

АЗЕРБАЙДЖАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА

На правах рукописи

**ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РАЗРАБОТКИ
МЕТАЛЛОСТЕКЛЯННЫХ ПОРОШКОВЫХ
КОМПОЗИЦИЙ**

Специальность: 3312.01 – Технология материалов

Отрасль науки: Техника

Соискатель: **Тахир Гаффар оглы Джаббаров**

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Баку - 2024

Диссертационная работа выполнена в Азербайджанском Государственном Университете Нефти и Промышленности

Научный консультант: Доктор технических наук, профессор
Мустафа Баба оглы Бабанлы

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, профессор
Аббас Абдурахман оглы Гувалов

Доктор технических наук, доцент
Зия Сахаведдин оглы Алиев

Доктор технических наук, профессор
Низами Шайы оглы Исмаилов

Доктор технических наук,
Рамин Исметбей оглы Керимов

Диссертационный совет ED 2.02 Высшей Аттестационной Комиссии при Президенте Азербайджанской Республики, действующий на базе Азербайджанского Государственного Университета Нефти и Промышленности

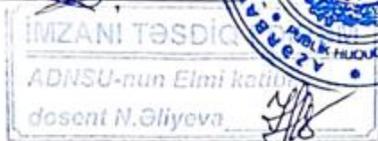
Председатель
диссертационного совета: Доктор технических наук, профессор

Ибрагим Абульфаз оглы Габибов

Ученый секретарь
диссертационного совета: 
Шукюр Нариман оглы Насиров

Председатель научно-методического семинара: Доктор технических наук, доц.

Гахраман Сулейман оглы Гасанов



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Важнейшим достижением технологии порошковой металлургии, является возможность создания уникальных комбинаций различных веществ (компонентов) в одном материале. Именно это преимущество технологии порошковой металлургии, позволило создать широчайшую гамму так называемых композиционных материалов – дисперсно-упрочненных и армированных, псевдосплавов.

Создание новых износостойких материалов, является приоритетным направлением порошковой металлургии. При этом, перед исследователями ставятся две задачи: повышение свойств материалов, с учетом возрастающих к ним требований и снижением стоимости материалов за счет использования более дешевых и доступных компонентов, а также упрощение технологического цикла изготовления износостойких изделий.

В этом контексте, создание износостойких порошковых материалов на основе железа, занимает ведущее место среди технологических процессов порошковой металлургии. Превращение чугуновой стружки и отходов стекла в порошок, позволит их использовать в качестве компонентов порошковой шихты на основе железа.

Использование в шихте порошков железа, чугуна и стекла образуется при прессовании в закрытой пресс-форме в упругопластическую среду. Известно, что чугун и стекло не обладают пластической деформируемостью, в этом случае уплотнение порошковой шихты может происходить лишь за счет пластичных частиц железа, т.е. основного компонента прессуемой шихты. Вопросы уплотнения упругопластической среды, какой является среда «железо-чугун-стекло» являются не изученными и поэтому представляют серьезный научно-практический интерес.

Объект исследования. Объектом диссертационного исследования являются порошковые композиционные металлостеклянные материалы, синтезируемые из порошков

железа, чугуна и стекла, предназначенные для изготовления деталей антифрикционного назначения.

Предмет исследования. Предметом исследования является кинетика уплотнения порошкового материала из упругопластической среды, факторы влияющие на характеристики качества межчастичного сращивания, особенности формирования структуры и свойств композиционного порошкового материала системы «железо-чугун-стекло».

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы, является разработка нового научного направления по уплотнению упругопластической среды, «железо-чугун-стекло» и оценка процессов прессования и спекания «железо-чугун-стеклянных» порошковых материалов при различных условиях и параметрах технологии прессования и спекания.

Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Выбор состава порошковой шихты упругопластической среды, состоящей из порошков железа, чугуна и стекла;
2. Разработка математических моделей процесса холодного прессования упругопластической среды, при различных условиях пассивной деформации;
3. Теоретическая и экспериментальная оценка пластической деформации пористых заготовок из «железо-чугун-стекла» при радиальном обжатии их в жесткой оправке;
4. Построение единой математической модели процессов обработки давлением порошковых шихт и пористых заготовок из «железо-чугун-стекла»;
5. Оценка уплотнения пористых тел из «железо-чугун-стекла» с участием пресс-оснастки разной формы;
6. Оценки силовых и кинематических параметров, при пластической деформации пористых заготовок из «железо-чугун-стекла»;
7. Разработка математических моделей процесса спекания металлостеклянных материалов на основе железа.

Аналитическое описание кинетики спекания этих материалов;

8. Оценка основных преимуществ использования ситаллизированного стекла в железочугунных порошковых материалах и расчет коэффициента диффузии компонентов;
9. Экспериментальное исследование процессов прессования и спекания металлостеклянных материалов;
10. Разработка предпосылок для внедрения результатов исследований в производство в Азербайджанской Республике.

Методы исследования. В диссертационной работе, применены современные методы исследований: известные положения теории композиционных порошковых материалов для построения математической модели статического деформирования, устойчивости; численные и численно-аналитические методы решения краевых задач для расчета напряженно-деформированного состояния; построение модели с использованием FCM кластеризации экспериментальных данных, чтобы вывести нечеткие правила IF-THEN, описывающие связь между составом и свойствами, а также связь между свойствами материала и технологическими параметрами. Экспериментальные работы по получению образцов и деталей, т.е. по прессованию, спеканию, паротермическому оксидированию осуществляли с использованием современного оборудования, установок и приборов фирм “KoyoLindberg” (США), Mannesman “Elino” (Германия). Изучения механических и триботехнических характеристик, проведены по стандартным методикам, а исследования микроструктур на металлографическом микроскопе “NEOFOT– 21 (Германия)” и на растровом электронном микроскопе TescanVega 3.

Дилатометрические исследования для определения кинетики спекания и закономерности усадки, проводили на высокотемпературном дилатометре DIL402-2 (NETZSCH). Достоверность теоретических и экспериментальных результатов, подтверждена в лабораторных и производственных условиях. Опытно-промышленная апробация технологии

получения порошкового композиционного материала «железо-чугун-стекло», проводилась в производственных условиях при изготовлении деталей 8ТЛ.210.005 «Втулка».

Результаты диссертации могут быть применены не только на машиностроительных и нефтегазовых предприятиях Азербайджанской Республики, но и на соответствующих предприятиях стран СНГ и дальнего зарубежья.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Новый состав шихты из композиционного порошкового материала типа «железо-чугун-стекло»;
2. Математические модели процесса холодного прессования пористых тел в упругопластической среде;
3. Экспериментальная оценка пластической деформации пористых заготовок из «железо-чугун-стекла»;
4. Математическая модель процессов обработки давлением порошковых шихт и пористых заготовок из «железо-чугун-стекла»;
5. Результирующие уравнения для уплотнения пористых тел в упругопластической среде;
6. Процессы уплотнения пористых тел из «железо-чугун-стекла» в пресс-формах разной формы;
7. Результаты оценки силовых и кинематических параметров при пластической деформации спеченных пористых заготовок из «железо-чугун-стекла»;
8. Математическая модель процесса спекания металлостеклянных материалов на основе железа;
9. Технология производства износостойких порошковых изделий из «железо-чугун-стекла», разработанная на основе данных теоретических и экспериментальных исследований.
10. Модели зависимости между составом материала «железо-чугун-стекло» и его свойствами в виде нечетких правил «ЕСЛИ-ТО», полученных путем применения метода нечеткой кластеризации С-средних к экспериментальным данным. Аналогично, получены нечеткие правила «ЕСЛИ-ТО», описывающие связь между технологическими параметрами и свойствами материала.

Научная новизна. Разработаны математические модели уплотнения порошкового материала из упругопластической среды. Определено, что при чрезмерном росте радиальных деформаций, пористость прессовок практически остается неизменной. Процесс уплотнения, спеченного «железо-чугун-стекла» состоит из двух стадий: первое – изменение формы и объема тела, второе – лишь изменение формы без уплотнения тела.

На основе применения метода нечеткой кластеризации Средних экспериментальных данных, построены нечеткие правила «ЕСЛИ-ТО», описывающие связь между составом материала «железо-чугун-стекло» и его свойствами. Данные правила, позволяют компактно описать рассматриваемую зависимость в условиях неточности, неопределенности и сложности большого объема экспериментальных данных. На основе построенных правил синтезирован материал с заданными характеристиками (т.е. определен состав материала, при котором могут достигаться заданные характеристики).

Построены нечеткие правила «ЕСЛИ-ТО», описывающие связь между технологическими параметрами и свойствами материала «железо-чугун-стекло». Эти правила представляют собой лингвистическую модель, позволяющую интерпретировать зависимости, содержащиеся в сложных и несовершенных экспериментальных данных. Исходя из правил, синтезирован материал с заданными характеристиками (т.е. определено количество исходных компонентов шихты и значения технологических параметров, при которых могут достигаться заданные характеристики).

С использованием методов микроструктурного анализа и испытания на твердость пористого тела, получено новое представление о распределении пористости материала, деформации зерен и их взаимосвязи, а испытания на твердость позволили определить механические свойства компонентов напряженно-деформированного состояния тела.

Построена математическая модель процессов обработки давлением порошковых шихт и пористых заготовок из «железо-

чугун-стекла», которая позволила определить при пластическом течении участие с общими тензорными соотношениями скалярного соотношения, связывающего между собой компоненты тензора напряжений.

Проведено математическое моделирование процесса спекания металлостеклянных материалов на основе железа. Установлено, что при топологически непрерывно преобразовывающейся структуре порошкового материала в процессе спекания, количественный анализ кинетики изменения линейного параметра пористой структуры можно проводить с использованием общих закономерностей диффузионной коаленценции дисперсной системы.

Определены основные преимущества использования стекла в металлостеклянных материалах. В микроструктуре «железо-чугун-стекла» после спекания, кроме металлической матрицы, пор и свободных включений стекла, может присутствовать новая фаза в виде фаялита и гематита в результате взаимодействия металла со стеклом.

Произведен расчет коэффициентов диффузии компонентов шихты из «железо-чугун-стекла» по экспериментальным данным. Определено, что при высоких температурах преимущественное значение имеет объемная диффузия, которая выражается снижением механической прочности частиц, повышением пластичности и способности их к объемному течению в металле под действием сил поверхностного натяжения.

Практическая ценность работы. С учетом разработанных теоретических положений прессования порошковых шихт и пористых заготовок, а также спекания прессонок и с использованием данных экспериментальных исследований, разработана технология производства износостойких порошковых материалов из «железо-чугун-стекла». Использование в составе шихты отходов производства чугуна и стекла, позволило существенно снизить себестоимость разработанного износостойкого материала.

Разработаны предпосылки и рекомендации для внедрения результатов исследований в производство, при изготовлении деталей узлов трения нагруженных насосов и других деталей, используемых в нефтегазодобывающей промышленности Азербайджанской Республики.

Реализация результатов в промышленности. Научные разработки и технические решения, изложенные в диссертации, направлены на создание и совершенствование различных способов прессования и спекания композиционных материалов типа «железо-чугун-стекла», экономии материальных и энергетических ресурсов. Результаты разработок диссертации, внедрены на предприятиях «Азнефтхиммаш» при производстве износостойких деталей, использованных на оборудовании и установках нефтегазодобывающей отрасли Азербайджанской Республики.

Апробация работы. Материалы диссертации доложены, обсуждены и одобрены на:

1. Gənc alimlərin və aspirantların Respublika konfransı. – Bakı, Dekabr, 1997 .
2. AzTU-nun aspirant və gənc tədqiqatçıların elmi texniki konfransı. – Bakı, 12-15 aprel 2002.
3. 46-cı Tələbə elmi-texniki konfransı AzTU, Bakı, 1-3 may 2003.
4. Azərbaycan Respublikasının Ümummilli Lideri Heydər Əliyevin 80-illik yubileyinə həsr olunmuş “Aspirant və Gənc Tədqiqatçıların Elmi-Texniki konfransı”. – Bakı, 12-15 may 2003.
5. Ali məktəb tələbələrinin XIX Respublika elmi konfransı, Bakı, Konfrans Azərbaycan Respublikası Təhsil Nazirliyinin 31.01.2003-cü il tarixli 93 sayılı əmrinə əsasən 16-17 may 2003-cü ildə AMİU-də keçirilmişdir.
6. “Metallar fizikasının müasir problemləri” Beynəlxalq elmi-praktik konfransı. – Bakı, AMİU, 9- 11 oktyabr 2007.
7. International Conference. “Thermophysical and mechanical properties of advanced materials” and 4th Rostocker international symposium”. Thermophysical properties for technical thermodynamics”. – AzTU, Baku, 17-18 September 2015.
8. “Metallar fizikasının müasir problemləri” V Beynəlxalq elmi-

- praktik konfrans. – AMİU, Bakı, 10-11 iyun 2016.
9. Maşınqayırmada intellektual texnologiyalar. Beynəlxalq elmi praktik konfrans. Bakı, 28-30 sentyabr, 2016.
 10. Tələbə və gənc tədqiqatçıların “Gənclər və elmi innovasiyalar” mövzusunda Respublika elmi-texniki konfransı. – Bakı, AzTU, 3-5 may, 2017.
 11. “Metallurgiya və materialşünaslığın problemləri” mövzusunda 2-ci Beynəlxalq elmi-texniki konfransı. Bakı,28-30 noyabr,2017.
 12. Tenth World Conference “Intelligent Systems for Industrial Automation”, WCIS-2018, Tashkent, Uzbekistan, 25-26 October, 2018.
 13. International Conference on Research in Natural and Engineering Sciences (ICRNES 2020), Konya, Turkey.
 14. Fifth International Iron-Steel Symposium. April 1-3, Karabuk, Turkey.
 15. 11th World Conference “Intelligent System for Industrial Automation”, WCIS – 2021, AISC1323, Tashkent, Uzbekistan.
 16. Second International Scientific-Practical Conference “Modern Information, Measurement and Control Systems: Problems and Perspectives 2020” (MIMCS 2020) dedicated to the: 100th anniversary of ASOIU. – Baku, Azerbaijan, December 07-08, 2020.
 17. “Su nəqliyyatının problemləri” XVIII Beynəlxalq elmi-texniki konfrans.“Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyası”PHŞ,Bakı, 4-5 may 2023

Материалы, представленные в диссертационной работе, используются при выполнении курсовых и выпускных работах бакалавров и магистерских диссертациях Азербайджанского Государственного Университета Нефти и Промышленности и Азербайджанского Технического Университета.

Название организации, где выполнена диссертационная работа. Диссертационная работа выполнена в Азербайджанском Государственном Университете Нефти и Промышленности на кафедре “Материаловедение и технологии обработки”.

Личный вклад соискателя в проведенных исследованиях.

В диссертации, работа по обоснованию актуальности поставленных задач путем изучения литературных данных, по выбору методов исследования и применения их в решении задуманных научных проблем, по исполнению запланированных экспериментов на всех этапах исследования, обобщению и систематизации полученных результатов выполнялась непосредственно соискателем. Анализ результатов экспериментов, а также обсуждение работы на научных конференциях, составление научных статей на основании полученных результатов также выполнялись самим автором.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, выводов и рекомендаций, списка используемой литературы, включающего 264 наименований и приложений.

Работа изложена на 310 страницах компьютерного текста, содержит 76 рисунков и 11 таблиц. 1 глава состоит из 61366, 2 глава из 62300, 3 глава из 49728, 4 глава из 57801, 5 глава из 37904, 6 глава из 61140 знаков. Общий объем работы состоит из 380930 знаков.

Публикации. Основные результаты диссертации получены автором и достаточно полно опубликованы в 18 статьях и 17 материалах конференций. Получено авторское свидетельство №1752508 8 апреля 1992 г.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности работы, сформулированы цель и задачи исследований, а также изложены основные результаты, имеющие научную новизну и практическую значимость.

В первой главе проведен литературный обзор по проблемам создания самосмазывающихся композиционных материалов с гетерогенной структурой. Установлено, что внимание исследователей в области создания порошковых материалов с гетерогенной структурой, сосредоточены на принципе получения таких материалов с использованием

промышленных отходов. Указано, что такими отходами, пригодными для производства порошковых материалов с гетерогенной структурой, могут быть чугунная стружка и отходы стеклянного производства.

Изучена и проанализирована возможность создания новых износостойких порошковых материалов, синтезируемых из смеси порошков железа и чугуна. Установлено, что для получения железочугунных композиций наиболее эффективным компонентом, может быть порошок белого чугуна, углерод которого при спекании эффективно взаимодействует с железной матрицей.

Результаты исследования железочугунных композиций показывают, что спекание железочугунных композиций необходимо активизировать наличием в системе жидкой фазы. Таким компонентом железочугунных композиций может быть, например, стекло, которое имеет более низкую температуру плавления, чем железо и чугун.

Установлено, что немаловажным фактором для успешной работы износостойких композиционных порошковых материалов, является конструктивное оформление узлов трения, где определяются условия подачи смазки в зону трения.

Результаты испытаний показали, что втулки из пористых порошковых износостойких материалов, имеют значительно меньший износ в условиях жидкостного трения по сравнению с антифрикционным компонентным - чугуном, который не имеет резервуар масла в виде пор.

На основании проведенного литературного обзора, можно отметить, что порошковые износостойкие материалы представляют большой интерес с материаловедческой точки зрения. Так, например, несмотря на то, что имеются многочисленные исследования по холодному прессованию и спеканию пластичных сред, а исследования по упругим пластичным средам отсутствуют. Следовательно, при исследовании пластичных сред можно применить законы и положения теоретически для пластичности, а упругих – теории упругости. В случае разработки процессов формирования

упругопластической среды не та, не другая теория не подходит. Значит, нужен другой неординарный подход.

Существующие модели уплотнения металлических порошков [211]¹, удовлетворительно описывая функциональные зависимости между отдельными параметрами, не могут служить, для вышеуказанных целей.

Во-первых, они являются, как правило, статическими, в то время как консолидируемое порошковое тело представляет собой неравновесную термодинамическую систему с нелинейной внутренней динамикой, а значит, в уравнение состояния ее среды прочих параметров должно входить время. Это условие, удовлетворяет лишь теории горячей обработки пористых материалов, давлением. Кроме того, технологические режимы очень чувствительны к изменениям температуры и скорости прессования чего, как правило, не учитывают существующие модели процесса уплотнения упругопластической среды. Следовательно, для адекватного моделирования технологического прессования компонентов шихты, необходимо пользоваться расширенной системой внешних и внутренних термодинамических параметров, τ , время t , температура T , внешнее давление P (или скорость нагружения P), а также набор обобщенных реологических параметров, характеризующих физико-химические свойства частиц порошка и их форму (μ_R). Процесс уплотнения должен описываться дифференциальным уравнением в виде:

$$\frac{d\tau}{dt} = \Phi(\tau, t, T, P\{\mu_R\}), \quad (1)$$

где $\frac{d\tau}{dt}$ - скорость изменения относительной плотности пористого материала в процессе уплотнения; $\Phi(\tau, t, T, P\{\mu_R\})$ - некоторая функция внешних и внутренних параметров.

1. Hewift R.L., Wallace W. de Molherbe M.S. The effects of Abrain- hardening in powder compaction//Powder Metallurgy, 2002, 16, № 31, pp.88-106.

Уравнения состояния системы, должны быть получены в результате интегрирования выражения (1). В работе [112]² среди которых, как минимум, должны быть: относительная плотность предпринята попытка построения феноменологической теории процесса прессования, лишь гомогенных процессов в закрытой пресс-форме, удовлетворяющей вышеуказанным требованиям, а также рассмотрены пути применения ее в качестве базовой модели для описания процессов прессования металлических порошков и моделирования технологических производственных процессов. Следовательно, такая модель не отвечает условиям уплотнения упругопластической среды, где необходимо учитывать, как теорию пластичности, так и теорию упругости. Таким образом, как видно из литературного обзора, в настоящее время нет устойчивой теории прессования порошковых материалов, содержащих как пластичные элементы, так и упругие. Поэтому, разработка новых моделей, учитывающих радиальное обжатие пористого тела, стадии уплотнения, условия как пассивной, так и активной деформации, и других параметров прессования упругопластической среды, является весьма актуальной задачей. Кроме того, необходима математическая оценка уплотнения при односторонней, двусторонней прессованиях и прессовании с плавающей матрицей. Это позволит определить, более энергетический вариант уплотнения материалов. Например, можно исследовать радиальное обжатие пористых втулок из «железо-чугун-стекла» на предмет определения его энергетики при уплотнении.

Необходимо построить единую математическую модель процессов обработки давлением порошковых шихт и пористых заготовок из «железо-чугун-стекла». При этом можно получить результирующие уравнения для уплотнения пористых тел, в присутствии упругопластической среды. Кроме того, для уплотнения таких материалов, немаловажное значение имеет форма формирующего инструмента при прессовании.

2. Нигматулин, Р.И. Основы механики гетерофазных сред // - М: Наука, - 2008. - с. 336.

Существенным моментом, является математическое моделирование процесса спекания металlostеклянных порошковых пресовок. Таким образом, можно аналитически описать кинетику спекания порошковых материалов, диффузионные процессы железа и углерода при участии стекла и других включений эндогенного и экзогенного происхождения.

Возможно, оценить основные преимущества использования в составе порошкового железочугуна, ситаллизированного стекла. Причем можно определить предэкспоненциальный множитель коэффициента диффузии порошкового сплава и ситаллизированного стекла.

И наконец, разработанные модели процессов прессования, спекания, отжига и др. процессов могут являться теоретической базой для обработки технологических режимов этих операций. На основе этих моделей, есть возможность правильно построить экспериментальные исследования, уменьшая количество экспериментов на основе верных точных прогнозов.

Во второй главе выбраны составы порошковых шихт и исследованы свойства их компонентов. Для улучшения межфазного взаимодействия, а, следовательно, повышения механических свойств и износостойкости, в шихту, содержащую стекло, необходимо ввести компоненты, имеющие лучшую смачиваемость с ним [2]³.

К такому эффекту, может привести использование чугуна в составе шихты, поскольку чугун содержит большое количество кремния и марганца, которые в процессе нагрева в окислительной среде образуют трудно восстанавливаемые оксиды.

Известно, что оксиды металлов лучше смачиваются друг с другом, чем чистые металлы оксидами [3]⁴.

3. Oksidləmə parametrlərinin ЖЧ50СТ6 ovuntu kompozisiya materialının mexaniki xassələrinə təsiri, Cabbarov T.Q., Soltanov A.B.

4. Oksidləşdirilmiş dəmir-çuqun-şüşə sistemli ovuntu kompozisiya materialının tribotexniki xassələrinə bəşirmə temperaturunun müddətinin təsiri. Cabbarov T.Q., Soltanov A.B.

Надо полагать, что в процессе спекания, оксиды кремния и марганца хорошо будут смачиваться стеклом, образуя прочные соединения.

Эта концепция, являлась основой выбора железа, чугуна и стекла для получения композиционных спеченных материалов.

Для устранения недостатков, присущих известным материалам, либо содержащих дефицитные компоненты, либо имеющих низкие свойства, была разработана шихта для получения металлостеклянного материала, защищенная авторским свидетельством [50]⁵.

В ее составе использовали порошок, получаемый из стружки серого чугуна, выпускаемого по ТУ 16-89 ВАИК 41 1100.006ТУ и содержащего (мас.%): углерод – 3,0 - 3,8; кремний – 1,5 – 2,8; марганец – 0,5 - 1,0; фосфор – 0,05 - 0,1; сера– 0,05-0,1.

Шихта, получается смешиванием в Y-образном смесителе в течение 2,4 кс порошков железа марки ПЖ2МЗ ГОСТ 9849-74 – 40 - 88 мас.%, чугуна – 10 - 50 мас.% и вакуумного стекла марки С88-5 ОСТ 11027. 037-79 – 2 - 10 мас.%.

Выбор содержания чугуна порошка в интервале 10-50 мас.%, объясняется тем, что данный интервал нами изучен в предыдущих материалах и является наиболее подходящим, с точки зрения технологичности шихты и обеспечения достаточно высоких свойств спеченного материала.

Содержание стекла в шихте, рекомендуется не превышать более 10 мас.%, в противном случае ухудшаются ее технологичность и свойства спеченного материала.

5. Шихта для получения износостойкого спеченного материала на основе железа //Авторское свидетельство №1752508, 8 апреля 1992г. Джаббаров Т.Г., Мамедов А.Т.

Выбор состава материала «железо-чугун-стекло», обосновали теоретическим [174]⁶ и экспериментальным способами [8]⁷.

При теоретическом обосновании состава шихты построили нечеткие правила «ЕСЛИ-ТО», описывающие связь между составом материала и свойствами.

Правила построены на основе экспериментальных данных, с использованием нечеткой кластеризации С-средних [216]⁸.

Задача нечеткой кластеризации С-средних, состоит в разбиении множества данных $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ в n -мерном пространстве на c нечетких кластера и формулируется следующим образом:

Целевая функция:
$$J_m = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^c u_{ij}^m \|x_i - v_j\|^2 \rightarrow \min$$

Ограничения:

$$u_{ij}^m = \frac{1}{\sum_{j=1}^c \left(\frac{\|x_i - v_j\|}{\|x_i - v_k\|} \right)^{\frac{2}{m-1}}},$$

$$v_j = \frac{\sum_{i=1}^n u_{ij}^m x_i}{\sum_{i=1}^n u_{ij}^m},$$

$$1 \leq m < \infty,$$

здесь u_{ij} - степень принадлежности объекта данных x_i j -му нечеткому кластеру;

6. Soft Computing and Its Application. World Scientific. Aliev, R.A., Aliev, R.R.
 7. Konstruksiya ovuntu poladları üçün xrom tərkibli legirləyici əlavələrin seçimi. M.B. Babanlı, Cabbarov T.Q.
 8. Synthesis of "iron-cast iron-glass" obsolete powder composite materials using fuzzy logic and big data base concepts Jabbarov, T.G.

$\|\cdot\|$ – Эвклидово расстояние;

m – параметр, определяющий нечеткость кластеров;

v_j – центр j -го нечеткого кластера.

Целевая функция, значение которой необходимо минимизировать – сумма расстояний элементов кластеров до центров.

Экспериментальные данные характеризуются неопределенностью. Входными переменными модели, являются количества исходных компонентов шихты. Выходными переменными, являются механические свойства композиционного материала «железо-чугун-стекло». Целью, является построение модели зависимости между составом материала и его свойствами с учетом неопределенности.

Нечеткое разбиение (стандарт), использованное при построении правил, показано на рисунке 1.

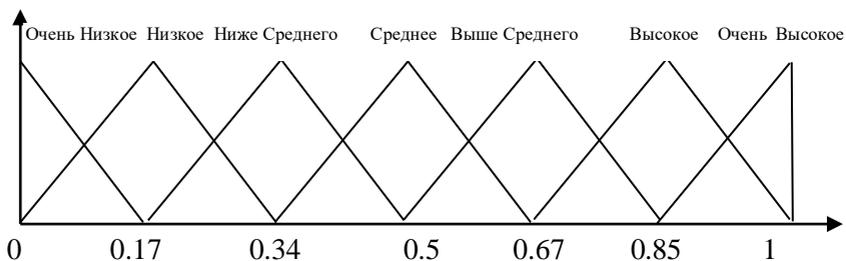


Рисунок 1. Нечеткое разбиение

Графическое представление правил дано на рисунке 2.

Для расчета состава материала по заданным характеристикам, был применен алгоритм нечеткого логического вывода Мамдани [173,124-142],[265]. Данный алгоритм кратко изложен ниже.

Согласно алгоритму нечеткого логического вывода Мамдани, при заданных значениях входных переменных

(y_1^*, \dots, y_n^*) , значение выходной переменной модели $z_l^*, l=1, \dots, L$ вычисляется следующим образом:

1. Находятся значения функций принадлежности

$$\mu_{A_{j1}}(y_1^*), \dots, \mu_{A_{jn}}(y_n^*) \text{ нечетких входных термов } A_{j1}, \dots, A_{jn}$$

2. Определяются степени активации правил:

$$\alpha_j = \mu_{A_{j1}}(y_1^*) \wedge \dots \wedge \mu_{A_{jn}}(y_n^*),$$

где \wedge – операция логического минимума (\min).

3. Вычисляются «усеченные» функции принадлежности $\mu'_{B_{jl}}(z_l)$ выходного термина B_{jl} :

$$\mu'_{B_{jl}}(z_l) = \alpha_j \wedge \mu_{B_{jl}}(z_l).$$

4. На основе операции объединения нечетких множеств, вычисляется итоговое нечеткое множество с функцией принадлежности μ_Σ для выходной переменной:

$$\mu_\Sigma(z_l) = \mu'_{B_{l1}}(z_l) \vee \dots \vee \mu'_{B_{cl}}(z_l),$$

где \vee – операция логического максимума (\max).

5. Четкое значение выходной переменной $z_l^*, l=1, \dots, L$ вычисляется на основе дефаззификации по методу центра тяжести:

$$z_l^* = \frac{\int_{\underline{z}_l}^{\bar{z}_l} z_l \cdot \mu_\Sigma(z_l)}{\int_{\underline{z}_l}^{\bar{z}_l} \mu_\Sigma(z_l)},$$

где \underline{z}_l и \bar{z}_l соответственно нижняя и верхняя грани универсума (диапазона) для z_l , \int – символ интеграла.

Полученные правила могут быть использованы для определения состава материала по заданным характеристикам. Например, пусть необходимо получить материал со следующими характеристиками:

$$z_1=302; z_2=259; z_3=88; z_4=22; z_5=73.6,$$

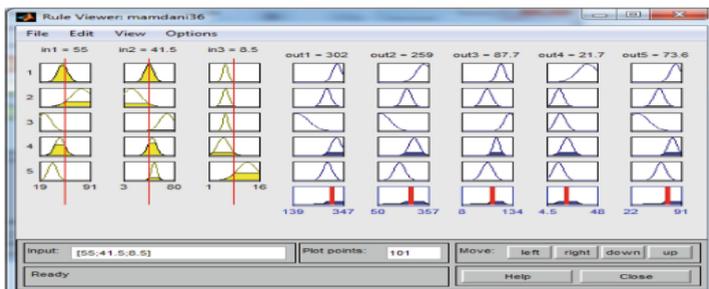


Рисунок 2. Графическое описание нечетких правил

где z_1 -предел прочности при растяжении(σ_b , МПа);
 z_2 - предел прочности при изгибе(σ_u , МПа);
 z_3 -твердость (НВ, МПа);
 z_4 -ударная вязкость (КС, кДж/м²);
 z_5 -относительная плотность (θ ,%) композиционного материала «железо-чугун-стекло».

Расчет на основе полученных правил показал, что данные характеристики достигаются при следующем составе:

$$y_1=55; y_2=41.5; y_3=8.5,$$

где y_1 -количество железного порошка (в мас. %);
 y_2 -чугунного порошка (в мас. %);
 y_3 -стекляного порошка (в мас. %).

При экспериментальном обосновании выбора состава шихты, в качестве параметров для оптимизации выбрали содержание чугуна и стекла, а также дисперсности их частиц. Прессование призматических образцов (55x10x10 мм) проводили под давлением 1000 МПа в обычных условиях, а спекание при 1150 °С в среде эндотермического газа в течение 3,6 кс [6]⁹. Наиболее высокие механические свойства имеют образцы, содержащие 30 – 50 мас.% чугуна с размерами частиц от 100 до 160 мкм и 2 – 6 мас.% порошка стекла (50 – 200 мкм).

9. ЖЧЗ0Ст6 ovuntu kompozisiya materialının struktur və xassələrinə presləmə təzyiqinin təsiri. Cabbarov T.Q., İbrahimov A.M.

Коэффициент трения (f) и износ (J) материала изучали при сухом трении на стандартной машине СМЦ-2 по схеме «призматический образец – втулка» из стали 45, закаленной до твердости 50 HRC. Давление на образец было постоянное и составляло 4,0 МПа, при скорости скольжения 1,0 м/с.

Образцы прессовали в обычных условиях под давлением 1000 МПа и спекали в эндогазе при температуре 1150 °С.

Выбор столь высокого давления прессования объясняется плохой прессуемостью шихты, из-за порошков стекла и чугуна.

Зависимость f и J от содержания чугунного (а) и стеклянного (б) порошков, показывает, что при увеличении содержания чугунного порошка в шихте (при содержании стеклянного порошка 6 мас.%) от 10 до 50% f и J имеют тенденцию к снижению. В дальнейшем они резко повышаются, что связано с интенсификацией износа обусловленного низким механическими свойствами материала этого состава. Таким образом, лучшими антифрикционными свойствами обладает материал, содержащий 50 мас.% чугуна, который использовали для исследования. Более высокие антифрикционные свойства, достигаются при 6%-ном содержании стекла в шихте. При повышении содержания стеклянного порошка в шихте до 10% хрупкость материала возрастает, что приводит к выкрашиванию твердых частиц, а значит к абразивному износу. При понижении также существенно ухудшаются f и J , что связано с худшими механическими свойствами материала.

Изучили влияние температуры и продолжительности спекания на f и J .

С увеличением температуры спекания от 1050 до 1150°С f и J улучшается, что объясняется упрочнением материала и ситализацией стекла. Увеличение продолжительности спекания при температуре 1150°С в диапазоне 1 – 3 часа, поначалу улучшает f и J , а затем ухудшает их. Это связано с образованием крупных скоплений расплавленного стекла. Проводили также исследования по влиянию марки стекла. Образцы прессовали в пресс-форме с использованием «потеющей» матрицы под

давлением 1000 МПа и спекали при температуре 1150°C, как следует из приведенных в табл.1 данных, износостойкий порошковый материал на основе железа (составы 1 – 3) имеет достаточно высокие механические и антифрикционные свойства. Использование в составе шихты стекла иной марки (составы 4,5) приводит к их снижению, что связано с тем, что вакуумное стекло содержит большее количество SiO₂, MnO, Ba₂O₃, [51]¹⁰, которые хорошо смачиваются с частицами железа и чугуна, имеющие на поверхности оксиды.

Главным условием в данном случае является наличие на поверхности металлов оксидов, температура плавления которых должна существенно превышать температуру расплава стекла. Уменьшение содержания чугуна и стекла менее 10 и 2 мас.%, соответственно, приводит к снижению механических свойств материала, а повышение их содержания более 50 и 10 мас.%, затрудняет процесс прессования порошковой шихты.

Разработан способ повышения прочности металлостеклянных материалов заключающийся в том, что прессовки перед спеканием подвергаются паротермическому оксидированию в печи типа «Элино» при температуре 570–600 °С в течение 7,2 кс. Спекание оксидированных образцов проводится в среде эндотермического газа в печи типа «KOYO LINDBERG» при температуре 1150°C с изотермической выдержкой 3,6 кс. С целью подавления восстановления оксидов, образцы укладываются в металлические поддоны и сверху засыпаются порошком талька. Последний активизирует межфазное взаимодействие оксидов железа, кремния, марганца и стекла.

Микроструктура материалов ЖЧ10С2 и ЖЧ20С4, спрессованных при давлениях 400, 700 и 1000 МПа, парооксидированных представлена на рис.3.

10. Разработка композиционных порошковых материалов «железо-чугун-стекло» для деталей бытовой техники. Дис.на соиск. уч. степ. канд.техн.наук. Джаббаров Т.Г

В процессе спекания системы «железо-стекло» стекло расплавляется, на его границе с металлом происходит взаимодействие свободного кремнезема с оксидом металла. Далее оксиды растворяются в стекле и образуются комплексные соединения – силикаты. В материалах системы «железо-чугун-стекло» этот механизм протекает несколько иначе. Поскольку чугун содержит активный восстановитель в виде включений графита, то при нагреве появляется опасность удаления оксидов с поверхности металла, а, следовательно, смачивание их со стеклом не наблюдается.

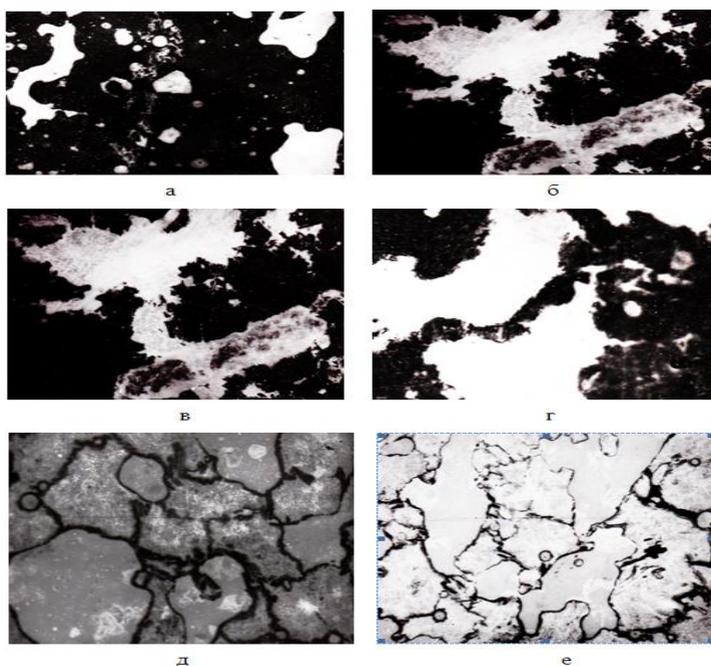


Рисунок 3. Микроструктура «железо-чугун-стекла», $\times 400$:
а, б; в, г; д, е; давление прессования 400;700 и 1000 МПа, соответственно, а, в, д; б, г, е содержание чугуна и стекла 10 и 2; 20 и 4 мас.%, соответственно

Поэтому предложен принцип образования на поверхности разнородных частиц «родственных» фаз и включений,

обеспечивающих их межфазное взаимодействие при спекании. Этот принцип, реализуется путем проведения паротермического оксидирования неспеченных заготовок.

Установили, что образуемые при этом трудновосстановимые оксиды SiO_2 , MnO а также оксиды железа хорошо растворяются в стекле при спекании [221]¹¹, (рис.4).

Таблица 1
Составы шихт и свойств полученных из них материалов

№ состава	Содержание компонентов в шихте, мас.%		Марка стекла	Состав чугуна, мас.%					Крупность порошка стекла, мкм	Крупность порошка чугуна, мкм	Отношение крупности порошков чугуна и стекла	Свойства спеченных материалов			
	Порошок чугуна	Порошок стекла		C	Si	Mn	P	S				σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	KC, кДж/м ²	f
1	10	2	C88-5	3,8	1,5	0,5	0,05	0,05	10	100	1:0,1	453	907	95	0,15
2	30	6	C88-5	3,4	2,1	0,75	0,075	0,075	50	150	1:0,3	475	970	116	0,14
3	50	10	C88-5	3,8	2,8	1,0	0,1	0,075	100	200	1:0,5	490	1050	125	0,12
4	50	6	№40	3,4	2,1	0,75	0,075	0,075	50	150	1:0,3	340	750	78	0,22
5	50	6	№46	3,4	2,1	0,78	0,075	0,075	50	150	1:0,3	350	760	80	0,21

Спеченные сплавы ЖЧ10С2 и ЖЧ20С4 имеют ярко выраженную гетерогенную структуру – металлическую матрицу и равномерно распределенные стеклянные включения.

Структура металлической матрицы представлена перлитом и ферритом, в сплаве ЖЧ20С4 наблюдается также структурно-свободный цементит.

11. Saturation of glass particles with meal during sintering of a composite material of the iron-glass system Jabbarov T.G.,Aslanov J.N,Shahmarova R.S.

Стеклянные частицы в процессе спекания изменяли свою форму с осколочной, на более округлую (рис.5).

Первый уровень гетерогенности, наблюдается между металлической матрицей и включениями стекла, второй – в самой матрице, которая содержит, как твердые, так и мягкие включения.

Увеличения давления прессования от 400 до 1000 МПа повышает σ_b , $\sigma_{и}$ и КС пароокислованных и спеченных материалов (рис.6–8).

σ_b существенно повышается с увеличением давления от 400 до 700 МПа, а дальнейшее увеличение его до 1000 МПа несколько замедляет интенсивность ее повышения.

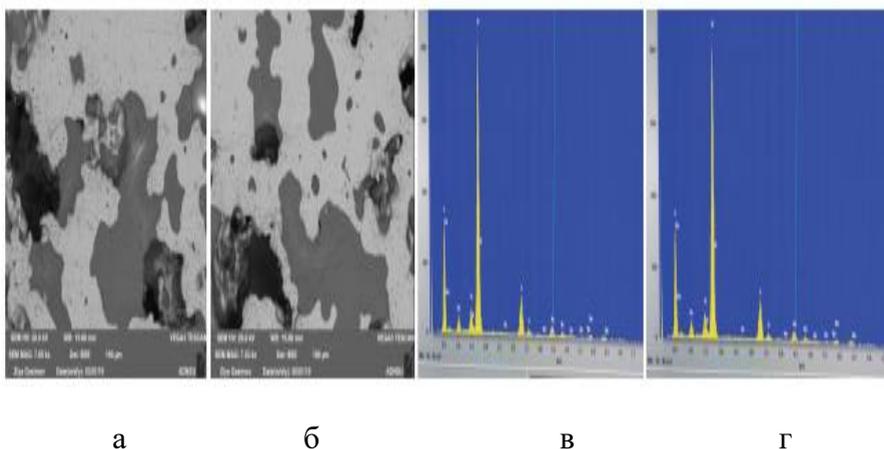


Рисунок 4. Насыщение частиц стекла Mn, Si и Fe-ом входивших в состав железо-, «железо-чугун-стеклянных» материалов:

а, в–железо-стеклянный; *б, г* – «железо-чугун-стеклянный»

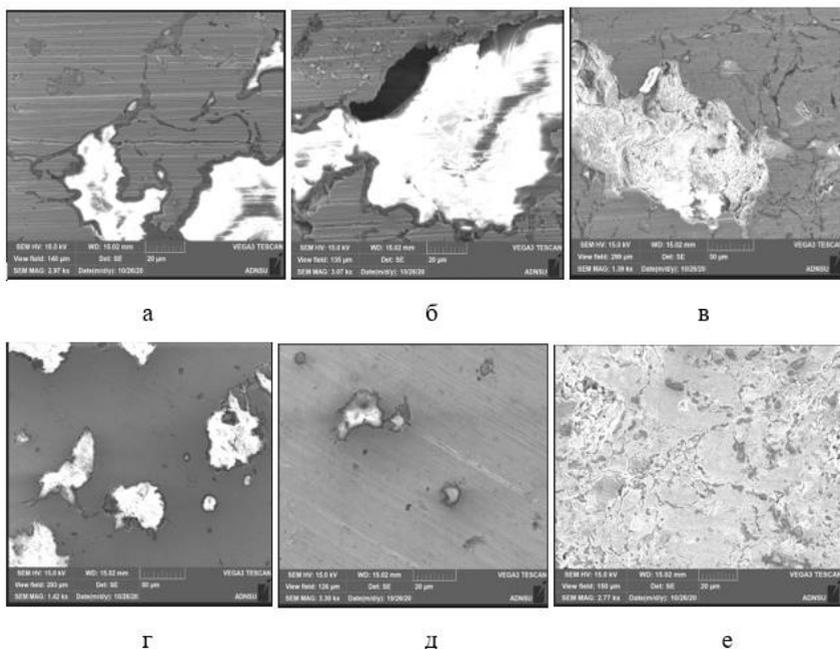


Рисунок 5. Изменение формы стеклянных частиц в процессе спекания: а, б; в, г; д, е; давление прессования 400;700 и 1000 МПа, соответственно, а, в, д; б, г, е содержание чугуна и стекла 10 и 2; 20 и 4 мас.%, соответственно.

В сплаве ЖЧ20С4 в этих условиях прочность даже несколько снижается (рис.б). Объясняется это тем, что повышение давления прессования до 1000 МПа для сплава с содержанием чугуна 20 и стекла 4 мас.%, приводит к разрушению частиц стекла, которое является очагами трещин и разрывов в прессовке. Увеличение содержания чугуна и стекла в шихте, также способствует повышению прочности материалов.

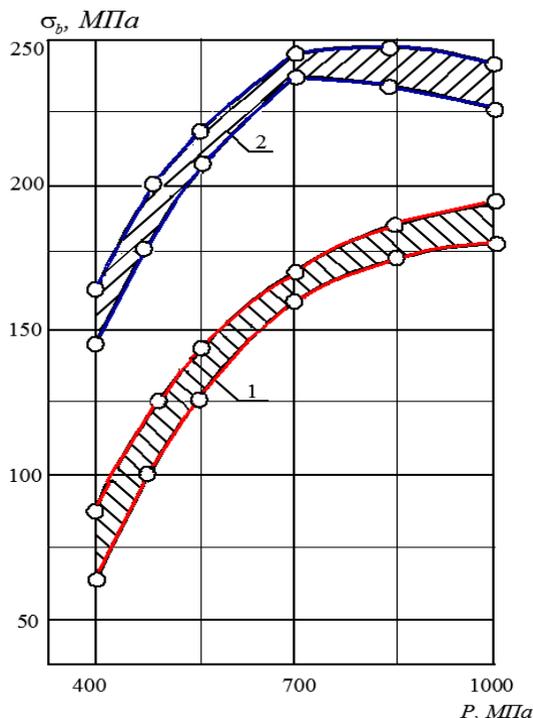


Рисунок 6. Зависимость σ_b от содержания чугуна и стекла в шихте и от давления прессования: 1; 2 – содержание чугуна и стекла в шихте 10; 20 и 2; 4 мас.% соответственно

$\sigma_{и}$ с увеличением давления прессования резко возрастает (рис.7). Она увеличивается с увеличением содержания чугуна и стекла, соответственно до 20 и 4 мас.%. Вероятно, чем больше стекла, а значит жидкой фазы в сплаве, тем сильнее при спекании происходит пропитка пористого каркаса жидкостью, сопровождающаяся усадкой и гомогенизацией сплава.

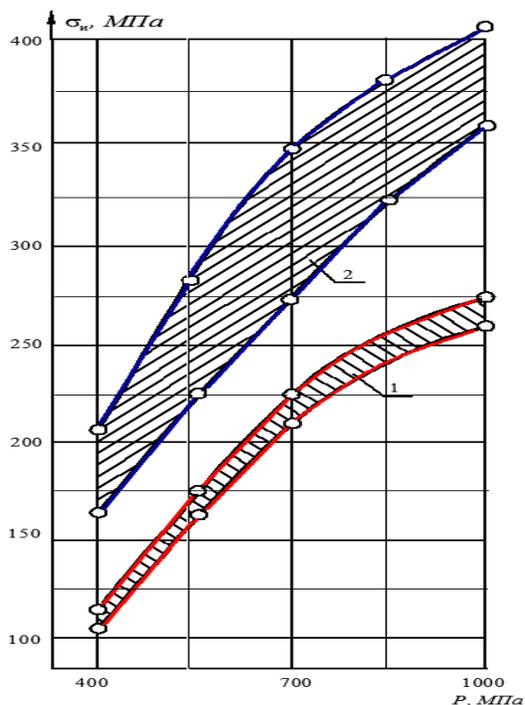


Рисунок 7. Зависимость $\sigma_{с}$ материалов от содержания чугуна и стекла в шихте и давления прессования: 1; 2 – содержание чугуна и стекла в шихте 10; 20 и 2; 4 мас.% соответственно

График зависимости КС образцов от давления прессования не отличается от аналогичного графика $\sigma_{с}$ (рис.8). Однако увеличение содержания чугуна и стекла в материалах почти не повышают КС образцов ввиду того, что они являются природно-хрупкими компонентами. Наряду с исследованиями процесса пароксидирования прессовок из «железо-чугун-стекла» изучали также влияние оксидирования на воздухе на механические свойства.

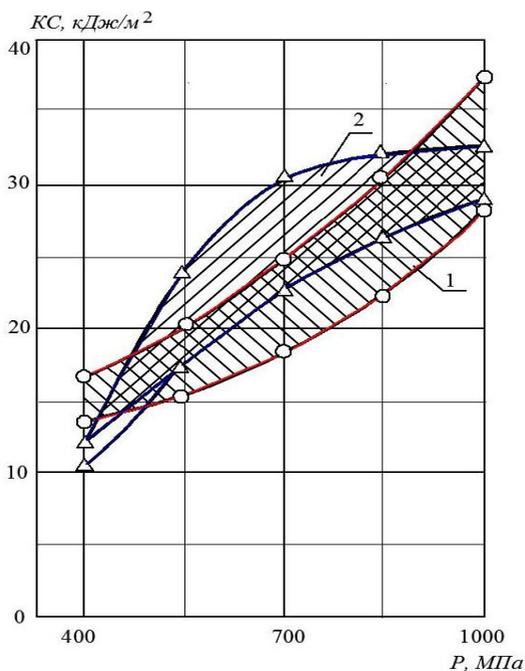


Рисунок 8. Зависимость K_C материалов от содержания чугуна и стекла в шихте и давления прессования: 1; 2 – содержание чугуна и стекла в шихте 10; 20 и 2; 4 мас.% соответственно

Оксидирование проводили в обычной печи без защитной среды при температурах: 200, 400 и 600 °С с изотермическими выдержками: 1, 2 и 3 часа. Прессовки получали под давлением 1000 МПа прессованием в обычных условиях. Оксидированные прессовки спекали в печи в среде эндогаза при температуре 1150 °С. В результате изучения влияния температуры оксидирования на свойства спеченного материала было установлено, что лучшие свойства получаются при температуре оксидирования 200 °С и изотермической выдержке 1 час. Однако наиболее высокую твердость образцы обнаруживают при температуре оксидирования 400 °С. с увеличением температуры оксидирования до 600 °С ударная вязкость образцов резко

снижается, что объясняется повышением хрупкости материала при оксидировании.

Исследование зависимости механических свойств спеченного материала от продолжительности оксидирования при температуре 200 °С, показали, что самые высокие σ_b , σ_{II} КС и НВ образцы обнаруживают при продолжительности оксидирования 1 час. Это связано со структурными изменениями в стекле и химическим взаимодействием между оксидами металла и стеклом [52]¹². Стекло лучше насыщается железом, а матрица - кремнием. Растворение кремния в α – железе увеличивает в 1.5 раза ударную вязкость материала, приводит к уменьшению параметров решетки и увеличению его пластичности. В последнем изучали взаимосвязь технологических параметров прессования – спекания и механических свойств оксидированных образцов. Судя по данным рис.9 и 10, в целом лучшие механические свойства образцов достигаются при температуре оксидирования 200 °С и изотермической выдержки 1,0 часа, и поэтому дальнейшие эксперименты проводили с использованием этих режимов. Как видно из рис.9, с увеличением давления прессования прессовок их механические свойства повышаются, что согласуется с общепринятыми закономерностями.

Таким образом, проведения оксидирования прессовок перед спеканием, не изменяет характер формирования механических свойств материала в зависимости от давления прессования. Поэтому для получения образцов из «железа-чугун-стекла» с высокими механическими свойствами, наиболее приемлемым является давление прессования 1000 МПа.

С увеличением температуры спекания образцов, спрессованных под давлением 1000 МПа, от 1050 до 1100 °С σ_b , σ_{II} и КС несколько повышаются, а НВ имеет тенденцию к снижению.

12. Влияние режимов спекания порошковых оксидированных заготовок на их механические свойства. Джаббаров Т.Г., Бабаев А.И.

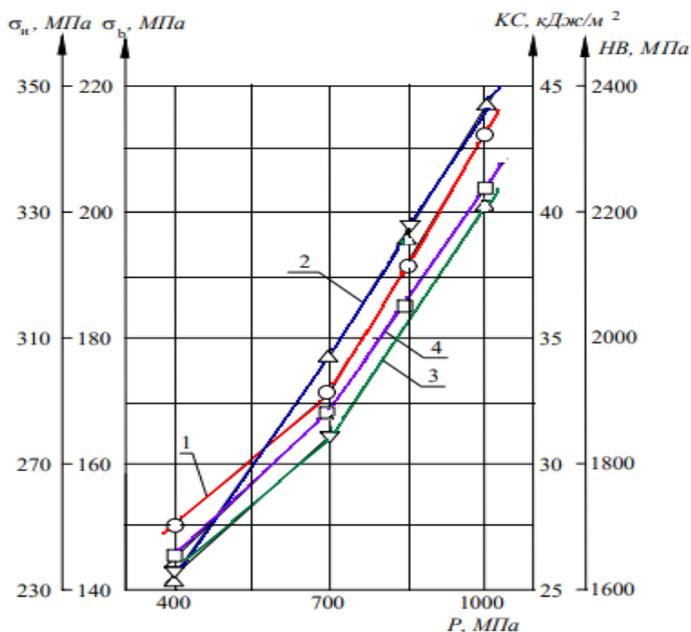


Рисунок 9. Зависимость механических свойств материала ЖЧ50С6 от давления прессования: 1 - σ_b ; 2- σ_n ; 3 – КС; 4 – НВ

Дальнейший рост температуры спекания образцов до 1150 °С вызывает существенное повышение всех механических свойств (рис.10). Поэтому эту температуру можно считать оптимальной для данного класса материалов. По-видимому, смачивание частиц, имеющих на поверхности «родственные» фазы (оксиды), образованные в результате оксидирования, интенсифицируется при этой температуре.

Увеличение продолжительности спекания от 1 до 2 часов повышает σ_b , КС и снижает σ_n НВ, что связано со ситализацией стекла, а, следовательно, улучшением его вязкости. Дальнейшее увеличение продолжительности спекания до 3 часов снижает σ_b , σ_n и КС материала, а НВ наоборот, резко повышается. Это объясняется усилением миграции

расплавленного стекла и повышением гетерогенности структуры материала. Иными словами, при этом образуются крупные скопления стекла, которые, положительно влияя на твердость, повышают хрупкость материала (рис.11).

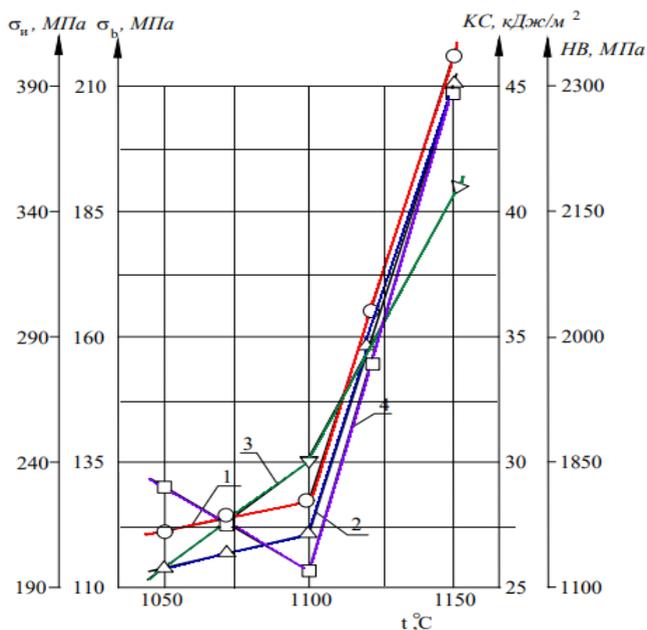


Рисунок 10. Зависимость механических свойств материала ЖЧ50С6 от температуры спекания:
 1 - σ_b ; 2 - $\sigma_{и}$; 3 – КС; 4 – НВ.

Триботехнические характеристики материала, подвергнутого пареокидированию перед спеканием, приведены в таблице 2, из которой видно, что в условиях сухого трения при нагрузке 2 – 8 МПа коэффициент трения композиций снижается с увеличением содержания чугуна и стекла. По-видимому, здесь положительную роль играют включения графита и комплексные соединения (силикаты), которых тем больше, чем выше содержание чугуна и стекла в сплаве. Образцы получали в

пресс-форме с «потеющей» матрицей. По износостойкости сплав ЖЧ10С2 имеет лучшие показатели по сравнению со сплавом ЖЧ20С4.

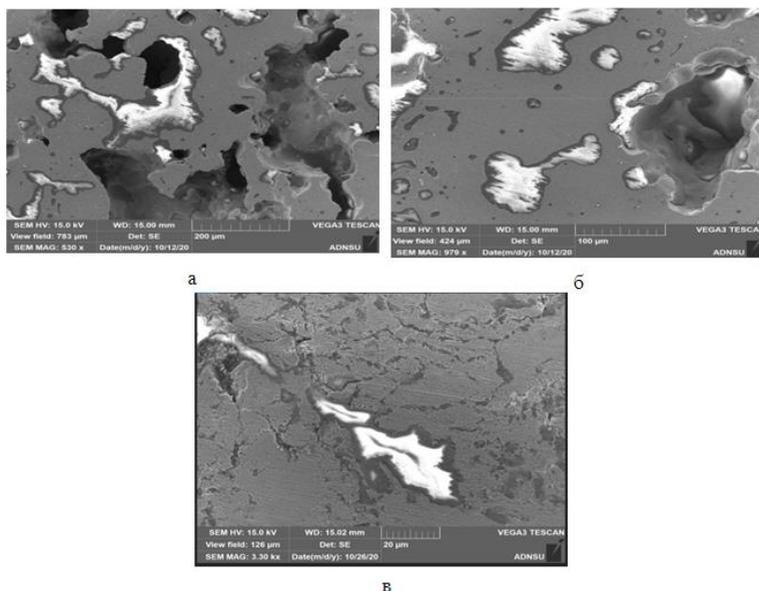


Рисунок 11. Образование в структуре крупных скоплений стекла при продолжительности спекания 3 часа: а-ЖЧ10С2; б-ЖЧ20С4; в-ЖЧ50С6

Если квалифицировать эти сплавы по работоспособности, то можно применять следующую последовательность: сплав ЖЧ10С2 с пористостью 20% обладает работоспособностью до 6 МПа, 14% - до 8 МПа, 10% - до 10 МПа; сплав ЖЧ20С4 с пористостью 22% - до 4 МПа, 13 – 16% - до 6 МПа. Это объясняется тем, что с повышением содержания чугуна и стекла последние в большей мере снижают механические свойства сплава. При нагрузке 2 МПа разница в работоспособностях так отчетливо не прослеживается, как при повышенных нагрузках. Влияние температуры и продолжительности оксидирования на

триботехнические характеристики материала ЖЧ50С6, исследовали в условиях сухого трения под нагрузкой 2 МПа. Образцы прессовали под давлением 1000 МПа в обычных условиях. Самые низкие f и J имеют образцы, оксидированные при температуре 200°C изотермической выдержкой 2 часа.

Таблица 2

**Триботехнические характеристики «железо-чугун-стекла»
при сухом трении**

Нагрузка при трении, МПа	Давление прессования образцов, МПа		
	400	700	1000
2	<u>0,194 – 0,20</u> 30	<u>0,194 – 0,20</u> 8	<u>0,155 – 0,175</u> 8
	<u>0,155 – 0,163</u> 12	<u>0,163 – 0,18</u> 12	<u>0,175 – 0,182</u> 6
4	<u>0,165 – 0,17</u> 110	<u>0,194 – 0,21</u> 102	<u>0,155 – 0,19</u> 62
	<u>0,136 – 0,145</u> 250	<u>0,139 – 0,145</u> 86	<u>0,145 – 0,155</u> 76
6	<u>0,155 – 0,159</u> 310	<u>0,177 – 0,18</u> 160	<u>0,155 – 0,16</u> 92
	<u>0,148 – 0,155</u> 445	<u>0,129 – 0,134</u> 243	<u>0,142 – 0,145</u> 510
8	<u>0,143 – 0,147</u> 2000	<u>0,150 – 0,155</u> 380	<u>0,131 – 0,136</u> 274
	<u>0,124 – 0,126</u> 2000	<u>0,136 – 0,14</u> 1900	<u>0,130 – 0,136</u> 1200
10	-	<u>0,143 – 0,146</u> 800	<u>0,147 – 0,25</u> 242
12	-	-	0,153 – 0,155

Повышение температуры оксидирования, приводит к образованию крупных оксидных включений, которые

отрицательно влияют как на механические, так и на триботехнические свойства порошковых образцов.

Увеличение продолжительности оксидирования также отрицательно сказывается на антифрикционных свойствах. Самые низкие f и J достигаются лишь при температуре оксидирования 200 °С и изотермической выдержке 1,0 час. Интенсивное зарастивание поверхности частиц железа и чугуна, а также пор и поровых каналов оксидами не лучшим образом действует на формирование механических и антифрикционных свойств. Тем не менее, надо отметить, что принцип формирования на поверхности разнородных частиц «родственных» фаз и включений с целью повышения механических и антифрикционных свойств спеченных материалов является эффективным. Судя по данным рис.18 оптимальными режимами оксидирования прессовок являются: температура – 200°С и продолжительность – 1,0 час.

Разработаны математические модели холодного прессования пористых тел и «железо-чугун-стекла» в упругопластической среде. Для теоретической оценки уплотнения упругопластической среды нами была использована шихта, состоящая из порошков специального серого чугуна, железа марки ПЖ2М3 (ГОСТ 9849-86 Российской Федерации) и вакуумного стекла марки С88-5 ОСТ11027. Состав серого чугуна состоял (в масс.%) углерода 3,6 – 3,8, кремния 1,5 – 2,8, марганца 0,5 – 1,0, фосфора 0,05 – 0,1, серы 0,05 – 0,1. Этот чугун выпускается по ТУ 16-89 ВАИК 411100.006 ТУ.

Содержание компонентов шихты было распределено следующим образом, масс. %: чугунный порошок – 45; вакуумное стекло – 5 и железный порошок – остальное. Такое состояние компонентов, обеспечивало получение упругопластической среды.

После холодного прессования под давлением 700 МПа и спекания прессовок при температуре 1150° в среде эндотермического газа, получили пористое тело с пористостью – 12%.

На основе представлений о среднеквадратичных напряжения и скоростях деформации в пористом теле, развитых в [104]¹³, в [105]¹⁴ предложена модель пластического поведения пористых тел, состоящих из упругопластической среды.

В отличие от существующих моделей, данная модель позволяет охарактеризовать поведение пластической деформации пористого тела не только его текущей пористостью, но и мерой пластической деформации, накопленных в материале основы.

Таким образом, предложенная в [104]¹³ теория пластичности пористого тела учитывает геометрический и физический факторы упрочнения этой среды.

В соответствии с общей методологией механики сплошной среды, компоненты тензоров скоростей деформаций и напряжений, которые описывают макросостояние исследуемой упругопластической среды, обязаны удовлетворять основным законам сохранения. Поэтому имеет место уравнение равновесия

$$\frac{d\sigma_z}{dz} + \frac{d\tau_{rz}}{dr} + \frac{\tau_{zz}}{r} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{d\tau_{rz}}{dz} + \frac{\sigma_r - \sigma_\varphi}{r} = 0 \quad (3)$$

и уравнение неразрывности

$$\dot{\varepsilon} = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} = \frac{\dot{\theta}}{1-\theta}.$$

13. Исследование радиального и осевого уплотнения пористого тела методами механики сжимаемого континуума. Мартынова И.Ф., Скороход В.В., Штерн М.Б.

14. Уравнение пластичности пористого тела, учитывающее истинные деформации материала основы. Мартынова И.Ф., Штерн М.Б.

Согласно [104]¹³ скорости деформации связаны ассоциированным законом, который приводит к соотношениям соосности девиаторов напряжений и скоростей деформации

$$\frac{\dot{\varepsilon}_z - \frac{1}{3}\dot{\varepsilon}}{\sigma_z - \frac{1}{3}\sigma} = \frac{\dot{\varepsilon}_r - \frac{1}{3}\dot{\varepsilon}}{\sigma_z - \frac{1}{3}\sigma} = \frac{\dot{\varepsilon}_\varphi - \frac{1}{3}\dot{\varepsilon}}{\sigma_\varphi - \frac{1}{3}\sigma} = \frac{\dot{\gamma}_{rz}}{\tau_{rz}}, \quad (4)$$

а также к уравнению

$$\dot{\gamma}r\varphi(\theta) = \dot{\varepsilon}t\psi(\theta). \quad (5)$$

Уравнение (5) характеризует сжатость пористой упругопластической среды, необратимо изменяющей свой объем. Это соотношение показывает, что материал уплотняется лишь в случае, когда гидростатическое давление не равно нулю, хотя оно может иметь место при неизменном P . Если материал беспористый, то соотношение $\varphi : \psi = 0$. Следовательно, и $\dot{\varepsilon} = 0$, то есть материал не уплотняется. Установлено, что при достаточно больших радиальных обжатиях пористого тела, изменение объема пренебрежимо мало, то есть по мере роста радиальных деформаций пористость практически не изменяется. Полученные результаты для радиального обжатия позволяют заключить, что в диапазоне изменения пористости $1/3 < \theta < 2/3$, условия для уплотнения материала при радиальном обжатии благоприятнее, чем при одноосном.

Процесс формирования спеченного пористого тела из «железо-чугун-стекла» можно разделить на две стадии. На первой из них происходит изменение как формы, так и объема тела, а на второй – лишь изменение формы, то есть уплотнение тела не происходит. На первой стадии формирования, большое значение имеет соотношение объемной и радиальной деформации.

Исследовано уплотнение металлостеклянных пористых тел, в условиях ограниченной пассивной деформации. Получены результаты уплотняемости спеченного пористого «железо-чугун-стекла», в случае радиального обжатия пористого элемента (при наличии жестких стенок с торцов и сжатия в закрытой пресс-форме). Основные результаты связывают силовые параметры, необходимые для достижения заданной плотности, с ее текущим и начальным значением. По нашему мнению, целесообразно провести сравнительный анализ энергоемкости рассмотренных в работе схем деформирования. По-видимому, энергоемкость является одним из основных критериев, позволяющих выбирать оптимальную схему получения материала с заданной пористостью.

Выведем общую формулу зависимости затраченной работы от пути деформирования. Известно, что в общем случае работа A вычисляется по формуле:

$$A = \int_0^t \frac{1}{\rho} \cdot \sigma_{ij} dt \quad (6)$$

Постулат об однозначности диссипативной функции [171]¹⁵, а также связь между плотностью и пористостью позволяет привести это выражение к виду:

$$A = \frac{1}{\rho_k} \int_0^t \sigma_{ij_0} \dot{\varepsilon}_{ij_0} dt, \quad (7)$$

Предполагается, что указанный материал идеально жесткопластический не сжимаем и обладает свойствами, описываемыми в рамках модели Сен-Венка-Мизеса. Поэтому справедливым является соотношение:

$$\frac{\dot{\gamma}_0}{\tau_0} (\sigma_{ij_0} - P_0 \sigma_{ij}) = \dot{\varepsilon}_{ij_0}, \quad (8)$$

15. Влияние схемы прессования на напряженно-деформированное состояние изделий типа втулок. Штерн М.Б. и др.

при помощи которого выражение для A преобразуем в

$$A = \frac{1}{\rho_k} \int_0^t \tau_0(\gamma_0) \cdot \dot{\gamma}_0 dt \quad (9)$$

$$\text{или } A = \frac{1}{\rho_k} \int_P^{\gamma_0} \tau_0(\gamma_0) \cdot d\gamma_0 \quad (10)$$

Таким образом, установлено что, наиболее энергетически выгодно радиальное обжатие с жесткими стенками. Менее выгодно одностороннее прессование и еще менее – радиальное обжатие с неограниченной продольной деформацией.

Наибольшие энергетические затраты требуется для уплотнения материала методом свободной осадки.

Проведено радиальное обжатие пористых втулок из «железо-чугун-стекла», упрочняемых в жесткой оправке, являющейся энергетически более выгодным процессом.

Установлено, что при радиальном обжатии пористых втулок в жесткой оправке, плотность уплотняемого тела равномерно распределяется по радиусу. Полученный при этом результат, можно рассматривать как начальное приближение к истинному решению задачи, которое находят методом итерации.

Осуществлена экспериментальная оценка пластической деформации пористых заготовок из «железо-чугун-стекла». При этом для оценки пластической деформации пористого тела, использованы методы микроструктурного анализа (рис.12.) и испытания на твердость.

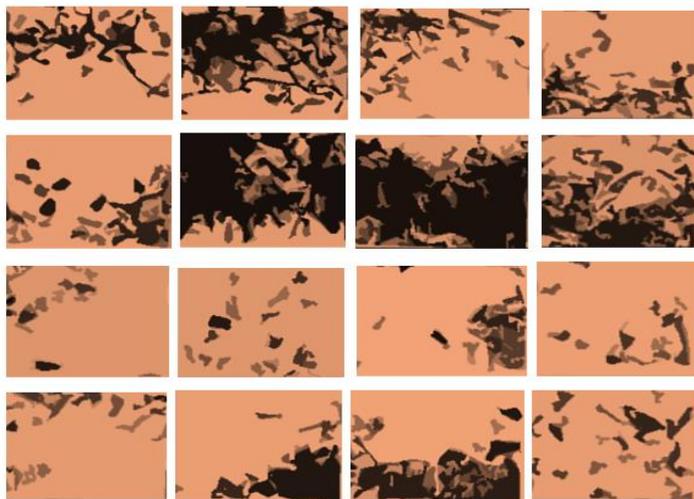


Рисунок 12. Микроструктура четверти осевого сечения образца после неустановившегося процесса прессования через коническую матрицу, x400

Микроструктурный анализ дает представление о распределении пористости материала, деформации зерен и их взаимосвязи, а испытания на твердость служит для определения механических свойств и компонентов напряженно-деформированного состояния материалов.

Испытания на твердость и микроструктурный анализ спеченных цилиндрических заготовок, деформированных при свободной осадке и прессовании в конических матрицах, показали справедливость теоретических расчетов, выполненных методом конечных элементов.

В третьей главе рассмотрены теоретические положения для уплотнения пористых заготовок из «железо-чугун-стекла». Построена математическая модель процессов обработки давлением порошковых шихт и пористых заготовок из «железо-чугун-стекла». Установлено, что в случае пластического течения наряду с общими тензорными соотношениями, существует скалярное соотношение, связывающее между собой компоненты

тензора напряжений.

Скалярные свойства уплотняемого пористого тела, могут быть охарактеризованы уравнениями, выражающих зависимости гидростатического давления p и интенсивности касательных напряжений τ от пористости и параметров, характеризующих состояние материала порошка и пористого тела. Функции p и τ обязаны удовлетворять уравнению:

$$\frac{dp}{dS}S + \frac{d\tau}{dS} = 0, \quad (11)$$

при этом p является монотонно возрастающей, ограниченной функцией $S = \ell/\gamma$, а τ при $S \leq 0$ возрастает, при $S = 0$ достигает максимума, а при $S \geq 0$ убывает: при $|S| \rightarrow \infty$; $\tau \rightarrow 0$

При пластическом деформировании уплотняемых материалов, гидростатическое давление может оказывать влияние на сдвиговые деформации, а касательные напряжения могут приводить к изменению объема.

Наряду с указанной существует форма определяющих уравнений, выражаемых уравнением поверхности нагружения

$$f(p, \tau, \theta, \chi_k) \cong \tau - \tau(p, \theta, \chi_k) = 0 \quad (12)$$

и соотношением

$$\frac{dF}{dP} \cdot \gamma = \frac{df}{d\tau} \cdot \ell \quad (13)$$

В случае строго выпуклой поверхности нагружения, эти две формы эквивалентны.

Предложено решение задачи о неустановившемся процессе прессования цилиндрической пористой заготовки через коническую матрицу метода конечных элементов, а также прессования пористой и биметаллической заготовки переменного сечения через коническую матрицу метода конечных элементов. По распределениям пористости, определены зоны больших и малых деформаций. В качестве исследуемого материала использовали заготовки-спеченное «железо-чугун-стекло» (содержание шихты – порошок железа

ПЖ2М3-47%, порошок серого чугуна – 47 %, порошок вакуумного стекла – 6 % по массе).

Исследовано напряженно-деформированное состояние при двустороннем уплотнении пористых заготовок в жестких цилиндрических матрицах, методом конечных элементов. Рассмотрены также случаи уплотнения биметаллических заготовок. Двустороннее уплотнение пористых биметаллических цилиндрических заготовок в закрытых цилиндрических матрицах показывает, что сравнительно большим деформациям (а, следовательно, уплотнению) подвергаются «пластичные» элементы биметалла. Причем твердый слой металла внедряется внутрь «пластичного», что подтверждается экспериментами [223]¹⁶.

Произведена оценка силовых и кинематических параметров при пластической деформации спеченных пористых заготовок из «железо-чугун-стекла».

Установлено, что, несмотря на конечные величины давлений уплотнения (равные пределу текучести материала основы), соответствующие нулевым значениям пористости, достичь беспористого состояния материала при осадке невозможно. Это объясняется тем, что теоретически для достижения нулевой пористости требуется бесконечно большое усилие.

В четвертой главе проведено математическое моделирование процесса спекания металлостеклянных материалов, на основе железа. Для улучшения межфазного взаимодействия и интенсификации явлений диффузии, а, следовательно, повышения механических свойств и износостойкости железо-стеклянных материалов, их необходимо легировать компонентами, более смачиваемыми стеклом.

16. Analysis of the Influence of the Shape of the Matrix on the Compaction of Porous Powder Bodies of “Iron-Cast Iron-Glass” 11th World Conference “Intelligent System for Industrial Automation” (WCIS-2020), Jabbarov T.G.

К такому эффекту может привести, например, использование чугунного порошка в составе шихты, поскольку чугун содержит сравнительно большое количество кремния и марганца, обладающих свойством образования трудно восстанавливаемых оксидов при нагреве.

Следует ожидать, что эти оксиды в процессе спекания будут хорошо смачиваться стеклом и тем самым способствовать его прочному соединению с металлической основой [218]¹⁷. В период быстрого повышения температуры, используемого до начала изотермической выдержки, в процессе спекания активных порошков обычно достигается значительное уплотнение со скоростями, намного превышающими скорость после перехода к изотермическому (жидкофазному) спеканию.

Для математического описания усадки решающее значение приобретает выбор зависимой переменной.

В качестве такой зависимой переменной рекомендуется использовать относительный объем пор v_c/v_n , где v_n и v_c – объемы пор образца до и после спекания. При спекании тел с разной плотностью на близкие значения отношения пористости тел Π_c/Π_n после и до спекания (Π – пористость, определяемая как доля объема пористого тела) при значительном изменении плотности пористого тела до спекания, d_n [г/см³], отношение Π_c/Π_n не может быть постоянным в процессе спекания, что следует из зависимостей:

$$v_c/v_n = [d_n(d_k - d_c)]/[d_c(d_k - d_n)] \quad (14)$$

$$\Pi_c/\Pi_n = (d_k - d_c)/(d_k - d_n), \quad (15)$$

где d_c – плотность пористого тела после спекания;

d_k – плотность компактного вещества (без пор).

$$\Pi_c = 1 - \frac{1 - \Pi_0}{1 - \left(\frac{\Delta V}{V_0}\right)^2}, \quad (16)$$

17. Modelling of the Sintering Process of Iron Based Metal-Glass Materials.- Progress in physics of metals. Jabbarov T.G., O. A. Dyshin, M. B. Babanli, I. I. Abbasov

Теоретическая зависимость между объемной усадкой $\Delta V/V_0$ и достигаемой при спекании максимальной величиной межчастичных контактов для порошков со сферической формой частиц, получается на основании анализа геометрии приконтактной зоны.

При припекании по механизму объемной или поверхностной самодиффузии образование контакта, не сопровождается сближением частиц, т.е. объемная усадка в этом случае отсутствует. Если же припекание осуществляется за счет вязкого течения или диффузии вакансий в контакте границы, способной неограниченно поглощать вакансии, то в этом случае получается следующее соотношение между относительным сближением частиц, т.е. линейной усадкой $\Delta l/l_0$, и объемной усадкой $\Delta V/V_0$.

$$\Delta V/V_0 = 3 \Delta l/l_0 \quad (18)$$

В идеализированных моделях кинетики спекания обычно предполагается, что во время спекания работает какой-либо один механизм массопереноса и что массоперенос осуществляется в точке контакта между двумя одинаковыми сферами. Однако необходимо иметь в виду, что при спекании реальных образцов, частицы могут иметь разные формы и размеры и каждая частица контактирует сразу с несколькими частицами, причем контакт на практике не бывает идеальным (точечным) и в местах контакта частицы, как правило, сплющены при компактировании. Но, самое главное, массоперенос в реальных образцах контролируется не каким-либо одним процессом, а несколькими.

Начальная стадия спекания характеризуется образованием и ростом шейки между частицами, сопровождаемым усадкой образца, за исключением случаев, когда массоперенос происходит лишь за счет испарения/конденсации или объемной и поверхностной диффузии. Усадка в начальной стадии спекания достигает всего лишь нескольких процентов и происходит до тех пор, пока поры в образце почти полностью связаны между собой и пронизывают весь объем.

При топологически непрерывно преобразовывающейся структуре порошкового материала в процессе спекания, количественный анализ кинетики изменения характерного линейного параметра пористой микроструктуры L (L – средний размер зерен образца) можно осуществить с помощью общей теории диффузионной коалесценции дисперсных систем. Если основным механизмом массопереноса является поверхностная диффузия, то кинетическое уравнение для L принимает вид :

$$L^4 = L_0^4 + \frac{B_1 \gamma D_s \cdot \delta^4}{kT} \cdot t, \quad (19)$$

где D_s – коэффициент поверхностной диффузии; $\Delta L = L - L_0$ – толщина слоя, в котором осуществляется поверхностная диффузия, порядка атомного диаметра δ ; γ – поверхностное натяжение; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; t – время; B_1 – численная постоянная, приближенно равная 30; L_0 – начальное значение параметра L до спекания.

Уравнение (19) удовлетворяет многим экспериментальным данным для оксидных и металлических порошков. Для металлических островковых пленок, коалесценция происходит преимущественно по механизму поверхностной диффузии адатомов (адсорбирующих атомов).

Дифференцируя (19) по t , получим дифференциальное уравнение кинетики изменения L :

$$\frac{dL}{dt} = \frac{B_1 \gamma D_s \cdot \delta^4}{4L^3 kT} \quad (20)$$

Таким образом, для математического описания процесса спекания смеси порошков построена система нелинейных дифференциальных уравнений кинетики уплотнения и роста зерен на последовательных температурных режимах. Путем “припасовывания” решений этих уравнений на стыках температурных режимов и интегрирования полученной системы уравнений с помощью метода Рунге-Кутты четвертого порядка,

построена численная дискретизация по времени непрерывных кривых пористости и зернистости.

Исследуемая смесь порошков железа, серого чугуна и ситаллизованного стекла (ситалла) рассмотрена как система из двух компонентов *A* и *B*. Компонент *A* – соединение железа с ситаллом Fe_2SiO_4 (называемое фаялитом), а компонент *B* – соединение железа с углеродом FeC (чугун). Коэффициент гетеродиффузии данной бинарной системы, вычислен по формуле Даркена. Коэффициент гетеродиффузии \tilde{D} бинарной системы из компонентов *A* и *B*, согласно Даркену, выражается через парциальные коэффициенты диффузии D_A и D_B с помощью соотношения

$$\tilde{D} = c_B \cdot D_A + c_A \cdot D_B, \quad (21)$$

где c_A и c_B – концентрации компонентов *A* и *B* (в нашем случае $c_A = c_B = 0,5$).

При реологическом описании кинетики спекания под давлением (всесторонним сжатием) использован механизм диффузионно-вязкого течения и принята модель Маккензи-Шатлворса. В соответствии с этим механизмом, происходит термическое проскальзывание вдоль границ зерен и уменьшение объема пор из-за выталкивания вакансий пустот на поверхность.

При образовании жидкой фазы, наряду с изменением капиллярных сил в контакте частиц, с возникновением расплава, смачивающего частицы, площадь поверхности взаимодействия компонентов существенно возрастает, приводя к ускорению процесса спекания. При этом в процессе спекания порошкового тела в общем случае обнаруживается уменьшение пористости и увеличение зернистости, а затем происходит усадка и стабилизация, как пористости, так и зернистости (рис.13 и рис.14).

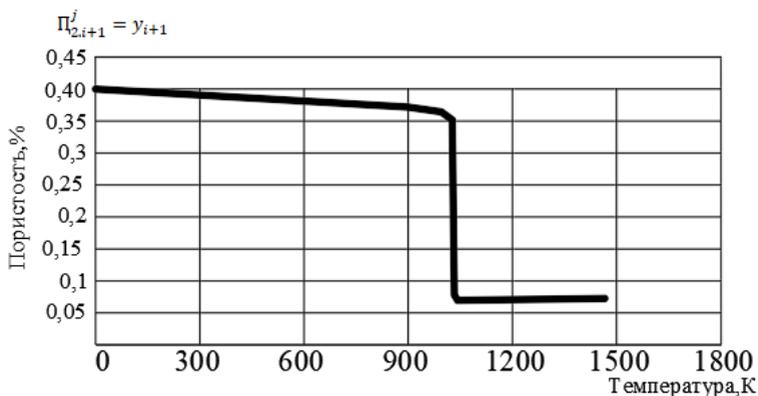


Рисунок 13. Зависимость пористости от температуры

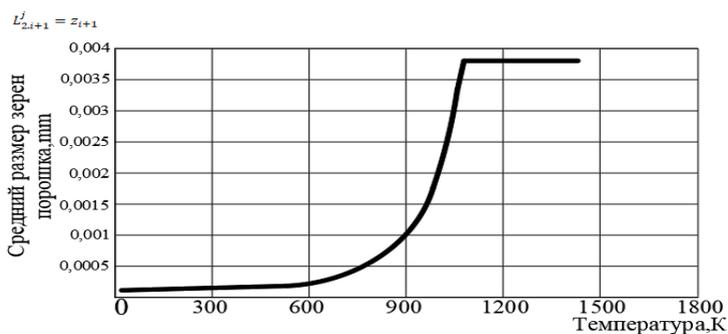


Рисунок 14. Зависимость среднего размера зерен порошка от температуры

В главе 5 приведены экспериментальные исследования структуры и свойств «железо-чугун-стеклянных» порошковых композиций. Показано взаимовлияние твердых смазок (графит, включения меди) и включений (чугун, стекло) в порошковых композиционных материалах. В «железо-чугун-стекло» порошки чугуна и стекла в шихту, вводили без дополнительной обработки. Это преследовало цель выявить возможность

спекаемости чугуна с порошком железа, так как спекание пресовок проводилось при температуре 1100 – 1150°С. Порошок стекла в железочугунную шихту вводили в количестве 6 мас.%. Износостойкость подобного материала была несколько меньше, чем у железогрфита ЖГр3 (рис.15, кривые 1 и 3), что связано, по-видимому, с меньшей прочностью железочугунной матрицы после спекания. При этом заметных преимуществ по сравнению с аналогичным материалом, содержащим графит, не было отмечено (рис.15, кривые 1 и 2). Твердые смазочные вещества, дополнив друг друга, в 6 – 8 раз снизили интенсивность изнашивания металлостеклянного материала при трении без смазки (рис.15, кривая 4).

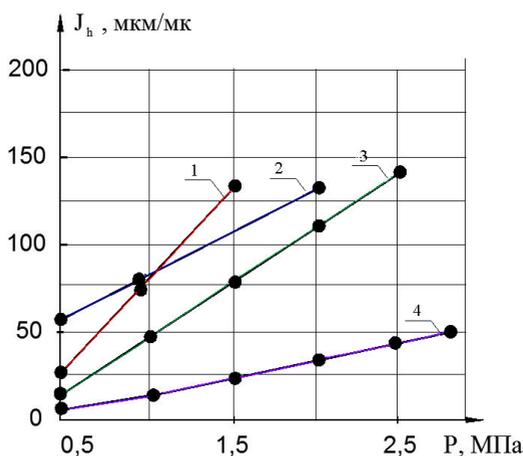


Рисунок 15. Зависимость интенсивности изнашивания от удельной нагрузки металлостеклянного материала различного состава (в массовых долях):

1 – 30% чугуна, 6% стекла и 64 % железа; 2 – 2% дисульфида молибдена, 6% стекла, 30% чугуна и 62% железа; 3 – 3% графита и 97% железа; 4. 3% графита, 2% дисульфида молибдена, 6% стекла, 30% чугуна и 59% железа

$V_{ск} = 0,84$ м/с, трение без смазки.

Таким образом, увеличение вдвое количества твердой смазки различной природы в материале приводило к повышению износостойкости более чем в 6 раз.

При создании порошковых композиционных материалов нами предложено применять многофункциональные добавки. металлизирuемые (медленные) порошки чугуна и стекла. Это позволяет в одном порошке объединить 2 - 3 элемента, влияющие на различные свойства. Металлизация заключается в химическом восстановлении расчетного количества металла (меди, никеля, олова и др.) на частицы чугуна и неметаллических порошков (графита, сульфидов, оксидов, нитридов карбидов [160]¹⁸.

При использовании металлизированных порошков как добавок в матрицу порошковых антифрикционных материалов был получен эффект, аналогичный синергизму двух твердых смазок. Введение твердого включения в виде меденного порошков чугуна и стекла позволило более чем втрое уменьшить интенсивность изнашивания «железо-чугун-стекла» по сравнению с материалами аналогичного состава из механической смеси порошков (рис.16).

Усиление смазочного действия в данном случае можно объяснить более прочным закреплением металлизированных частиц в матрице, препятствующим их выкрашиванию и удалению из зоны трения. Различные по природе твердые включения при одинаковом количестве их в материале матрицы, неадекватно влияют на интенсивность изнашивания композиционного материала (рис.17). Как показали результаты исследований, твердые включения в количестве более 10% вводить не целесообразно в силу заметного снижения антифрикционных свойств композиционного материала.

18. Прессование структурно неоднородных систем с различным агрегатным состоянием фаз в технологических процессах утилизации тонкодисперсных порошковых отходов черной металлургии. Цеменко, В. Н. // Вестник УлГТУ. - Ульяновск: УлГТУ, - 2004. №2, -с. 39-41.

Резко повысить износостойкость и нагрузочную способность, удалось введением и бронзографитовую матрицу равных количеств (по 6 мас.%) медненных порошков низкотемпературного стекла и тугоплавких оксидов. Интенсивность изнашивания при трении без смазки такого материала снизилась в 7 – 10 раз, коэффициент трения в 1,5 раза, а нагрузочная способность возросла до 12 МПа (рис.17, кривая 3).

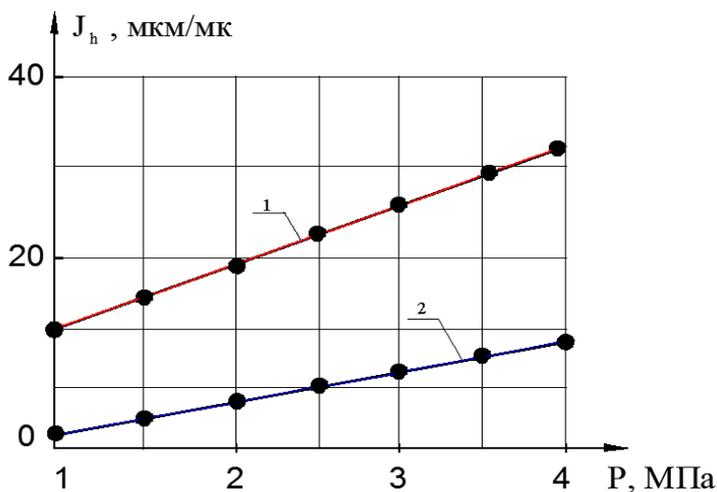


Рисунок 16. Зависимость интенсивности изнашивания от нагрузки трения порошковых материалов: 1 – бронза с 6 мас.% стекла и 30 мас.% чугуна (оба порошка не металлизированы); 2 – бронза с 6 мас.% стекла и 30 мас.% чугуна (оба порошка медненные); $V_{ск}= 1$ м/с, трение без смазки пропитанных маслом образцов.

Установлено, что одновременное введение твердых смазок и твердых включений и химическая металлизация исходных порошков этих добавок позволяют регулировать ход структурообразования и формирования триботехнических характеристик композиционных материалов из «железо-чугун-стекла».

Химическое меднение порошков чугуна и стекла, дают серьезный положительный эффект в направлении повышения антифрикционных свойств порошковых композиций из «железо-чугун-стекла». Однако наличие пористости в структуре этих композиций после спекания порядка $10 \div 15\%$, (рис.18.) не позволяет поднять их грузоподъемность до уровня 20 МПа, т. е. спеченные композиции из железо-чугун-стекла работоспособны при нагрузке трения до $5 \div 6$ МПа.

Дальнейшее повышение работоспособности этих композиций требует проведения дополнительных операций, обеспечивающих существенное снижение их пористости.

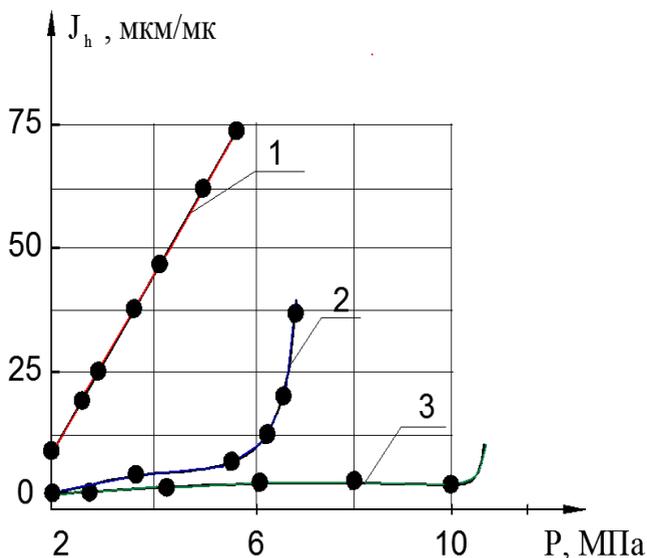


Рисунок 17. Зависимость интенсивности изнашивания от нагрузки трения порошковых бронз, содержащих медные порошки: 1 – 8 мас.% низкотемпературного стекла; 2 – 8 мас.% тугоплавкого оксида; 3 – по 6 мас.% стекла и оксида. $V_{ск} = 1$ м/с, трение без смазки пропитанных маслом образцов

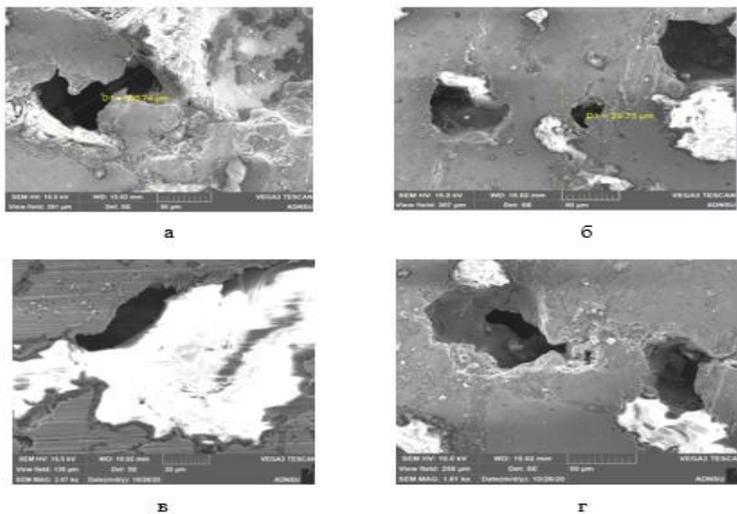


Рисунок 18. СЭМ-изображения распределения поры основной (а, в) и центральной (б, г) зон КМ «железо-чугун-стекло»

Наличие в структуре пластичной матрицы в качестве ферритной и перлитной фазы, твердых включений в виде медненного чугуна, не растворившегося в матрице и медненных включений в виде стекла при высокой плотности, на наш взгляд обеспечит высокую работоспособность этой композиции в условиях сухого трения (рис.19).

Установлено, что для повышения грузоподъемности спеченных композиций из «железо-чугун-стекла» при работе в условиях сухого трения, необходимо их доуплотнение.

Применение выдавливания пористых заготовок из «железо-чугун-стекла» позволило снизить их пористость на 10%, то есть при исходной пористости заготовок 15% их конечная пористость составила 4÷5%. Это приводит к упрочнению матрицы материала и равномерному распределению твердых частиц медненных чугуна и стекла в матрице. При таком раскладе структурных составляющих материала, значительно улучшаются также его триботехнические характеристики.

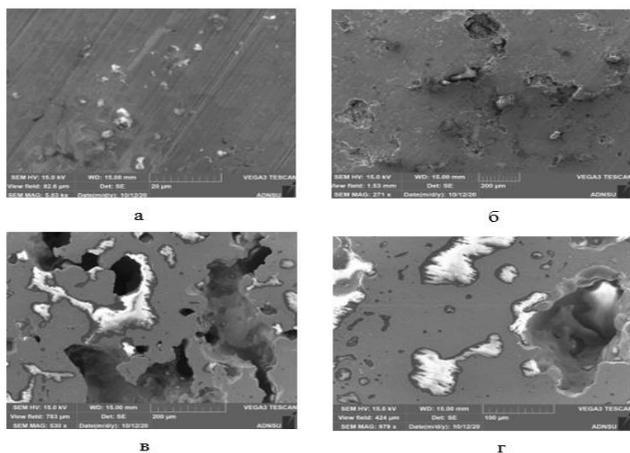


Рисунок 19. СЭМ-изображения распределения в структуре матрицы твердых включений меденного чугуна (а, б) и меденных включений стекла (в, г) в КМ «железо-чугун-стекло»

Поскольку при этом происходит не только упрочнение матрицы, но и закрепление твердых включений чугуна и стекла в ней. Кроме того, доуплотнение материала также улучшает равномерность распределения включений графита и свободных включений меди, которые могут играть серьезную роль при трении в качестве твердых смазок. Так наличие в структуре свободных включений меди при трении выполняет роль пластически составляющего, пластически “течет” в направлении движения контактирующих поверхностей, облегчая при этом скольжения. Свободные включения графита, как твердая смазка предотвращает макросхватывание контактирующих поверхностей, снижают коэффициент трения.

Увеличение нагрузки трения от 3 МПа до 4 МПа коэффициент трения материала в условиях сухого скольжения практически мало изменяется, хотя нужно отметить, что нагрузка порядка 4 МПа является существенной величиной для

сухого трения. Далее с увеличением нагрузки трения до 10 МПа коэффициент трения композиции плавно повышается. При этом его резкое падение, свидетельствующее о катастрофическом износе материала, не наблюдается. Столь низкий уровень коэффициента трения материала в диапазоне 2 – 10 МПа в условиях сухого трения связан положительным взаимовлиянием твердых и пластичных включений (чугун, стекло и свободные включения меди), твердой смазки (включения графита) и прочной матрицы.

Химическая металлизация (меднение) исходных порошков чугуна и стекла, а также доуплотнение спеченного «железо-чугун-стекла» в условиях экструзии позволили повысить плотность и, следовательно, антифрикционные свойства материала. Так, например, прошедший такую обработку «железо-чугун-стекло» показало высокую износостойкость при нагрузке трения 6 – 8 МПа в условиях сухого трения при скорости скольжения 1 м/с. Таким образом, разработанный материал типа «железо-чугун-стекло» можно рекомендовать для работы в узлах трения при экстремальных условиях эксплуатации. Такие узлы трения имеются на различных нефтегазодобывающих оборудованьях, например, на станках качалках на погружных насосах, гидротурбинах, дизелях и т.д.

В компактных многофазных композициях, концентрационная зависимость прочности зачастую носит немонотонный сложный характер, что вызвано индивидуальными свойствами образующих фаз и их морфологии. В этом отношении важны закономерности разрушения и прочности упругопластических материалов, каким является «железо-чугун-стекло». Стереологический анализ изломов показал, что траектория трещин проходит преимущественно по межкристаллитным границам чугуна-стекла и участкам связующей фазы (железа), (рис.20.)

Спеченные материалы, как известно, изготавливают, минуя стадию расплавления. Поэтому, содержание примесей в них зачастую выше, чем в литых (что сказывается на структурно-чувствительных характеристиках, например, на температуре

перехода тугоплавких металлов из хрупкого состояния в пластичное). Повышенное содержание примесей обуславливает также особенности состава приграничных зон.

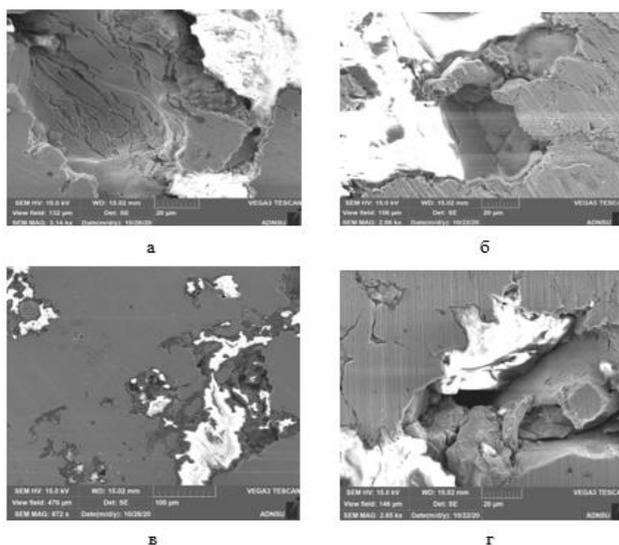


Рисунок 20. СЭМ- изображения траектории трещин по межкристаллитным границам чугуна-стекла (а, б) и участкам связующей фазы (железа) (в, г)

Методом микрорентгеноспектрального анализа приграничных зон в спеченном «железо-чугун-стекла» выявлены сегрегация кремния, кислорода, меди, марганца [221]¹⁹ (рис.21). Присутствие таких сравнительно легкоплавких сегрегаций обуславливает высокие скорости рекристаллизации и высокотемпературную ползучесть для нестехиометрических фаз внедрения.

19. Saturation of glass with meal during sintering of a composite material of the iron-glass system. Jabbarov T.G., Aslanov J.N, Shahmarova R.S.

Роль микрочеренных границ велика и при сверхпластичной деформации, которая характерна для многих мелкозернистых или горячепрессованных материалов.

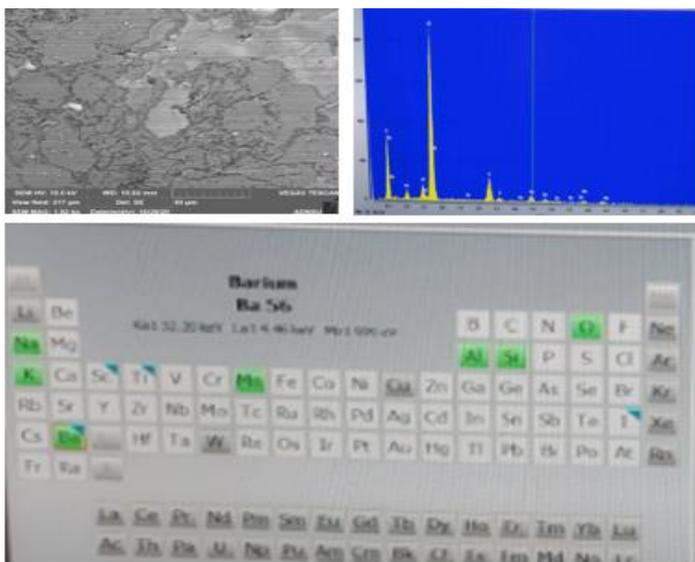


Рисунок 21. СЭМ- изображения распределение Si, Mn, Cu и O₂ на приграничных зонах в спеченном композите «железо-чугун-стекла».

Рассмотренные нами случаи, иллюстрирующие связь свойств спеченных композиций из «железо-чугун-стекла» с пористостью и величиной зерна, не исчерпывает всего многообразия аспектов этой проблемы.

Можно отметить еще роль границ и пор как стопоров на пути распространения трещин, их влияние на вязкость разрушения, закономерности формирования свойств при спекании растворяющихся друг в друге порошков. Количественное описание свойств, спеченных тел очень сложно требует дальнейшего развития теоретических представлений и накопления опытных данных.

Значимость таких работ достаточно очевидно, особенно в связи с использованием автоматических систем управления технологическими процессами в порошковой металлургии.

В шестой главе предложено меднение порошков чугуна и стекла перед вводом их в шихту на основе железа. Показано, что при использовании этих порошков в шихте в медненном виде, достигается высокий эффект по прессуемости шихты на основе железа и спекаемости заготовок.

Это в результате приводит к значительному повышению механических свойств «железо-чугун-стеклянных» композиций (рис.22).

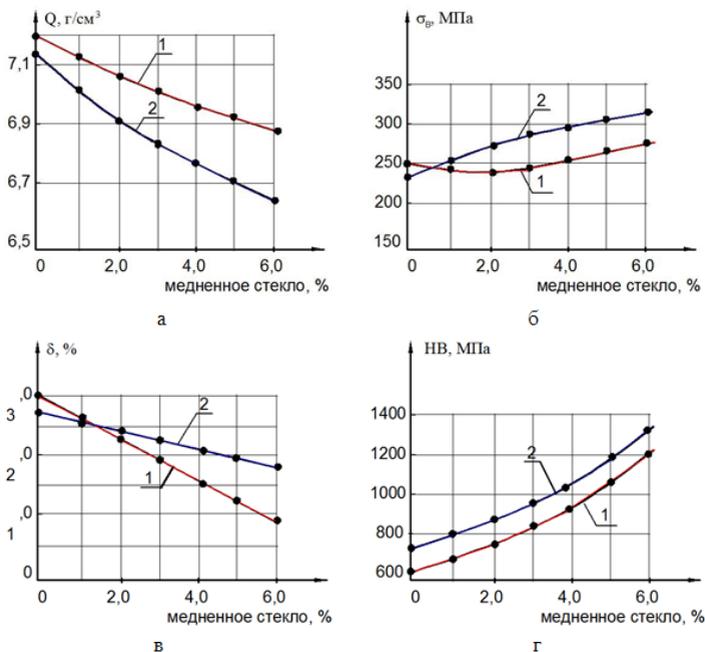


Рисунок 22. Зависимость плотности (а), предела прочности (б) относительного удлинения (в) и твердости (г) спеченных железо-чугун-стеклянных композиций: 1 – распыленный железный порошок; 2 – восстановленный железный порошок.

Причиной получения значительно более высоких механических свойств этих композиций, является пластическое течение и скольжение медненных порошков при холодном прессовании шихты и участие жидких фаз меди и стекла при спекании.

Применение восстановленного железного порошка и медненных порошков чугуна и стекла позволяет значительно повысить прочностные характеристики спеченных «железо-чугун-стеклянных» композиций, полученных на основе восстановленного железного порошка и медненных порошков чугуна и стекла, достигнуть предела прочности почти 330 МПа, что на 120 МПа выше прочности таких же композиций, изготовленных в аналогических условиях, но на основе порошков чугуна и стекла без меднения. Эта разница, обусловленная применением медненных порошков чугуна и стекла, сохраняется и после термической обработки (закалка + отпуск) (рис.23).

В «железо-чугун-стеклянных» композициях, полученных из порошков железа и медненных порошков чугуна и стекла химическая и структурная однородность достигается при более низких температурах, чем у «железо-чугун-стекла», у которого количество медненного порошка чугуна во всех случаях составляло – 30 мас.%, порошки чугуна и стекла вводили без меднения и что создает возможность снижения температур спекания этих композиций.

Мы использовали нечеткую кластеризацию экспериментальных данных для получения нечетких правил «ЕСЛИ-ТО», [219]²⁰ описывающих связь между свойствами материала и технологическими параметрами (задача аналогичная построению нечетких правил, описывающих связь между свойствами материала и его составом, рассмотренная во второй главе на страницах 16-19).

20. Synthesis of Optimal Technological Parameters of "iron-cast-glass" Grinding Composite Materials Using Fuzzy Logic and Big Data Concepts. Jabbarov T.G., Gurbanov.N.A

В качестве примера, рассматривали композиционный материал «железо-чугун-стекло».

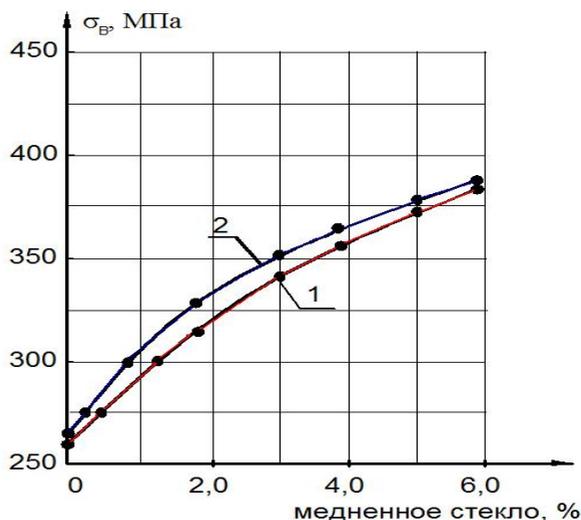


Рисунок 23. Зависимость прочности железо чугунастеклянных композиций после закалки и низкотемпературного отпуска: 1,2 – закалка, 900°С, вода; 1 – распыленный порошок; 2 – восстановленный порошок.

Количество медненного порошка чугуна во всех случаях составляло 41.5 мас.%. Эту нечеткую модель можно использовать для анализа и синтеза материалов [174]²¹.

Входными переменными модели являются, технологические параметры. Выходными переменными, являются механические свойства композиционного материала «железо-чугун-стекло».

Нечеткое разбиение (стандарт), использованное при построении правил, показано на рисунке 1. Графическое представление правил дано на рисунке 30.

Полученные правила, могут быть использованы для определения технологических параметров по заданным характеристикам материала.

21. Fuzzy Logic-Based Material Selection and Synthesis. Babanli, M.B.

Например, пусть необходимо получить материал со следующими характеристиками:

$$z_1=382; z_2=358; z_3=80; z_4=38,$$

где z_1 -предел прочности при растяжении (σ_b , МПа);

z_2 - предел прочности при изгибе (σ_u , МПа);

z_3 -твердость (НВ, МПа);

z_4 -ударная вязкость (КС, кДж/м²).

Расчет на основе полученных правил с помощью алгоритма нечеткого логического вывода Мамдани (данный алгоритм описан на стр. 15-19) показал, что данные характеристики достигаются при следующих технологических параметрах:

$$y_1=800; y_2=1170; y_3=8.9,$$

где y_1 -давление прессования (Р, МПа);

y_2 -температура спекания (t^0C);

y_3 -продолжительность спекания ($\tau-1 \times 10^3$ сек)

композиционного материала «железо-чугун-стекло».

В качестве примера рассматривали композиционный материал «железо-чугун-стекло». Эту нечеткую модель, можно использовать для анализа и синтеза материалов, описывающих связь между свойствами материала и технологическими параметрами (рис.24).

Добавка порошка чугуна и стекла в медненном виде, прежде всего, улучшает пластичность порошковой шихты, активизирует процессы прессования и спекания композиций, вызывает повышение вязкости таких композиций при снижении влияния на эти свойства давления прессования.

Использование восстановленных железных порошков совместно с медненными порошками чугуна и стекла для изготовления обычным прессованием и спеканием «железо-чугун-стеклянных» композиций, является новым способом повышения их прочности без дополнительного легирования или применения других производственных операций.

Установлено, что наилучшие прочностные и структурные характеристики, достигаются при применении восстановленных

железных порошков, чем распыленных. Это объясняется более высокой степенью губчатости частицы восстановленного железного порошка.

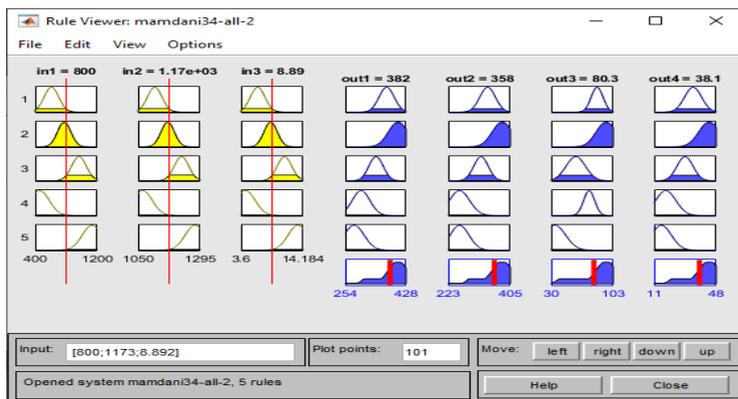


Рисунок 24. Графическое описание нечетких правил

При этом диффузия легирующих элементов, происходит главным образом по границам частиц и плоскостям с наибольшим разрушением решетки, а в случае исследования распыленного порошка легирование композиции осуществляется в основном объемной диффузией.

Исследованы особенности спекания «железо-чугун-стеклянных» прессовок, содержащих медненные порошки чугуна и стекла. Предпринята попытка изучить кинетику начальной стадии (под влиянием лишь капиллярных напряжений) спекания путем дилатометрических измерений. Установлено, что в начальной стадии идет «активная» усадка, то есть это соответствует интенсивному спеканию, а при последующем нагреве темп усадки существенно снижается. Наряду с дилатометрическими измерениями проводили также металлографические исследования структуры отожженных образцов с использованием оптической и электронной микроскопии (рис.25, рис.26). Важная особенность обсуждаемого процесса, состоит также в том, что экспериментально фиксируемая усадка существенно зависит от

размера порошинок так, что прессовка из порошков медненного чугуна с размером частиц 50 мкм в продолжение нагрева до 500°C со скоростью 0,3 град/с уменьшает свою пористость на 8% (от 35 до 27%,рис.27.), в то время как прессовка с той же исходной пористостью, но при $r = 160$ мкм в аналогичных условиях усадка вообще не обнаруживается (рис.28). Следует отметить, что на интенсивность спекания значительное влияние оказывают размеры порошков, чем они мельче, тем быстрее идет спекание. Таким образом, разработана новая технология производства многокомпонентных порошковых композиций с использованием пластичных и упругих составляющих в шихте. Вместе с тем, даны технологические решения уплотнения и упрочнения таких систем путем применения эффективных методов формования и легирования разработанных композиций.

Определены перспективные области применения результатов исследований в различных областях промышленности Азербайджанской Республики. Показано, что разработанные материалы типа «железо-чугун-стекла» можно использовать в узлах трения нефтепромыслового оборудования страны.

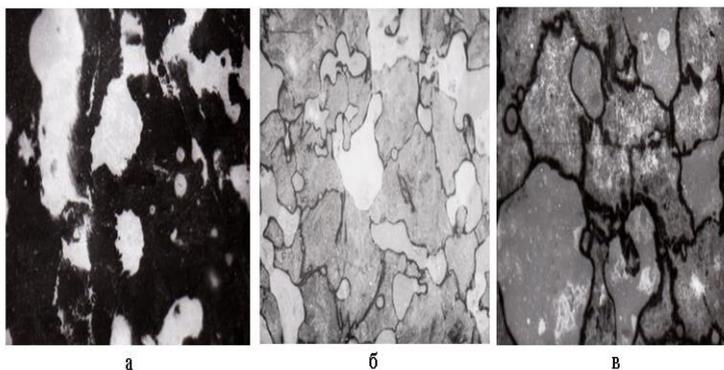
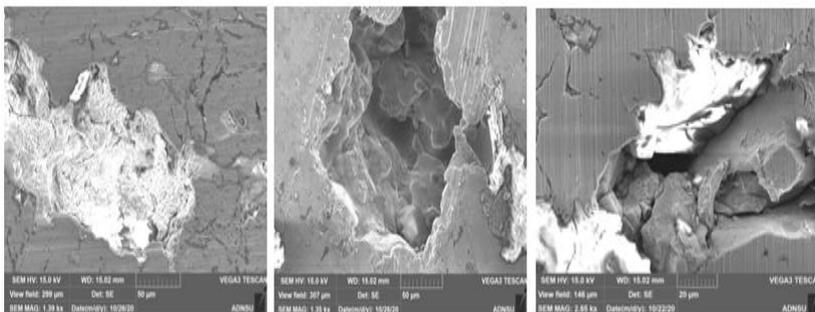


Рисунок 25. Микроструктура композиционного материала «железо-чугун-стекло», (20%.мас. медненный чугун, 4%.мас. медненное стекло и остальное железо),×500:а– P=400 МПа, $t_{\text{спек.}}=1150$ °С, $\tau_{\text{спек.}}=1$ ч.; б–P=700МПа $t_{\text{спек.}}=1150$ °С, $\tau_{\text{спек.}}=1$ ч.; в–1000 МПа, $t_{\text{спек.}}=1150$ °С, $\tau_{\text{спек.}}=1$ ч.



а

б

в

Рисунок 26. СЭМ изображения композиционного материала «железо-чугун-стекло», (20%.мас. медненный чугун, 4%.мас. медненное стекло и остальное железо): а– $P=400$ МПа, $t_{\text{спек.}}=1150$ °С, $\tau_{\text{спек.}}=1$ ч.; б– $P=700$ МПа $t_{\text{спек.}}=1150$ °С, $\tau_{\text{спек.}}=1$ ч.; в– $P=1000$ МПа, $t_{\text{спек.}}=1150$ °С, $\tau_{\text{спек.}}=1$ ч.



а



б

Рисунок 27. СЭМ изображения микрошлифа композиционного материала «железо-чугун-стекло»: (20%.мас. медненный чугун, 4%.мас. медненное стекло и остальное железо, (а) $P=1000$ МПа, $t_{\text{спек.}}=1150$ °С, $\tau_{\text{спек.}}=1$ ч.) и расположение микрошлифов на рабочем столе СЭМ (б)

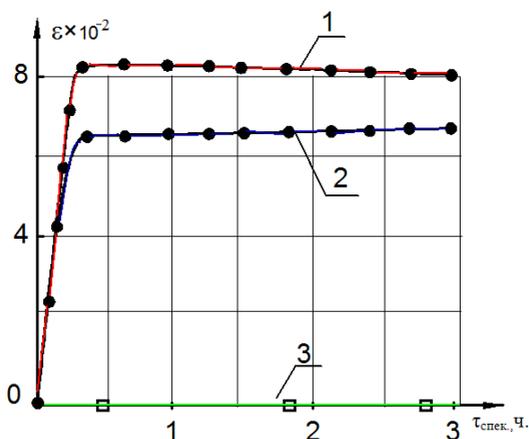


Рисунок 28. Зависимость относительной усадки железостеклянных прессовок от исходного размера порошка меденного чугуна: $r = 50$ мкм (1), 100 мкм (2) и 160 мкм (3)

Однако для дальнейшего расширения области применения таких порошковых изделий более перспективным, считается изготовление их из простых конструкций, а затем для получения сложной формы эти конструкции можно соединять пайкой, клеей и сваркой. Наиболее надежным методом соединения порошковых конструкций, является сварка. Детали нефтепромыслового оборудования, как правило, имеют сложную конфигурацию. При переходе их в порошковый вариант, следует применить технологию расчленения при прессовании, а затем соединения простых спеченных деталей различными методами сварки, например печной сварки.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Разработаны математические модели формы изменения пористых материалов, состоящих из упругопластической среды. Показано, что при чрезмерно больших радиальных обжатиях прессовки, ее пористость практически почти не изменяется. Поэтому процесс уплотнения спеченного пористого тела из

«железо-чугун-стекла» предложено делить на две стадии: стадия изменения формы и объема и стадия некоторого изменения формы. При первой стадии формирования соотношение объемной и радиальной деформаций имеет существенное значение.

2. Построены лингвистические модели зависимости между составом материала «железо-чугун-стекло» и его свойствами в виде нечетких правил «ЕСЛИ-ТО», полученных путем применения метода нечеткой кластеризации С-средних к экспериментальным данным. На основе модели, синтезирован материал с заданными характеристиками (определен состав материала, при котором могут достигаться заданные характеристики). Аналогично, получены нечеткие правила «ЕСЛИ-ТО», описывающие связь между технологическими параметрами и механическими свойствами материала. Исходя из модели, определены значения технологических параметров, при которых могут достигаться заданные характеристики.

3. Дана оценка уплотняемости пористого «железо-чугун-стекла» в условиях ограниченной пассивной деформации с применением инструмента с жесткими стенками, является наиболее энергетически выгодным процессом. При свободной осадке спеченного пористого материала, требуются наибольшие энергетические затраты. Установлено, что только в случае радиального обжатия пористой втулки из «железо-чугун-стекла» в жесткой оправке, плотность ее равномерно распределяется по радиусу.

4. Для экспериментальной оценки пористых тел из «железо-чугун-стекла» применены методы микроструктурного анализа и испытания на твердость. Методом конечных элементов при помощи микроструктурного анализа, получено представление о распределении пористости материала, деформации зерен и их взаимосвязи. Значения твердости, служат для определения механических свойств и компонентов напряженно-деформированного состояния материалов.

5. Разработана единая математическая модель процессов уплотнения порошковых шихт и пористых заготовок из

«железо-чугун-стекла». Показано, что при пластическом течении наряду с общими тензорными соотношениями существует скалярное соотношение, связывающие между собой компоненты тензора напряжений. Скалярные свойства уплотняемого пористого тела описываются уравнениями, выражающими зависимости гидростатического давления и интенсивности возникновения касательных напряжений от пористости и исходных состояний порошков и пористого тела. При этом гидростатическое давление, оказывает влияние на сдвиговые деформации, а касательные сопряжения оказывают изменения объема тела.

6. Методом конечных элементов, решена задача о неустановившемся процессе прессования цилиндрической пористой заготовки через коническую матрицу. Кроме того, исследовано напряженно-деформированное состояние при двухстороннем уплотнении пористых заготовок из «железо-чугун-стекла» в жестких цилиндрических матрицах с применением метода конечных элементов. Оценка характера компонентов композиции и кинематических параметров при пластической деформации «железо-чугун-стеклянных» пористых заготовок показало, что, несмотря на конечные величины давлений уплотнения материала, равные пределу текучести материала, получить беспористый материал при осадке представляется возможным.

7. Проверено математическое моделирование процесса спекания многокомпонентных систем типа «железо-чугун-стекла». Сделана попытка описать кинетику спекания порошковых материалов твердофазного спекания и спекания с участием жидкой фазы. Дано аналитическое описание самодиффузии железа и диффузии углерода, при участии жидкой фазы стекла. Установлено, что диффузионная пара (бипара) состоит из двух полубесконечных образцов А и В, соединенных между собой плоской границей, через которую осуществляется диффузия из одного образца с начальной концентрацией диффузианта C_2 в другой образец с начальной концентрацией диффузианта C_1 ($C_1 < C_2$).

8. Показаны преимущества использования стекла в порошковых материалах типа «железо-чугун-стекла» при спекании композиции. Установлено, что для интенсификации процесса спекания многокомпонентной системы «железо-чугун-стекла», компоненты системы необходимо покрывать хорошо смачивающимися веществами, например, целесообразно проводить металлизацию порошков чугуна и стекла. В этом плане наиболее эффективным процессом можно считать химическое меднение порошков чугуна и стекла. Меднение твердых порошков чугуна и стекла может также приводить к значительному улучшению прессуемости прессовок, а в дальнейшем интенсифицировать процесс спекания из-за наличия в системе жидких фаз меди и стекла.

9. Определены предэкспоненциальный множитель коэффициента диффузии компонентов системы «железо-чугун-стекла». Установлена корреляционная зависимость между логарифмическим значением коэффициента диффузии и энергией активации. Однако эта корреляционная зависимость, является приближенной (не точной) для аморфных сплавов, каким является стекло. Произведен расчет коэффициентов диффузии по экспериментальным данным различных отжигов. Определен коэффициент гетеродиффузии \bar{D} бинарной системы, состоящей из компонентов А и В, который выражается через парциальные коэффициенты диффузии этих компонентов.

10. Приведены результаты экспериментальных исследований порошковых материалов из «железо-чугун-стекла». Определен вклад твердых смазок (графит, включения меди) и твердых включений (чугун, стекло) в медненных порошковых композициях «железо-чугун-стекла» в формировании антифрикционных свойств спеченных материалов. Показано, что для предотвращения снижения антифрикционных свойств композиций, количество твердых смазок в них не должно превышать более 10%.

11. Определено, что для повышения грузоподъемности спеченных «железо-чугун-стеклянных» композиций по работе в условиях сухого трения их необходимо доуплотнять,

исследована кинематика процесса доуплотнения спеченных заготовок в конической матрице (экструзия). Произведены качественная и количественная оценка кинематики процесса выдавливания и деформационные характеристики при этом спеченных заготовок. Установлено, что скорости перемещения по осям X и Y порошкового материала соответственно на 8 и 12% ниже, чем литого, что объясняется уплотнением пористой заготовки за счет сокращения пор.

12. Показано, что при использовании металлизированных порошков чугуна и стекла, а также доуплотнении спеченного «железо-чугун-стекла» в условиях экструзии, значительно повышается плотность заготовки и грузоподъемность материала в условиях работы при сухом трении. В условиях работы сухого трения грузоподъемность «железо-чугун-стекла» достигает до 6-8 МПа, что является весьма положительным эффектом.

Сделана попытка установить взаимосвязь между составом – свойством пористостью спеченных материалов. Установлено, что при этом количественное описание свойств спеченных тел очень сложно, требуется накопление многих опытных данных и с применением ИКТ можно решить эту проблему.

13. Исследовано влияние вида железного порошка на формирование прочностных характеристик спеченных композиций из «железо-чугун-стекла». Показано, что наилучшие свойства достигаются в случае использования восстановленного железного порошка по сравнению с распыленным порошком. Важная степень губчатости и развитости поверхности восстановленного порошка, ускоряет диффузию легирующих элементов в железную матрицу. Это связано с наибольшим разрушением решетки железа в случае получения восстановительного порошка в процессах отжига и грануляции.

14. Исследованы особенности спекания «железо-чугун-стеклянных» композиций. Установлено, что спекание таких материалов проходит в двух стадиях: начальная, которая соответствует “активной” усадки и конечная – пассивная усадка. Отмечено, что по интенсивности спекания существенное

влияние оказывают размеры порошков, то есть, чем меньше порошок, тем быстрее идет спекание.

15. Проанализированы специальные области применения результатов исследований на промышленных предприятиях Азербайджанской Республики. Анализ характеристик разработанных материалов и специфики промышленности, позволяет рекомендовать эти материалы для расчетов в углах трения различных машин и оборудования.

Результаты исследований положены в основу технологии получения деталей 8ТЛ.210.005 «Втулка». Реализация технологии холодного прессования при давлении 1000 МПа и спекание при температуре 1150⁰С продолжительностью 2 часа, а также доуплотнение спеченного «железо-чугун-стекла» в условиях экструзии, позволяет на 20 – 70 % повысить усталостную долговечность порошкового композиционного материала и на 25 – 35 % межремонтный период эксплуатации. Внедрение технологии при объеме производства 1000 деталей в год, обеспечит экономический эффект в сумме 345600 манат для деталей 8ТЛ.210.005 «Втулка».

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Cabbarov, T.Q., Иманов, Х.И. Износостойкость порошковых композиционных материалов «железо-чугун-стекло» при трении без смазок. // АзТУ, Елми эсерлер. – Баку, – 1993, № 4, – с.30-32.
2. Cabbarov, T.Q., Sadiqov, V.B. «Dəmir-çuqun-şüşə» sistemli yeyilməyə davamlı ovuntu kompozisiya materialında şüşə ovuntusunun miqdarının mexaniki və tribotexniki xassələrinə təsiri. // Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyası, Elmi əsərləri. – Bakı, 2004, №2, – s.51-53.
3. Cabbarov, T.Q. Radial sıxılmada dəmir-çuqun-şüşə ovuntu kompozisiya materialının elastik əks-təsirinin azaldılması üsulları. // Azərbaycan Ali Texniki Məktəblərinin Xəbərləri. – Bakı, 2020. – Cild 22, № 4, – s.56-59.

4. Джаббаров, Т.Г. Радиальное обжатие пористых втулок из железо-стекла, упрочняемых в жесткой оправке. // Вестник высших технических учебных заведений Азербайджана. E-ISSN: 2674-5224. – Баку, – 2021, – с.29-35. DOI: 10. 36962/PAH TEI.
5. Jabbarov, T.G. Compaction of porous powder body consisting of the elastic-plastic medium. // Eastern-European Journal of enterprise technologies. ISSN1729-37746/7(96). – Charkov, 2018, 6/7(96). – pp.44-48.
6. Jabbarov, T.G., Dyshin, O.A., Babanli, M.B., Abbasov I.I. Mathematical Modelling of the Sintering Process of Iron Based Metal-Glass Materials. // Progress in physics of metals. ISSN 1608-1021. – Kiyev, 2019. – Vol.20, № 4, – pp.584-619.
7. Jabbarov, T.G., Aslanov, J.N., Shahmarova, R.S. Saturation of glass particles with meal during sintering of a composite material of the iron-glass system. // «EUREKA: Physics and Engineering». ISSN 2461-4254. – Tallin, 2021. – Vol.32, – pp.106-112.
8. Jabbarov, T.G., Dyshin, O.A., Babanli, M.B., Abbasov, I.I. Numerical simulation of the sintering process of multicomponent composite materials based on iron and glass. // STS “Institute for Single Crystals”. Functional Materials. – 2021, 28, №1, – p0p.158-169. ISSN 1027-5495doi:https://doi.org/10.15407/fm28.01.158.
9. Jabbarov, T.G. Compaction of metal-to-glasporous bodies under conditions of limited passive deformation. // News of Azerbaijan high technical educational institutions. ISSN-1609-1620. – Baku, 2021. – Vol.23, Issue 2(130), – pp.35-41.
10. Jabbarov, T.G. Development of mathematical models of the process of cold pressing of porous bodies in elastic-plastic medium. // Azerbaijan high technical educational institutions. ISSN 1609-1620.– Baku, 2022. – Vol.24, issue 2(136), – pp.58-65.
11. Cabbarov, T.Q., Şərifov, Z.Z Nikellə legirlənmiş ovuntu poladlarının mexaniki xassələrinə presləmə təzyiqinin təsiri. // Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyasının Elmi əsərləri. – Bakı, 2005, №3, – s.84-85.

12. Cabbarov, T.Q., Şərifov, Z.Z. Xrommolibdenli ovuntu poladlarının mexaniki xassələrinə termiki emalın təsiri // Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyasının Elmi əsərləri. – Bakı, 2006, №4, – s.84-85.
13. Cabbarov, T.Q., Şərifov, Z.Z., Orucov F.S. Nikellə legirlənmiş ovuntu poladlarının mexaniki xassələrinə bişirmə temperaturunun təsiri. // Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyasının Elmi əsərləri. – Bakı, 2007, №5, – s.40-41.
14. Cabbarov, T.Q., Şərifov, Z.Z., Orucov F.S. Manqanla legirlənmiş ovuntu poladlarının mexaniki xassələrinə presləmə təzyiqinin təsiri. // Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyasının Elmi əsərləri. – Bakı, 2008, №7, – s.76-77.
15. Cabbarov, T.Q., Şərifov, Z.Z. Manqanla legirlənmiş ovuntu poladlarının mexaniki xassələrinə bişirmə müddətinin təsiri. // Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyasının Elmi əsərləri. – Bakı, 2009, №1, – s.42-43.
16. Cabbarov, T.Q., Şərifov, Z.Z., Orucov F.S. Nikellə legirlənmiş ovuntu poladlarının mexaniki xassələrinə bişirmə temperaturunun müddətinin təsiri. // Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyasının Elmi əsərləri. – Bakı, 2010, №1, – s.10-11.
17. Jabbarov, T.G. Synthesis of "iron-cast iron-glass" obsolete powder composite materials using fuzzy logic and big data base concepts. // 10th International Conference on Theory and Application of Soft Computing, Computing with Words and Perceptions Prague. – Czech Republic, 2019, – pp.866-871.
18. Jabbarov, T.G., Gurbanov, N.A. Synthesis of Optimal Technological Parameters of "iron-cast-glass" Grinding Composite Materials Using Fuzzy Logic and Big Data Concepts. // 4th International Conference on Theory and Application of Fuzzy Systems and Soft Computing – ICAFS-2020Budva. eBook – Montenegro, August 27-28. – Vol.1306. – pp.254-260. ISBN 978-3-030-64058-3, <https://www.springer.com/gp/book/9783030640576>.
19. Jabbarov, T.G. Analysis of the Influence of the Shape of the Matrix on the Compaction of Porous Powder Bodies of "Iron-Cast Iron-Glass". // 11th World Conference "Intelligent System for In-

- dustrial Automation” (WCIS-2020), AISC1323, – pp.316-321. ISBN 978-3-030-68004-6, https://doi.org/10.1007/978-3-030-68004-6_41.
20. Jabbarov, T.G. Compaction scenario for powder elastoplastic medium of “Iron-cast-iron-glass” type. // Tenth World Conference “Intelligent Systems for Industrial Automation” WCIS-2018, 25-26 October 2018. – Tashkent, Uzbekistan, – pp.189-193.
 21. Jabbarov, T.G. Evaluation of Force and Kinematic Parameters during Plastic Deformation of Sintered Porous Billets Made Of Iron-Cast Iron-Glass-International Conference on Research in Natural and Engineering Sciences (ICRNES 2020). – Konya, Turkey, – pp-235-246. https://756d243f-9742-4892987f8834db07019e.filesusr.com/ugd/e42d97_cf2.
 22. Jabbarov, T.G. The choice of powder charges and properties of the powder composite material "iron-cast iron-glass". // Fifth International Iron-Steel Symposium. April 1-3, – Karabuk, Turkey.pp.210-216
 23. Джаббаров, Т.Г., Бабаев, А.И. Влияние режимов спекания порошковых оксидированных заготовок на их механические свойства. Современные проблемы физики металлов. // Материалы международной научно-практической конференции. – Баку: ЕЛМ, 2007, – с.145-146.
 24. Cabbarov, T.Q., İbrahimli, A.M. ЖЧ30Ст6 ovuntu kompozisiya materialının struktur və xassələrinə presləmə təzyiqinin təsiri. // Tələbə və gənc tədqiqatçıların “Gənclər və elmi innovasiyalar” mövzusunda Respublika elmi-texniki konfransının materialları, AzTU. – Bakı, 2017, – s.120-121.
 25. Babanlı, M.B., Cabbarov, T.Q. Konstruksiya ovuntu poladları üçün xrom tirkibli legirləyici əlavələrin seçimi. Metallar fizikasının müasir problemləri. // V Beynəlxalq elmi-praktik konfrans. – Bakı, 2016, – s.122-125.
 26. Cabbarov, T.Q. ЖЧ50СТ6 ovuntu kompozisiya materiallarının struktur və xassələrinə presləmə təzyiqinin təsiri. // Gənc alimlərin və aspirantların Respublika konfransının tezləri. – Bakı, 1997, – s.64-65.
 27. Cabbarov, T.Q., Soltanov, A.B. Oksidləşdirmə parametrlərinin

- ЖЧ50CT6 ovuntu kompozisiya materialının mexaniki xassələrinə təsiri. // AzTU-nun aspirant və gənc tədqiqatçıların elmi texniki konfransı. – Bakı, 2002, – s.143-144.
28. Cabbarov, T.Q., Soltanov, A.B. Oksidləşmiş ЖЧ50CT6 ovuntu kompozisiya materialının tribotexniki xassələrinə bişirmə temperaturunun təsiri. // 46-cı Tələbə elmi-texniki konfransı. AzTU. – Bakı, 2003, – s.46.
29. Cabbarov, T.Q., Soltanov, A.B. Oksidləşdirilmiş «dəmir-çuqun-şüşə» sistemli ovuntu kompozisiya materialının tribotexniki xassələrinə bişirmə temperaturunun müddətinin təsiri. // Aspirant və gənc tədqiqatçıların elmi-texniki konfransı, AzTU. – Bakı, 2003, – səh.181-184.
30. Cabbarov, T.Q., Soltanov, A.B. Oksidləşdirilmiş «dəmir-şuqun-şüşə» sistemli ovuntu kompozisiya materialının fiziki-mexaniki xassələrinə presləmə təzyiqinin təsiri. // Ali məktəb tələbələrinin XIX Respublika elmi konfransı, AzMİU. – Bakı, 2003, – s.120-121.
31. Cabbarov, T.Q. Elektromaqnit səth-qaynağı ilə formalaşmış örtüyün yeyilməyə davamlığı.//Maşınqayırmada intellektual texnologiyalar. Beynəlxalq elmi praktik konfrans. AzTU,Bakı,2016, - s.399-400.
32. Cabbarov, T.Q. , Qafarova G.M. X15P5Д2T yonqarlarından alınmış ovuntunun texnoloji xassələrinə emal üsullarının təsiri//“Metallurgiya və materialşünaslığın problemləri” mövzusunda 2-ci Beynəlxalq elmi-texniki konfransı.AzTU, Bakı,2017,-305-306.
33. Jabbarov, T.G. Development of mathematical models of the of cold pressing of porous bodies in an elastic-plastic medium Second International Scientifi-Practica Conference”, Modern Information, measurement and Control Systems: Problems and Perspectives, 2020” (MIMCS-2020) dedicated to the: 100th anniversary of ASOIU, December 07-08. – Baku, Azerbaijan, 2020, – pp.314-315. E-ISBN: 978-9916-9639-4-4.
34. Jabbarov, T.G., Babanlı, M.B., İsmayilova, K.H. Method of decrease of elastic counteract to the quality of powder materials

pressed in closed press-casts. // Thermophysical properties for technical thermodynamics. International Conference “Thermophysical and mechanical properties of advanced materials” and 4th Rostocker international symposium, AzTU, 17-18 September. – Baku, 2015, – pp.80-81.

35. Cabbarov, T.Q “Dəmir-çuqun-şüşə” ovuntu kompozisiya materialının tribotexniki xassələrinə bişirmə temperaturu və müddətinin təsiri. // XVIII Beynəlxalq elmi-texniki konfrans “Su nəqliyyatının problemləri”. Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyası, PHŞ. – Bakı, 2023, – səh.14-16.
36. Джаббаров, Т.Г., Мамедов, А.Т., Иманов, Х.И., Гейдаров, В.А. Шихта для получения износостойкого спеченного материала на основе железа. // Авторское свидетельство №1752508 8 апреля 1992 г.

Личный вклад, внесенный соискателем в работах, опубликованных в соавторстве:

1. Работы [3,5,8-10,17,18,20-23,31,34,35] автором выполнены самостоятельно;
2. [1,2,4-7,11-16,19,24-30,32,33,36] постановка задач, проведение экспериментов проведены соискателем, а обработка результатов исследований выполнены совместно с соавторами.

Защита диссертации состоится «30 » _05___ 2024-го года в __13.00__ на заседании Диссертационного Совета ЕД 2.02 действующего на базе Азербайджанского Государственного Университета Нефти и Промышленности

Адрес: г. Баку, проспект Азадлыг, 34

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Азербайджанского Государственного Университета Нефти и Промышленности.

Электронная версия диссертации и автореферата размещена на официальном сайте www.adnsu.edu.az

Автореферат разослан по

соответствующим адресам «_23__» __04___ 2024-го года.

Подписано в печать: 19.04 2024
Формат бумаги: A5
Объем: 76177
Тираж: 100