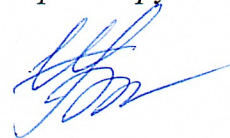


На правах рукописи



БЕЛОЗИР ИРИНА ИВАНОВНА

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

Специальность 2.6.4 – Обработка металлов давлением

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Луганск – 2025

Работа выполнена на кафедре «Материаловедение» в ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», г. Луганск

**Научный
руководитель:**

Рябичева Людмила Александровна
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Луганский государственный
университет имени Владимира Даля»,
заведующая кафедрой «Материаловедение»

**Официальные
оппоненты:**

Лавриненко Владислав Юрьевич
доктор технических наук, доцент,
«Московский государственный технический
университет им. Н.Э. Баумана (национальный
исследовательский университет)», заведующий
кафедрой «Технологии обработки материалов»

Вайцехович Сергей Михайлович
кандидат технических наук, главный научный
сотрудник АО «Научно-производственное
объединение „Техномаш“ имени С.А. Афанасьева»

**Ведущая
организация:**

ФГБОУ ВО «Донецкий национальный
технический университет»

Защита диссертации состоится 11 сентября 2025 в 12:00 на заседании диссертационного совета 24.2.323.01 на базе ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет» по адресу: 398055, г. Липецк, ул. Московская, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет» и на сайте www.stu.lipetsk.ru.

Отзывы на автореферат диссертации (заверенные печатью организации, с указанием даты, почтового адреса и контактного телефона) просьба отправлять по адресу: 398055, г. Липецк, ул. Московская, 30, Диссертационный совет 24.2.323.01. Копии отзывов в электронном виде направлять по e-mail: d212.108.03@stu.lipetsk.ru.

Автореферат разослан « 08 __ » августа 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.323.01,

д.т.н., доцент



И.А. Седых

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 последствия; 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 последствия 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 (Алчевск, 2024); Всероссийской научно-практической 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, научная новизна и практическая значимость исследований.

В первой главе рассмотрены вопросы обработки полых заготовок методом дорнования. Представлена общая характеристика процессов дорнования заготовок из компактных материалов. Рассмотрены технологические параметры свободного дорнования. Для спечённых полых заготовок с различной пористостью материала комплексные исследования процесса дорнования не проводились. Представлены коммерческие пакеты инженерного анализа, которые используют алгоритмы численного решения систем дифференциальных уравнений, построенные на методе конечных элементов. Намечены задачи исследований.

Во второй главе выполнен выбор направления и методов исследования технологии свободного дорнования цилиндрических полых заготовок из порошковых медно-титановых материалов. Приведено теоретическое обоснование применения свободного дорнования на основе теории пластичности пористых тел и компьютерного моделирования в программе DEFORM-3D.

Для исследования использовали порошок стабилизированный медный марки ПМС-1 ГОСТ 4960-2017, легированный 6 % порошкового титана марки ВТ1-0 ОСТ 1.90013-81. Технология изготовления полых заготовок состоит из следующих операций: приготовление порошковой шихты, прессование заготовок типа полый цилиндр, спекание в среде генераторного газа, свободное дорнование для повышения плотности и упрочнения поверхностного слоя отверстия.

Прессования порошковых полых заготовок и свободное дорнование осуществляли на гидравлическом прессе модели ПД-476 силой 1600 кН в лабораторных штампах. Твёрдость после дорнования исследована на приборе Бригелля, микротвёрдость - на приборе ПМТ-3. Микроструктуру исследовали на электронном микроскопе РЭММА-102.

В третьей главе выполнены теоретические исследования свободного дорнования порошковых пористых заготовок с помощью программного комплекса DEFORM-3D. Рассматривали технологию свободного дорнования заготовки с размерами: исходный внутренний диаметр $d_0 = 9,8$ мм, наружный диаметр $D_0 = 28$ мм, высота $L_0 = 20$ мм.

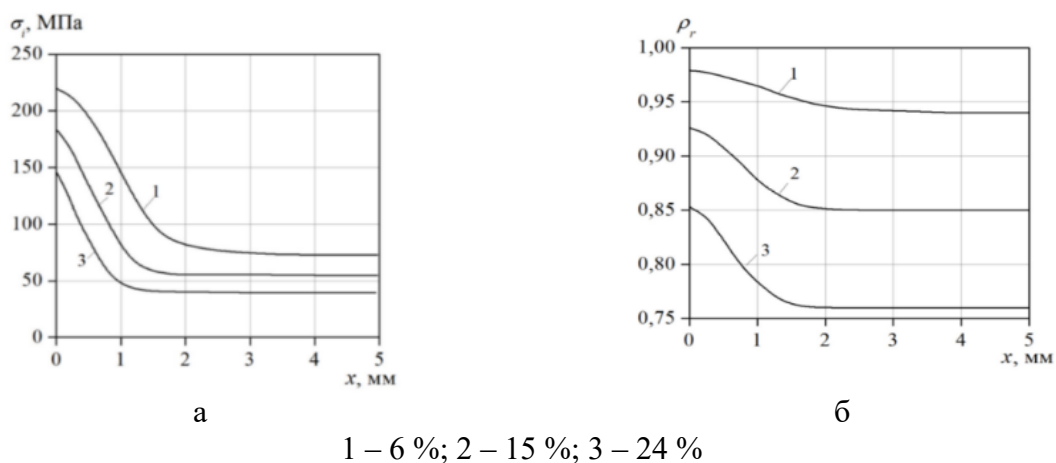
По результатам компьютерного моделирования выполняли анализ напряженно-деформированного состояния, плотности, остаточных напряжений, силу в зависимости от исходной пористости 24 %, 15 %, 6 %.

Установлено, что при дорновании в области контакта дорна и поверхности полого цилиндра образуется очаг деформации, переходящий в очаг уплотнения. Интенсивность напряжений зависит от пористости и при большей пористости ее величина минимальна (Рисунок 1, а). Чем дальше от образующей отверстия полого цилиндра, тем меньше интенсивность напряжений, деформаций и скорость течения материала. Рост относительной плотности материала зависит от его исходной пористости (Рисунок 1, б). Чем меньше исходная пористость, тем более

эффективно растёт относительная плотность на внутренней поверхности, которая достигает 0,98 при начальной пористости 6 %. При всех значениях начальной пористости материала остаточные напряжения являются сжимающими, переходящими с увеличением расстояния от очага деформации в растягивающие (Рисунок 2). Сила дорнования зависит от начальной пористости. 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 последующее преодоление сопротивления деформированию твёрдой фазы.

Выполнен анализ дорнования порошкового полого цилиндра с различными геометрическими параметрами: степень толстостенности D_0/d_0 где D_0 - наружный, d_0 - исходный внутренний диаметр и относительной высотой L_0/d_0 , где L_0 - высота цилиндра. Полый цилиндр имел размеры: исходный внутренний диаметр $d_0 = 9,8$ мм, наружный диаметр $D_0 = 16, 22, 28$ и 40 мм, высота $L_0 = 20$ мм, отношение D_0/d_0 составляло 1,63; 2,24; 2,86; 4,08, исходная пористость 15 %.

Моделирование показало, что интенсивность напряжений отличается только на малом расстоянии от образующей отверстия, далее она практически одинакова и не зависит от степени толстостенности. При степени толстостенности 1,63 относительная плотность составляет около 0,92 и очаг уплотнения имеет размер 1,7 мм. При степени толстостенности 2,24 его размеры несколько больше.



а – интенсивность напряжений; б – относительная плотность

Рисунок 1 – Профили интенсивности напряжений и изменение относительной плотности в очаге деформации по ширине стенки полого цилиндра при исходной пористости

Уплотнение материала в зоне отверстия зависит от степени толстостенности цилиндра только при малых степенях толстостенности 1,63 и 2,24. При степени толстостенности более 2,24 уплотнение практически постоянно. Изменение силы дорнования в зависимости от степени толстостенности согласуется с данными по интенсивности напряжений в очаге деформации.

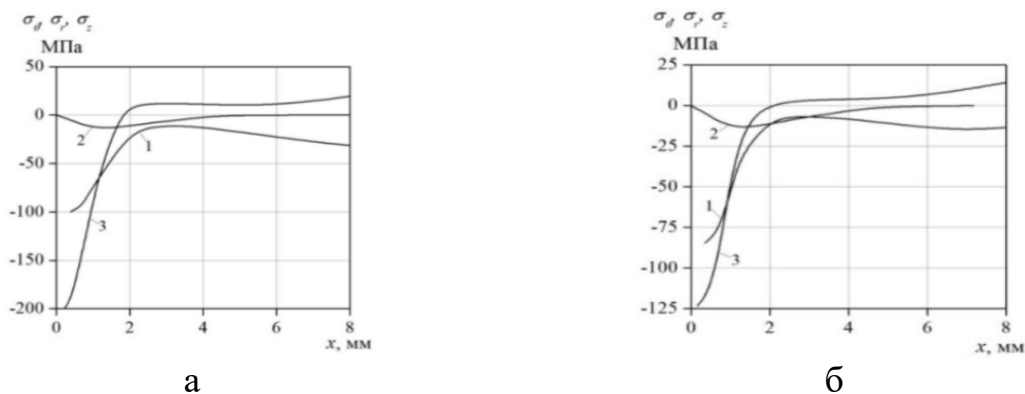
При различной относительной высоте полого цилиндра заметного отличия в зависимости силы дорнования от перемещения дорна не получено, отличие получено только по величине. Относительная высота не влияет на формирование очага уплотнения. При обеих высотах максимальная относительная плотность

реализуется на внутренней поверхности и составляет 0,94 при исходной плотности материала 0,85. Размер очага уплотнения одинаков, его ширина равна 4 мм.

Распределение остаточных напряжений зависит от высоты цилиндра. При малых высотах очаг деформации больше, а при большой высоте он растянут по всей внутренней поверхности. Наибольшую величину имеют окружные и осевые напряжения. Их величина зависит от высоты заготовки; для полого цилиндра с $L_0/d_0 = 6,32$ они примерно в два раза меньше, чем в цилиндре с $L_0/d_0 = 2,11$. Величина осевых напряжений в зоне отверстия одинакова.

Выполнен анализ дорнования порошкового полого цилиндра исходной пористостью 15 % с различными геометрическими параметрами дорна. Высота цилиндра $L_0 = 20$ мм, наружный диаметр $D_0 = 28$ мм. Натяг дорнования определялся исходным внутренним диаметром полого цилиндра $i = d - d_0$. Относительный натяг i/d_0 составлял 2,0; 5,3; 8,7 %.

Чем больше относительный натяг, тем больше сила дорнования и больше относительная плотность. Однако выше относительного натяга 8,7 % уплотнения практически не происходит, что связано с увеличением объёма металла, участвующего в деформации. Величина интенсивности остаточных напряжений и деформаций после дорнования также увеличивается с ростом относительного натяга. Осевые напряжения не зависят от относительного натяга.



а – 6 %; б – 15 %
о́кружные – 1, радиальные – 2 и осевые – 3

Рисунок 2– Эпюры остаточных напряжений по ширине стенки полого цилиндра с различной исходной пористостью материала

Увеличение угла заборного конуса дорна до 15° приводит к увеличению силы дорнования до 3000 Н и относительной плотности до 0,99, что создается большим гидростатическим сжатием, интенсивностью напряжений и деформаций. Однако, при этом уменьшается ширина уплотнённого слоя и изменяется характер пластической деформации, возможен срез металла.

На образование дефектов оказывает влияние структурная неоднородность материала, параметры заготовки – пористость, степень толстостенности и относительная высота, параметры инструмента – угла заборного конуса и величины натяга. Высота наплывов меньше у заготовок, имеющих большую пористость. С увеличением степени толстостенности, увеличивается высота наплыва. Относительная высота полого цилиндра практически не влияет на высоту наплывов. Чем

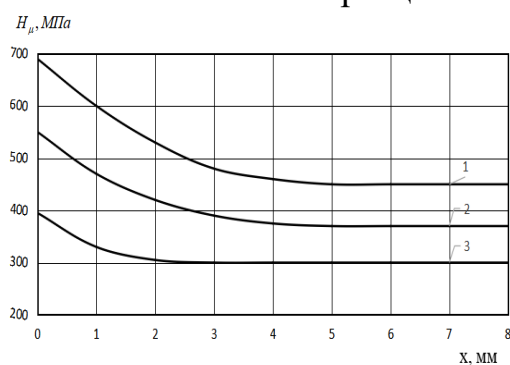
больше натяг, тем больше размеры наплывов на нижнем и верхнем торцах полого цилиндра. С увеличением угла заборного конуса наплывы материала на верхнем торце полого цилиндра уменьшаются и при больших значениях угла полностью исчезают.

При малой степени толстостенности (1,63) наружный диаметр искривляется. При малой величине относительной высоты наружный диаметр полого цилиндра увеличивается. 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.

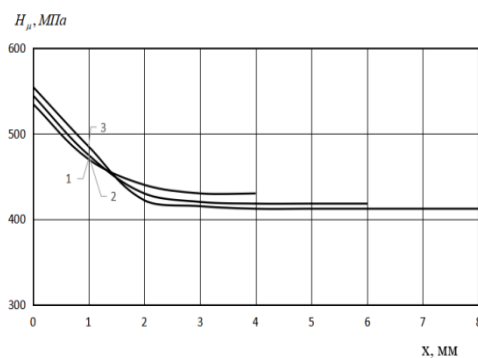
В четвёртой главе представлено экспериментальное исследование технологических параметров свободного дорнования порошковых пористых заготовок. Экспериментально подтверждена зависимость силы дорнования от технологических параметров – натяга, угла заборного конуса; характеристик заготовки – степени толстостенности 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 увеличивается. Расхождение экспериментальных и расчётных данных в среднем составляет 15 %.

Ширину упрочнённого слоя определяли с помощью микротвердости. Ширина слоя зависит от пористости, степени толстостенности и относительного натяга. С увеличением исходной пористости уменьшается величина микротвердости и ширина упрочнённого слоя (Рисунок 3, а). С повышением степени толстостенности наблюдается увеличение микротвердости и ширины упрочнённого слоя вследствие увеличения энергозатрат на деформирование большего по размерам очага деформации (Рисунок 3, б). С повышением относительного натяга наблюдается увеличение микротвердости упрочнённого слоя и его ширины.

После свободного дорнования для уменьшения разницы напряжений в упрочнённом и недеформированном слое образца выполняли отжиг по режиму: нагрев до температуры 500–550 °С, выдержка, охлаждение на воздухе. В результате отжига твёрдость по Бринеллю и микротвердость несколько уменьшаются. Твёрдость по Бринеллю на внутренних слоях отверстия составила в среднем 100-115 НВ, на внешних слоях образца – 83-85 НВ.



а



б

а – исходная пористость: 1 – 6 %; 2 – 15 %; 3 – 24 %;
б – степень толстостенности: 1 – 1,63; 2 – 2,24; 3 – 2,86

Рисунок 3 – Зависимость микротвердости по ширине стенки образца

Для получения математической модели влияния факторов технологии на качество образцов использовали метод полного факторного эксперимента. В модели число факторов равно трём, поэтому выбран план полного факторного эксперимента 2^3 . В качестве целевых параметров принимали относительное уширение, относительное укорочение, уменьшение внутреннего диаметра отверстия в результате упругого последействия, силу дорнования. Получены линейные модели уравнений регрессии, в которые вместо кодированных факторов подставляли их выражения через натуральные значения. Затем потенцировали и получили эмпирические зависимости исследуемых параметров от факторов процесса: относительное уширение:

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

относительное укорочение:

$$\lambda = 4,63 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{a^{0,928} \alpha^{0,437}}{\beta^{3,038}}; \quad (2)$$

уменьшение внутреннего диаметра отверстия, мкм:

$$\Delta = 8,015 \cdot \frac{\alpha^{0,771}}{\beta^{0,871} \alpha^{0,478}}; \quad (3)$$

максимальная сила дорнования, Н:

$$P = 0,076 \cdot a^{0,952} \beta^{0,632} \alpha^{0,49}; \quad (4)$$

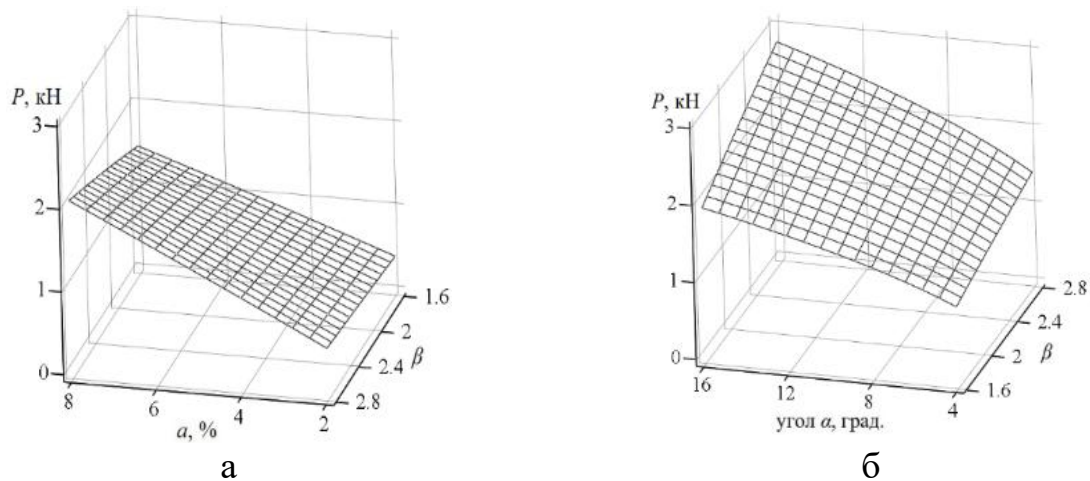
Установлена линейная зависимость между относительным уширением наружного диаметра образцов и величиной относительного натяга. Угол заборного конуса дорна оказывает незначительное влияние на этот параметр. С увеличением степени толстостенности относительное уширение образца резко уменьшается.

Выявлена практически линейная зависимость между относительным укорочением образцов и величиной натяга. С ростом степени толстостенности укорочение становится менее выраженным. Относительное укорочение образцов увеличивается с ростом угла заборного конуса дорна, в то время как относительное уширение наружного диаметра уменьшается.

В результате упругого последействия происходит уменьшение внутреннего диаметра отверстия. При этом с увеличением относительного натяга и угла заборного конуса интенсивность изменения внутреннего диаметра снижается.

Сила дорнования увеличивается с ростом относительного натяга, угла заборного конуса и степени толстостенности (Рисунок 4).

Расхождение экспериментальных результатов и данных, полученных по моделям, находится в пределах 15 %.



а – от относительного натяга дорнования и степени толстостенности при фиксированном значении угла заборного конуса $\alpha = 4^\circ$; б – от угла заборного конуса и степени толстостенности при относительном натяге $a = 5,3\%$ ($i = 0,5$ мм);

Рисунок 4 – Зависимость силы дорнования

В пятой главе рассмотрены технологические процессы свободного дорнования цилиндрических полых деталей из порошковых материалов. На основании полученных результатов исследований, требований, предъявляемых к изделиям, разработаны технологии изготовления тонкостенной заготовки втулки и толстостенной заготовки втулки с фланцем из медного порошка, легированного порошком титана.

Порошковые медно-титановые материалы с содержанием титана 6 % обладают высокими прочностными характеристиками (твёрдость НВ 100-115), износостойкостью, достаточно высокой теплопроводностью, самосмазываемостью, которые необходимы для работы в узлах трения. По своим свойствам они превосходят бронзу ПА-БрО, поскольку совмещают свойства компонентов: низкий коэффициент трения за счёт медной матрицы, повышенную твёрдость и прочность за счёт свободного дорнования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации решена актуальная научно-техническая задача повышения качества и эксплуатационных свойств порошковых медно-титановых заготовок за счёт совершенствования упрочняющей технологии свободного дорнования.

Научные и практические результаты 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 Н, 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 Н, и относительной плотности до 0,91-0,92. При степени толстостенности более 2,24 сила дорнования остаётся практически постоянной в пределах 590-610 Н, 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 медно-титановых 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.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Российской Федерации для публикации основных результатов диссертационных исследований

1. **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.
2. **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.
3. **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.
4. **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.

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК ЛНР (Постановление Правительства РФ от 18.03.2023 №415) для публикации основных результатов диссертационных исследований

5. **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: изд-во ЛГУ им. В. Даля. – с. 18-24.
6. **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.

Статьи в журналах, сборниках научных трудов

7. **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.
8. **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.
9. **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.

Доклады на научных конференциях

10. **Белозир, И.И.** Применение свободного дорнования для повышения качества детали «втулка» из порошкового материала / Л.А. Рябичева, И.И. Белозир // Сб. трудов XXX международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века» 12 – 18 сентября 2023 г, г. Севастополь - Донецк, 2024.
11. **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.
12. **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
13. **Белозир, И.И.** Исследование технологического процесса свободного дорнования деталей из порошковых материалов / 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. 164-165
14. **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
15. **Белозир, И.И.** Влияние параметров инструмента на качество порошковой заготовки при свободном дорновании / Л.А. Рябичева, И.И. Белозир // Сб. трудов XXX международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века» 12 – 18 сентября 2023 г, г. Севастополь - Донецк, 2023. С. 291-296.
16. **Белозир, И.И.** Применение свободного дорнования для повышения качества детали «втулка» из порошкового материала / Л.А. Рябичева, И.И. Белозир // В сборнике: Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XXXI Международной научно-технической конференции, Донецк, 2024. С. 340-344.
17. **Белозир, И.И.** Влияние параметров заготовки на силу свободного дорнования деталей типа «втулка» / Л.А. Рябичева, И.И. Белозир // Проблемы машиностроения: современные технологии обработки, материала, машины, агрегаты. Сб.статей. Махачкала: ДГТУ, 2024, с.
18. **Белозир, И.И.** Инструмент для свободного дорнования деталей из порошковых материалов / Л.А. Рябичева, И.И. Белозир // Сб.тезисов VIII Международная научно-техническая конференция «Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства». Алчевск, 2024.

АВТОРЕФЕРАТ

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

БЕЛОЗИР ИРИНА ИВАНОВНА

Подписано в печать

Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура Times.

Печать лазерная. Усл. печ. лист 1,0.

Тираж 100 экз. Изд. № 01330. Зак. № 1772.

Цена договорная.

Издательство

**Луганского государственного университета
имени Владимира Даля**

*Свидетельство о государственной регистрации издательства
МИ-СРГ ИД 000003 от 20 ноября 2015 г.*

Адрес издательства: 91034, г. Луганск, кв. Молодежный, 20а

Телефон: (072) 138-34-80

E-mail: izdat.lguv.dal@gmail.com

http: www.dahluniver.ru

Отпечатано в издательстве «Ноулидж»

(ФЛП «Лазарев А.И.»)

Свидетельство о регистрации: №11-0015382 от 26.07.2016

Адрес: 91031, г. Луганск, ул. Ватутина, д. 91, кв. 75.

Тел: +7(959) 514-97-90, e-mail: nickvnu@gmail.com