр рабочей полости матрицы находили по формуле [113, 114]:

$$D_{M \max} = D_{\Pi P \max} + l_n,$$

$$D_{M \min} = D_{\Pi P \min} + l_n,$$
(5.9)

где l_n - упругое последействие при прессовании, мм.

Величина упругого последействия по диаметру при прессовании составила 0,18 мм.

За номинальный размер принимали $D_{M \min}$ с учётом износа и назначили допуск по квалитету H7.

Диаметр стержня для формирования внутреннего отверстия заготовки рассчитывали, используя формулу (5.7). При этом учитывали износ стержня, в соответствии с этим, диаметр назначали по максимальному расчётному размеру. Увеличение размера после извлечения из штампа принимали равным 0,324 мм.

При расчёте высоты пористой заготовки учитывали упругое последействие:

$$h_{\Pi P} = h_3 + l_n. (5.10)$$

Высоту засыпки, т.е. высоту загрузочной камеры матрицы для прессования пористой заготовки, рассчитывали по формуле [102, 103]:

$$h_{\kappa} = \kappa h_{\Pi P}, \tag{5.11}$$

где к - коэффициент уплотнения, определяемый по формуле:

$$\kappa = \frac{\rho_{np}}{\rho_{H}},\tag{5.13}$$

где ρ_{np} =7590 кг/м³ - плотность пористой заготовки при пористости 15%;

 ρ_{μ} =3360 кг/м³ - насыпная плотность порошка.

Полную высоту матрицы рассчитывали с учётом высоты загрузочной камеры и величины захода нижнего *h*_{*u*} и верхнего *h*_{*e*} пуансонов:

$$h_M = h_k + h_\mu + h_g. (5.14)$$

При автоматической загрузке шихты роль дозатора выполняет загрузочная камера. Тогда, $h_e = 0$. Выбор h_{μ} производили из конструктивных соображений, но не менее 5 мм.

Соотношение диаметров детали $D_0/d_0 = 1,82$. Деталь относится к тонкостенным. Это даёт возможность получить порошковую полую заготовку непосредственно в одном штампе (Рисунок 5.2).

Прессование полой заготовки из медно-титанового порошка пористостью 15 % выполняли на гидравлическом прессе модели ПД–476 усилием 1600 кН. На Рисунке 5.2 представлен чертёж прессованной заготовки втулки и схема штампа для её изготовления [85].



а - чертёж заготовки втулки; б - схема штампа

1-порошок; 2-стержень; 3-пуансон; 4-пружина; 5-плита нижняя; 6-матрица; 7-обойма; 8-верхняя плита; 9-заготовка;

Рисунок 5.2 – Чертёж прессованной заготовки втулки и схема штампа для получения заготовки втулки

Спекание прессованной заготовки выполняли по ступенчатому режиму в среде проточного генераторного газа. При достижении температуры 920 °C спекание длилось 1 ч. Затем заготовки охлаждали до температуры 50 °C со скоростью 15

°C/с. В результате объёмной и линейной усадки пористость заготовок составила 15 %. Чертёж пористой заготовки после спекания показан на Рисунке 5.3.



Рисунок 5.3 – Чертёж пористой заготовки втулки после спекания

Свободное дорнование пористой заготовки осуществляли дорном с углом заборного конуса 4°, ленточка шириной 1 мм, с натягом 0,2 мм на гидравлическом прессе модели ПД–476 усилием 1600 кН.

Силу дорнования рассчитывали по формуле (4.22).

Таблица 5.2 – Основные характеристики технологического процесса свободного дорнования заготовки втулки

	Степень толсто- Угол заборного конуса		Относительный	
Сила, Н	стенности	дорна, ⁰	натяг, %	
705	1,82	4	2,02	

Штамп для свободного дорнования заготовки втулки представлен на Рисунке 5.4, а, фото заготовки – на Рисунке 5.4, б.

Отжиг заготовки после дорнования осуществляли в среде проточного генераторного газа в течение 0,5 часа при температуре 500-550 °C. Затем их охлаждали до температуры 20 °C со скоростью 15 °C/с. Термообработка не оказывала заметного влияния на изменение размеров.



 1-корпус; 2-стакан; 3-дорн; 4-штанга; 5-катушка электромагнита; 6-обойма; 7-шток; 8-опора; 9стакан из немагнитного материала; 10-пневоцилиндр; 11-обрабатываемая деталь;
 Рисунок 5.4 – Схема штампа для свободного дорнования заготовки втулки и фото заготовки

втулки

Исследование микроструктуры проводили на образцах, вырезанных так, чтобы получить шлиф внутренней и внешней поверхности заготовки. Характер структуры твёрдой фазы мелкозернистый, межчастичные трещины отсутствуют. Для оценки качества заготовки определяли физико-механические свойства: твёрдость на приборе Бринелля НРО–250 ГОСТ–9012–59. Плотность определяли методом гидростатического взвешивания, согласно ГОСТ 25281–82.

Физико-механические свойства заготовки втулки полностью отвечают техническим требованиям. Плотность после дорнования, кг/м³: внутренней поверхности 8470, внешней поверхности 7203,4. Твёрдость внутренней поверхности 100-115 НВ, внешней поверхности 83-85 НВ. Свободное дорнование внутренней поверхности отверстия позволило получить слой повышенной плотности и твёрдости.

Таким образом, разработана технология изготовления заготовки втулки из медно-титанового материала, включающая операции: холодное прессование полой заготовки пористостью 15 % на гидравлическом прессе усилием 1600 кН модели ПД–476; спекание при 920 °C в среде генераторного газа; свободное дорнование

спечённой заготовки пористостью 15 % на том же прессе; отжиг при температуре 500-550 °C.

В результате свободного дорнование на внутренней поверхности заготовки происходит уплотнение и упрочнение внутреннего слоя шириной 1,5 мм и микротвердостью 560 МПа. Упрочнение происходит за счёт больших сжимающих остаточных напряжений, превышающих предел текучести.

5.3 Технологический процесс изготовления заготовки втулки с фланцем из порошкового материала

Для изготовления подшипников узлов трения, бытовых приборов и других деталей применяется порошковая бронза марки ПА-БрО. Она имеет следующий химический состав: на основе меди, 10 % олова, до 0,25 % углерода. При комнатной температуре микроструктура – α - твёрдый раствор олова в меди с наличием упрочняющих фаз Cu₃Sn, Cu₅Sn [114].

Для изготовления втулки с фланцем рассмотрены два порошковых материала: порошковая бронза марки ПА-БрО (ГОСТ 26719-85) и механическая смесь медного порошка марки ПМС-1 (ГОСТ 4960-2017) легированного титановым порошком марки ВТ 1-0 (ОСТ 1.90013-81) в количестве 6% по массе [85].

Разработана технология изготовления заготовки втулки с фланцем из меднотитанового порошкового материала, включающая операции: холодное прессование порошковой пористой заготовки, спекание, прямое выдавливание, свободное дорнование и отжиг.

Расчёт размеров пористой заготовки выполняли по методике, разработанной И.Д. Радомысельским. Принимали, что пористость после прессования составляет 20 %, пористость после выдавливания – 15 %. Рассчитывали массу детали, массу заготовки с учётом пористости, плотность порошковой смеси и размеры прессованной заготовки по формулам (5.1 – 5.6). На Рисунке 5.5 представлен чертёж заготовки втулки с фланцем, масса детали 0,162 кг, масса заготовки 0,170 кг, пористость 20 %. При расчёте диаметра отверстия в заготовке учитывали величину упругого

последействия.



Рисунок 5.5 – Чертёж заготовки втулки с фланцем

На Рисунке 5.6, а показан штамп для прессования порошковой заготовки пористостью 20 %, на Рисунке 5.6, б фото заготовки втулки с фланцем.



a



~	
6	
ť١	
v	

а - схема штампа; б - фото заготовки

1- плита; 2 –винт; 3- верхний пуансон; 4 – порошковая шихта; 5 – заготовка; 6 – матрица; 7 нижний пуансон; 8- стержень; 9 – втулка; 10 – бандаж; 11 – выталкиватель пресса; 12 – пружина; 13 – направляющие колонки; 14 – плита;

Рисунке 5.6 – Схема штампа для прессования заготовки втулки с фланцем и фото пористой заготовки

После прессования заготовки спекали в печи в среде генераторного газа со скоростью 3 °С/мин по ступенчатому режиму: нагрев до температур 100-120 °С, 200-220 °С, 300-320 °С, 400-420 °С, 500-520 °С и 600-620 °С с выдержкой при каждой температуре 30 мин., подъём до температуры спекания 920 °С и выдержка 3 ч. В результате объёмной и линейной усадки пористость заготовок уменьшилась и составила 18 % [116].

На Рисунке 5.7 показан чертёж заготовки втулки с фланцем, которую предполагаем изготавливать методом прямого выдавливания. Детали, имеющие ступенчатую форму, изготавливают горячей штамповкой порошковых пористых заготовок, используя осадку при формообразовании. Однако в связи с поочередной осадкой ступенчатых частей детали материал перераспределяется неравномерно, что оказывает влияние на распределение плотности и качество. Характерным дефектом деталей, полученных этим методом, является зажим – несплошность, образованная поверхностными слоями, которые затянуты в тело детали и плотно сжаты в нем.



Рисунок 5.7 – Чертёж заготовки втулки с фланцем

Применение прямого выдавливания является наиболее рациональной операцией для изготовления этой детали. Повышению пластичности материала способствует схема напряженно-деформированного состояния близкая к всестороннему сжатию.

Перед прямым выдавливанием заготовки нагревали в печи с защитной атмосферой до температуры 600 °C в течение 15 мин. Выбор температуры выдавливания, основан на результатах работ [110, 117], в которых на кривых уплотнения и упрочнения показано изменение плотности и прочности в интервале температур 20-700 °C при испытании на сжатие. Для исключения градиента температуры по сечению заготовки инструмент предварительно подогревали до температуры 300 °C. Чертёж и фото заготовки после выдавливания представлены на Рисунке 5.8. Выдавливание осуществляли в штампе, представленном на Рисунке 5.9.

Прессование заготовки втулки с фланцем пористостью 20 % и прямое выдавливание заготовки с заданной пористостью 15 % выполнено на гидравлическом прессе модели ПД-476 силой 1600 кН. В качестве смазки использовали дисульфид молибдена. Выполняли оценку качества готовых заготовок: микроструктуру на микроскопе МИМ-8 и физико-механические свойства по стандартным методикам.

После прямого выдавливания дефекты отсутствуют. По всему сечению втулки получена мелкозернистая структура, отличающаяся небольшим различием в величине зерна составляющим 22-28 мкм, что связано с различным характером течения металла (Рисунок 5.10, б). Определены физико-механические свойства втулки с фланцем: заданная пористость 12-15 %, предел прочности 260 МПа, твёрдость НВ 80 -85, выдерживает давление 0,75-0,90 МПа, коэффициент трения при скольжении по стали со смазкой 0,06-0,09.

Плотность заготовок исследовали методом гидростатического взвешивания (ГОСТ 25281–82). Прочность определяли испытанием на осевое сжатие (ГОСТ 25.503-97) образцов диаметром 8 мм и высотой 16 мм, полученных двусторонним прессованием. Испытание выполняли на универсальной испытательной машине P-10 усилием 100 кН. Твёрдость образцов определяли согласно ГОСТ 9012–59 на приборе Бринелля НРО–250. В качестве индентора применяли шарик закалённой стали диаметром 5 мм, который вдавливался с силой 2500 Н. Продолжительность выдержки составила 30 с. Диаметр отпечатка измеряли при помощи микроскопа МИМ–7 с предельной погрешностью ±0,001 мм.

Для определения основных показателей триботехнических свойств выполняли сравнительные испытания, сущность которых заключается в определении соотношения интенсивности изнашивания исследуемой и эталонной поверхностей, используя метод измерения износа поверхности трения по изменению массы образца (ГОСТ 23.208-79). Испытания образцов «диск-колодка» размером 9,5×10×55 мм при заранее установленных идентичных условиях проводили на машине для ис-

пытания материалов на трение и износ модели СМЦ-2. Эталонный диск изготавливался из стали 45 (ГОСТ 1050-2013) диаметром 50 мм и твёрдостью HRC 43. Удельная нагрузка на образец составляла 2,25 МПа, скорость скольжения 1,1 м/с. В качестве смазочной жидкости использовали индустриальное масло MC-20 (ГОСТ 20779-75). До начала испытаний образец прирабатывался согласно РД 50-662-88 в течение 10 ч., в том числе 5 ч. при постоянной удельной нагрузке, равной 15-20 % от номинальной. После приработки образец и контртело промывали и взвешивали. В качестве промывочной жидкости использовали ацетон (ГОСТ 2603-79). Испытания проводили в течение 80 ч. Затем образец и контртело повторно промывали и взвешивали. Оценку износостойкости при испытаниях производили по средней для испытания образцов интенсивности изнашивания (ГОСТ 23.224-86).





а-чертёж, б-фото

Рисунке 5.8 – Заготовка втулки с фланцем после прямого выдавливания



1 – верхний пуансон; 2 – заготовка; 3 – втулка; 4 – матрица; 5 – бандаж матрицы; 6 –стержень; 7 – нижний пуансон; 8 – опорная плита; 9 -винт

Рисунок 5.9 – Штамп для прямого выдавливания заготовки втулки с фланцем при 600 °С:

После прямого выдавливания исследовали микроструктуру и физико-механические свойства. Статическая рекристаллизация при спекании обеспечивает получение равноосного зерна со средним диаметром 22 мкм (Рисунок 5.10, а). Частицы титана имеют средний размер 55 мкм. Твёрдость составила НВ 80-85.



а – после спекания; б – после прямого выдавливания при 600 °С
 Рисунок 5.10 – Микроструктура заготовки втулки с фланцем

Выполняли свободное дорнование втулки с фланцем по схеме сжатия. Деталь

имеет внутренний диаметром $d_0 = 9,8$ мм, наружный диаметр $D_0 = 20$ мм. Степень толстостенности составляет $D_0/d_0 = 2,04$. Деталь относится к толстостенным и имеет сложную форму, которая влияет на способ изготовления заготовки.

Для выполнения дорнования использовали дорн со следующими параметрами: дорн однозубый, диаметр по ленточке d = 10 мм; ленточка шириной b = 1 мм; угол заборного конуса $\alpha = 4^{\circ}$; угол обратного конуса $\alpha_l = 4^{\circ}$; в месте перехода конической части дорна в цилиндрическую кромка скруглена до R = 0,2 мм. Скорость дорнования – 2 мм/с. Натяг дорнования определяется исходным внутренним диаметром втулки с фланцем; его величина равна 0,2 мм. Для описания трения на контактной поверхности заборного конуса дорна и заготовки использовали формулу Зибеля [85].

Свободное дорнование заготовки втулки с фланцем выполняли на гидравлическом прессе модели ПД-476 усилием 1600 кН в штампе, схема которого показана на Рисунке 5.11, а, фото заготовки втулки на Рисунке 5.11, б.



а – схема штампа; б – фото заготовки втулки с фланцем 1 – корпус; 2 – штанга; 3 – дорн; 4 – заготовка; 5 –обойма; 6 – основание

Рисунок 5.11 – Схема штампа для свободного дорнования и фото заготовки втулки с фланцем

Для анализа технологического процесса свободного дорнования было выполнено моделирование в пакете инженерного анализа Deform 10.2. Использовали два материала бронзу и медно-титановый. Кривые упрочнения бронзы и медно-титанового материала для различных скоростей деформации заданы в базе материалов пакета Deform 10.2 в табличном виде, согласно данным из справочника [118]. Условия моделирования: модель порошковой заготовки – пористая среда; условие текучести – по Мизесу.

На рисунке 5.12 показано распределение интенсивности напряжений во втулке с фланцем, изготовленной из пористой бронзы и медно-титанового сплава. Анализ показал равномерное распределение напряжений, а также одинаковую ширину упрочнённого слоя, которая составляет 1,8 мм для бронзы и 2,2 мм для меднотитанового материала. В бронзе максимальная интенсивность напряжений достигает 330 МПа. В медно-титановом сплаве этот показатель составляет 180 МПа. Повышенный уровень напряжений в бронзе обусловлен наличием упрочняющих фаз Cu₃Sn и Cu₅Sn в α - твёрдом растворе олова в меди [85].



а – бронза; б – медно-титановый материал;

Рисунок 5.12 – Картина распределения интенсивности напряжений

Картина распределения интенсивности деформаций соответствует распределению интенсивности напряжений (Рисунок 5.13). На верхнем торце заготовки из бронзы наблюдается небольшая утяжина с малой степенью деформации равной 0,064-0,096, что объясняется большим сопротивлением деформации материала при входе дорна в отверстие. Медно-титановый материал более пластичный вследствие большого содержания меди, поэтому утяжина отсутствует.

Равномерное напряженно-деформированное состояние обеспечивает получение равномерной относительной плотности в упрочнённом слое (Рисунок 5.14). Относительная плотность достигает величины плотности компактного материала и составляет 0,93. Свободное дорнование позволяет получить упрочнённый и уплотнённый поверхностный слой материала.



а – бронза; б – медно-титановый материал;

Рисунок 5.13 – Картина распределения интенсивности деформаций

Исследование изменения силы дорнования для обоих материалов показывает, что при деформировании втулки с фланцем из медно-титанового материала сила гораздо меньше, чем у бронзы (Рисунок 5.15). Вследствие более высокой пластичности и низкого уровня интенсивности напряжений сила дорнования заготовок из медно-титанового материала меньше.



Рисунок 5.14 – Картина распределения относительной плотности



1 – бронза; 2 – медно-титановый материал;
 Рисунок 5.15 – Сила дорнования втулки с фланцем

При свободном дорновании заготовок втулок с фланцем из порошковой бронзы ПА-БрО наблюдается увеличение интенсивности напряжений в уплотнённом слое. Это обусловлено наличием упрочняющих фаз. При дорновании заготовок из медно-титанового материала интенсивность напряжений ниже. Интенсивность деформации для обоих материалов незначительно отличается. Толщина упрочнённого слоя в медно-титановых заготовках выше из-за большей пластичности медной

составляющей. Увеличение интенсивности напряжений приводит к росту силы дорнования втулок из бронзы. Сила дорнования составила 550 Н для медно-титанового порошка и 1350 Н для бронзы. Формирование уплотнённого и упрочнённого поверхностного слоя в отверстии снижает интенсивность изнашивания до 1,39×10⁻¹⁴ мкм/км при коэффициенте трения 0,075, давлении 2,5 МПа и скорости скольжения 1,1 м/с.

Порошковые медно-титановые материалы с содержанием титана 6 % обладают высокими прочностными характеристиками (предел прочности σ_{e} = 320-350 МПа, твёрдость НВ 100-115), износостойкостью, достаточно высокой теплопроводностью, самосмазываемостью и другими важными свойствами, которые необходимы для работы в узлах трения [119]. По своим свойствам они превосходят бронзу ПА-БрО, поскольку совмещают свойства компонентов: высокую пластичность, теплопроводность, низкий коэффициент трения за счёт медной матрицы и повышенная твёрдость и прочность вследствие введения частиц титана.

Таким образом, изготовление втулки из медно-титанового материала экономически выгодней ввиду меньших энергозатрат на дорнование. Кроме того, выше качество полученной заготовки: отсутствует утяжина в верхнем торце, что уменьшает отходы материала и объем обработки.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 5

1. Разработана технология изготовления заготовки втулки из медно-титанового материала, включающая операции: холодное прессование полой заготовки пористостью 15 % на гидравлическом прессе усилием 1600 кН модели ПД–476; спекание при 920 °C в среде генераторного газа; свободное дорнование спечённой заготовки пористостью 15 % на том же прессе; отжиг при температуре 500-550 °C. В результате свободного дорнование на внутренней поверхности заготовки происходит уплотнение относительной плотности 0,92 и упрочнение внутреннего слоя шириной 1,5 мм и микротвердостью 560 МПа. Упрочнение происходит за счёт больших сжимающих остаточных напряжений, превышающих предел текучести.

2. Разработана технология изготовления заготовки втулки с фланцем из порошкового медно-титанового материала, включающая операции: холодное прессование полой заготовки пористостью 20 % на гидравлическом прессе усилием 1600 кН модели ПД–476; спекание при 920 °C в среде генераторного газа; прямое выдавливание при температуре 600 °C пористостью 15 %, свободное дорнование спечённой заготовки на том же прессе; отжиг при температуре 500-550 °C. Наличие уплотнённого и упрочнённого поверхностного слоя отверстия обеспечило получение относительной плотности 0,93 и ширины уплотнения 2,2 мм, твёрдости 580 МПа, уменьшение интенсивности изнашивания до 1,39·10⁻¹⁴ мкм/км при коэффициенте трения 0,075, давлении 2,5 МПа, скорости скольжения 1,1 м/с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках диссертационной работы решена актуальная научно-техническая задача, связанная с улучшением качества и эксплуатационных характеристик порошковых медно-титановых заготовок путём совершенствования технологии упрочнения методом свободного дорнования.

Основные итоги исследования заключаются в следующем:

1. Установлено, что увеличение исходной пористости материала до 15 % приводит к росту интенсивности напряжений до 185 МПа, что обеспечивает силу дорнования 650 H, ширину уплотненного слоя 1,8 мм, относительную пористость 7 %. Величина остаточных окружных и осевых сжимающих напряжений максимальна у образующего отверстия.

2. Получено, что увеличение степени толстостенности до 2,24 приводит к росту силы дорнования до 580 H, и относительной плотности до 0,91-0,92. При степени толстостенности более 2,24 сила дорнования остаётся практически постоянной в пределах 590-610 H, при этом относительная плотность изменяется в пределах $\rho = 0,92 - 0,93$. Остаточные сжимающие окружные и осевые напряжения увеличиваются. Поэтому порошковые полые цилиндры с отношением $D_0/d_0 < 2,24$ рекомендуется относить к тонкостенным, $D_0/d_0 > 2,24$ к толстостенным. Увеличение относительной высоты приводит к увеличению силы дорнования, но при этом относительная плотность достигает 0,94, а очаг уплотнения 4 мм. Величина остаточных сжимающих напряжений у полых цилиндров с $L_0/d_0 = 2,11$ в два раза больше, чем у полых цилиндров с $L_0/d_0 = 6,32$.

3. Свободное дорнование заготовок по схеме сжатия из порошковых меднотитановых материалов рекомендуется выполнять для заготовок с отношением размеров D_0/d_0 от 1,63 и относительной высоты L_0/d_0 до 2,11. При таких условиях и исходной пористости 15 % может быть получена ширина уплотненного и упрочненного слоя в пределах 1,1-1,8 мм.

4. Выявлено, что увеличение относительного натяга с 2 до 8,7 % приводит к увеличению силы дорнования соответственно до 650-2700 Н, увеличению слоя уплотнения до 5,6 мм при максимальной относительной пористости у образующего
отверстия 0,94. При этом наблюдается равномерное распределение уплотнения при относительном натяге 2 %, что минимизирует припуски на обработку. Увеличение угла заборного конуса дорна до 15° при увеличении величины натяга приводит к увеличению силы дорнования до 3000 Н и относительной плотности до 0,98, что обеспечивается большим гидростатическим сжатием.

5. Установленные зависимости силы дорнования от технологических параметров – натяга, угла заборного конуса, характеристик заготовки – степени толстостенности и исходной пористости подтверждены экспериментально. Отличие экспериментальных и расчётных исследований не превышают 15 %.

6. Установлена зависимость величины упрочнённого слоя от пористости, степени толстостенности и натяга. С ростом пористости, микротвердость и ширина упрочнённого слоя уменьшаются. Увеличение степени толстостенности и натяга приводит к увеличению микротвердости и ширины упрочнённого слоя.

7. Получены математические модели относительного уширения, относительного укорочения, уменьшения внутреннего диаметра отверстия, силы дорнования от параметров порошковой заготовки и инструмента на основании регрессионного анализа экспериментальных данных свободного дорнования. Модели позволяют определить оптимальные параметры свободного дорнования медно-титановых порошковых заготовок. Использование таких параметров обеспечивает минимальные энергозатраты и равномерное распределение уплотнения и упрочнения по внутренней поверхности отверстия заготовки за счёт сжимающих остаточных напряжений.

8. Свободное дорнование деталей типа «втулка» и «втулка с фланцем» обеспечивает уплотнение и упрочнение поверхностного слоя отверстия шириной до 2 мм, микротвердость возрастает до 580 МПа, при этом пористость деформированной поверхности уменьшается в два раза и составляет 7 %. В результате выполнения данных технологических процессов металлоемкость уменьшается на 30 %, износостойкость увеличивается на 15 %, трудоёмкость изготовления деталей уменьшается в 1,2 раза.

145

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- θ_o исходная пористость
- *m_i* масса навесок
- *m*_{см} масса порошковой смеси
- *Θ* относительная плотность заготовки
- $\rho_{\rm CM}$ плотность порошковой смеси
- D_o/d_o степень толстостенности
- L_o/d_o относительная длина
 - Р сила дорнования
 - σ_i интенсивность напряжений
 - ε_i интенсивность деформации
 - σ_{cp} гидростатическое давление
 - ρ_r относительная плотность
 - и скорость течения металла
 - ΔV абсолютное изменение объёма
 - σ_{θ} окружное остаточное напряжение
 - σ_r радиальное остаточное напряжение
 - σ_z осевое остаточное напряжение
 - *h* высота наплыва
 - ΔD увеличение наружного диаметра
 - δ относительное изменение наружного диаметра
 - λ относительное изменение длины
 - *△* величина роста внутреннего диаметра
 - Y_{δ} относительное уширение
 - Y_{λ} относительное укорочение

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скворцов, В.Ф. Дорнование глубоких отверстий малого диаметра: монография / В.Ф. Скворцов, А.Ю. Арляпов. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – 91 с.

 Скворцов, В.Ф. Дорнование глубоких отверстий малого диаметра / В.Ф. Скворцов, А.Ю. Арляпов, И.С. Охотин // Справочник. Инженерный журнал. – 2012. – №2. – С. 69–91.

 Проскуряков, Ю Г. Дорнование цилиндрических отверстий с большими натягами / Ю.Г. Проскуряков, Г.И. Шельвинский; Отв. ред. Ф. Ф. Валяев. – Ростов н/Д: Изд-во Рост. ун-та, 1982. – 168 с.

4. Розенберг, А.М. Расчёт и проектирование твердосплавных деформирующих протяжек и процесса протягивания / А.М. Розенберг, О.А. Розенберг, Э.К. Посвятенко и др. – Киев: Наукова думка, 1978. – 256 с.

5. **Проскуряков, Ю.Г.** Дорнование цилиндрических отверстий / Ю.Г. Проскуряков. – М.: МАШГИЗ, 1958. – 112 с.

Арляпов, А.Ю. Обеспечение точности и качества поверхностного слоя глубоких отверстий малого диаметра в толстостенных заготовках дорнованием твердосплавными прошивками: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Арляпов Алексей Юрьевич. – Томск, 2004. – 161 с.

7. **Охотин, И.С.** Дорнование глубоких отверстий малого диаметра в полых толстостенных цилиндрах с большими натягами: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.07 / Охотин Иван Сергеевич. – Томск, 2010. – 171 с.

8. Монченко, В.П. Эффективная технология производства полых цилиндров / В.П. Монченко. – М.: Машиностроение, 1980. – 248 с.

9. Розенберг, А.М. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания / А.М. Розенберг, О.А. Розенберг. – Киев: Наукова думка. 1990. – 320 с.

10. **Розенберг, А.М.** Обработка отверстий твердосплавными выглаживающими протяжками / А.М. Розенберг, О.А. Розенберг. – Киев: Техника, 1966. – 62 с. 11. Бознак, А.О. Управление остаточными напряжениями при дронировании отверстий в толстостенных цилиндрах: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.07 / Бознак Алексей Олегович. – Томск, 2018. – 167 с.

12. Хомяк, Б.С. Твердосплавный инструмент для холодной высадки и выдавливания / Б.С. Хомяк. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.

13. Кузнецов, А.М. Особенности износа деформирующих элементов и режущих зубьев протяжек с износостойкими покрытиями / А.М. Кузнецов, В.В. Клепиков, Ж.К. Джунусбеков // Сб. тр. «Рациональные технологические процессы механической обработки деталей машин». – М.: МДНТП, 1979. – С. 146–151.

14. Цеханов, Ю.А. Механика деформирующего протягивания как научная основа оценки качества деталей и работоспособности инструмента с износостойкими покрытиями: автореф. дис. ... д-ра. техн. наук: 05.02.08 / Цеханов Юрий Александрович. – Киев, 1993. – 43 с.

15. **Проскуряков, Ю.Г.** Технология упрочняюще-калибрующей и формообразующей обработки металлов / Ю.Г. Проскуряков. – М.: Машиностроение, 1971. – 208 с.

16. Щедрин, А.В. Обработка отверстий деформирующими прошивками, упрочненными регулярным микрорельефом / А.В. Щедрин, В.В. Сулаков // Тракторы и сельхозмашины. – 1990. – № 7. – С. 41–42.

17. **Мазеин, П.Г.** Моделирование остаточных напряжений и деформаций, возникающих при дорновании / П.Г. Мазеин, Д.В. Прусаков, А.В. Цунин // Известия Челябинского науч. центра УрО РАН. – 2001. – № 1. – С. 47–50.

 Воронцов, А.Л. Теория и расчёты процессов обработки металлов давлением : учеб. пособие : в 2 т. / А.Л. Воронцов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. ISBN 978-5-7038-3916-4 Т. 1. – 396, [4] с.

19. **Кирсанов, С.В.** Обработка глубоких отверстий в машиностроении / С.В. Кирсанов. – М.: Машиностроение, 2009. – 295 с.

20. **Мазеин, П.Г.** Моделирование формирования остаточных напряжений и деформаций при поверхностном пластическом деформировании стальных деталей: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.08 / Мазеин Петр Германович. – Челябинск, 1994.

- 35 c.

21. **Проскуряков, Ю.Г.** Дорнование отверстий / Ю.Г. Проскуряков. – М.: МАШГИЗ, 1961. – 192 с.

22. **Проскуряков, Ю.Г.** Объёмное дорнование отверстий / Ю.Г. Проскуряков, В.Н. Романов, А.Н. Исаев. – М.: Машиностроение, 1984. – 223 с.

23. **Розенберг, А.М.** Качество поверхности. Обработанной деформирующим протягиванием / А.М. Розенберг, О.А. Розенберг, Э.И. Гриценко, Э.К. Посвятенко. – Киев : Наукова думка, 1977. – 187 с.

24. Сторожев, М.В. Теория обработки металлов давлением: учеб. [для вузов. Изд.
4-е, перераб. и доп.] / М.В. Сторожев, Е.А. Попов. – М.: Машиностроение, 1977. –
423 с.

25. Кокорин, В.Н. Специальные способы обработки металлов давлением: учебное пособие / В. Н. Кокорин, Ю.А. Титов, В.Н. Таловеров, Л.В. Федорова. – Ульяновск: УлГТУ, 2006. – 36 с.

26. Дмитриев, А.М. Машины и технологии обработки металлов давлением / А.М. Дмитриев; М-во образования и науки Рос. Федерации, Гос. образоват. учреждение высш. проф. образования "Ижев. гос. техн. ун-т". – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2004. - 46, [1] с.

27. Исаев, А.Н. Совершенствование процессов дорнования отверстий трубчатых заготовок: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.08 / Исаев Альберт Николаевич. – Ростов н/Д, 2005. – 400 с.

28. Одинцов, Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник / Л.Г. Одинцов – М.: Машиностроение, 1987. – 327 с. 29. Суслов А.Г. Технология и инструменты отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием / А.Г. Суслов, В.Ю. Блюменштейн, Р.В. Гуров, Исаев А.Н. // Справочник. В 2-х томах. Т. 1. // Под общ. Ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2014. – 480с.

30. Полетика, М.Ф. Контактные давления и шероховатость поверхности при дорновании отверстий в толстостенных заготовках / М.Ф. Полетика, В.Ф. Скворцов,

А.Ю. Арляпов // Сб. тез. докладов Всероссийской науч. Технической конф. «Аэрокосмические технологии и образование на рубеже веков». – Рыбинск : РГТА, 2002. – С. 21–22.

31. Колмогоров, В.Л. Механика обработки металлов давлением: учебник для вузов
/ В.Л. Колмогоров. 2-е изд., перераб. и доп. – г. Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ,
2001. – 836 с.

32. Губкин, С.И. и др. Основы теории обработки металлов давлением / С. И. Губкин, Б. П. Звороно, В. Ф. Катков и др.; под ред. М. В. Сторожева. – М.: МАШГИЗ, 1959. – 540 с.

33. **Суворов, И.К.** Обработка металлов давлением / И.К. Суворов. – М.: Высш. школа, 1980. – 364 с.

34. **Farhangdoost, K**. The effect of mandrel speed upon the residual stress distribution around cold expanded hole / K. Farhangdoost, A. Hosseini // Procedia Engineering. – 2011. – V. 10. – P. 2184-2189.

35. Тимошенко, А.В. Исследование процесса дорнования отверстий в листовых заготовках из алюминиевого сплава Д16ЧТ / А.В. Тимошенко, В.В. Пиманов, А.Н. Бабак, Е.Н. Коробко // Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування. – 2015. – №3 (75). – С. 144–150.

36. Скворцов, В.Ф. Влияние геометрических параметров заготовок на процесс дорнования / В.Ф. Скворцов, И.С. Охотин, А.С. Иванова, Б.К. Орманов // Обработка металлов. – 2013. – № 3. – С. 4–8.

37. Скворцов, В.Ф. Деформирующие усилия при дорновании с большими натягами отверстий малого диаметра в толстостенных деталях / В.Ф. Скворцов, И.С. Охотин, А.Ю. Арляпов // Обработка металлов. – 2011. – № 4. – С. 3–6.

38. **Бизяев, Г.Н.** Повышение эффективности технологии изготовления тонкостенных колец подшипников на основе совершенствования процесса свободного дорнования: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Бизяев Григорий Николаевич. – Саратов, 2008. – 175 с.

39. Скворцов, В.Ф. Влияние степени толстостенности заготовок на процесс дор-

нования отверстий, выполняемый с большими натягами / В.Ф. Скворцов, И.С. Охотин, А.Ю. Арляпов // Изв. ТПУ. Серия Математика и механика. Физика. – 2009. – Т. 314, № 2. – С. 62–65.

40. Дечко, Э.М. Обработка отверстий в металлокерамических деталях. – Минск: Наука и техника, 1965. – 116 с.

41. **Артамонов, А.Я.** Влияние условий обработки на физико-механическое состояние металлокерамических материалов / А.Я. Артамонов. – Киев: Наукова думка. – 1965. – 263 с.

42. Скворцов, В.Ф. Обработка колец подшипников чистовым пластическим деформированием / В.Ф. Скворцов, М.Г. Гольдшмидт, В.М. Бутряков. – М.: НИИНАвтопром, 1985. – 62 с.

43. **Григорьев, А.К.** Пластическая деформация пористых материалов / А.К. Григорьев, А.И. Рудской. – Л.: ЛДНП. – 1989. – 25 с.

44. **Федорченко, И.М.** Композиционные спечённые антифрикционные материалы / И.М. Федорченко, Л.И. Пугина. – Киев: Наукова думка, 1980. – 404 с.

45. Радомысельский, И.Д. Пресс-формы для порошковой металлургии. Расчет и конструирование / И.Д. Радомысельский, Е.Л. Печентковский, Г.Г. Сердюк. – Киев: Техника, 1970. – 172 с.

46. Сердюк, Г.Г. Поверхностное упрочнение изделий из металлокерамических порошков обработкой давлением (обзор) / Г.Г. Сердюк // Порошковая металлургия. – 1993. – №7. – С. 31–41.

47. **Каменев, С.В.** Расчёт и выбор норм точности деталей и узлов машин : учебное пособие / С.В. Каменев, К.В. Марусич. – Оренбург: ОГУ, 2021. – 142 с. ISBN 978-5-7410-2528-4

48. **Папшев**, Д.Д. Упрочнение деталей обкаткой шариками / Д.Д. Папшев. – М.: Машиностроение, 1968. – 132 с.

49. **Кузнецов П.А.** Технология обработки давлением порошковых материалов в жестких пресс-формах: учеб. – метод. пособие / П.А. Кузнецов, А.О. Просторова, Р.В. Кузнецов. – СПб., 2022. – 50 с.

50. Богодухов, С.И. Порошковые материалы со специальными свойствами: учебное пособие / С.И. Богодухов, Е.С. Козик, Е.В. Свиденко, под общ. ред. проф., д-ра техн. наук С.И. Богодухова. – Оренбург: ОГУ, 2017. – 162с.

51. Зенкевич, О.К. Метод конечных элементов в технике : Пер. с англ / О.К. Зенкевич; Под ред. Б. Е. Победри. – М.: Мир, 1975. – 541 с.

52. Розин, Л.А. Метод конечных элементов в применении к упругим системам / Л.А. Розин. – М.: Стройиздат, 1977. – 129 с.

53. Малинин, Н.Н. Решение задач горячего формоизменения методом конечных элементов / Н.Н. Малинин, К.И. Романов // Известия вузов. Машиностроение. – 1977. – № 8. – С. 127–131.

54. Клованич С.Ф. Метод конечных элементов в нелинейных задачах инженерной механики / С.Ф. Клованич // Запорожье: Издательство журнала «Світ геотехніки». – 2009. – 400 с.

55. **Маковкин Г.А.** Применение МКЭ к решению задач механики деформируемого твердого тела. Часть 1 : учебное пособие / Г.А. Маковкин, С.Ю. Лихачева – Н.Нов-город: Изд-во ННГАСУ, 2012. – 71 с.

56. Yongshou, L. Finite element method and experimental investigation on the residual stress fields and fatigue performance of cold expansion hole / L. Yongshou, S. Xiaojun, L. Jun, Y. Zhufeng // Materials & Design. – 2010. – T. 31. – №3. – P. 1208–1215.

57. **Chakherlou, T.N.** Analysis of cold expanded fastener holes subjected to short time creep: finite element modelling and fatigue tests / T.N. Chakherlou, A.B. Aghdam, A.Akbari, K. Saeedi // Materials & Design. $-2010. - V. 31. - N_{2}6. - P. 2858-2866.$

58. **Паршин, В.С.** Практическое руководство к программному комплексу DE-FORM-3D: учебное пособие / В.С. Паршин, А.П. Карамышев, И.И. Некрасов, А.И. Пугин, А.А. Федулов. – Екатеринбург: УрФУ, 2010. – 265 с.

59. Таупек, И.М. Общее руководство по работе с инженерным программным комплексом DEFORM: учебное пособие / И.М. Таупек, Е.Г. Кабулова, К.А. Положенцев, А.В. Лисовский, А.В. Макаров. – Старый Оскол: «Кириллица», 2015. – 217 с. 60. Гуревич, Л.М. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением. Введение в Abaqus: учебное пособие / Л.М. Гуревич, В.М. Волчков, В.Ф. Даненко. – Волгоград: ВолгГТУ, 2015. – 95 с.

61. **Федорова, Н.Н.** Основы работы в ANSYS 17 / Н.Н. Федорова, С.А. Вальгер, М.Н. Данилов, Ю.В. Захарова. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 210 с.

62. Ryabicheva, L. Modeling a Free Burnishing of a Powder Hollow Cylinder / L. Ryabicheva, V. Dyadichev, D Reshetnyak // Journal «Defect and Diffusion Forum» 2021 vol.
410, pp. 424–432.

63. Рябичева, Л.А. Влияние натяга на плотность и остаточные напряжения при дорновании порошковой пористой заготовки / Л.А. Рябичева, Д.В. Решетняк // Вестник ЛГУ им. В. Даля: научный журнал № 5 (47) 2021. – С. 141–145.

64. **Gopalakrishna, H.D.** Cold expansion of holes and resulting fatigue life enhancement and residual stresses in Al 2024 T3 alloy–An experimental study / H.D. Gopalakrishna, H.N. Murthy, M. Krishna, M.S. Vinod, A.V. Suresh // Engineering Failure Analysis. – 2010. - V. 17. - N 2. - P. 361-368.

65. Исаев, А. Н. Геометрия очага деформации при локально-кольцевой раздаче пустотелого цилиндра методом дорнования / А. Н. Исаев, А. Р. Лебедев // Математические методы в технике и технологиях: сб. трудов XXIII междунар. науч. конф. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2010. – Т. 5. – С. 153–156.

66. **Рябичева**, **Л.А.** Модель процессов деформирования пористых тел с учётом скоростной чувствительности / Л.А. Рябичева, Ю.В. Кравцова // Физика и техника высоких давлений. – 2004. – №1. – С. 54–61.

67. Розенберг, О.А. Моделирование процесса упрочнения пористых втулок методом многократного протягивания / Розенберг О.А., Михайлов О.В., Штерн М.Б. // Наукові нотатки. – 2011. – № 31. – С. 306–313.

68. Рыбин, Ю.И. Математическое моделирование и проектирование технологических процессов обработки металлов давлением : учеб. пособие для студентов вузов / Ю.И.Рыбин, А.И. Рудской, А.М. Золотов. – СПб.: Наука ; СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2004. – 644 с.

69. Liu, G.R. The Finite Element Method: a practical course / G.R.Liu, S.S. Quek. – Singapore: Butterworth-Heinemann, 2003. – 365 p.

70. Решетняк, Д.В. Математические модели деформируемых тел при дорновании /

Д.В. Решетняк // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении. 2021. № 1 (34). С. 77-86.

71. Грин, Р.Дж. Теория пластичности пористых тел / Р.Дж. Грин // Механика. – 1973. - №4. – С.109–120.

72. Бондарь, В.С. Теории пластичности при сложном нагружении по плоским траекториям деформаций / В.С. Бондарь, Д.Р. Абашев, Д.Ю. Фомин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2021. – № 3. С. 35–47.

73. Трусов, П.В. Многоуровневые модели неупругого деформирования материалов и их применение для описания эволюции внутренней структуры / П.В. Трусов, А.И. Швейкин, Е.С. Нечаева, П.С. Волегов // Физическая мезомеханика. – 2012. – Т. 15. – № 1. – С. 33–56

74. Цеменко, В.Н. Разработка процессов прокатки пористых изделий на основе теоретического и экспериментального исследования уплотняемых порошковых сред: автореф. дис. ... д-ра. техн. наук.: 05.16.06 / Цеменко Валерий Николаевич. – Санкт-Петербург, 2001 – 34 с.

75. Штерн, М.Б. Феноменологические теории прессования порошков / М.Б. Штерн, Г.Г. Сердюк, Л.А. Максименко, Ю.В. Трухан, Ю.М. Шуляков – Киев: Наукова думка, 1982. – 139 с.

76. Скворцов, В.Ф. Остаточные напряжения при дорновании отверстий малого диаметра в полых толстостенных цилиндрах с большими натягами / В.Ф. Скворцов, И.С. Охотин, А.Ю. Арляпов // Известия Томского политехнического ун-та. – 2010. – Т. 316. – № 2. – С. 24–27.

77. Скворцов, В.Ф. Остаточные напряжения при дорновании отверстий в толстостенных цилиндрах по схемам сжатия и растяжения / В.Ф. Скворцов, Р.С. Цыганков, А.О. Бознак, В.С. Федотов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2014. – № 3. – С. 45–50.

78. Скворцов, В.Ф. Применение метода Н.Н. Давиденкова для оценки окружных остаточных напряжений в обработанных дорнованием полых цилиндрах / В.Ф.

Скворцов, А.Ю. Арляпов, А.О. Бознак, И.И. Оголь // Системы. Методы. Технологии. – 2016. – № 4. – С. 65–70.

79. Крайнов, В.В. Эффективность дорнования в медных (волноводных) деталях / В.В. Крайнов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2014. – №5 (107). – С. 225–229. 80. Elajrami, M. Experimental investigation of the effect of double cold expansion on the residual stresses distribution and on the fatigue life of rivet hole / M. Elajrami, R. Miloud, H. Milouki, F. B. Boukhoulda // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2016. – T. 38. – № 8. – С. 2527–2532.

81. De Castro, P. M. S. T. An overview on fatigue analysis of aeronautical structural details: Open hole. single rivet lap-joint. and lap-joint panel / P. M. S. T. De Castro, P. F. P. De Matos, P. M. G. P. Moreira, L. F. M. Da Silva // Materials Science and Engineering: A. – 2007. – T. 468. – C. 144–157.

82. Yuan, X. Numerical and experimental investigation of the cold expansion process with split sleeve in titanium alloy TC4 / X. Yuan, Z. F. Yue, S. F. Wen, L. Li, T. Feng // International Journal of Fatigue. -2015. - T. 77. - C. 78-85.

83. Скворцов, В.Ф. Толщина упрочненного слоя при дорновании отверстий в толстостенных цилиндрах / В.Ф. Скворцов, И.С. Охотин, Т.С. Саиспаева // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. – 2012 – №. 2 (55) – С. 14–17

84. **Попов, М.Е.** Разработка технологии повышения качества изготовления деталей из порошковых материалов методом дорнования / М.Е. Попов, М.Е. Игбоануго, К.А. Пономарь // Сборник научных трудов 3-й международной молодёжной научно-практической конференции «Качество продукции: контроль, управление, повышение, планирование». – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2016. – Т. 2. – С. 164–167.

85. Белозир, И.И. Экспериментальные и теоретические исследования процесса дорнования заготовок втулок из различных материалов / Л.А. Рябичева, И.И. Белозир // Заготовительные производства в машиностроении. 2025. Т. 23, № 1. С. 48-51. DOI: 10.36652/1684-1107-2025-23-1-48-51.

86. Пат. 11201 А Україна, МПК 7С10Ј3/18, С10Н1/00. Газогенератор / А.Т. Циркін,
Ю.М. Никитін, О.В. Ковалівський, М.В. Білошицький, О.І. Стафєєв – №

2056559832; Заявлено 05. 03.03. Опубл. 15.12.05, Бюл. №12. 2 с.

87. Штерн М.Б. Модифицированные модели деформирования порошковых материалов на основе пластичных и труднодеформируемых порошков / М.Б. Штерн, О.В. Михайлов // Вестник Национального технического университета «Киевский политехнический институт». – Серия Машиностроение. 2011. – №62. – С. 13-19.

88. Скороход В.В. Реологические основы теории спекания / В.В. Скороход. – Киев, Наукова думка, 1972. – 151 с.

89. Белозир, И.И. Влияние пористости и степени толстостенности порошковых заготовок на процесс дорнования отверстий / Л.А. Рябичева, И.И. Белозир // Металлообработка, №3 (135) / Издательство «Политехника» (Санкт-Петербург) — 2023, с. 51–58.

90. **Рябичева, Л.А.** Влияние напряженно-деформированного состояния на структурообразование и свойства при свободном дорновании отверстий порошковой заготовки / Л.А. Рябичева, В.В. Королько, Т.Б. Коробко // Сборник трудов Донец. техн. ун-та. – 2022. – №71. – С. 48 – 55.

91. **Соловей В.Д.** Влияние скорости деформации на упрочнение меди / В.Д. Соловей, А.Н. Мушников // Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций. Материалы XIII международной конференции. Екатеринбург, 2019. С. 27.

92. Беккерт, М. Способы металлографического травления: Справочник / М. Беккерт, Х. Клемм; Пер. с нем. Н. И. Туркиной, Е. Я. Капуткина; Под ред. И. Н. Фридляндера и др. – М.: Металлургия, 1988. – 398 с.

93. Барсуков, В. Г. Трибомеханика дисперсных материалов. Технологические приложения; Монография / В. Г. Барсуков, Б. Крупич. – Гродно: ГРГУ, 2004. – 260 с.

94. Лежнев, С.Н. Теоретические основы обработки металлов давлением: учебное пособие. / С.Н. Лежнев. – Темиртау: КГИУ, 2013. – 124 с.

95. **Огородников В.А.** Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формоизменении. / В.А. Огородников – К.: УМК ВО, 1989. – 150 с.

96. Белозир, И.И. Влияние пористости на напряженно-деформированное состояние при свободном дорновании полого цилиндра / Л.А. Рябичева, И.И. Белозир // Мехатроника, автоматика и робототехника. (Санкт-Петербург), – 2023. – №11 – с.

105-109.

97. **Belozir, I.I.** Evolution of physical and mechanical properties during free burnishing of a powder billet / L.A. Ryabicheva, I.I. Belozir // USA, Seattle, Journal of Advanced Research in Technical Science, 2023, № 35. P.P. 11-14. ISSN 2474-5901, SRC MS.

98. **Рябичева**, **Л.А.** Влияние условий деформации на уплотнение порошковых медно-титановых материалов при повышенных температурах / Л.А. Рябичева, О.П. Гапонова // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении. – Луганск : Изд-во ВНУ им. В. Даля, 2008. – С. 38– 43.

99. **Рябичева, Л.А.** Компьютерное моделирование свободного дорнования втулки из порошковой меди / Л.А. Рябичева, Д.В. Решетняк // Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации: сборник статей XLI Международной научно-практической конференции. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». – 2021. – С.24–30.

100. Белозир, И.И. Влияние параметров заготовки на силу свободного дорнования деталей типа «втулка» / Л.А. Рябичева, И.И. Белозир // Сб.статей. Махачкала: ДГТУ, 2024, с.

101. Белозир, И.И. Поверхностное пластическое деформирование деталей из порошкового медно-титанового материала / Л.А. Рябичева, И.И. Белозир // Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства: сборник тезисов докладов VII научно-технической конференции с международным участием (27 октября 2023 г.) / под общ. ред. Е. С. Смекалина. — Алчевск: ФГБОУ ВО «ДонГТУ», 2023. – с. 184-185

102. Белозир, И.И. Моделирование напряжений и плотности в порошковой заготовки при поверхностном пластическом деформировании / Л.А. Рябичева, И.И. Белозир // Проблемы технического и технологического обеспечения инновационного развития машиностроения. Сб.статей. Махачкала: ДГТУ, 2023, с.75-80

103. Белозир, И.И. Остаточные напряжения при свободном дорновании отверстий в порошковых полых заготовках / Л.А. Рябичева, И.И. Белозир // Физика и техника высоких давлений 2024. Том 34, № 2 с. 105-112.

157

104. Белозир, И.И. Свободное дорнование порошкового полого цилиндра разной высоты / Л.А. Рябичева, И.И. Белозир // Современная наука: Актуальные вопросы, достижения и инновации: сборник статей XXIX Международной научно-практической конференции. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». – 2023. – 348 стр. – С.30–34.

105. Мендебаев, Т.М. Взаимосвязь качественных характеристик поверхностного слоя отверстий с условиями их дорнования / Т.М. Мендебаев, Т.Ю. Никонова // Труды Университета. – Караганда: Изд-во КарГТУ, 2008. – №2. – С. 25–27

106. **Belozir, I.I.** Modeling of technological parameters of free burnishing of powdered porous billet / L.A. Ryabicheva, I.I. Belozir // USA, Seattle, Journal of Advanced Research in Technical Science, 2023, № 36. P.P. 90-94. ISSN 2474-5901, SRC MS.

107. Белозир, И.И. Формирование дефектов при свободном дорновании порошковых заготовок / Л.А. Рябичева, И.И. Белозир // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении / Научный журнал – №2 2023. – Луганск: изд-во ЛГУ им. В. Даля. – с. 10-17.

108. Белозир, И.И. Экспериментальное исследование технологических параметров свободного дорнования порошковых пористых заготовок / Л.А. Рябичева, И.И. Белозир // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении / Научный журнал – №1 (42) 2023. – Луганск: издво ЛГУ им. В. Даля. – с. 18-24.

109. **Рябичева, Л.А.** Регрессионный анализ технологических факторов на качество заготовок при свободном дорновании / Л.А. Рябичева, В.В. Королько // ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении. 2022. №2 (39). С. 34-36.

110. **Gaponova, O.** Deforming of the copper-titanium powder materials at elevated temperatures / O. Gaponova, L. Ryabicheva // International Conference Deformation and fracture in structural pm materials DF PM 2008 Proceedings. – Stará Lesná, High Tatras, Slovak Republic. – 2008. – P. 196–199.

111. Дмитриев А.М. Холодная объёмная штамповка полых осесимметричных деталей / А.М. Дмитриев, Н.В. Коробова. – М.: Российская академия наук, 2023. – 356 с.

112. Кузнецов П.А. Методика выбора рационального технологического варианта эластостатического прессования композиционных слоистых втулок из порошковых материалов / П. А. Кузнецов, Т. Т. Нгуен, Ф. А. Демчук // Металлообработка. – 2009.
– № 6. – С.25–27.

113. **Либенсон, Г.А.** Процессы порошковой металлургии. Т. 2. Формование и спекание / Г.А. Либенсон, В.Ю. Лопатин, Г.В. Комарницкий. – М.: МИСИС, 2002. – 318 с.

114. Кузнецов П. А. Технология обработки давлением порошковых материалов в жестких пресс-формах: учеб. - метод. пособие / П. А. Кузнецов, А. О. Просторова, Р. В. Кузнецов. – СПб., 2022 – 50 с.

115. **Колачев, Б. А.** Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов: учебник для вузов / Б. А. Колачев, В. И. Елагин, В. А. Ливанов. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: МИСИС, 1999. – 413 с.

116. **Белозир, И.И.** Разработка технологии изготовления детали «втулка» из порошкового материала на основе меди с содержанием титана прямым выдавливанием / Л.А. Рябичева, И.И. Белозир // Заготовительные производства в машиностроении. 2025. №2. с.71-75.

117. **Рябичева Л.А.** Динамическое разупрочнение пористых порошковых материалов при различных температурно-скоростных условиях деформирования / Л.А. Рябичева, О.П. Гапонова // Сб. науч. тр. международной научно-технической конференции «Современные металлические материалы и технологии». - С.-Петербург. – Изд-во политех. ун-та. – 2009. – С. 244-246.

118. Полухин П.И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов.
Справочник / П.И. Полухин, Г.Я. Гун, А.М. Галкин. – М.: Металлургия, 1976. – 487
с.

119. Осинцев О.Е. Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки: Справочник / О.Е. Осинцев, В.Н. Федоров. – М.: Машиностроение, 2004. – 336 с.

Приложение А

СПРАВКА

об использовании результатов диссертационной работы соискателя

кафедры «Материаловедение»



СПРАВКА

об использовании результатов диссертационной работы соискателя кафедры «Материаловедение» ФГБОУ ВО «ЛГУ им. В. Даля» Белозир И.И.

В ходе выполнения диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.6.4 – «Обработка металлов давлением» разработаны технологические процессы изготовления деталей типа «втулка» из порошкового медно-титанового материала с использованием операции свободного дорнования и методика контроля качества. Результаты научных исследований переданы в технический отдел ООО «ЛУГАМАШ»:

1. Методика расчёта заготовок и инструмента для разработки технологических процессов по изготовлению заготовок заданной пористости.

2. Технологические процессы свободного дорнования порошковых заготовок типа «втулка».

3. Методика контроля качества пористых заготовок типа «втулка» после свободного дорнования.

Применение указанных результатов диссертации позволит повысить качество выпускаемых изделий и сократить затраты на их изготовление.

От ФГБОУ ВО «ЛГУ им.В. Даля» Научный руководитель Заведующая кафедрой «Материаловедение» д-р техн. наук, профессор Л.А. Рябичева

Соискатель кафедры материаловедение И.И. Белозир_____

От ООО «ЛУГАМАШ» И.о. главного инженера А.А. Самков

Приложение Б

СПРАВКА

об использовании в учебном процессе материалов, содержащихся в кандидатской

диссертации соискателя кафедры «Материаловедение»

ВЕРЖДАЮ Проректор по научной работе и инновационной деятельности ФГБОУ,ВО «ЛГЎ им.В. Даля» D. В.А. Витренко al 2025г.

СПРАВКА

об использовании в учебном процессе материалов, содержащихся в кандидатской диссертации соискателя кафедры «Материаловедение» Белозир Ирины Ивановны

Настоящей справкой удостоверяется, что результаты диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.6.4 - «Обработка металлов давлением», используются в учебном процессе Федерального государственного бюджетного общеобразовательного учреждения высшего образования «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», внедрены в раздел лекционного курса по дисциплинам «Теория и технологии получения порошковых материалов и изделий», «Теория и технология упрочнения порошковых материалов» по направлениям подготовки 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов» профиль «Композиционные и порошковые материалы, покрытия», 22.04.01 Материаловедение и технологий материалов, магистерская программа «Функциональные материалы, покрытия».

Директор института «ТиИМ»

Monuly -

Е.П. Могильная

Заведующая кафедрой «Материаловедение»

Л.А. Рябичева