

На правах рукописи



Кокорин Алексей Валерьевич

**РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССА ХОЛОДНОЙ ШТАМПОВКИ ВЫСОКОПЛОТНЫХ
ЗАГОТОВОК И ДЕТАЛЕЙ ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ НА ОСНОВЕ
ЖЕЛЕЗА В КОНИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕ НА ПРЕССАХ**

Специальность: 05.02.09 – Технологии и машины обработки
давлением

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Ульяновский государственный технический университет» на кафедре «Материаловедение и обработка металлов давлением»

Научный руководитель: **Филимонов Вячеслав Иванович**,
доктор технических наук, профессор, кафедры
«Материаловедение и обработка материалов
давлением» ФГБОУ ВО «Ульяновский
государственный технический университет»

Официальные оппоненты: **Демин Виктор Алексеевич**,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Технологии обработки
давлением» МТ6 ФГБОУ ВО
«Московский государственный технический
университет им. Н.Э. Баумана»

Кузнецов Павел Алексеевич,
кандидат технических наук, профессор кафедры
«Технология конструкционных материалов и
материаловедение» ФГАОУ ВО
«Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»

Ведущая организация: Ульяновский Научно-технологический Центр Филиал
Всероссийского Института Авиационных Материалов
(УНТЦ ВИАМ)

Защита диссертации состоится « 13 » декабря 2016 г. в 16⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.30 при ФГАОУ ВО СПбПУ Петра Великого по адресу 195251, Санкт-Петербург, Политехническая, 29, лабораторно-аудиторный корпус, аудитория кафедры «ТКМ и М».

Отзыв на автореферат в двух экземплярах (заверенных печатью) просим направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО СПбПУ Петра Великого и на сайте www.spbstu.ru

Телефон для справок 8(812) 552-95-30

Автореферат разослан « » _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук,
профессор



Востров Владимир Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Важной проблемой, стоящей перед современным промышленным производством, является повышение эффективности, конкурентоспособности технологий и продукции, обеспечение их импортозамещения в процессах, связанных с получением высокоплотных порошковых деталей и заготовок, обладающих повышенным комплексом механических характеристик.

Современной тенденцией развития процессов обработки давлением при получении изделий, приближающихся по уровню физико-механических свойств к компактным деталям из литья и проката, является снижение остаточной пористостью до уровня $\leq 1\%$ и образование благоприятной регламентированной структуры металла, что является **важной на учно-технической проблемой** в связи с традиционно высокой потребностью промышленности в деталях конструкционного назначения. Наибольшими преимуществами обладает схема нагружения, реализующая комплексное всестороннее сжатие и сдвиговые деформации, при которых можно ожидать как снижение величины деформирующих сил, так и повышение плотности деталей и заготовок. Однако в настоящее время отсутствуют системные данные по использованию эффективных схем уплотнения гетерофазных механических смесей, реализующих сдвиговые деформации; не выявлен механизм влияния условий уплотнения на структурирование; не сформулированы требования, которым должен отвечать инструмент для производства высокоплотных заготовок из металлических порошков обработкой давлением на прессах что обуславливает **актуальность** темы исследования.

Таким образом, исследования процессов интенсивного уплотнения гетерофазных механических систем за счет структурного и деформационного механизмов уплотнения при реализации сдвиговых деформаций решает важную научно-техническую задачу, востребованную промышленным производством.

Работа выполнена как часть научных исследований, проводимых в Ульяновском государственном техническом университете в рамках госбюджетной НИР «Разработка и исследование ресурсосберегающих процессов получения заготовок с применением давления»

Цель работы:

Разработка новых технологических решений штамповки заготовок и деталей из металлических порошков на основе железа, обеспечивающих повышение качества структуры материалов на основе получения плотностей, приближенных к теоретической, при реализации механических схем нагружения, инициирующих комплексное осевое и тангенциальное перемещение уплотняемого материала при обеспечении условий возникновения локализованного сдвига.

Для достижения поставленной цели решали следующие **задачи**:

1. Провести анализ закономерностей уплотнения поровой структуры и пластического деформирования твердой фазы механической смеси в условиях структурного и деформационного воздействия при использовании схемы нагружения, реализующей комплексное осевое и тангенциальное воздействие на уплотняемую среду;

2. Теоретически выявить основные зависимости влияния деформирования в конической матрице на величину удельных сил при реализации локализованного сдвига;

3. Исследовать процесс получения структур теоретической плотности при реализации локализованных сдвиговых деформаций;

5. Провести оценку эффективности интенсивного уплотнения гетерофазной механической смеси в условиях действующего производства.

6. Разработать конструкцию технологической оснастки, реализующую условия, инициирующие сдвиг;

Научная новизна работы:

1. Разработан способ интенсивного уплотнения гетерофазных механических смесей при образовании структур теоретической плотности, что соответствует требованиям к тяжело нагруженным деталям конструкционного назначения. Данный способ основан на реализации в механической схеме нагружения условий возникновения сдвиговых деформаций.

2. Выявлены основные системные факторы, характеризующие структуру и классифицирующие состояния плотноупакованной гетерофазной смеси в процессе интенсивного уплотнения в условиях комплексного осевого и тангенциального воздействия на уплотняемую среду.

3. Экспериментально определены общие закономерности постадийного уплотнения, установлен четырехстадийный процесс консолидаций гетерофазной механической смеси на основе железа. Представлен анализ постадийного кластерного состояния плотноупакованной структуры при реализации условий нагружения, инициирующих локализованный сдвиг.

4. Предложены теоретические модели, позволяющие устанавливать величину давления на деформирующем пуансоне и обеспечивающие получение структур теоретической плотности. Предложены комплексные параметрические модели, определяющие технологические параметры прессования. Установлена величина бокового давления в зависимости от стадий уплотнения.

5. Установлен характер деформационного упрочнения матрицы-основы при реализации механизма деформационного уплотнения.

6. Разработана перспективная схема холодной штамповки цилиндрических деталей и конструкция технологической оснастки при использовании комплексного осевого и тангенциального перемещения уплотняемого материала при обеспечении условий возникновения локализованного сдвига.

Достоверность результатов работы обеспечена корректностью постановки задач исследования; большим объемом экспериментов и сравнительным анализом и корреляцией с известными данными; использованием современных методов исследования и привлечением статистических методов обработки результатов, а так же в успешной апробацией результатов работы в промышленных условиях.

Практическая ценность результатов работы:

1. Показана эффективность технологической схемы комплексного осевого и тангенциального воздействия на уплотняемую гетерофазную механическую смесь при достижении плотностей теоретического уровня;

2. Получена экспериментальная база данных по результатам интенсивного уплотнения и структурирования увлажненных смесей при реализации в механической схеме нагружения совместного поперечного и осевого перемещения и деформации материала, создающих условия возникновения локализованного сдвига;

3. Разработана перспективная конструкция оснастки, позволяющая обеспечивать возникновение локализованных сдвиговых деформаций при прессовании цилиндрических изделий с регламентированной размерной точностью.

Внедрение результатов работы в производство и учебный процесс подтверждается соответствующими актами.

Личный вклад автора

Концепция работы, формулирование цели, определение задач и их практическая реализация принадлежат автору. Теоретико-аналитическая и экспериментальная части

исследования выполнены при участии сотрудников, аспирантов и студентов старших курсов кафедры «Материаловедение и обработка металлов давлением» УлГТУ под руководством и непосредственным участием автора.

Апробация работы:

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах: Всероссийская молодежная выставка-конкурс прикладных исследований, изобретений и инноваций. – Саратов: СГТУ, 2009., Всероссийская НТК «Проведение научных исследований в обработке, хранении, передаче и защите информации», Ульяновск, УлГТУ, 2009., Международная НТК “Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении-2014 FRITME-2014”, ИМАШ РАН, Москва, Россия (2014, 2105), 47,48,49,50 НТК” Вузовская наука в современных условиях”, Ульяновск, УлГТУ(2013,2014,2015,2016), Всеросс. НТК «Студенческая научная весна (2011, 2013, 2015): М. Машиностроительные технологии.-М.: МГТУ Им. Э. Баумана (2011, 2013, 2015), СНТК «Студент-науки будущего». - Ульяновск,,:УлГТУ,2015. Международная НТК” Современные металлические материалы и технологии (СММТ’2011)”: СПб, 2011;. Международная НТК ” Неделя науки СПбПУ”.- СПб.: СПбПУ (2014, 2015).

Работа выполнена как часть научных исследований, проводимых в УлГТУ в рамках государственной НИР «Разработка и исследование ресурсосберегающих процессов получения заготовок с применением давления»

Публикации:

По теме диссертации **опубликовано 35** научные работы, в том числе 10 статей в рецензированных изданиях, рекомендуемых ВАК, 1 учебное пособие.

На защиту выносятся:

1. Способ получения высокоплотных заготовок и деталей из увлажненного металлического порошка с использованием условий нагружения, инициирующих локализованный сдвиг при получении структур теоретической плотности;

2. Научнообоснованные принципы интенсивного уплотнения и структурирования за счет физико–механического взаимодействия системы контактирующих объектов гетерофазной механической смеси при комплексном осевом и тангенциальном воздействии на уплотняемую среду;

3. Результаты аналитических и экспериментальных исследований взаимодействия основной и заполняющей фаз структуры пористого уплотняемого тела в процессе интенсивного уплотнения;

4. Математические и физические модели постадийного структурообразования при получении высокоплотных структур в процессе интенсивного уплотнения;

5. Математические модели и экспериментальные исследования процесса уплотнения; величины бокового давления; методика установления стадийности структурообразования увлажненных механических смесей при наличии условий нагружения инициирующих локализованный сдвиг;

6. Анализ деформационного упрочнения матрицы-основы порошковой смеси при интенсивном уплотнении;

7. Результаты разработки и внедрения технологического оснащения процессов прессования деталей и заготовок из металлических порошков при получении структур теоретической плотности.

Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы (134 наименований).

Объемы диссертаций: 165 страниц машинописного текста, 62 рис., 14 табл.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, приведена ее краткая характеристика, сформулированы цель, научная новизна, практическая ценность и основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу потребности промышленности в высокоплотных заготовках, обладающих высоким уровнем физико-механических и эксплуатационных свойств; существующих современных методов изготовления деталей конструкционного назначения, сильнонагруженных из порошковых материалов на железной основе.

Современной тенденцией развития процессов обработки давлением металлических порошков при получении изделий, приближающихся по уровню физико-механических свойств к компактным деталям из литья и проката, является снижение остаточной пористостью структуры до уровня $\leq 1\%$.

Современный уровень теоретической и прикладной разработки процессов уплотнения дисперсных и пористых материалов при получении высокоплотных изделий базируется на ряде фундаментальных работ отечественных и зарубежных исследователей: Бальшина М. Ю., Дмитриева А.М., Друянова Б.А., Гречникова Ф.В., Ждановича Г.М., Алымова М.И., Богатова А.А., Виноградова Г.А., Колбасникова Н.Г., Мертенса К.К., Мартыновой И.Ф., Перельмана В. Е., Радомысльского И. Д., Рудского А. И., Штерна М. Б., Шатта В., Цеменко В.Н., Сердюк Г.Г., Субич В.Н., Ребиндера П.А., Ковальченко М.С., Дорофеева Ю.Г., Овчинникова А.Г., Коробовой Н.В., Кокорина В.Н. и др.

Интенсивное уплотнение может осуществляться различными способами, но наибольшими преимуществами обладает схема нагружения, реализующая сдвиговые деформации, при которых можно ожидать как благоприятные изменения реологических свойств структуры, так и создания рациональной морфологии пор, способствующих повышению интенсивности уплотнения и образованию ювенальных межзеренных контактов.

Однако в настоящее время отсутствуют системные данные по использованию эффективных схем уплотнения гетерофазных механических смесей, реализующих условия возникновения сдвиговых деформаций; не выявлен механизм влияния условий уплотнения на структурирование, не сформулированы требования, которым должен отвечать инструмент для прессования.

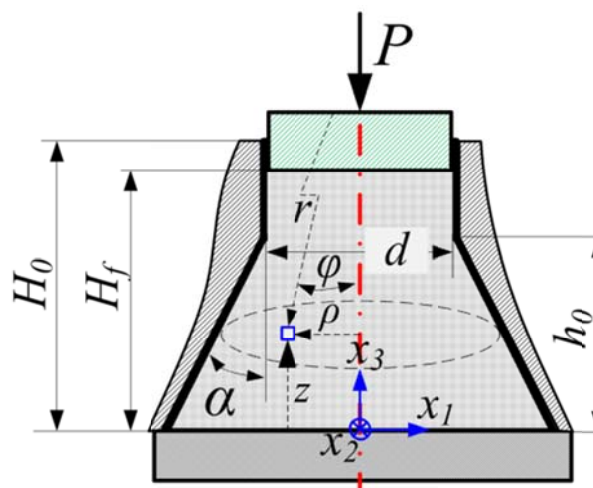
Все вышеизложенное определило цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе детализированы задачи, методы исследования и разработки, раскрывающие предмет исследования, приведены классификаторы: механических схем процессов уплотнения; структур гетерогенных механических смесей, даны их характеристики и основные дефекты, возникающие при прессовании гетерофазных увлажненных механических смесей.

В третьей главе представлены теоретико-экспериментальные исследования процесса интенсивного уплотнения гетерофазных механических смесей на основе железа при реализации комплексного осевого и тангенциального перемещения уплотняемого материала при обеспечении условий возникновения локализованного сдвига.

Перемещения и деформации.

При анализе процесса формовки порошковой смеси в конической матрице для



определения перемещений и деформаций была принята схема, представленная на рисунке 1. Учитывая, что смещение материала при уплотнении происходит только по радиальным направлениям, а также учитывая степень уплотнения ψ , в сферической системе координат было определено распределение перемещений по телу прессовки:

$$U_r(r, \varphi) = \frac{1-\psi}{3}r + \frac{f(\varphi)}{r^2}, \quad (1)$$

где ψ – степень уплотнения материала прессовки; r, φ – сферические координаты. Функция $f(\varphi)$ в формуле (1) определяется следующим образом:

$$f(\varphi) = \kappa \frac{\varphi}{\alpha} \cdot a^3 - \frac{1-\psi}{3} a^3, \quad (2)$$

где; κ – множитель, учитывающий соотношение плотностей на начальной и конечной стадиях деформирования в рамках континуальной модели ($\kappa = 0,915/\psi$); α – угол наклона образующей матрицы; $\alpha = d/(2\sin\alpha)$ (см. Рисунок 1).

При выводе соотношений (1) и (2) использовали условие равенства деформаций ε_φ и ε_θ , а также условие деформирования прессовки с остаточной пористостью.

С учётом деформаций, определяемых по формулам $\varepsilon_r = \frac{\partial U_r}{\partial r}, \varepsilon_\varphi = \frac{U_r}{r}$, в терминах главных деформаций была найдена интенсивность деформаций сдвига γ :

$$\gamma(r, \varphi) = \left| \frac{1-\psi}{3} - \frac{d^3}{4r^3 \sin^3 \alpha} \left(\kappa \frac{\varphi}{\alpha} - \frac{1-\psi}{3} \right) \right|. \quad (3)$$

На рисунке 3 представлено распределение перемещений согласно зависимости (1), а на рисунке 4 – распределение деформаций сдвига при соизмеримых значениях среднего диаметра и высоты конической части матрицы по формуле (3).

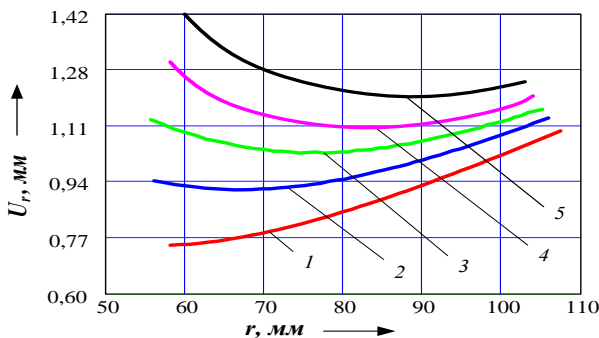


Рисунок 2 – Зависимость перемещений от сферических координат r и φ : 1 – 5 – $\varphi = 3, 6, 9, 12$ и 15° соответственно

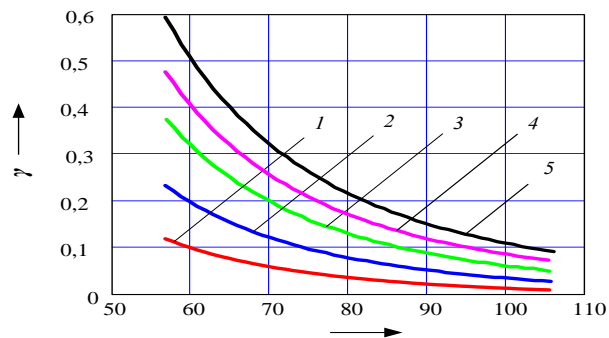


Рисунок 3 – Зависимость деформаций сдвига от сферических координат r и φ : 1 – 5 – $\varphi = 3, 6, 9, 12$ и 15° соответственно

С увеличением радиуса перемещение материала ведёт себя по-разному: в центральной части прессовки оно увеличивается, а по мере приближения к стенкам матрицы – снижается (Рисунок 2). В то же время деформации сдвига имеют тенденцию к уменьшению по мере удаления от горловины матрицы. В центральной части прессовки эти деформации незначительны, а по мере приближения к стенкам матрицы их значения повышаются существенно (Рисунок 3).

Влияние **параметров матрицы** на уровень деформаций сдвига: с увеличением диаметра горловины деформации повышаются, а при увеличении угла образующей матрицы – снижаются, что отражает влияние размеров зоны «прямого давления» на перераспределение

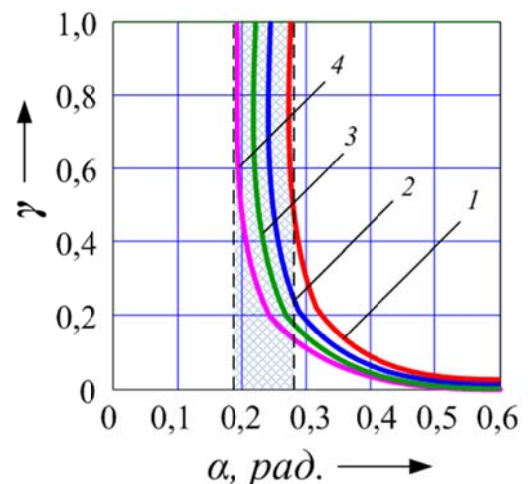


Рисунок 4 – Оптимальный диапазон углов образующей конической оснстки ($d=30$ мм): 1 – 4 – $r = 60, 70, 80$ и 90 мм соответственно

деформаций (с увеличением этой зоны уровень деформаций сдвига увеличивается).

Для получения наилучшей структуры форму детали следует приближать к так называемой «оптимальной» форме матрице. Углы образующей матрицы, при которых сдвиговые деформации максимальны, показаны на Рисунке 4, откуда видно, что для повышения плотности прессовки углы наклона образующей «тающей» части матрицы следует брать равными 13...15°.

Напряжения и коэффициент бокового давления.

Методом прямого интегрирования уравнений равновесия совместно с условием пластичности (без учёта упрочнения) для модельной задачи осадки цилиндра в коническом трубчатом контейнере (Рисунок 5) получено давление на пуансоне p :

$$p = \mu \sigma_s \frac{5d}{3h_0} + \sigma_s^* \ln \left[1 + 2 \operatorname{tg} \alpha \frac{h_0}{d} \right] + \sigma_s + \frac{4\mu(H_f - h_0)}{3d} \sigma_s, \quad (4)$$

где μ – коэффициент трения; σ_s , σ_s^* – обычный и модифицированный предел текучести материала прессовки и трубчатого контейнера соответственно; h_0 – высота прессовки; d – диаметр пуансона.

Рисунок 6 даёт зависимость давления на пуансоне от параметра β при пределе текучести исходного материала 300 МПа, откуда видно, что **минимальное давление** на пуансоне соответствует величине $\beta \approx 0,9$, т.е. когда высота и диаметр прессовки соизмеримы. Полную силу на пуансоне можно найти простым

умножением давления (4) на площадь поперечного сечения пуансона. С учётом параметров напряжённого состояния получено распределение коэффициента бокового давления ξ по высоте, представленное на Рисунке 7.

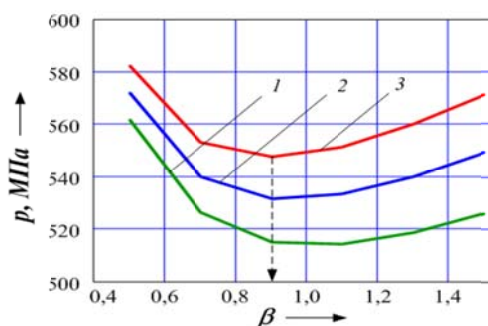


Рисунок 6 – Зависимость давления от соотношения высоты прессовки и диаметра горловины матрицы ($\beta = h_0/d$) при различных углах матрицы: 1, 2, 3 – $\alpha = 11, 13$ и 15°

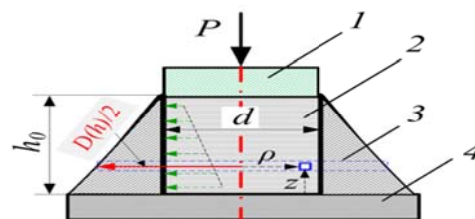


Рисунок 5 – Схема модельной задачи прессования: 1 – пуансон, 2 – материал стержня прессовки; 3 – конический трубчатый контейнер; 4 – основание

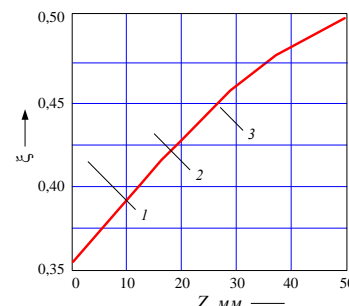


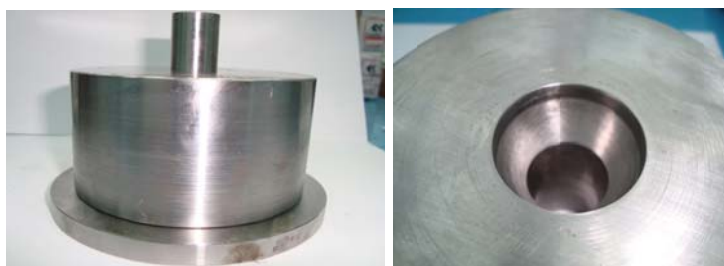
Рисунок 7 – Распределение коэффициента бокового давления по высоте ($d = 30$ мм): 1, 2, 3 – $\alpha = 11, 13$ и 15°

Экспериментальные исследования деформирования

Проведен анализ закономерностей уплотнения поровой структуры и пластического деформирования твердой фазы механической смеси в условиях структурного и деформационного воздействия.

В экспериментальных исследованиях использовалась механическая смесь: железный порошок АНС100.29 и жидкая фаза (вода) в пропорции по массовой доле (85:15), исходная влажность $W_0 = 15\%$.

Исследования проведены с использованием экспериментальной прессформы, содержащей: коническую матрицу, основание, деформирующий пуансон (Рисунок 8).



8 Рисунок 8 – Экспериментальная прессформа для изучения уплотнения при реализации локализованного сдвига

По результатам экспериментов был построен график изменения плотности структуры в процессе нагружения (кривая уплотнения), представленный на рисунке 9.

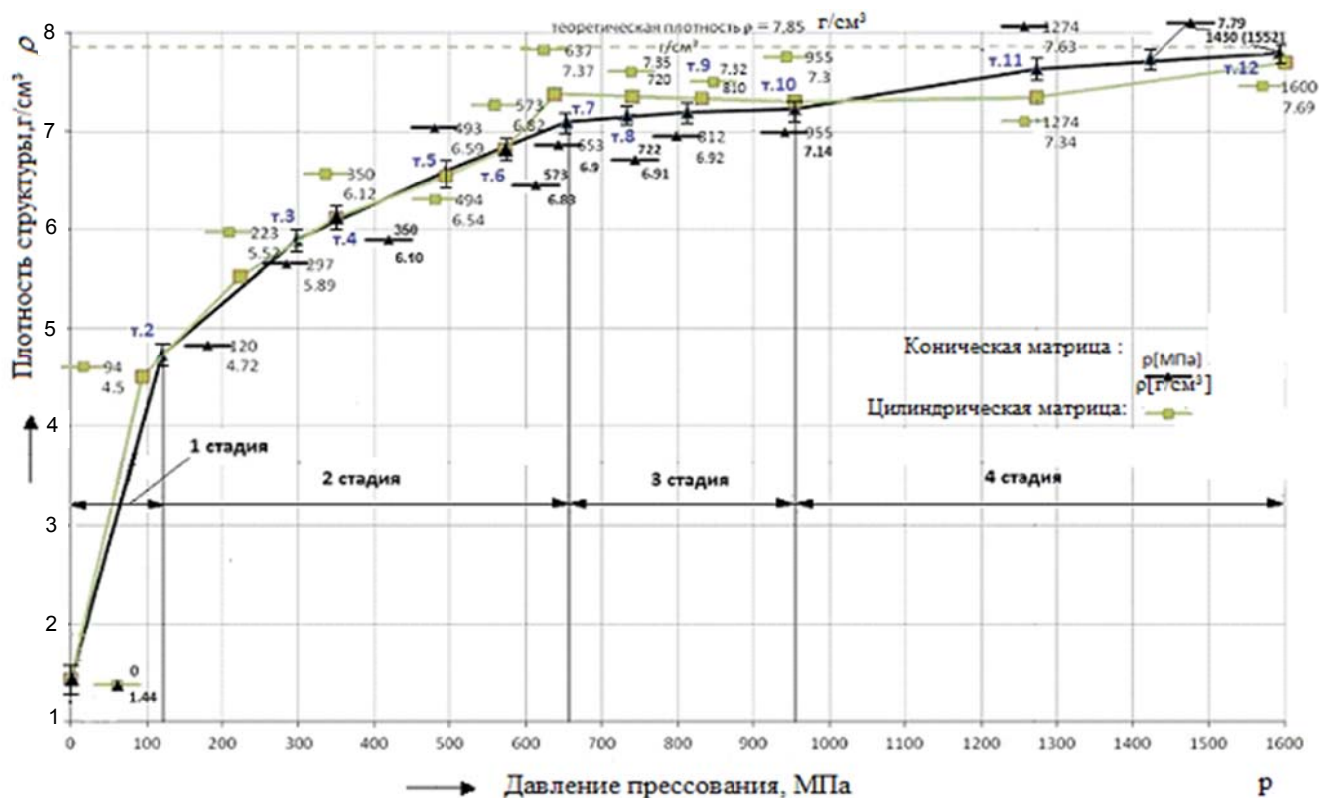


Рисунок 9 – Анализ кривых уплотнения гетерофазных смесей на основе железа

Применяя методику фиксирования характерных участков связи: “плотность - давление” прессования, определены значения величин интенсивности роста плотности в характерных участках.

Установлен деформационный характер уплотнения в наложении на структурное в диапазоне прикладываемых давлений от 950 МПа до 1250 (1270) МПа, при этом наблюдается интенсивное уплотнение и угловых зон конической оснастки: при достижении средней плотности массива материала плотность прессовки находится на уровне $7,63 \text{ г/см}^3$ ($Q_{\text{ост}}=3\%$). Фиксированный участок, характеризующийся как третья стадия уплотнения.

Четвертая стадия уплотнения определяется как деформационное уплотнение и характеризуется наличием локализованных сдвиговых деформаций, образованием плотностей структуры, близким к теоретической ($Q_{\text{ост}}=1\%$). Достижение плотности, близкое к теоретической, зафиксировано при давлениях прессования 1430 МПа.

Следует отметить существенное снижение требуемых давлений прессования и достижения плотностей критического уровня ($Q_{\text{ост}}=3\%$): при использовании конической оснастки давление прессования составляет 1274 МПа, при использовании цилиндрической- 1600 МПа (Рисунок 9), т.е. зафиксировано уменьшение требуемых давлений уплотнения в 1,25 раз (на 25%).

По результатам экспериментов по изучению характера уплотнения гетерофазной смеси на основе железа предложена физическая модель четырехстадийного процесса уплотнения при осевом и тангенциальном перемещении уплотняемой смеси.

На рисунке 10 представлена кинематика уплотнения гетерофазной механической смеси на основе железного порошка АНС100.29.

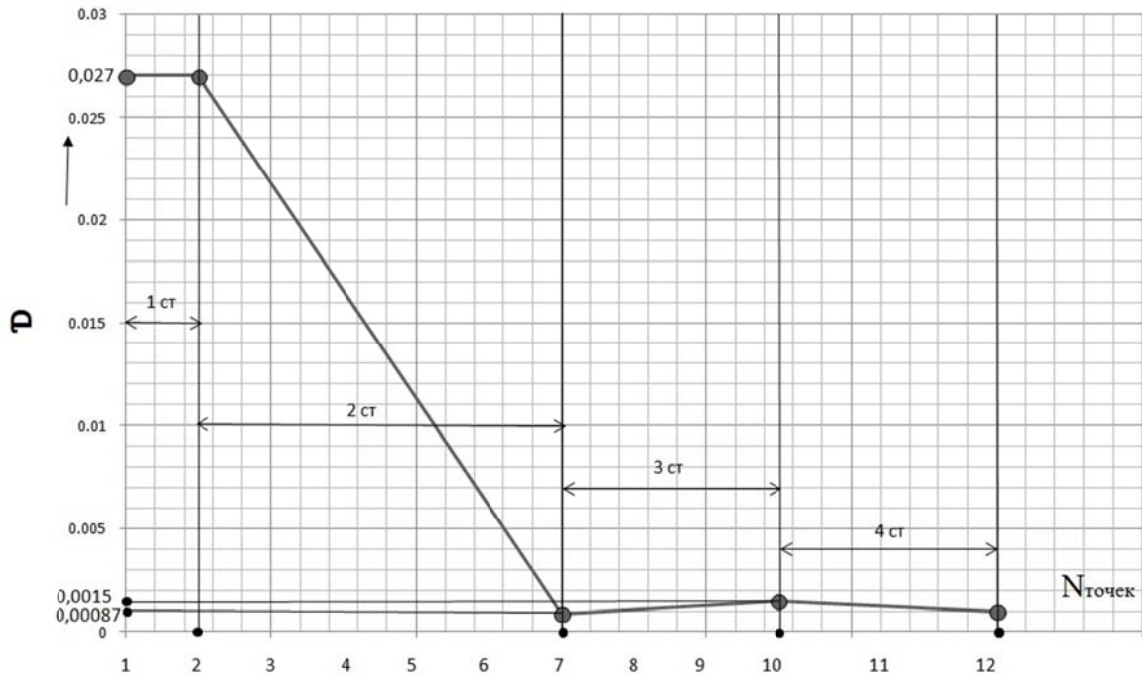


Рисунок 10 – Кинематика уплотнения гетерофазной механической смеси

В проведенных экспериментах изучалось влияние величины межинструментального зазора (Z), исходной влажности (W) механической смеси, угла наклона конической образующей “тающей” оснастки (α^0) на процесс уплотнения гетерофазной механической смеси при получении структур высокой плотности. В качестве регистрируемого параметра (отклика) принята плотность структуры на последней (четвертой) стадии уплотнения.

На рисунке 11 представлена принципиальная схема экспериментальных исследований.

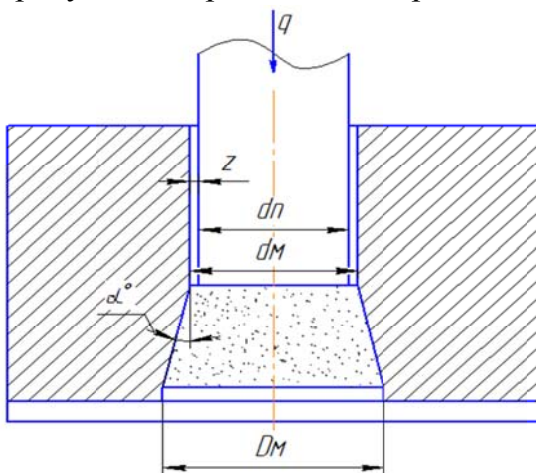


Рисунок 11 – Принципиальная схема экспериментальных исследований по выявлению функциональных связей

На рисунке 12 представлена графическая интерпретация результатов исследования основных функциональных связей.

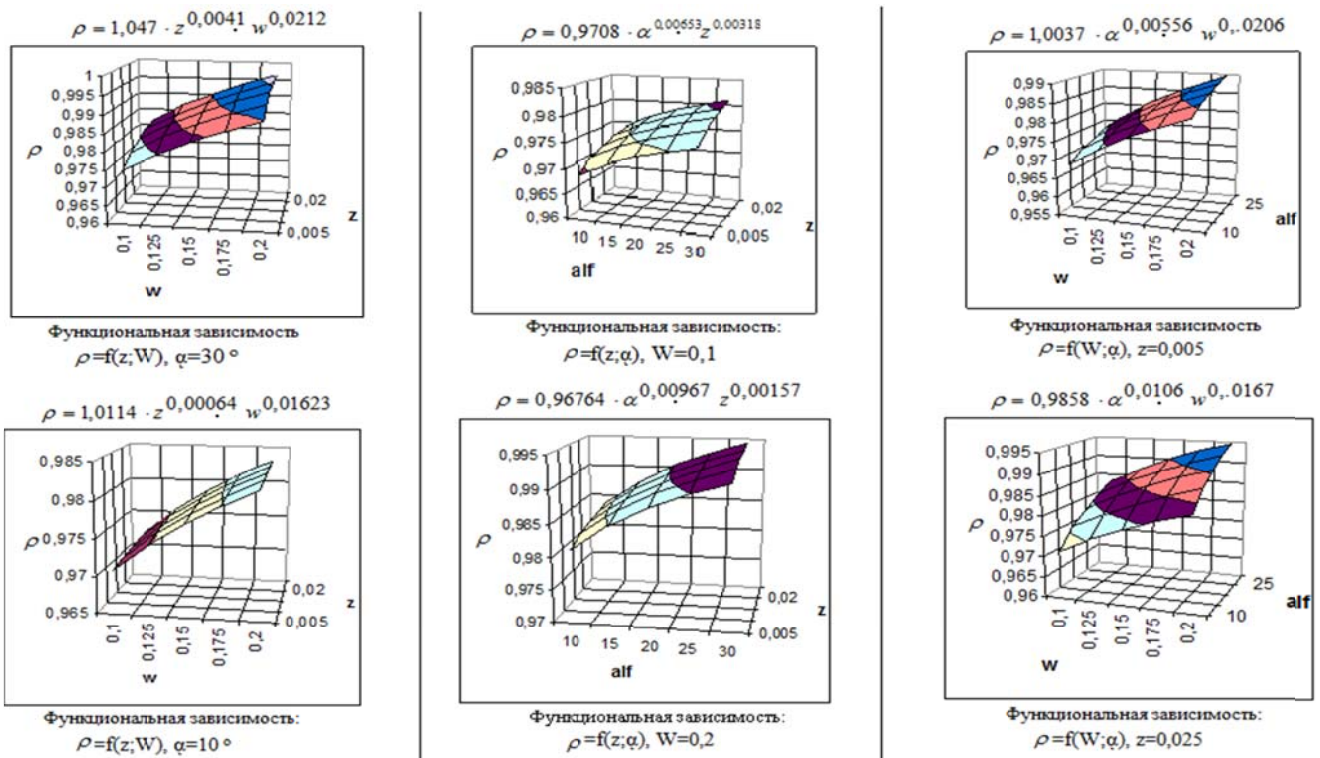


Рисунок 12 – Исследования основных функциональных связей при уплотнении материала в конической матрице

Был поставлен и реализован полнофакторный эксперимент по изучению уплотнения завершающей стадии прессования.

Основные технологические факторы:

1. Угол наклона конической матрицы (α): $X_1 \in [(10^\circ); (30^\circ)]$;
2. Начальная влажность механической смеси (W): $X_2 \in [0,1 (10\%); 0,2 (20\%)]$ (массовая доля жидкой фазы);
3. Относительный межинструментальный односторонний зазор: ($Z_{отн} = \text{односторонний зазор } Z / \text{диаметр прессовки } D$): (Z): $X_3 \in [0,005; 0,025]$. Откликом принята относительная плотность механической смеси.

Получена комплексная параметрическая модель в виде полинома множественного порядка, определяющая влияние угла наклона, зазора и влажности на плотность 4-ой стадии прессования: $\rho = 1,0054 \cdot \alpha^{0,0081} \cdot z^{0,0024} \cdot w^{0,0187}$ (5)

В работе проведено исследование деформационного упрочнения металлической матрицы-основы массива прессовки гетерофазной механической смеси при использовании теории деформационного уплотнения Ковальченко М.С.

В таблице 1 представлены аналитико-экспериментальные исследования текущей плотности (абсолютной и относительной) и осевого давления, а так же расчетные величины сдвиговых напряжений τ_s и среднеквадратичных деформаций $\langle \epsilon_m \rangle$. зависимость сдвигового напряжения пластической деформации (текущей) матрицы пористого тела ($\tau_s = \langle \tau \rangle$) от ее средней квадратичной сдвиговой деформации ($\langle \epsilon_m \rangle$) с учетом упрочнения определена в виде: $\tau_s = \tau_{s(0)} + \int_0^{\langle \epsilon_m \rangle} \left(\frac{\partial \tau}{\partial \langle \epsilon_m \rangle} \right) d \langle \epsilon_m \rangle$,

где $\tau_{s(0)}$ - начальный предел текучести ; $\frac{\partial \tau}{\partial \langle \epsilon_m \rangle}$ модуль деформационного упрочнения или $\tau_s =$

$\sigma_l \sqrt{\frac{2(1-\rho^2/\rho)}{\rho^{2,5}/\rho \cdot (2-\rho^2/\rho)}}$, где $\sigma_l = p$ (осевое давление); ρ - относительная плотность структуры.

Истинная (среднеквадратичная) деформация матрицы составляет:

$\langle \epsilon_m \rangle = \int_{\rho_0}^{\rho} \rho^{(2,5-4\rho)} \left(\frac{2-\rho^{2/\rho}}{2(1-\rho^{2/\rho})} \right) d\rho$. При отыскании определенного интеграла использован метод трапеций.

Таблица 1. – Анализ деформационного упрочнения материала-матрицы структуры прессовки

№, точки	Цилиндрическая оснастка					Коническая оснастка				
	Исходные данные		Рассчитанные данные			Исходные данные		Рассчитанные данные		
	ρ , г/см ³	p , МПа	τ_s , МПа	$\langle \epsilon_m \rangle$,		ρ , г/см ³	p , МПа	τ_s , МПа	$\langle \epsilon_m \rangle$,	
1	1,44	0,183	0	0	$2,66 \times 10^{-6}$	1,44	0,183	0	0	$2,66 \times 10^{-6}$
2	4,5	0,573	94	319,89	$0,137 \times 10^{-6}$	4,72	0,601	120	329,0	$0,164 \times 10^{-6}$
3	5,52	0,703	223	367,1	$0,279 \times 10^{-6}$	5,89	0,750	297	401,0	$0,339 \times 10^{-6}$
4	6,12	0,779	350	418,68	$0,378 \times 10^{-6}$	6,10	0,777	350	422,5	$0,375 \times 10^{-6}$
5	6,54	0,833	493	468,22	$0,456 \times 10^{-6}$	6,59	0,839	493	457,2	$0,465 \times 10^{-6}$
6	6,82	0,868	573	464,13	$0,511 \times 10^{-6}$	6,83	0,870	573	459,2	$0,512 \times 10^{-6}$
7	7,37	0,938	637	349,05	$0,641 \times 10^{-6}$	6,9	0,878	653	501,8	$0,527 \times 10^{-6}$
8	7,35	0,936	720	379,625	$0,629 \times 10^{-6}$	6,91	0,880	722	548,0	$0,531 \times 10^{-6}$
9	7,32	0,932	810	442,915	$0,637 \times 10^{-6}$	6,92	0,881	812	614,8	$0,532 \times 10^{-6}$
10	7,3	0,929	955	533,43	$0,622 \times 10^{-6}$	7,14	0,909	955	615,4	$0,582 \times 10^{-6}$
11	7,34	0,935	1274	678,83	$0,634 \times 10^{-6}$	7,63	0,971	1274	441,3	$0,725 \times 10^{-6}$
12	7,69	0,979	1600	471,93	$0,751 \times 10^{-6}$	7,79	0,992	1592	288,2	$0,808 \times 10^{-6}$

Выявлена корреляция между продолжительностью (по шкале давлений) стадий уплотнения и деформационными характеристиками уплотнения механической смеси (Рисунок 13).

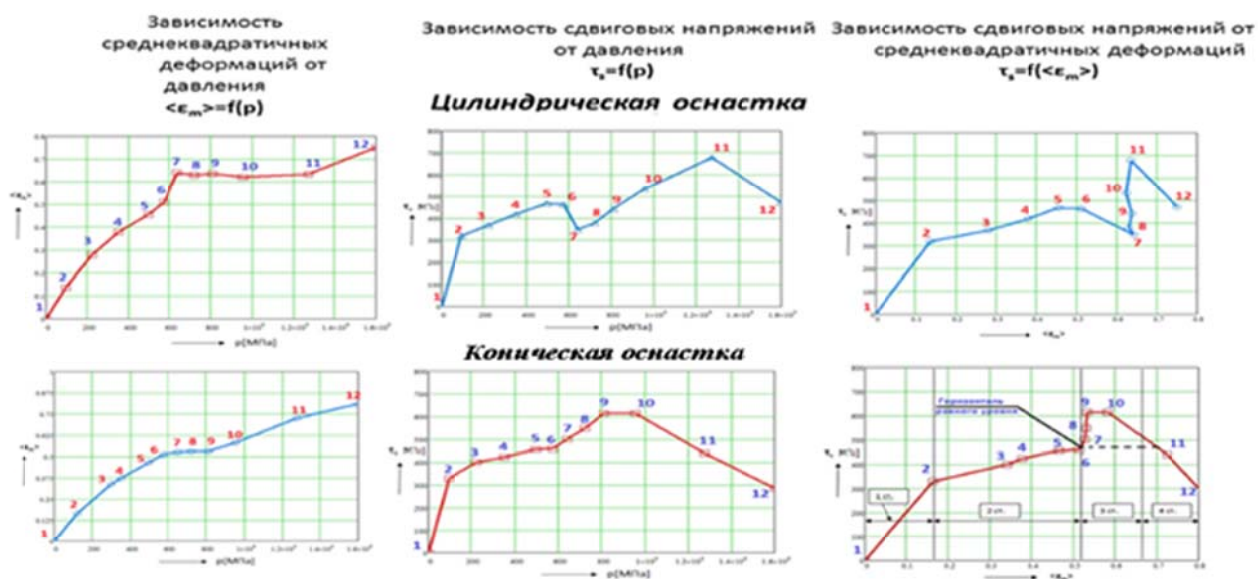
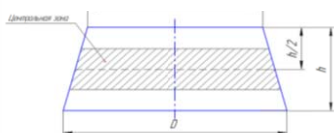


Рисунок 13. – Функциональные характеристики деформационного упрочнения металла-матрицы структуры прессовки

В главе 4 проведены исследования структурирования при комплексном осевом и тангенциальном перемещении уплотняемого материала с созданием условий реализации локализованного сдвига плотноупакованной структуры.

На рисунке 14 представлена динамика постадийного изменения порового пространства структуры.

Экспериментальная схема изучения структуры

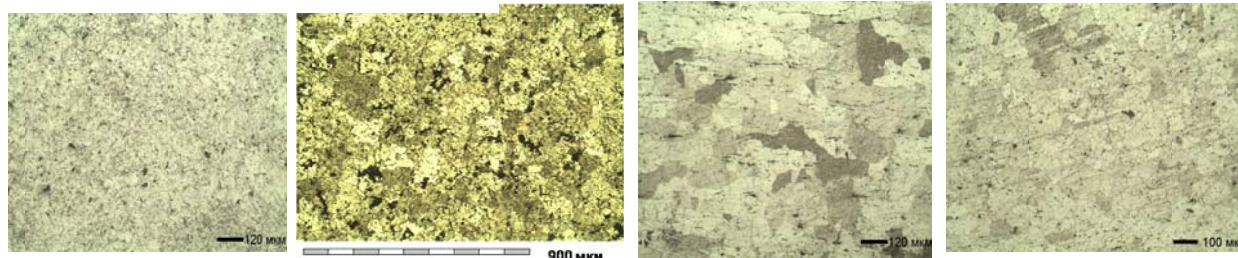


Динамика изменения порового пространства изучаемых механических смесей x 400

Травленная структура

3 стадия

4 стадия



Нетравленная структура

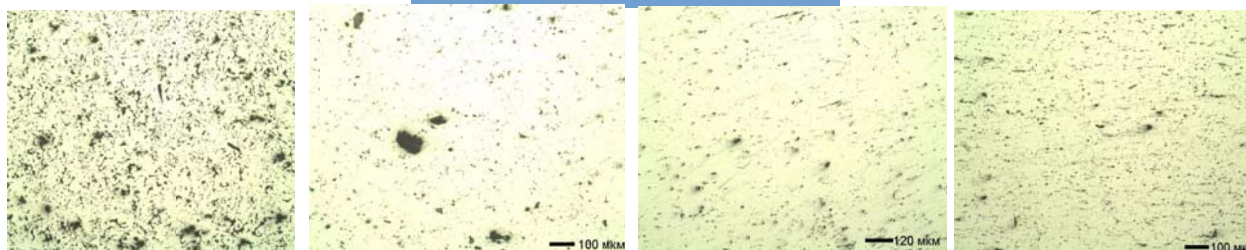


Рисунок 14 – Динамика постадийного изменения порового пространства уплотнения

Установлен характер топологии и морфологии порового пространства структуры прессовки. На четвертой стадии уплотнения наблюдается структура (Рисунок 15), близкая к теоретической плотности ($\theta_{отн} \leq 1\%$), при этом установлено дробление (уменьшение) зерен металла на последней стадии уплотнения в 1,27 раза (226мкм/178мкм), где реализуется локализованный сдвиг (Рисунок 16).

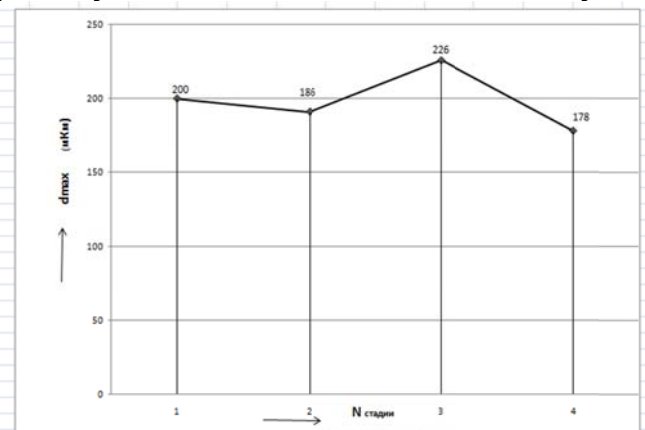


Рисунок 15 – Анализ изменения величины максимального зерна на различных стадиях уплотнения

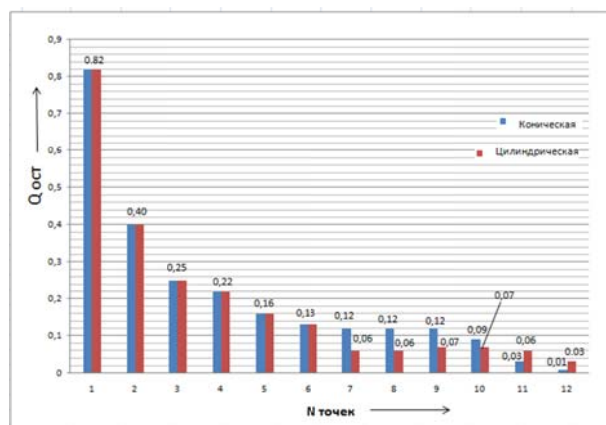


Рисунок 16 – Анализ сопоставимости интенсивности изменения остаточной пористости $Q_{кон}(Q_{цил})=f(N_{точек})$

Анализ механических испытаний структуры свидетельствует о существенном увеличении прочностных характеристик структуры на конечной стадии уплотнения (Рисунок 17).

Установлен высокий уровень гомогенности структуры при достижении твердости, превышающий твердость беспорового материала в зонах наибольшего сдвига за счет интенсивного деформационного упрочнения. Сравнение твердости структур завершающих

стадий: 5-ая стадия (статическое прессование в цилиндрической матрице) – Тв ц. и 4-ая (локализованный сдвиг при использовании конической матрицы)- Тв сдв. позволило установить: Тв сдв./ Тв ц.=1,15 (превышение на 15%).

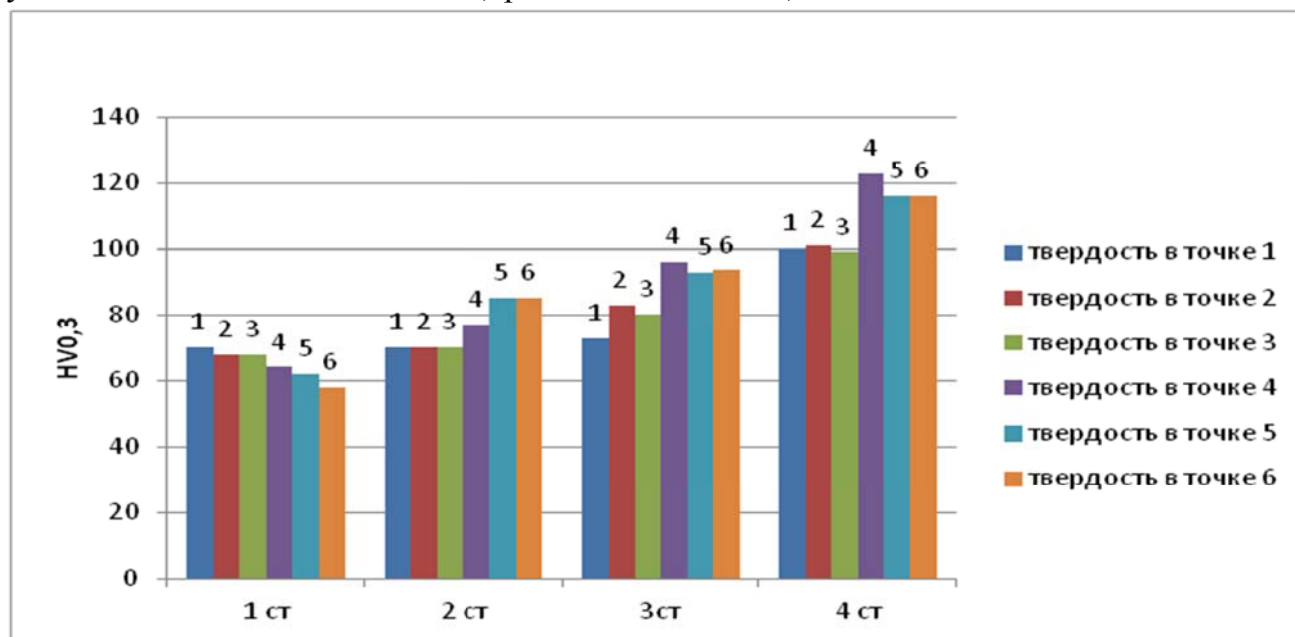
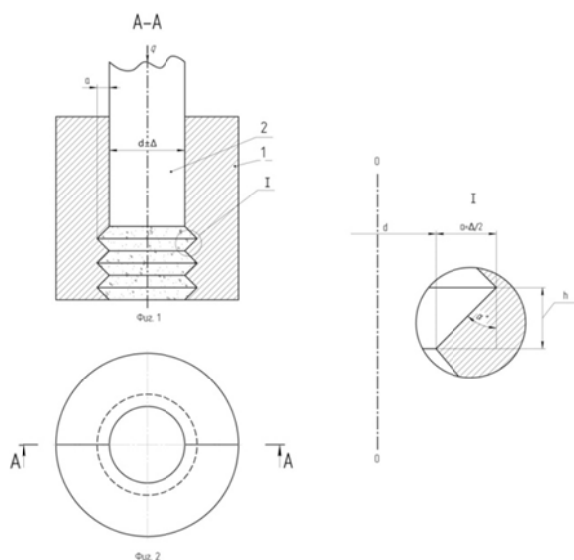


Рисунок 17 – Сопоставительная схема распределения твердости по сечению образца (постадийно)

В работе представлена перспективная техника и технология прессования цилиндрических деталей с обеспечением условий нагружения, инициирующих и реализующих локализованные сдвиговые деформации.

Прессформа для прессования порошковых механических увлажненных смесей при изготовлении высокоплотных цилиндрических изделий при интенсивном уплотнении представлена на рисунках 18, 19.



Прессформа рельефная (Рисунок 18) содержит матрицу 1 и пуансон 2 и позволяет существенно повысить размерную точность деталей, имеющих цилиндрическую (либо цилиндрические элементы части общей конструкции детали) форму. Особенностью является то, что матрица в рабочей части имеет периодическую рельефную с обратным конусом форму; высота отдельного конуса h функционально зависит от угла образующей конуса и регламентированного чертежом $0,5$ допуска (Δ) на диаметр детали; матрица выполнена секционной.

Рисунок 18 – Прессформа рельефная

Прессформа ступенчатая (Рисунок 19) содержит матрицу и пуансон и позволяет получать строго цилиндрическую форму боковой поверхности детали при обеспечении высокой размерной точности. диаметр заходной части соответствует: $d = D_d - 2h \cdot \operatorname{tg} \alpha = D_d - 2\Delta d$, где h – высота детали, D_d – габаритный размер цилиндрической части детали, α – угол находящийся в диапазоне $(10...30^\circ)$, – угол естественного скоса. Образцы на четвертой стадии уплотнения имеют строго цилиндрическую поверхность (Рисунок 20),

при этом плотность приближается к плотности теоретического уровня ($Q \leq 1\%$).

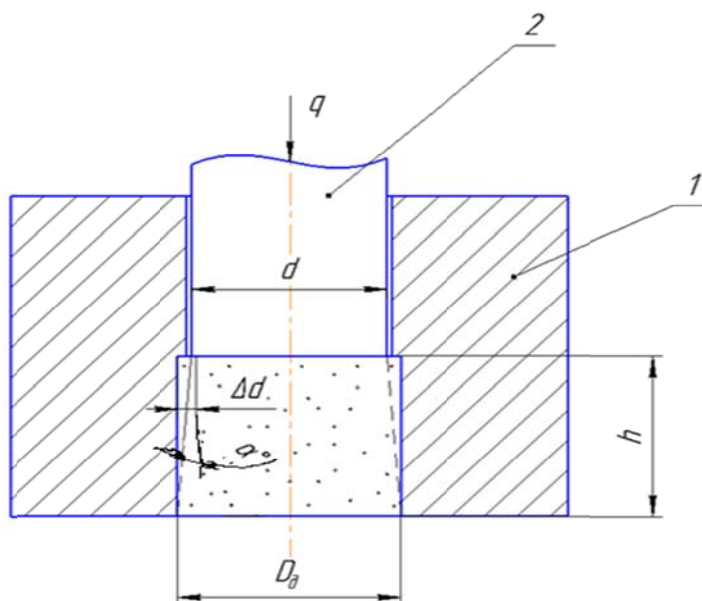


Рисунок 19 – Прессформа ступенчатая цилиндрическая



Рисунок 20 – Характерные этапы постадийного формообразования

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Выполненное аналитико-экспериментальное исследование позволило решить задачу, имеющую существенное значение по повышению развития импортозамещающих технологий (продукции) отраслей машиностроения, автомобилестроения, тракторостроения и т.д. и направленную на повышение производительности и ресурсосбережения при обеспечении высокого качества продукции.

Представленные в работе результаты исследований следующие:

1. Разработан способ интенсивного уплотнения гетерофазных механических смесей при образовании структур теоретической плотности, что соответствует требованиям к тяжелонагруженным деталям конструкционного назначения. Данный способ основан на реализации в механической схеме нагружения совместного поперечного и осевого перемещения и деформации материала, создающих условия возникновения локализованного сдвига.

2. Установлено, что использования конической матрицы позволяет интенсифицировать процесс уплотнения при увеличении плотности структуры (остаточная пористость $\leq 1\%$). Достижение плотности, близкой к теоретической (остаточная пористость $\leq 1\%$), зафиксировано при давлениях прессования 1430 МПа.

3. Экспериментально определены общие закономерности постадийного уплотнения, доказано, что процесс уплотнения увлажненных смесей при реализации условий нагружения, моделирующих сдвиг, - четырехстадийный; установлена кинематика уплотнения гетерофазной механической смеси, выявлены характерные особенности функциональной связи: плотность – давление при реализации условий, моделирующих локализованный сдвиг.

Представлен анализ постадийного кластерного состояния плотноупакованной структуры при реализации условий нагружения, инициирующих локализованный сдвиг. Установлено существенное снижение потребных давлений прессования и достижение плотностей критического уровня ($Q_{ост}=3\%$): при использовании конической (“тающей”) оснастки давление прессования составляет 1274 МПа, при использовании цилиндрической- 1600МПа, т.е. зафиксировано уменьшение потребных давлений уплотнения в 1,25 раз (на 25%).

4. На основе проведенных аналитических и экспериментальных исследований разработаны критерии стадийности уплотнения и структурирования при интенсивном уплотнении. Предложены теоретические модели, позволяющие устанавливать величину давления на деформирующем пуансоне и обеспечивающего получения структур теоретической плотности. Предложены комплексные параметрические модели, определяющие влияние межинструментального зазора, угла наклона образующей конической матрицы, исходной влажности смеси на плотность структуры прессовки при использовании конической прессформы, моделирующей возникновение локализованного сдвига.

5. Установлена величина бокового давления в зависимости от стадий уплотнения. Экспериментально установлен характер постадийного изменения бокового давления при использовании конической матрицы, что позволяет оценить уровень воздействия упругого сжатия матрицы в радиальном направлении. Установлен “опаздывающий” рост бокового давления при использовании конической матрицы на 1-3 стадиях уплотнения (по сравнению с цилиндрической матрицей), причем, на завершающей (четвертой стадии) боковое давление превышает в 1,23 раза, что характеризует интенсивный деформационный характер уплотнения при наличии локализованного сдвига на последней стадии уплотнения, а так же сопротивление пристенного трения.

6. Установлен характер деформационного упрочнения матрицы-основы при реализации механизма деформационного уплотнения. Установлена тенденция к существенному понижению сдвигового напряжения текучести матрицы-основы, что определяет снижение потребных энергосиловых характеристик процесса по сравнению с уплотнением в цилиндрической матрице.

7. Экспериментальные исследования с использованием методов металлографии установили высокий уровень качества структуры отпрессованного изделия: равноплотность, практически отсутствие порового пространства, дробления зерен на последней стадии уплотнения в 1,27 раза в результате локализованных сдвиговых деформаций. Установлено значительное повышение механических характеристик изделий и, прежде всего, прочностных, - твердости, превышающей в 1,2 раза твердость литого материала за счет деформационного упрочнения. Сравнение твердости структур завершающих стадий: 5-ая стадия (статическое прессование в цилиндрической матрице) – T_v ц. и 4-ая (локализованный сдвиг при использовании конической матрицы)- T_v сдв. позволило установить: T_v сдв./ T_v ц.=1,15 (превышение на 15%).

8. Разработана перспективная схема прессования и конструкция технологической оснастки при использовании комплексного осевого и тангенциального перемещения уплотняемого материала при обеспечении локализованного сдвига.

ОСНОВНЫЕ ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Издания, рекомендованные ВАК РФ:

1. Кокорин А.В. Аналитико-экспериментальные исследования процесса прессования и структурообразования при интенсивном уплотнении увлажненных механических смесей / В.Н. Кокорин, А.А. Скворцов, М.А. Брызгин, А.В. Кокорин // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2014 – №7. – С. 18-26. (0,6 п.л./0,2 п.л.)
2. Кокорин А.В. Исследование механизма структурообразования в процессе интенсивного уплотнения порошков с использованием эффекта межчастичного срачивания / В.Н. Кокорин, Н.А. Сизов, А.В. Кокорин, В.И. Филимонов, М.А. Брызгин // Известия МГТУ «МАМИ» № 1(19). – 2014, т.2. – С. 134–137. (0,6 п.л./0,2 п.л.)
3. Кокорин А.В. Прессование гетерофазных увлажненных порошков при использовании метода интенсивного уплотнения / В.Н. Кокорин, А.И. Рудской, С.Ю. Кондратьев, В.И. Филимонов, А.В. Кокорин // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2013. – №5. – С. 13-20. (0,8 п.л./0,25 п.л.)
4. Кокорин, В.Н. Моделирование процесса интенсивного уплотнения увлажненных металлических порошков с использованием ультразвукового воздействия / В.Н. Кокорин, Н.И. Шанченко, А.В. Кокорин // “Упрочняющие технологии и покрытия.”-2014.-№9. – С.7-13 (0,5 п.л./0,18 п.л.)
5. Кокорин А.В. Оценка технико-экономической эффективности процессов прессования высокоплотных изделий методом порошковой металлургии/ С.Ю. Кондратьев, А.М. Кожин, В.А. Щепочкин, Н.А. Сизов, А.В. Кокорин // Заготовительные производства машиностроения. – 2014. – №10. – С. 7 – 15. (0,5 п.л./0,18 п.л.)
6. Кокорин А.В. Теоретические исследования процесса интенсивного уплотнения гетерофазных механических смесей / В.Н. Кокорин, В. И. Филимонов, А.А. Григорьев, А.В. Кокорин, Н. А. Сизов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2014 – №11. – С. 18-26. (0,5 п.л./0,15 п.л.)
7. Кокорин, А.В. Теоретические исследования процесса интенсивного уплотнения гетерофазных механических смесей / В.Н. Кокорин, В.И. Филимонов, А.А. Молгачев, А.В. Кокорин, Б.Р. Зиннатов, А.А. Евстигнеев // “Упрочняющие технологии и покрытия.” – 2016. – №1. – С. 15-20. (0,5 п.л./0,15 п.л.)
8. Кокорин, А.В. Экспериментальное исследование влияния технологических параметров на плотность порошковых материалов на основе железа при прессовании в конической матрице в присутствии жидкой фазы / В.Н. Кокорин, Н.И. Шанченко, А.В. Кокорин, А.А. Евстигнеев, Б.Р. Зиннатов // Заготовительные производства в машиностроении. – 2016. – №2. – С. 10-17 (0,4 п.л./0,15 п.л.)
9. Кокорин, А.В. Способ интенсивного прессования порошковых материалов на основе железа в конической матрице / В.Н. Кокорин, В.И. Филимонов, А.В. Кокорин и др. // Справочник. Инженерный журнал. – 2016. – №3. – С. 3-7 (0,4 п.л./0,1 п.л.)
10. Кокорин, А.В. Техно-экономические аспекты применения процесса интенсивного прессования металлических порошков при изготовлении тяжело нагруженных деталей / В.Н. Кокорин, А.Н. Кожин, В.И. Филимонов, Е.А. Качагин, А.В. Кокорин, А.А. Айдашкин // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2016. – №1(17). – С. 258-270.

Статьи и материалы конференций:

11. В.Н. Кокорин, А.В. Кокорин, Н.А. Сизов, В.И. Филимонов Интенсивное прессование порошковых материалов со сдвиговыми деформациями при ультразвуковом воздействии // Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении-2014 FRITME-2014, ИМАШ РАН, Москва. – 2014. – С. 243 – 248.
12. В.Н. Кокорин, Н.А. Сизов, А. В. Кокорин, Б.Р. Зиннатов, А.А. Евстигнеев, К.М. Волков, Е.С. Обидин, Н.А. Крылатов. Исследование структурирования в процессах порошковой

металлургии// Неделя науки СПбПУ.- СПб.: СПбПУ. – 2014. – С. 149 – 153.

13. В.Н Кокорин, **А.В. Кокорин**, А.А. Евстигнеев, Б.Р. Зиннатов Интенсивное уплотнение в конической матрице на прессах гетерофазных механических смесей при реализации сдвиговых деформаций // Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении-2015 FRITME-2015, ИМАШ РАН, Москва. – 2015. – С. 157 – 163.

Патент на полезную модель:

14. Патент РФ на полезную модель № 100005, Прессформа для прессования порошковых механических увлажненных смесей при изготовлении высокоплотных изделий / В.Н. Кокорин, К.К. Мертенс, Д.П. Груздев, А.А. Митюшкин, А.В. Кокорин, Н.А. Сизов, С.Г. Белобородов. – Оpubл. 2010. – Бюл. № 34

Другие издания:

15. В.Н.Кокорин, В.И.Филимонов Н.А. Сизов, А.А. Григорьев., **А.В. Кокорин**. Энергетический метод решения технологических задач обработки давлением компактных и порошковых тел. Учебное пособие. –Ульяновск: УлГТУ. – 2012. – 82 с. (5,1 п.л./0,8 п.л.)

Подписано в печать Формат 60 × 84 1/16

Отпечатано в ризографе. Усл. печ. л. 1.

Тираж 100 экз. Заказ № ...

ФГБОУ «Ульяновский государственный технический университет»

Отдел типографии и оперативной печати

432008, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32

Кокорин Алексей Валерьевич

РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССА ХОЛОДНОЙ ШТАМПОВКИ ВЫСОКОПЛОТНЫХ ЗАГОТОВОК И ДЕТАЛЕЙ ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА В КОНИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕ НА ПРЕССАХ

Автореф. дисс. на соискание учёной степени кандидата техн. наук

Подписано в печать Заказ №

Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Отпечатано с готового оригинала-макета

432008, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32

Подписано в печать Формат 60x84/16

Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Отпечатано с готового оригинала-макета

432008, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32