

**АЗЕРБАЙДЖАНСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

*На правах рукописи*

**ШИРИН МАГДИ АХМЕД МУХАММАД**

**ФИЗИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ  
ОЦЕНКА УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО  
ДЕФОРМИРОВАНИЯ  
ПОРОШКОВЫХ СЖИМАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**Специальность: 33 12.01-«Технология материалов»**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**на соискание ученой степени доктора философии  
по технике**

**БАКУ – 2014**

Работа выполнена в Азербайджанском Техническом Университете

- Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Мамедов А.Т.**
- Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор **Бабанлы М.Б.**  
кандидат физико-математических  
наук, доцент **Мехтиев Р.К.**
- Ведущее предприятие: Азербайджанская Государственная  
Нефтяная Академия  
(кафедра «Материаловедение и техноло-  
гия материалов»)

Защита состоится ...19/02..... 2014 года в 11<sup>00</sup> часов на заседа-  
нии диссертационного совета Д02.171 при Азербайджанском Тех-  
ническом Университете по адресу: AZ 1073, г.Баку, проспект  
Г.Джавида, 25.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Азер-  
байджанского Технического Университета.

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2014 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д02.171,  
кандидат технических наук, доцент

**Гезалов С.К.**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В последние годы в промышленности наблюдается существенный рост потребления металлических порошков и изделий из них. Расширяется ряд изделий различной формы и размеров, производимых методами порошковой металлургии, при одновременном возрастании требований к ним. Поэтому обязательным требованием к производимым изделиям является наличие высокой плотности и прочности. Металлические порошки обычно прессуются при комнатной температуре. Применяются также методы горячего изостатического и теплого прессования (прессование при температурах между горячим и холодным прессованием). Оба метода холодного и теплого прессования требуют наличия смазки, вводимой в порошок.

В практике прессования очень сложно найти оптимальное сочетание кинематики перемещения формообразующих элементов пресс-формы при прессовании, разгрузке и извлечении детали. На стадии прессования желательно реализовать минимальное течение и однородную консолидацию порошка. Большое перемещение порошка при прессовании может вызвать появление сдвиговых трещин. Проблемы больших градиентов плотности приводят к изменениям по объему в сырой прочности прессовок и нерегулируемой усадке при спекании и даже появлению трещин. Нежелательные остаточные напряжения могут привести к ряду проблем при транспортировке сырых прессовок, механической обработке, а также при нагреве до температур спекания. Для прессования обычно используют сложную систему мультиплексных пуансонов. Неправильная нагрузка и извлечение деталей сложной формы может привести к образованию трещин или появлению больших остаточных напряжений. Хорошее качество поверхности прессового инструмента и небольшие уклоны могут привести к снижению остаточных напряжений при выталкивании прессовки. Изгибные напряжения при выталкивании обычно компенсируют приложением дополнительной нагрузки к верхнему пуансону, так называемой «пригруз верхнего пуансона».

После прессования сырое тело разгружается в аксиальном направлении. Даже если нагрузка полностью снята между сырой прессовкой и матрицей существует радиальные напряжения. Прессовка является зажатой в матрице и требуется определенное усилие для ее извлечения. Радиальная сила и усилие выталкивания увеличиваются с повышением давления прессования. Если в порошке присутствует смазка, то усилие выталкивания уменьшается. Смазка уменьшает трение между порошком и матрицей, снижает износ инструмента, но сильно влияет на кривую уплотнения прессования. Малое количество смазки улучшает скольжение частиц порошка относительно друг друга и увеличивает плотность прессовки. Большое количество смазки препятствует сжатию частиц из-за заполнения ее дополнительного объема.

Численное моделирование прессования порошка может быть полезным при разработке и конструировании процессов формообразования. Расчеты кинематики формообразующих элементов, общего усилия прессования, напряжений в конструкции инструмента, распределения плотности, остаточных напряжений и получения трещин могут с успехом заменить метод проб и ошибок. Однако имеется ряд трудностей мешающих выполнить процедуры хорошего численного расчета. В первую очередь, это связано с выбором реологической модели порошкового тела.

**Целью работы** является разработка теоретических основ физического и математического моделирования упругопластического поведения металлических порошков при прессовании в жесткой матрице.

В соответствии с поставленной целью работы сформированы следующие основные задачи:

1. Изучение уплотняемости и деформационного упрочнения металлических порошков и их смесей при прессовании;
2. Физическое обоснование и разработка математической модели упругопластического деформирования порошковых сжимаемых материалов;
3. Многомасштабное моделирование холодного прессования металлических порошков;
4. Компьютерное моделирование процесса теплого прессования в жестких матрицах;

5. Сформулирование научно обоснованных рекомендаций, обеспечивающих внедрение результатов исследований в производство порошковых изделий.

**Достоверность полученных результатов** подтверждается экспериментальными исследованиями, с использованием современных приборов и средств измерений, установок, оснастки и программ для компьютерного моделирования процессов порошковой металлургии.

**Научная новизна.** Сформулированы основные принципы построения физической модели деформирования порошковых композиционных материалов с различной структурной организацией, определены условия, необходимые для описания структур различных типов. Построена замкнутая система определяющих уравнений, включающих базовые законы сохранения и учитывающих особенности реологии упругопластичных сред, что позволяет проводить полный анализ уплотнения с учетом условий разрушения. Таким образом, получена математическая модель уплотнения для анализа упругопластического деформирования порошковых композиционных материалов с различными типами структур.

С помощью компьютерного моделирования процесса теплового прессования порошковых изделий установлено, что (в сравнении с холодным прессованием), наряду с уменьшением величин осевого и радиального давления прессования происходит также дополнительное радиальное течение порошка, влияющее на конечное распределение плотности.

**Практическая ценность работы.** Результаты компьютерного моделирования уплотнения сжимаемых материалов могут быть использованы для оптимизации процессов холодного и теплового прессования путем создания в уплотняемом порошке начального температурного градиента (при теплом прессовании).

Определены краевые условия, характеризующие взаимодействие поверхностей прессования элементов и обрабатываемых тел, которые могут формулироваться как в скоростях, так и в напряжениях и в квазистатическом случае должны со относиться к текущим моментам деформирования. Установлено, что для квазистатических процессов следует задавать начальные значения уп-

рочнения и пористости, а в случае динамики к ним необходимо добавлять начальное напряжение и скорость.

Результаты работы нашли практическое апробирование при производстве специальных изделий втулочного типа, изготавливаемых из композиционных порошковых смесей.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы обсуждены и одобрены на:

1. I-ой Международной конференции «Проблемы металлургии и материаловедения», посвященной 90 летнему юбилею общенационального лидера Азербайджанского Народа Гейдара Алиева, г.Баку, 2013г.

2. VIII-ой международной научной конференции «Современные проблемы Морского транспорта», посвященной 90 летию со дня рождения общенационального лидера Гейдара Алиева, г.Баку, 1013.

3. Научном семинаре кафедры «Литейное и сварочное производство».

**Публикация работы.** Основное содержание работы опубликовано в десяти работах.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка использованных литератур и приложения. Диссертация изложена на 161 страниц компьютерного текста, содержит 45 рисунков, 8 таблиц, 117 наименований литературных источников, 1 приложения.

Работа выполнена на кафедре «Литейное и сварочное производство» Азербайджанского Технического Университета.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы и формулируются основные положения, выносимые на защиту. В частности проведен анализ процесса прессования порошковых материалов в жесткой матрице при различных условиях формования. Обоснована необходимость математического моделирования упругопластического поведения математических порошков в матрице.

**В первой главе** дан критический анализ математических моделей упругопластического деформирования материалов, приведены существующие методы расчета распределений напряжений и пористости при прессовании в жесткой матрице, рассмотрено влияние давления прессования на распределение плотности по высоте при различных схемах формования.

В рамках предложенной модели механики континуума может быть решена следующая задача: по необходимым конечным размерам втулки, ее конечной средней по объему пористости и данной схеме прессования вычислить распределение остаточной пористости и напряжений в объеме изделия.

Установлено, что решение краевой задачи процесса холодного прессования не зависит от вида поверхности нагружения. Оно определяется зависимостями осевого и бокового давления от пористости.

Касательное напряжение и дополнительная пористость, обусловленная внешним трением, являются решением задачи Дирихле для системы уравнений эллиптического типа.

Определено, что каждой схеме прессования соответствует свой характер изгиба слоев, параллельных плоскости основания до прессования.

Установлено, что предложенные в литературном обзоре математические модели построены на основе концепции пластичности прессуемого материала. Поэтому все они являются линеаризованным вариантом общей модели процесса прессования. В реальных случаях на определенном этапе процесса прессования формируемая среда становится упруго-пластичной, в ряде случаев даже упругой, что не учтено в рассматриваемых моделях.

Все известные модели процесса холодного прессования металлических порошков построены для случая формования заготовок типа втулки. Это самый простой вид заготовки, для которой получены аналитические зависимости. Вопрос построения математической модели заготовок более сложной и универсальной формы, учитывающей кинематику рабочих элементов формирующего инструмента остается пока еще открытым.

**Во второй** главе разработано численное моделирование процессов прессования порошковых изделий сложной формы в

жестких матрицах. Исследовано влияние схемы прессования на распределение плотности уплотнения порошка.

Установлено, что однопараметрическая модель сжимаемой среды (все материальные функции модели зависят только от текущей плотности) эффективна для использования при моделировании процессов прессования порошковых изделий сложной формы.

Изучено формирование равновесной плотности при трехосном нагружении прессовки. Для определения материальных функций целесообразно использовать равновесную плотность, существующую при сжатии несвязанных порошковых тел. Равновесная плотность - это такое значение, начиная с которого дальнейшее деформирование не сопровождается объемными изменениями. Соответствующее ее достижению напряженное состояние позволяет определить координаты вершины контура нагружения в пространстве напряжений. Другая точка контура соответствует всестороннему сжатию.

Определена поверхность нагружения при прессовании порошков в жесткой матрице. Получены определяющие соотношения, необходимые для вычисления распределения плотности

$$\sigma_{ij} = \frac{\tau_m}{W} \left[ e_{ij} + \left( \frac{P^{*2}}{\tau_m^2} - \frac{1}{3} \right) e \delta_{ij} \right] + P_m \delta_{ij}, \quad (1)$$

где,  $P^*$  среднее напряжение, соответствующее достижению равновесной плотности,  $P_m$ ,  $\tau_m$  - параметры, описывающие свойства материала;  $e_{ij}$  - тензорное выражение деформации;  $\delta_{ij}$  - тензорное выражение пластичности металла.

$$W = \sqrt{\gamma^2 + \frac{P^{*2}}{\tau_m^2} e^2}.$$

где  $\gamma$  - плотность материала.

Получены точки контура для различных значений плотности порошковых материалов.

Поскольку порошковый материал рассматривается как несвязанный, третья точка контура соответствует нулевым напряжениям. Таким образом, потенциальный контур может рассматри-



ваться как совокупность двух эллипсов, гладко сопрягающихся в наивысшей точке контура.

Разработана методика численного моделирования процесса прессования порошковых частиц в жесткой матрице. Механическая модель, описывающая поведение несвязанной сыпучей среды, используется для решения краевых задач о поведении порошков в жестких матрицах. Наряду с определяющими соотношениями, краевая задача включает также формулировку соответствующего вариационного принципа для поля скоростей. Полученная общая система уравнений дискретизируется по методу конечных элементов с линейной аппроксимацией поля скоростей, в результате чего получается система уравнений

$$[K] \cdot \{X\} = \{P\} - \{P_m\}. \quad (2)$$

Здесь  $[K] = \sum_1^{Ne} \int_P [B]_{(e)}^T \cdot [D]_{(e)} \cdot [B]_{(e)} \cdot dV$  - глобальная матрица системы;  $Ne$ -количество конечных элементов;  $\{X\}$  - столбец узловых скоростей;  $\{P\}$  - столбец узловых усилий;

$\{P_m\} = \sum_1^{Ne} \int_V [B]_{(e)}^T \cdot [P_m]_{(e)} \cdot dV$  - столбец узловых усилий, соответствующих смещению максимальной точки контура поверхности нагружения относительно оси гидростатического давления в плоскости гидростатического давления-интенсивность касательных напряжений;  $[B]_{(e)}$  - матрица, связывающая скорости пластических деформаций в элементе со скоростями перемещений его узлов (определяется согласно);  $[D]_{(e)}$  - матрица, связывающая компоненты напряжений в элементе со скоростями деформаций.

В результате дискретизации системы определяющих уравнений по методу конечных элементов соответствующая начально-краевая задача сводится к системе нелинейных дифференциально-алгебраических уравнений относительно текущих координат узлов сетки конечных элементов. Её удаётся решить на основе модифицированных пошаговых процедур, имитирующих интегрирование по времени с переменным и зависящих от этапа нагружения шагом интегрирования.

Представляет интерес сравнение экспериментальных и теоретических результатов. В работе экспериментально установлено распределение средней плотности для различных областей изделия. Расположение этих областей показано на рис.1. Для этих зон подсчитывали среднюю плотность исходя из значений, полученных в результате моделирования (таблица 1). Можно отметить близость полученных результатов.

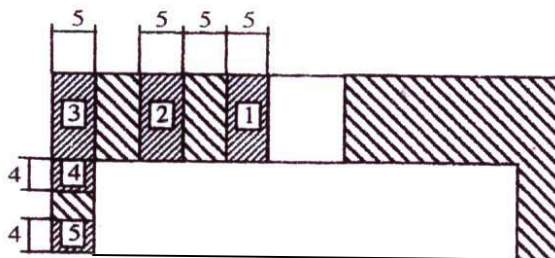


Рис. 1. Распределение областей, в которых определяли среднюю плотность

Таблица 1

Экспериментальное и теоретическое распределение плотности

Область изделия	Плотность, г/см <sup>3</sup>
1	6,90/6,69*
2	6,93/6,73
3	7,03/6,72
4	6,91/6,78
5	6,97/6,81

\* До черты указаны экспериментальные данные, после-результаты моделирования

На каждом шаге интегрирования нелинейно-алгебраическая система уравнений относительно узловых скоростей решается по методу Ньютона путем итераций. При этом начальное приближение соответствует линейно-вязкому поведению, где матрица жесткости определяется на предыдущем шаге.

Использование описанного выше алгоритма позволило получить распределение плотности для различных схем прессования.

Их сравнительный анализ свидетельствует о преимуществах методов, использующих активное течение.

Установлено, в частности, что для рассмотренного выше изделия наилучшие результаты дает трехстадийная диаграмма движения пуансонов при дополнительной подпрессовке одной из частей, т.е. когда обеспечивается сложная и согласованная кинематика рабочих элементов пресс-формы.

**В третьей главе** приведены результаты разработки многомасштабного моделирования холодного прессования металлических порошков и особенности их деформационного упрочнения.

Новый метод многомасштабного моделирования порошковых сред позволяет отслеживать макроскопическое формоизменение образцов и изменение микроструктуры в разных элементах изделия. При этом моделирование свободно от предположений относительно влияния пористости, формы пор и частиц на уплотнение порошкового тела.

Рассмотренное моделирование прессования агломерированного порошка, с одной стороны, демонстрирует возможности метода, с другой - показывает существенное влияние внутренней структуры порошкового тела на его деформационное поведение даже при заданной пористости.

Проведено исследование уплотнения порошков карбонильного никеля и смесей на его основе, железа, алюминия и магния в условиях прессования в цилиндрической пресс-форме с непрерывной записью изменения высоты порошковой заготовки в машине для механических испытаний материалов.

Установлена взаимосвязь средней квадратичной деформации матрицы  $\langle \varepsilon_m \rangle$  и сдвигового напряжения текучести матрицы  $\tau_s$  при холодном прессовании порошков железа, магния, алюминия, никеля и смесей на его основе. Показано, что в отличие от уплотнения смесей порошков на никелевой основе для уплотнения порошка железа характерно слабое деформационное упрочнение.

Текущие значения сдвигового напряжения текучести матрицы, образующей порошковое тело в процессе его уплотнения в цилиндрической пресс-форме, рассчитывали по формуле:

$$\tau_s = P \sqrt{\frac{2(1 - \rho^{2/\rho})}{\rho^{2.5/\rho} (2 - \rho^{2/\rho})}}, \quad (3)$$

где  $P$  – осевое давление,  $\rho$  – относительная плотность.

Текущие значения средней квадратичной деформации матрицы пористого тела в процессе прессования в той же пресс-форме вычисляли по формуле.

$$\langle \varepsilon_m \rangle = \int_{\rho_0}^{\rho} \rho^{(2,5-4\rho)/2\rho} \left[ \frac{2 - \rho^{2/\rho}}{2(1 - \rho^{2/\rho})} \right]^{1/2} dS \quad (4)$$

На начальной стадии уплотнения чистого никелевого карбонильного порошка наблюдается экстремально высокое сдвиговое напряжение текучести матрицы, указывающее на высокую жесткость этого порошка, связанную с особенностями строения частиц и их малым размером. Разрушение конгломератов этих частиц и их последующее деформирование требует приложения высоких сдвиговых напряжений.

Для порошков Al и Mg на зависимости напряжения текучести матрицы  $\tau_s$  от её средней квадратичной сдвиговой деформации  $\langle \varepsilon_m \rangle$  наблюдается существенный спад величины  $\tau_s$ . Зависимость сдвигового напряжения текучести матрицы порошкового магния характеризуется начальным зубом текучести, что может быть вызвано наличием плотных оксидных пленок на поверхности частиц порошка магния.

Полученные результаты позволяют заключить, что характер уплотнения и достижение конечной плотности прессовок определяется величинами сдвигового напряжения текучести матрицы, образующей порошковое тело, и его повышением в процессе уплотнения под внешним давлением вследствие деформационного упрочнения матрицы.

Однако, следует заметить, что сдвиговое напряжения текучести матрицы можно регулировать введением в состав шихты скользящих компонентов, которые могут играть существенную роль при формировании структуры спеченного материала.

**В четвертой главе** представлены результаты моделирования упругопластического поведения металлических порошков при прессовании в жесткой матрице. Получена математическая связь

между напряжениями и скоростями деформаций упругопластичной среды:

$$\varepsilon_{ik} = \frac{1+\nu}{E} \left( \dot{\sigma}_{ik} + \delta_{ik} \frac{\nu}{1+\nu} \dot{p} \right) + \frac{\sqrt{\phi e^2 + \phi \gamma^2}}{\sigma_s \phi \rho \sqrt{1-\theta}} \left[ \phi \sigma_{ik} + \left( \frac{1}{3} \phi - \phi \right) p \delta_{ik} \right], \quad (5)$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $\delta_{ik}$  – единичный тензор;  $p$  – скорость гидростатического сжатия;  $\phi$  и  $\phi$  функции пластичности материала;  $E$  – модуль Юнга пористого тела;  $\sigma_s$  – предел текучести материала,  $\sigma_{ik}$  – тензор напряжений.

Установлена неравномерность в распределении характеристик напряженно-деформированного состояния по объему уплотняемого материала, более выраженная в верхних, расположенных близко к поверхности приложения нагрузки, областях представительных элементов.

Определена локализация деформаций и зарождение первых пластических элементов в областях, прилежащих к вершинам пор, с последующим их распространением по направлению к соседним порам и боковым границам представительного элемента при более интенсивном заполнении вначале области мягкой частицы включения, а затем – более жестких частиц основы. Развитие пластической области разрывает связность упругих элементов, количество которых с каждым шагом уменьшается, и с того момента, когда ее распространение достигает боковых границ элемента, начинается процесс эффективного уплотнения материала.

Установлена трехстадийность развития области пластического течения в объеме уплотняемого материала. На первой стадии при достаточном увеличении деформирующего усилия уплотнение практически не происходит: начинается зарождение и развитие областей пластического течения. Вторая характеризуется эффективным уплотнением материала при незначительном увеличении усилия деформирования. Заключительная стадия показывает, что при достижении определенной плотности дальнейшее уплотнение требует значительного повышения усилий деформирования. При этом в области межчастичных границ возможно появление разрывов, что указывает на возможность разрушения материала.

Для материалов с различными типами структур исследованы зависимости плотности от давления прессования. Сравнение

результатов теоретических расчетов с экспериментальными данными показывают удовлетворительное совпадение по плотности и механическим свойствам железо-медных инфильтрованных материалов и материалов на основе вольфрама с разным содержанием медных включений, а также порошков на основе железа при теплом прессовании.

Плотность прессовки определяли методом гидростатического взвешивания, согласно ГОСТ 18898-89, на весах с точностью  $\pm 0,01$  г.

В табл. 2 приведены теоретические плотности смесей различных порошков. Зависимости относительной плотности исследуемых порошковых смесей при холодном и теплом прессовании от давления в жесткой цилиндрической матрице приведены на рис. 2 и в табл. 3, 4 и 5.

Таблица 2

Теоретические плотности порошков

Маркировка	Соств порошковой смеси	Теоретическая плотность компактного материала, $\rho_T$ , г/см <sup>3</sup>
Fe	Fe+0,8% стеарата цинка	7,43
Distaloy AE	Distaloy AE (1,5% Cu, 4% Ni; 0,5%Mo)+0,6%графита+0,6% смазки DN120	7,47
Distaloy DC	Distaloy DC+0,3% графита+0,6% смазки DN120	7,55

Таблица 3

Влияние температуры теплого прессования на плотность порошковых смесей (давление прессования-700МПа)

Состав порошковой смеси	Температура прессования, °С					
	20	100	120	130	140	150
Distaloy AE+0,6%С+0,6% DN120	7,2	7,27	7,31	7,31	7,34	7,35
Distaloy	7,18	7,25	7,30	7,34	7,36	7,38

DC+0,3%C+0,6% DN120						
------------------------	--	--	--	--	--	--

Совокупность экспериментальных точек зависимости плотности от давления прессования была обработана плавной логарифмической кривой уплотнения вида

$$\rho = b \ln(p + a) \quad (6)$$

где  $\rho$  – плотность,  $p$  – давление прессования,  $a$  и  $b$  – экспериментальные коэффициенты.

Таблица 4

Влияние давления прессования на плотность порошковых смесей

Давление прессования, МПа	Холодное прессование						Теплое прессование			
	Fe		AE		DC		AE		DC	
	г/см <sup>3</sup>	%	г/см <sup>3</sup>	%	г/см <sup>3</sup>	%	г/см <sup>3</sup>	%	г/см <sup>3</sup>	%
0	2,57	34,6	2,91	39	3,32	44	2,91	39	3,32	44
50	4,46	60	4,71	63	4,53	60	4,72	63,2	4,55	60,2
100	4,71	63,4	5,10	68,3	4,98	66	5,12	68,6	5,04	66,8
150	5,07	68,3	5,48	73,4	5,37	71,1	5,51	73,8	5,44	72
200	5,36	72,1	5,79	77,5	5,69	75,2	5,89	78,9	5,76	76,3
400	6,17	83,1	6,54	87,6	6,43	85,2	6,77	90,6	6,63	87,8
600	6,71	90,3	6,96	93,2	6,90	91,4	7,16	95,9	7,08	93,8
800	6,98	94	7,18	96,1	7,15	94,7	7,33	98,1	7,34	97,2

Таблица 5

Значения экспериментальных параметров в уравнении прессования

Материал	a	b
Fe+0,8% стеарата цинка	12,338±1,843	13,825±0,143
Distaloy AE, холодное прессование	51,430±39,876	14,870±0,894
Distaloy AE, теплое прессование	13,843±1,227	14,787±0,099
Distaloy DC, холодное прессование	22,443±1,610	14,019±0,071
Distaloy DC, теплое прессование	20,651±2,320	14,396±0,122

Предложенной формулой можно с достаточной для практического использования точностью рассчитывать плотность

прессовок, получаемых из порошковых смесей Densmix на основе диффузионно-легированных сталей Distaloy AE и DC.

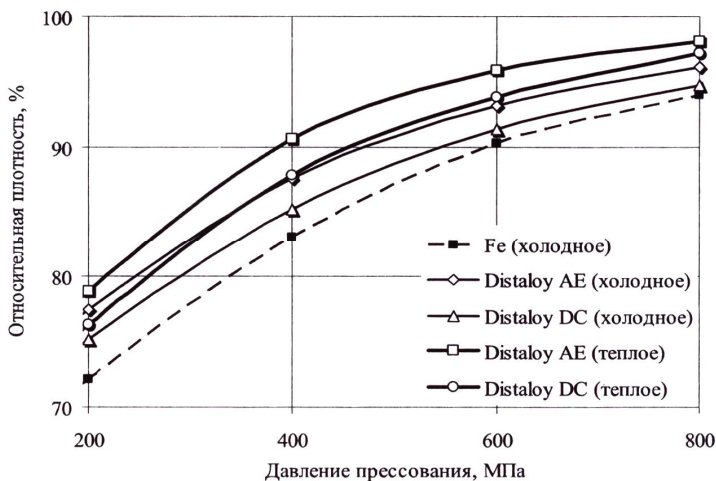


Рис. 2. Кривые уплотнения смесей при холодном и теплом прессовании в жестких матрицах

На основе метода конечных элементов определены условия и закономерности разрушения порошковых композиционных материалов, структура которых сформирована жесткими частицами основы и мягкими частицами включений при прессовании в жесткой матрице. Анализ распределения интенсивности напряжений, являющейся количественной мерой оценки склонности материала к разрушению, показал, что наиболее опасными, с точки зрения вероятности разрушения, являются вершины пор, образованных жесткими частицами.

**В пятой главе** представлены результаты разработки технологии прессования порошковых изделий повышенной плотности.

Сформулированы причины, ограничивающие возможности получения высокоплотных и прочных заготовок из износостойких порошковых материалов методом холодного прессования. Ими являются газы, находившиеся в свободно-насыпной шихте, которые при затруднительных условиях удаления из пресс-формы в



ходе прессования сжимаются до очень высоких давлений, серьезно противодействуя процессу уплотнения.

Технологическая смазка обволакивает металлические частицы и забивается во внутричастичные поры в ходе смешивания, вследствие чего препятствует удалению газов из пресс-формы при прессовании. Удаляясь, при спекании, смазка создает дополнительную пористость.

Проведена математическая оценка, позволяющая расчетным путем определить степень дренажирования газов из порошковых материалов, усредненное их давление в прессовках и изучить их влияние на характеристики изделий, получаемых при различных условиях дренажирования.

Предложен новый прием прессования порошковой шихты без стеарата цинка и устройство для его осуществления. Предложено использовать для этой цели пористую «потеющую» матрицу из нового материала, содержащего твердую смазку в виде микроталька, обладающего высокими антизадириными свойствами. Смазывание рабочей поверхности матрицы осуществляется через открытые поры порошкового материала с помощью керосина, подача которого обеспечивается гидронасосом.

Показано, что применяя новый принцип холодного прессования металлических порошков, можно достичь высокой плотности прессовок на уровне  $7,4-7,7\text{г/см}^3$  при давлениях прессования 700-1000МПа. Эти прессовки по свойствам успешно могут конкурировать с заготовками, полученными методами горячей штамповки. Отличительным признаком нового принципа прессования является то, что с увеличением давления прессования шихты до высоких значений порядка 700-1000МПа, эффективность уплотнения материала постоянно остается положительной величиной, что свидетельствует о благоприятных условиях дренажирования газов из пресс-формы по всей пористой матрицы.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Сформулирована теория пластичности пористого тела, учитывающая специфику поведения порошков при прессовании. Модель сжимаемой среды является однопараметрической, а все ее функции зависят от текущей плотности. Для определения пара-

метров модели использована равновесная плотность при сжатии несвязанных порошковых тел-такое значение плотности, начиная с которого дальнейшее деформирование не сопровождается объемными изменениями. Изложены методы определения материальных параметров модели.

2. Предложена модификация метода конечных элементов, использующая сформулированный ранее вариант теории пластичности пористого тела и предназначенная для моделирования процессов прессования порошковых материалов. Рассмотрен ряд схем прессования изделий с переходом по высоте. Проанализировано влияние внешнего трения и схемы прессования на протекание процесса уплотнения. Отдельно исследована схема уплотнения, применение которой обеспечивает получение порошковых изделий с равномерным распределением плотности. Полученные теоретические результаты достаточно близки к экспериментальным данным.

3. Предложен новый подход в моделировании прессования порошков – метод многомасштабного моделирования. В данном методе каждому макроскопическому конечному элементу задается некоторая макроструктура, рассматриваемая как представительная ячейка порошковой среды. На основании предложения о равенстве скоростей деформации макроскопического элемента и средних скоростей деформации соответствующей представительной ячейки на каждом шаге по времени определяется кинематика формоизменения как макроскопического образца, так и представительных ячеек. В качестве примера рассмотрена задача о влиянии начальной сфероидизации внутриагломератных пор на уплотнение агломерированных порошков. Новый подход позволил оценить влияние начальной формы пор в агломератах на кинетику закрытия межагломератных пор при прессовании.

4. Экспериментально исследовано уплотнение порошков карбонильного никеля и смесей на его основе, железа, алюминия и магния в условиях прессования в цилиндрических пресс-формах с непрерывной записью изменения высоты порошковой заготовки в машине для механических испытаний материалов. В рамках теории пластичности порошковых тел проанализировано деформационное упрочнение матрицы, образующей порошковое тело, в процессе прессования. Установлено, что сдвиговое напряжение теку-

чести и деформационное упрочнение матрицы порошкового тела определяют ход кривой уплотнения и достижение его конечной относительной плотности.

5. Проведены исследования в области компьютерного моделирования уплотнения порошковых композиционных материалов с различными типами структур. Определены базовые закономерности формирования свойств материалов, содержащих металлическую матрицу и включения второй (твердой, мягкой, а также поры) фазы, посредством учета в процессе их компактирования особенностей механического поведения локальных макрообъектов, обладающих свойствами композита в целом и подвергающихся внешнему силовому воздействию. Разработаны модельные структуры, характеризующие принадлежность исследуемых материалов к трем основным классификационным группам: с единичными включениями второй фазы; с сегрегационными включениями второй фазы, с перколяционным строением. Для всех модельных структур проведен конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния представленных элементов, деформируемых по схеме прессования в жесткой матрице.

6. Сформулированы основные принципы построения физической модели деформирования порошковых композиционных материалов с различной структурной организацией, определены условия, необходимые для описания структур различных типов. Построена замкнутая система определяющих уравнений, включающих базовые законы сохранения и учитывающих особенности реологии упругопластических сред, что позволяет проводить полный анализ уплотнения с учетом условий разрушения. Таким образом, сформулирована математическая модель уплотнения для анализа упругопластического деформирования порошковых композиционных материалов с различными типами структур.

7. Проведено исследование зависимости плотности от давления холодного и теплого прессования смесей Densmix на основе диффузионно-легированных порошков Distaloy AE и DC. Показано, что механизмы уплотнения порошковых смесей не зависят от температуры прессования в исследуемом диапазоне, а получение высокой плотности целиком определяется значением предела текучести основного компонента смесей. Снижение на 7-10% значений предела текучести материала низколегированных сталей при

повышении температуры прессования до 120-150<sup>0</sup>С приводит к повышенной уплотняемости смесей для теплового прессования в среднем на 2-5% от значений теоретической плотности смеси независимо от ее химического состава.

8. Теоретически и экспериментально оценен вклад в процесс формирования структуры и свойств, вносимый газами, содержащимися в порошковой шихте. Предложена концепция, учитывающая влияние условий дренажирования газов при прессовании на последующие процессы, т.е. на структурообразование, прочностные и триботехнические характеристики спеченных материалов. Разработана методика для оценки эффективности дренажирования газов из пресс-формы и определена их внутривыпускного давления в прессовках.

9. Установлено, что изделия, полученные в пресс-форме с применением «потеющей» матрицы, превосходят по свойствам в 1,3-1,5 раза соответствующие изделия, полученные традиционным методом однократного прессования, и не уступают материалам, полученным двухкратным прессованием или горячей штамповкой.

10. Разработаны конструкция «потеющей» матрицы и специальный материал для ее изготовления. Сформулированы требования, предъявляемые к материалу «потеющей» матрицы. Конструкция «потеющей» матрицы отличается сообщаемыми мелкими порами и специальными канавками, обеспечивающими подачу смазывающей жидкости к зоне между стенкой матрицы и порошком.

11. Проведенные исследования путем моделирования различных подходов к холодному и тепловому прессованию порошков различной природы позволили установить следующие основополагающие причины, которые необходимо учитывать в производстве:

- в случае прессования металлических порошков модель сжимаемой среды является однопараметрической, все ее функции зависят от текущей плотности

- в моделировании прессования порошков можно использовать многомасштабное моделирование, в котором каждому макроскопическому конечному элементу соответствует некоторая микроструктура.

- для каждого типа структур необходимо сформулировать математическую модель упругопластической среды;

- при прессовании сыпучей порошковой среды необходимо учитывать вклад газов, находящихся в порошковой шихте перед прессованием.

При получении высокоплотных заготовок можно использовать метод холодного прессования шихты без пластификатора в «потеющей» матрице.

**Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:**

1. Ш.М.Мухаммад. Особенности прессования порошковых материалов в жесткой матрице //Ученые записки АзТУ, 2011, №4, с.63-66.
2. Shereen Maqdy Mohamed. Simulation for Elastoplastic Powder Materials for Rigid Matrix.// Machine Science (International scientific-technical journal), Baku, 2012, №2, p.76-83.
3. Мухаммад Ш.М., Байрамова Ф.И. Прессование порошковых материалов, содержащих поры различной формы//Ученые записки АГМА, 2013, №1 с. 21-23.
4. Мамедов А.Т., Мухаммад Ш.М. Особенности прессования порошковых материалов в жесткой матрице//Теоретическая и прикладная механика.ААСУ, 2013, №1, с.149-152.
5. Мамедов А.Т., Мухаммад Ш.М. Особенности уплотнения легированных порошков при различных условиях прессования//Ученые записки АзТУ, 2013, спец., с. 51-55.
6. Мухаммад Ш.М. Деформационное упрочнение металлических порошков при прессовании// Прогресивні технології і системи машинобудування, г.Донецк, 2013, с.192-196.
7. Мухаммад Ш.М. Численное моделирование процессов прессования порошковых изделий сложной формы в жестких матрицах// Ученые записки АзТУ, 2012г., №1, с.53-57.
8. Мамедов А.Т., Мухаммад Ш.М. Особенности прессования порошковых материалов в жесткой матрице//Ученые записки АзТУ, 2013, №1, с.68-71.

9. Мухаммад Ш.М. Математическая модель упругопластического деформирования порошковых сжимаемых материалов//Машиноведение, 2013, №2,с.63-65.
10. Мамедов А.Т., Мухаммад Ш.М. Компьютерное моделирование уплотнения порошковых материалов//Ученые записки АзТУ, 2013, №1, с.62-66.

**Личное участие автора в опубликованных работах в соавторстве:**

[2,4] - постановка задачи и участие в проведении экспериментов, обобщение и анализ полученных научных результатов;

[5,9] - постановка задачи, участие в техническом решении и обоснование полученных научных результатов;

[1,3,6-8] - работы опубликованные без соавторов.

**ŞİRİN MAQDI AXMED MÜHAMMAD**  
**Sıxıla bilən ovuntu materiallarının elastiki-plastiki**  
**deformasiyasının fiziki əsaslandırılması və riyazi**  
**qiymətləndirilməsi**

**XÜLASƏ**

Dissertasiya işi sıxıla bilən elastiki-plastiki mühitə malik olan ovuntu materiallarının soyuq və ilıq preslənməsində baş verən proseslərin yeni mülahizələr əsasında modelləşdirilməsinə və riyazi qiymətləndirilməsinə həsr edilmişdir.

Dissertasiya işinin məqsədi sərt matrissada metallik ovuntuların elastiki-plastiki davranışının fiziki və riyazi modelləşdirilməsinin nəzəri əsaslarının işlənməsidir.

Dissertasiya işi girişdən, beş fəsildən, ümumi nəticələrdən, istifadə olunmuş ədəbiyyat siyahısından və qoşmalardan ibarətdir.

**Girişdə** aparılacaq elmi tədqiqatların məqsədi göstərilmiş, mövzunun aktuallığı və tədqiqatların vacibliyi əsaslandırılmışdır.

**Birinci fəsildə** materialların elastiki-plastiki deformasiyasının mövjud riyazi modellərinin tənqidi təhlili, sərt matrissada presləmədə gərginliklərin və məsaməliliyin paylanması hesabət metodları verilmişdir.

**İkinci fəsildə** mürəkkəb formalı ovuntu məmulatlarının sərt matrissalarda presləmə proseslərinin ədədi modelləşdirilməsi işlənməmişdir. Mürəkkəb formalı detalın müxtəlif sahələrində sıxlığın paylanmasına presləmə sxeminin təsiri tədqiq olunmuşdur.

**Üçüncü fəsildə** metallik ovuntuların soyuq preslənməsinin çoxmiqyaslı modelləşdirilməsinin işlənməsinin nəticələri və onların deformasiya möhkəmlənməsinin xüsusiyyətləri verilmişdir.

**Dördüncü fəsildə** sərt matrissada presləmədə metallik ovuntuların elastiki-plastiki davranışının modelləşdirilməsinin nəzəri əsaslarının nəticələri təqdim olunmuşdur. Elastiki-plastiki mühitin gərginlikləri və deformasiya sürətləri arasında riyazi əlaqə alınmışdır.

**Beşinci fəsildə** yüksək sıxlıqlı ovuntu məmulatlarının presləmə texnologiyasının işlənməsinin nəticələri verilmişdir. Bu məqsədlə prespəstahlın qəliblənməsində texnoloji sürtküdən istifadə etmədən «tərləyən» matrissanın istifadəsilə texnologiyanın tətbiqi tövsiyə olunur.

**SHIRIN MAGDI AHMED MUHAMMAD****Physical reasoning and mathematical estimation of elastic-plastic deformation of powder compressible materials****SUMMARY**

The thesis is based on the new provisions devoted to the modeling and mathematical evaluation of the processes occurring in cold-tion and heat pressing powdered materials with a compressible elastic-plastic medium.

The aim of the thesis is to develop the theoretical foundations of physical and mathematical modeling of elastic-plastic behavior of metal powders in a rigid matrix.

The thesis consists of an introduction, five chapters, the general of conclusions, bibliography and appendices.

In the introduction the purpose of scientific research, the substantiation Nova relevance of the topic and the need for research.

The first chapter presents a critical analysis of existing mathematical model of elastic-plastic deformation of materials, methods of calculation are given the stress distribution and porosity of the pressing in a rigid matrix.

In the second chapter developed a numerical simulation of compaction of powder in a rigid matrix of complex shapes. To investigate the impact of the scheme on the pressing density distribution at different sections of complex-shaped parts.

The third chapter presents the results of development of multiscale modeling of cold pressing of metal powders and features of their hardening.

The fourth chapter presents the results of the theoretical foundations of modeling of elastic-plastic behavior of metal powders during compression in a rigid matrix. The mathematical relationship between the voltage and speed of deformation elastic-plastic medium.

The fifth chapter gives the results of the development of technology of pressing powder products of high density. To this end, recommended The technology of molding in the "sweating" process matrix without lubrication during forming compacts.



**AZƏRBAYCAN TEXNIKI UNIVERSITETİ**

*Əlyazmalar hüququnda*

**ŞİRİN MAQDI AHMED MÜHƏMMƏD**

**SIXILA BİLƏN ÖVUNTU MATERIALLARININ ELASTIKI-  
PLASTIKI DEFORMASIYASININ FİZİKİ  
ƏSASLANDIRILMASI VƏ RIYAZI QIYMƏTLƏNDİRİLMƏSİ**

**Ixtisas: 3312.01– «Materiallar texnologiyası»**

Texnika üzrə fəlsəfə doktoru elmi dərəcəsi almaq üçün təqdim  
edilmiş dissertasiyanın

**AVTOREFERATI**

Bakı- 2014