

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МИСИС»

АХМЕТОВ АМАНКЕЛЬДЫ

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ПОРОШКОВЫХ
КОМПОЗИЦИОННЫХ БЫСТРОРЕЖУЩИХ СТАЛЕЙ**

2.6.5 – Порошковая металлургия и композиционные материалы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель

Доктор технических наук,

профессор

Еремеева Жанна Владимировна

Москва 2023

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Быстрорежущие стали применяются в промышленности как один из основных материалов для получения режущего инструмента. Возникновение карбидной ликвации в быстрорежущей стали (БРС), получаемой традиционными методами литья, требует в дальнейшем проводить долгие операции термической обработки (ТО) такой стали с дополнительным использованием обработки металлов давлением для уменьшения карбидной сетки. Именно карбидная неоднородность служит концентратором напряжений, в результате чего режущий инструмент из такого материала подвержен выкрашиванию в ходе эксплуатации. Была разработана порошковая БРС, в которой не возникает карбидная ликвация за счет того, что частицы распыленного порошка остывают за короткий промежуток времени, при котором грубая карбидная сетка образоваться не может. В результате, инструмент из такого материала демонстрирует лучшие физико-механические свойства.

Однако порошковая БРС также имеет свои недостатки, которые связаны с ее уплотнением и консолидацией. Из-за высокой твердости и сферической формы частиц, данные порошки БРС не формуется технологически простыми методами формования (прессованием), или же формуется без достижения удовлетворительного уровня плотности и физико-механических свойств, вследствие чего для этой цели используется метод горячего изостатического прессования (ГИП). Этот метод технологически сложен, требует применения дорогостоящего комплекса оборудования с низкой производительностью, что неизбежно увеличивает себестоимость инструмента из порошковой БРС.

Путем решения данной проблемы является получение порошковой БРС иными методами, обеспечивающими высокую уплотняемость при технологически более простых методах консолидации – прессования и спекания, а также горячего прессования (ГП).

Так, практически не исследована возможность применения метода диффузионного легирования, который обеспечивает получение порошков с частицами губчатой формы. Порошки с губчатой формой частиц отличаются высокой формуемостью. Также мало изучена возможность применения механического легирования для получения порошковой БРС, что в перспективе может обеспечить

лучшую альтернативу распыленному порошку.

Актуальность работы подтверждается выполнением её в соответствии с тематическими планами университета по следующим проектам:

- Проект Российского научного фонда № 22-79-10144 «Разработка высокоэнтропийных связок для нового поколения алмазного режущего инструмента с повышенными эксплуатационными характеристиками за счет комплексного модифицирования и реализации механизмов дисперсного и дисперсионного упрочнения» (тема № 8340306), 2022-2024;

- Проект Российского научного фонда № 23-49-00141: «Получение защитных гетерофазных покрытий методами импульсной плазменной и электроискровой обработки» (тема 8340307), 2023-2025.

Целью работы являлась разработка технологии получения композиционной быстрорежущей стали из порошковых смесей, которые отличаются высокой уплотняемостью при холодном и горячем прессовании.

Для достижения поставленной цели, в работе решались **следующие задачи**:

- определение оптимального режима получения порошковой диффузионно-легированной добавки для порошковой смеси БРС Р6М5К5, исследование процессов холодного прессования, спекания и горячего прессования полученной смеси, термическая обработка полученных заготовок и исследование их физико-механических свойств;

- определение оптимального режима обработки исходных порошков в планетарной центробежной мельнице для получения механически легированной смеси БРС Р6М5К5 и исследование процессов её холодного прессования, спекания и горячего прессования, термическая обработка полученных заготовок и исследование их физико-механических свойств;

- выбор и обоснование применения упрочняющих добавок для разрабатываемых порошковых смесей композиционных БРС, исследование процессов консолидации методами прессования, спекания и горячего прессования полученных порошковых смесей с различными добавками, термическая обработка полученных заготовок и исследование их физико-механических свойств;

- исследование применения полученных порошковых смесей БРС в электроискровой обработке инструментальной стали.

Научная новизна

1. Обнаружен эффект повышенной уплотняемости при холодном прессовании порошковой смеси быстрорежущей стали Р6М5К5 с диффузионно-легированной добавкой, сопоставимой с уплотняемостью порошка ПЖРВ 2.200.26, что обусловлено губчатой морфологией частиц добавки. В случае распыленного порошка быстрорежущей стали 10Р6М5 эффект повышенной формуемости достигается за счет введения в состав смеси твердых частиц карбида ванадия, которые интенсифицируют пластическую деформацию в области контакта карбидов с металлической матрицей.

2. Установлено, что при спекании холоднопрессованных заготовок из механически легированной смеси быстрорежущей стали Р6М5К5 уплотнение при температуре до 1125 °С протекает по механизму твердофазного спекания, а свыше 1125 °С по механизму жидкофазного спекания за счёт контактного плавления эвтектики, %: 29,4 Fe; 38,6 W; 19,7 Mo; 1,8 Cr; 1,0 V; 9,5 C.

3. На основе быстрорежущей стали Р6М5К5 с добавкой боридно-силицидной керамики $\text{MoSi}_2\text{--MoB--HfB}_2$ разработаны электродные материалы для электроискровой обработки, обладающие скоростью эрозии не менее 5,5 мг/мин при энергии единичных импульсных разрядов 0,1 – 0,4 Дж, силе тока 170 – 200 А, частоте 400 – 3000 Гц, обеспечившие прирост твердости инструментальных сталей до 15,8 ГПа и износостойкости при 500 °С до $2,82 \times 10^{-5}$ мм³/Н/м.

Практическая значимость

1. Разработана диффузионно-легированная добавка для получения порошковой смеси БРС Р6М5К5, получена опытная партия порошковой смеси в условиях ПАО «Северсталь». Исследованы особенности прессования и спекания, а также ГП, получено ноу-хау «Способ получения диффузионно-легированной смеси на основе железа, содержащей вольфрам, молибден, кобальт и карбид тантала» (зарегистрировано в депозитарии НИТУ МИСИС);

2. Определен оптимальный режим получения механически легированной смеси БРС Р6М5К5 обработкой в ПЦМ и исследованы различные режимы прессования и спекания, а также ГП механолегированной смеси БРС Р6М5К5. Разработан способ получения порошка быстрорежущей стали механическим легированием, Патент РФ № 2799363 от 10.06.2022, Бюллетень изобретения № 19 от 05.07.2023;

3. Получены режущие пластины из ГП-заготовок БРС Р6М5К5, 10Р6М5, Р6М5К5 с добавлением 3 % VC, которые при испытаниях на лабораторно-исследовательской

базе ПАО «Туполев» продемонстрировали стойкость при резании стали 30ХГСА в 1,13-1,60 раз больше, чем режущая пластина из горячекатаного прутка литой стали Р6М5. Также проведены испытания режущих пластин из ГП-заготовок в условиях производственного участка ООО НПФ «УМГ», согласно которым, резцы пригодны для механообработки графитовых заготовок;

4. Разработана технологическая инструкция на процесс получения электродов для электроискровой обработки на основе порошковой смеси быстрорежущей стали Р6М5К5 с добавкой керамики на основе силицида молибдена, боридов молибдена и гафния, ТИ № 58-11301236-2023;

5. Определены оптимальные режимы нанесения покрытий на сталь 5ХНМ методом электроискровой обработки из ГП электродов механолегированной смеси БРС Р6М5К5 и БРС Р6М5К5 с добавлением 40 % гетерофазной керамики $\text{MoSi}_2 - \text{MoB} - \text{HfB}_2$. Показано, что введение керамики уменьшило приведенный износ в 13,5 раз по сравнению с покрытиями из БРС Р6М5К5 без добавления керамики при высокотемпературных трибологических испытаниях.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Способы получения порошковых смесей БРС методами смешения с диффузионно-легированной добавкой, обработки в ПЦМ с механическим легированием и с введением различных добавок и их технологические свойства;

2. Особенности консолидации методами холодного прессования и спекания и горячего прессования смесей БРС, их термическая обработка и микроструктурное исследование;

3. Физико-механические свойства консолидированных БРС и эксплуатационные свойства резцов, полученных из данных БРС;

4. Применение полученной порошковой смеси БРС Р6М5К5 для ЭИО инструментальной стали.

Апробация работы

Основные результаты и материалы диссертации докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: Юбилейная LXX открытая международная студенческая научная конференция «СНК-2020», посвященная 155-летию Московского Политеха (Россия, Москва, 20-21 апреля); Шестой междисциплинарный научный форум с международным участием «Новые материалы и перспективные технологии»

(Россия, Москва, 23-27 ноября, 2020); 12-й международный симпозиум «Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы, сварка» (Беларусь, Минск, 7-9 апреля 2021); Международный молодежный научный форум «ЛОМОНОСОВ-2021» (Ломоносов-2021, Россия, Москва, 12-23 апреля 2021); Международная научно-практическая online конференция «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации» (Сагиновские чтения №13, Казахстан, Караганда, 17-18 июня 2021); 7-я Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении» (Россия, Курск, 10-11 февраля 2022); XI конференция молодых специалистов по перспективам развития металлургических технологий (Москва, Россия, 28 февраля 2022); Международная научно-техническая конференция «Машиностроительные технологические системы» (METS-2022, Россия, Азов, 26–29 мая 2022); 3-я Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы и направления развития металловедения и термической обработки металлов и сплавов» (SPM-2022, Россия, Курск, 15-16 сентября 2022); VI Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении» (ИТММ-2022, Россия, Пермь, 10-14 октября 2022).

Публикации

Материалы диссертации представлены в 20 публикациях, в том числе 8 в журналах из перечня ВАК и входящих в перечень Scopus/Web of Science, 10 тезисов и докладов в сборниках трудов конференций, 1 «Ноу-хау» зарегистрировано в депозитарии НИТУ МИСИС и 1 патент.

Достоверность полученных результатов

Достоверность подтверждается использованием современного научно-исследовательского оборудования и применения методов исследований согласно межгосударственным стандартам, значительным количеством экспериментальных данных и сопоставлением полученных результатов с данными других авторов.

Личный вклад автора

Диссертация представляет собой законченную научную работу, в которой приведены результаты исследований, которые были получены автором лично и в соавторстве. Работы по получению и обработке экспериментальных данных, их

анализе и обобщении результатов в основном велась автором работы. Совместно с научным руководителем и соавторами публикаций велось дальнейшее обсуждение и интерпретация полученных результатов. Основные положения и выводы по диссертационной работе были сформулированы автором.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, 6 разделов, общих выводов, приложений и списка использованной литературы

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы, приведена цель диссертационной работы и её основные задачи. Сформулированы научная новизна, практическая значимость, приведены основные положения, выносимые на защиту.

Первый раздел посвящен аналитическому обзору литературы, где приведено описание БРС, а также методы их получения, их преимущества и недостатки. Показано, что получение БРС методами литья приводит к образованию карбидной ликвации, и применение методов порошковой металлургии позволяет избежать возникновения данного дефекта. Отмечена сложность и дороговизна процесса горячего изостатического прессования, что значительно сдерживает более широкое распространение инструмента из порошковой БРС.

Проведен анализ ТО, как метода улучшения физико-механических и эксплуатационных свойств инструмента из порошковой БРС, согласно которому, в большинстве случаев, различные вариации ТО не приносят значительного эффекта в отличие от традиционных методов ТО. Приведено описание особенностей ТО БРС в зависимости от метода получения, марки стали, вида режущего инструмента и области его применения.

В качестве перспективных альтернатив, обеспечивающих исключение из технологической цепочки ГИП, приведены методы получения порошков при помощи диффузионного легирования для получения порошка губчатой морфологии с высокой формуемостью, и обработка в ПЦМ, что широко применяется для получения порошковых БРС, упрочненных различными добавками, в основном карбидами и нитридами, реже боридами и более сложными соединениями.

Показано, что порошковую БРС, в частности подверженную обработке в ПЦМ, можно консолидировать сверхсолидным спеканием, что может обеспечить

достаточно высокие физико-механические свойства, однако необходимость обеспечения точной температуры и времени выдержки усложняют данный процесс.

На основании аналитического обзора литературы сделан вывод, что добиться улучшения уплотняемости, физико-механических и эксплуатационных свойств БРС можно применением перечисленных альтернативных методов получения порошков.

Второй раздел посвящен описанию материалов, оборудования, приборов, методов получения, обработки и исследования БРС, использованных в диссертационной работе.

Порошковые смеси были получены основными тремя методами: смешивание порошков железа, хрома, феррованадия и сажи с диффузионно-легированной смесью (добавкой), содержащей железо, вольфрам, молибден и кобальт (была получена смесь БРС Р6М5К5); обработка в ПЦМ Активатор-4М порошков железа, вольфрама, молибдена, хрома, феррованадия и сажи и, в зависимости от марки БРС, кобальта (были получены смеси БРС Р6М5К5, 10Р6М5, Р12К3К5Ф2, в том числе с различными упрочняющими добавками VC, В₄С, TiC и MoSi₂ – MoB – HfB₂); обработка в ПЦМ распыленного порошка БРС 10Р6М5, в том числе с одновременным смешиванием с упрочняющими добавками VC и В₄С.

Проводили исследование текучести (согласно ГОСТ 20899-98), насыпной плотности (по ГОСТ 19440-94), гранулометрического состава (на лазерном анализаторе ANALYSETTE 22 MicroTec plus, производства Fritsch GmbH, Германия). Морфология и микроструктура перечисленных порошков и порошковых смесей, как и консолидированных образцов, исследовались методами растровой электронной микроскопии (РЭМ) на микроскопе S-3400N (производство Hitachi High-Technologies Corporation, Япония), оснащенного рентгеновским энерго-дисперсионным спектрометром NORAN System 7 X-ray Microanalysis System (производство Thermo Scientific, США). Исследовали особенности консолидации при холодном прессовании при давлениях 200, 400, 600, 700, 800 и 900 МПа, при спекании холоднопрессованных заготовок при температурах 1000 – 1300 °С и при ГП при температурах 900 – 1025 °С. Проводили ТО на различных режимах. На консолидированных образцах проводили микроструктурный анализ, анализ методом энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС) и рентгеноструктурного фазового анализа (РФА).

Также были получены электроды для нанесения покрытий методом ЭИО из механолегированной ГП смеси БРС Р6М5К5, а также смеси механолегированной БРС Р6М5К5 с 40 % гетерофазной керамики MoSi₂ – MoB – HfB₂. В качестве подложки

была выбрана инструментальная сталь 5ХНМ, из которой изготавливаются штампы, работающие при высоких температурах.

Третий раздел посвящен исследованию текучести, насыпной плотности, гранулометрического состава, микроструктуры и фазового состава полученных порошков и порошковых смесей и особенностей их получения. Так, методами термогравиметрического анализа (ТГА) и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) определено, что для получения диффузионно-легированной смеси на основе железа, вольфрама, молибдена и кобальта из смеси порошков железа и оксидов вольфрама WO_3 и молибдена MoO_3 и оксалата кобальта CoC_2O_4 достаточной является восстановление в потоке водорода при $800\text{ }^{\circ}C$. Повышение температуры восстановления желательно для большей гомогенизации. В результате образуется хрупкий губчатый спек, измельчение которого приводит к получению порошка с губчатыми частицами. Согласно РФА присутствуют фазы: α -железо, карбид M_6C , свободный углерод и различные твердые растворы, которые образуют между собой введенные элементы. Присутствие углерода связано с углеродной обмазкой лодочки, в которую загружалась исходная смесь до восстановления, что было сделано для предотвращения припекания продукта восстановления к стенкам лодочки.

Полученная в шаровой вращающейся мельнице (ШВМ) порошковая смесь БРС Р6М5К5 с диффузионно-легированной добавкой (рисунок 1) была монофракционной, с диапазоном размера частиц $1 - 100\text{ }\mu m$, со средним размером частиц $21\text{ }\mu m$ и основной фракцией $3 - 40\text{ }\mu m$. Порошковая смесь не течет, насыпная плотность составила $2,83\text{ г/см}^3$, что связано с губчатой морфологией частиц диффузионно-легированного порошка и высокой долей мелкодисперсной фракции.

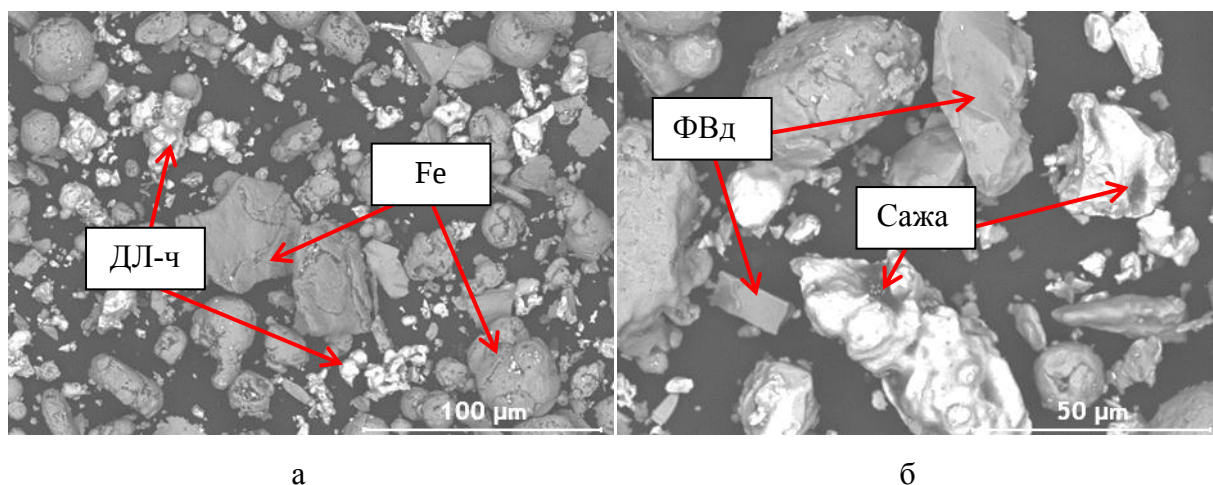


Рисунок 1 – РЭМ-изображения порошковых смесей БРС Р6М5К5 с диффузионно-легированной добавкой после смешивания в ШВМ

На рисунке 1 видно, что частицы порошковой смеси разнородны по своей морфологии: частицы железного порошка по форме, в основном, сферические или близкие к сферической (равноосные), диффузионно-легированная добавка представлена частицами губчатой формы (ДЛ-ч), частицы феррованадия (ФВд) имеют осколочную форму, поскольку порошок был получен измельчением кусков ферросплава, частицы сажи намазаны на остальные частицы.

По результатам работы в условиях ПАО «Северсталь» была получена опытная партия порошковой смеси БРС Р6М5К5, содержащей диффузионно-легированную добавку.

Обработка в ПЦМ порошковой смеси для получения БРС Р6М5К5 при длительности обработки 15, 30 и 45 мин приводила к уменьшению размера частиц в результате данной обработки. При 15 минутной обработке наблюдается образование пластинчатой и осколочной формы частиц с измельчением легирующих элементов, которые как налипают на частицы железа, так и находятся в свободном состоянии, основная фракция 6 – 20 мкм, средний размер 12 мкм. При обработке длительностью 30 мин наблюдается образование более округлых, равноосных частиц с налипанием или внедрением легирующих элементов на частицы железа, основная фракция 3 – 20 мкм, средний размер 10 мкм. Следует отметить, что практически имеет место отсутствие пластинчатых частиц при данном времени обработки. Обработка в течение 45 мин приводит как к дальнейшему измельчению, так и к образованию большего количества агломератов, основная фракция 4 – 30 мкм, средний размер 16 мкм. Согласно результатам РФА вне зависимости от времени обработки образуется твердый раствор на основе железа (α -Fe), карбид вольфрама WC и молибден.

Исходя из этих результатов, была выбрана длительность обработки в ПЦМ 30 мин, и при данной длительности были получены также БРС марок 10Р6М5 (основная фракция порошка 2 – 20 мкм, средний размер частиц 9 мкм) и Р12М3Ф2К8 (основная фракция 2 – 40 мкм, средний размер 15 мкм).

Была проведена обработка в ПЦМ распыленных порошков БРС марки 10Р6М5 и Р12М3Ф2К8. Наблюдается значительное измельчение частиц после обработки, распыленный порошок 10Р6М5 в исходном состоянии бифракционен, с двумя основными диапазонами размера частиц 2 – 30 мкм и 50 – 300 мкм, при среднем размере частиц 144 мкм. Обработка в ПЦМ в течение 15, 30 и 45 мин приводит к образованию среднего размера частиц в 19, 15 и 18 мкм, порошки монофракционны, с основным пиком 10 – 20 мкм.

В ПЦМ производилось смешивание как порошковых смесей БРС Р6М5К5 и 10Р6М5, так и распыленного порошка БРС 10Р6М5 добавками карбида бора B_4C (0,5 и 1 %), карбида ванадия VC (1 и 3 %), карбида титана TiC (1 и 3 %) и гетерофазной керамики $MoSi_2 - MoB - HfB_2$ (3 %) с целью получения композиционной БРС. Смешивание проводилось при длительности 30 мин.

Распыленный порошок БРС 10Р6М5, который не формуется и не уплотняется как в исходном виде, так и после обработки в ПЦМ, формуется и уплотняется с введением в него упрочняющей добавки VC, которые интенсифицируют пластическую деформацию в области контакта карбидов с металлической матрицей

На рисунке 2 представлены РЭМ-изображения порошковой смеси Р6М5К5 дисперсно-упрочненного частицами VC.

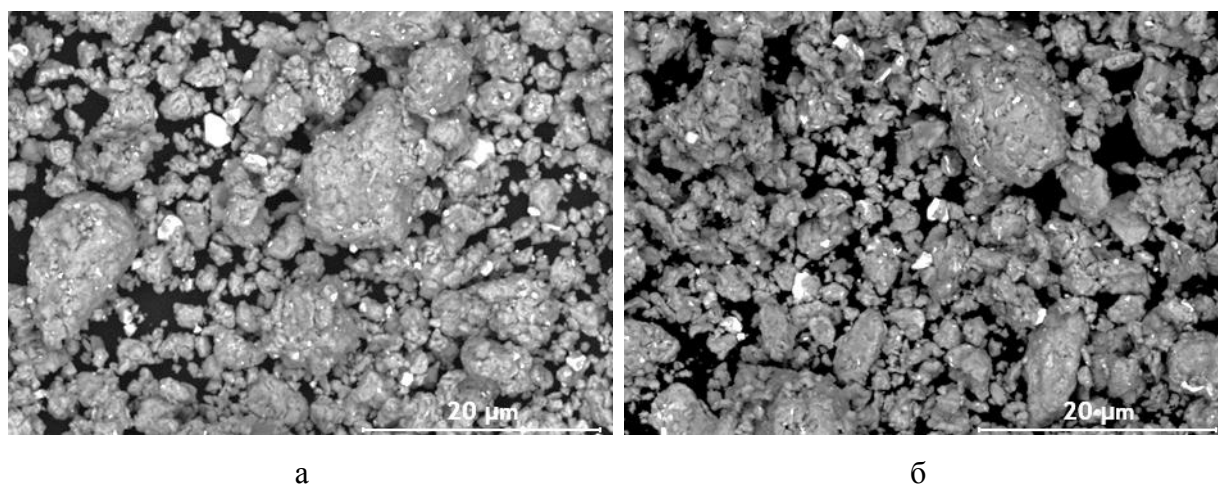


Рисунок 2 – РЭМ-изображения порошковой смеси БРС Р6М5К5, дисперсно-упрочненного VC в количестве: 1 % (а) и 3 % (б)

При этом с введением упрочняющих добавок в некоторых случаях наблюдается рост насыпной плотности с увеличением доли упрочняющей фазы, что можно объяснить лучшей межчастичной укладкой, при которой пустоты между более крупными частицами занимают частицы меньшего размера.

Также была получена смесь БРС Р6М5К5 с 40 и 60 % гетерофазной керамикой $MoSi_2 - MoB - HfB_2$ для получения в дальнейшем из них электродов для ЭИО.

Четвертый раздел диссертационной работы описывает результаты исследования процессов холодного прессования и спекания порошков и порошковых смесей БРС. Если, как было отмечено выше, распыленный порошок БРС в исходном состоянии не

формируется холодным прессованием, то смеси БРС с диффузионно-легированной добавкой и механолегированные смеси и смеси распыленного порошка с упрочняющими добавками – формируются хорошо в указанном диапазоне давлений.

Смесь БРС Р6М5К5 с диффузионно-легированной добавкой уплотняется, достигая при давлении прессования 900 МПа относительной плотности в 84,0 %, что сопоставимо с уплотняемостью порошка железа ПЖРВ 2.200.26, чему способствует мягкая матрица, которой служит железный порошок и губчатая морфология частиц диффузионно-легированной добавки (рисунок 3).

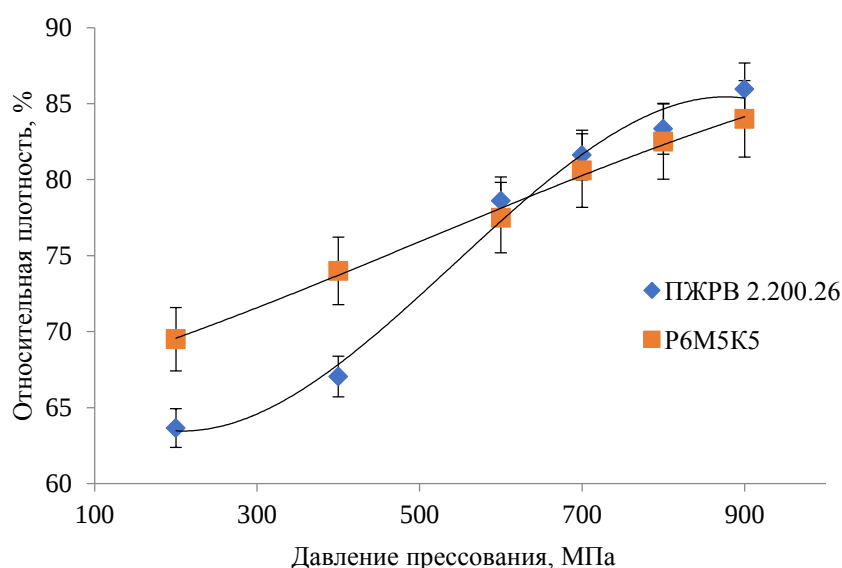


Рисунок 3 – График зависимости относительной плотности после прессования порошковой смеси БРС Р6М5К5 и порошка железа ПЖРВ 2.200.26

Далее проводилось спекание в углеродсодержащей среде холоднопрессованных заготовок при температуре 1000 и 1200 °С. Данные температуры были выбраны исходя из вертикального разреза диаграммы состояния для стали Р6М5К5, согласно которой жидкая фаза образовывается при температуре ~1250 °С. Из результатов спекания было определено, что плотность заготовок, спрессованных при 900 МПа, увеличивается до 88,0 %, разница в температурах спекания практически не влияет на усадку.

Исследование уплотняемости порошковых смесей БРС Р6М5К5, обработанных в ПЦМ в течение 15, 30 и 45 мин показало, что при прессовании при 900 МПа достигается относительная плотность 73,8, 71,8 и 70,1 % соответственно. Ухудшение уплотняемости при более длительной продолжительности обработки в ПЦМ связана с

большей дефектностью и наклепом частиц, что повышает их твердость. Вместе с тем разница в плотностях не столь значительна.

Было проведено спекание в углеродсодержащей засыпке перечисленных смесей БРС Р6М5К5 при 1000, 1100 и 1200 °С, что выявило во всех случаях значительное увеличение плотности при спекании при 1200 °С (рисунок 4).

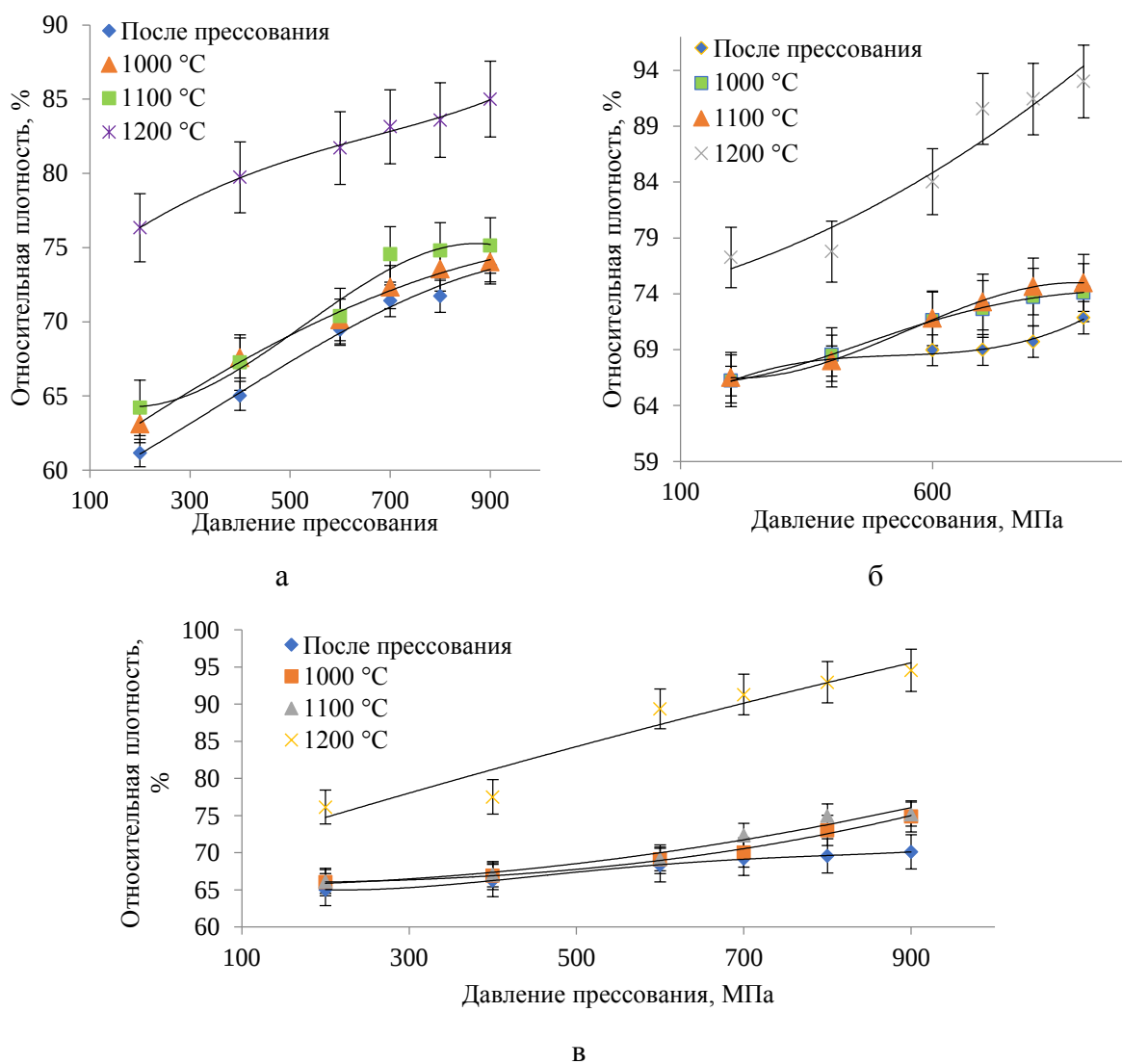
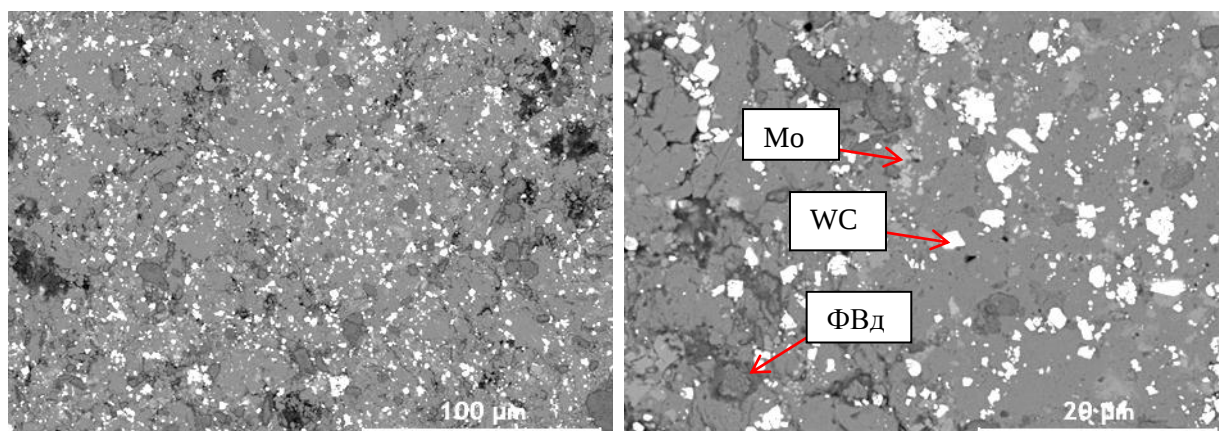


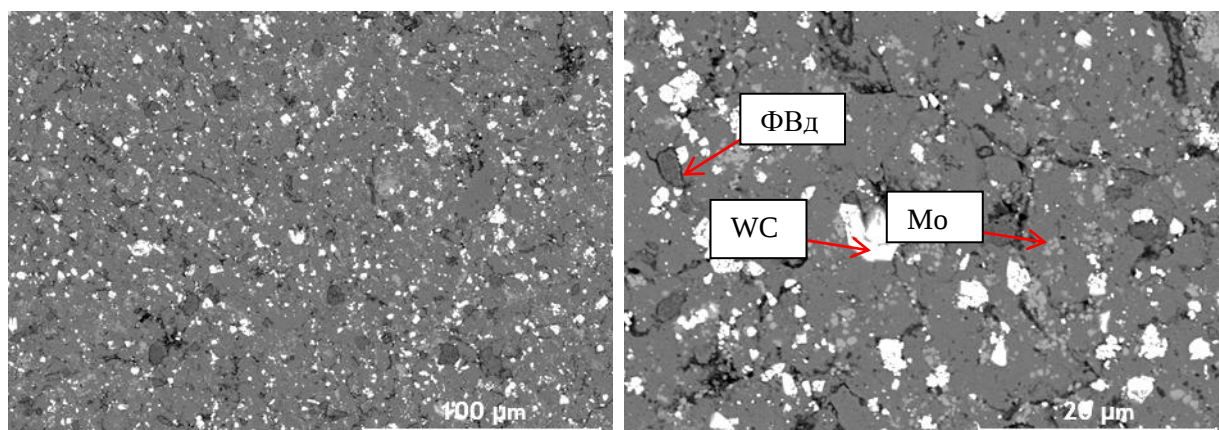
Рисунок 4 – Зависимость относительной плотности заготовок механолегированных порошковых смесей БРС Р6МК, подверженных обработке в ПЦМ в течение 15 (а), 30 (б) и 45 (в) мин от давления прессования после спекания

Разница в плотностях при спекании при 1000 и 1100 °С практически отсутствует. Она составляет у заготовок, спрессованных при 900 МПа примерно 74 – 75 % для всех

смесей. После спекания при 1200 °С для порошковой смеси, обработанной при 15 мин относительная плотность заготовки, спрессованной при 900 МПа составила 85 %; для обработанной при 30 мин – 93 %; для обработанной при 45 мин – 94 %. Резкое увеличение плотности можно связать как с процессом активированного спекания, который обусловлен высокой дисперсностью частиц порошка (что объясняет большую плотность у порошковых смесей с меньшим средним размером частиц), так и возможным образованием жидкой фазы. Это возможно для порошков, подвергнутых высокоэнергетической обработке в ПЦМ. Микроструктура более плотная и однородная у заготовок, спеченных при 1200 °С, где в матрице, представляющей собой твердый раствор на основе железа, равномерно распределены частицы эвтектического карбида M_6C . При этом спеченные при 1000 и 1100 °С заготовки имеют в своей структуре частицы молибдена, карбида вольфрама WC и феррованадия (рисунок 5).

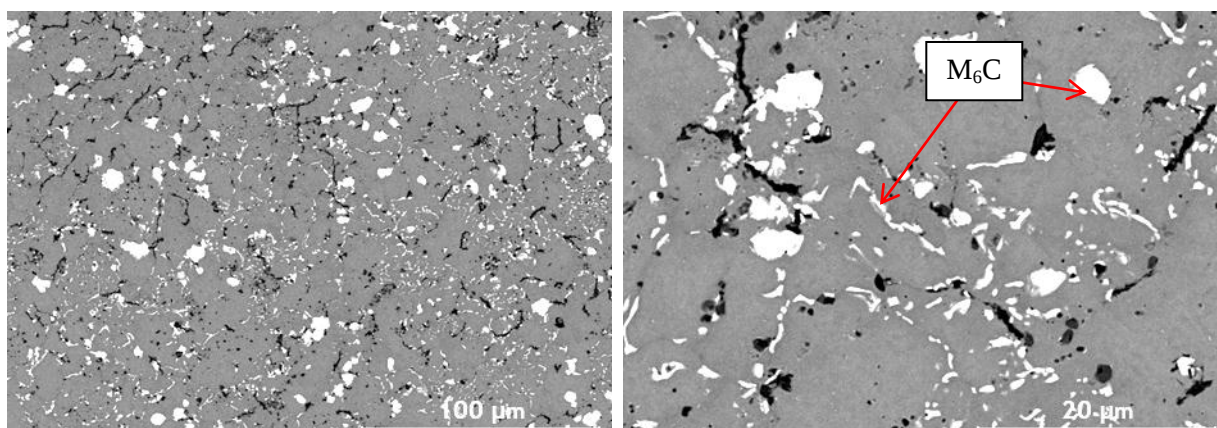


а



б

Рисунок 5 – РЭМ-изображения заготовок механолегированной порошковой смеси БРС, спеченных при температуре: а) 1000 °С; б) 1100 °С



В

Продолжение рисунка 5 – РЭМ-изображения микроструктуры заготовок механолегированной порошковой смеси БРС, спеченных при температуре: в) 1200 °С

Образование жидкой фазы в БРС Р6М5К5 при температурах свыше 1125 °С возможно при содержании углерода в количестве 2,10 - 2,25 %, что можно объяснить избытком углерода в отдельных участках порошковой заготовки из-за его неравномерного распределения в объеме смеси в процессе смешивания, а также из-за наличия углерода в составе феррованадия (до 0,5 %) и углеродсодержащей среды спекания.

В таблице 1 представлены результаты ЭДС-анализа эвтектики, образованной при спекании заготовок механически легированной порошковой смеси БРС Р6М5К5 при температуре спекания 1125 °С.

Таблица 1 – Результаты ЭДС-анализа эвтектики в спеченной БРС Р6М5К5

№	Fe	W	Mo	Cr	V	C
	Содержание, %					
1	29,4	38,6	19,7	1,8	1,0	9,5
2	29,6	39,0	19,9	1,9	1,2	8,4
3	30,4	37,2	19,8	2,2	1,0	9,4

Как можно видеть из таблицы 1, состав эвтектики практически аналогичен для всех исследованных участков, и он соответствует составу эвтектического карбида M_6C .

ДСК анализ не выявил отдельного выраженного эндотермического пика, в том числе при рассчитанной температуре солидуса, что может свидетельствовать о постепенном образовании жидкой фазы в малых количествах.

Дополнительное спекание образцов при 1300 °С привело к их оплавлению и

потере формы, с образованием практически беспористой структуры со значительно более грубой структурой с относительно крупными частицами эвтектического карбида.

Подобный значительный рост плотности после спекания характерен и для порошковых смесей БРС 10Р6М5 и Р12М3Ф2К8, где заготовки, спрессованные при 900 МПа, после прессования имеют относительную плотность 71 и 67 %, а после спекания при 1200 °С 93 и 94 % соответственно.

Обработанные при различной длительности в ПЦМ распыленные порошки 10Р6М5 формуются плохо, образуют хрупкие формовки при давлении прессования от 400 МПа, однако прочность таких заготовок слишком мала для проведения последующих операций, в частности, для транспортировки для последующего спекания. При этом с внедрением упрочняющих добавок распыленный порошок начинает формоваться. Плотность после прессования у заготовок, спрессованных при 900 МПа порядка 65 – 66 %, притом уплотняемость порошка с добавкой 1 и 3 % VC аналогична, после спекания плотность данных таблеток достигает 91 % для порошка с 1 % VC, и 92 % в случае введения 3 % VC. Высокую прессуемость и формуемость распыленного порошка, обработанного в ПЦМ при введении частиц VC, можно объяснить тем, что более твердые карбидные частицы могут внедряться в более пластичные частицы БРС, выполняя соединительную роль для частиц основного порошка, интенсифицируя пластическую деформацию в области контакта карбидов с металлической матрицей.

ДСК анализ не выявил выраженного эндотермического пика в области температуры солидуса, который для 10Р6М5 составляет ~ 1250 °С.

Смесь БРС Р6М5К5 с добавлением карбида 1 и 3 % VC достигает плотности при 900 МПа порядка 70 % вне зависимости от количества упрочняющей добавки, с некоторым расхождением после спекания, где для 1 % VC плотность составляет 92 %, а для 3 % VC – 94 %.

В пятом разделе дано описание результатов исследования процесса ГП порошковых смесей БРС, их ТО, а также физико-механических и эксплуатационных свойств.

ГП порошковой смеси БРС Р6М5К5 с диффузионно-легированной добавкой было проведено при 900 и 1000 °С, при давлении 40 и 50 МПа соответственно, со скоростью нагрева и охлаждения 50 °/мин. Относительная плотность полученных заготовок составила 93,1 и 97,2 %. На заготовке с относительной плотностью 97,2 % проводилась ТО: отжиг, закалка с 1200 °С в масло и последующий двукратный отпуск при 550 °С.

После ТО наблюдаются фазы α -Fe (мартенсит отпуска) и сложных карбидов M_6C и $M_{23}C_6$, однако при микроструктурном исследовании с применением ЭДС были также обнаружены частицы нерастворенного феррованадия, частицы диффузионно-легированной добавки и частицы карбида MC. Вместе с тем распределение частиц достаточно однородное, также наблюдается дисперсное распределение карбидов. Твердость исходной ГП-заготовки была равна 63,1 HRA, после ТО она повысилась до значений 66,3 HRA. Достаточно низкая твердость для БРС связана с неполным протеканием процессов диффузии, что связано с относительно крупным размером исходных частиц порошковой смеси, в том числе частиц диффузионно-легированной добавки. Твердость на изгиб составила 630 ± 10 МПа, а на сжатие 1721 ± 15 МПа, что связано с остаточной пористостью и относительно крупным зерном.

Проводили ГП механолегированной порошковой смеси БРС Р6М5К5, обработанной в ПЦМ в течение 30 мин, при 900, 1000, 1025 °С и давлении 50 МПа, по результатам которого плотность заготовок составила 98,1; 99,0 и 98,5 % соответственно. Из результатов можно говорить о предпочтительности температуры ГП 1000 °С. При данной температуре заготовки из порошковых смесей, обработанных в ПЦМ в течение 15 и 45 мин имели относительную плотность 92,9 и 96,0 %.

После ГП микроструктура заготовки Р6М5К5, консолидированной при 1000 °С, состоит из матрицы на основе железа (в ней растворены легирующие элементы). Также фиксируются частицы нерастворенного феррованадия (где содержится молибден, который образует непрерывный ряд твердых растворов с ванадием), карбид вольфрама WC (ближе к границам частиц карбида увеличивается количество молибдена, что также свидетельствует о постепенном растворении карбида в матрице) и молибден. Была проведена ТО данной заготовки: отжиг при 800 °С в течение 60 мин, закалка (с предварительным нагревом) в масло при температурах 1190, 1200, 1210, 1220 и 1230 °С с последующим двукратным отпуском при 550 °С. Из результатов определения твердости заготовок после проведения отпуска наиболее оптимальной температурой была выбрана 1200 °С, где твердость составила 66,0 HRC. Более высокие температуры закалки ухудшали твердость, т.к. происходит резкий рост зерна, связанный с тем, что эти температуры имеют меньшую разницу с температурой солидуса БРС. Согласно РФА наблюдаются фазы α -железа (мартенсит отпуска), остаточный аустенит, карбиды M_6C и MC. Микроструктура однородная, в ней отсутствует нерастворенный феррованадий, который перешел в карбид MC, также отсутствует чистый молибден.

На рисунке 6 представлена микроструктура ГП механолегированной порошковой

смеси БРС Р6МК5 до и после ТО.

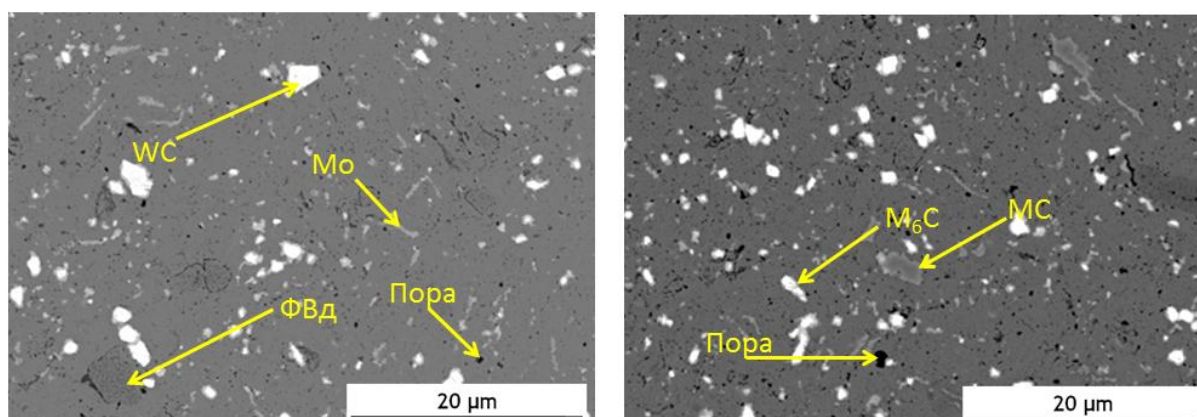


Рисунок 6 – РЭМ-изображения микроструктуры ГП-заготовки смеси БРС Р6М5К5 до (а) и после (б) ТО

Используя оптимальный режим ГП: 1000 °С, давление прессования 50 МПа и выдержка в течение 3 мин (более длительная выдержка не способствует к дальнейшей усадке) были получены заготовки БРС марки 10Р6М5 и Р12М3Ф2К8. Относительная плотность составила 98,2 и 98,0 %, твердость 66,0 и 66,7 HRC соответственно. ТО данных заготовок проводилась при температурах, перечисленных в ГОСТ 28393-89 1200 °С для 10Р6М5 и 1210 °С для Р12М3Ф2К8, с дальнейшим двукратным отпуском при 550 и 560 °С, с достижением твердости после ТО 65,5 и 66,0 HRC соответственно. Незначительное снижение твердости можно объяснить неизбежным ростом зерен во время ТО с нагревом до высоких температур. Основные микроструктурные составляющие полученных заготовок практически аналогичны: матрица на основе железа с легирующими элементами, растворенными в ней, карбиды типа M_6C и MC .

В таблице 1 показаны результаты определения физико-механических свойств заготовок, ГП при 1000 °С и давлении 50 МПа перечисленных БРС после ТО.

Таблица 1 - Физико-механические свойства ГП-заготовок из механолегированных порошковых смесей

Марка БРС	Твердость после ГП	Твердость после ТО	Красностойкость	Прочность на изгиб	Прочность на сжатие
	HRC			МПа	
10P6M5	66,0 ± 0,2	65,5 ± 0,6	59,0 ± 0,3	1141 ± 20	1985 ± 10
P6M5K5	70,5 ± 0,5	66,0 ± 0,5	59,0 ± 0,6	1288 ± 12	2371 ± 12
P12M3Φ2K8	66,7 ± 0,5	66,0 ± 0,6	60,3 ± 0,5	1515 ± 15	2509 ± 15

ГП порошковых смесей дисперсно-упрочненных композиционных БРС проводили при режиме: температура 1000 °С, 50 МПа, выдержка 3 мин и скорость нагрева и охлаждения 50 °/мин. В таблице 2 приведены сводные результаты по некоторым характеристикам ГП-заготовок.

Таблица 2 - Относительная плотность и твердость ГП-заготовок дисперсно-упрочненных порошковых смесей БРС

Марка БРС и содержание упрочнителя	Относительная плотность, %	Твердость, HRC	Твердость после ТО, HRC
10P6M5 (распыл.) + 1% В ₄ С	96,1	64,0 ± 0,2	64,8 ± 0,4
10P6M5 + 1% В ₄ С	92,2	63,0 ± 0,3	64,0 ± 0,5
P6M5K5 + 1% В ₄ С	89,9	63,0 ± 0,3	63,3 ± 0,2
10P6M5 (распыл.) + 1% VC	96,1	65,5 ± 0,5	66,0 ± 0,5
10P6M5 (распыл.) + 3% VC	97,5	66,0 ± 0,3	66,8 ± 0,1
10P6M5 + 1% VC	97,8	65,8 ± 0,2	66,6 ± 0,2
10P6M5 + 3% VC	98,2	66,5 ± 0,2	67,0 ± 0,5
P6M5K5 + 1% VC	98,0	66,2 ± 0,3	67,0 ± 0,4
P6M5K5 + 3% VC	98,9	67,2 ± 0,4	67,5 ± 0,3
P6M5K5 + 3 % MoSi ₂ -MoB-HfB ₂	97,8	64,0 ± 0,5	64,4 ± 0,6
P6M5K5 + 3 % MoSi ₂ -MoB-HfB ₂	97,2	64,2 ± 0,6	64,4 ± 0,5

Оптимальной добавкой, судя по результатам, показанным в таблице 2, является карбид ванадия VC, введение которого увеличивает твердость после ГП, при этом худшие результаты получаются при введении карбида бора В₄С. Последнее связано с диффузией бора и углерода в составе В₄С с фазами матрицы из БРС, что может приводить к образованию фаз типа М₆(С, В) и избыточному содержанию углерода и бора. Лучшие показатели по плотности и твердости наблюдается у ГП-заготовок композиционной БРС Р6М5К5 с 3 % VC, их прочностные свойства были исследованы: прочность на изгиб - 1649 МПа, прочность на сжатие – 2641 МПа с красностойкостью 60,0 HRC.

В шестом разделе даны результаты исследований применения механолегированной порошковой смеси БРС Р6М5К5 для ЭИО штамповой стали 5ХНМ. Были получены электроды из ГП заготовок БРС (Р6М5К5) и смеси БРС Р6М5К5 + 40 % MoSi₂ - MoB - HfB₂ (Р6М5К5-К). Из рассмотренных режимов

нанесения покрытий на сталь 5ХНМ (таблица 2), был определен оптимальный режим исходя из кинетики массопереноса (рисунок 7) и шероховатости (таблица 3).

Таблица 2 – Режимы нанесения покрытий методом ЭИО

№	Установка/режим	I, А	f, Гц	τ , мкс	E, Дж	ΣE , Дж×мин	Период следования импульса $P=1/f$, мкс
1	Alier 30 Metal*/ Режим 1	170	1500	25	0,1	7,65	666,6(6)
2	Alier 30 Metal*/ Режим 2	170	3000	25	0,1	15,30	333,3(3)
3	Alier G53 Metal*/ Режим 3	200	400	100	0,4	9,6	2500

* - зависимый генератор

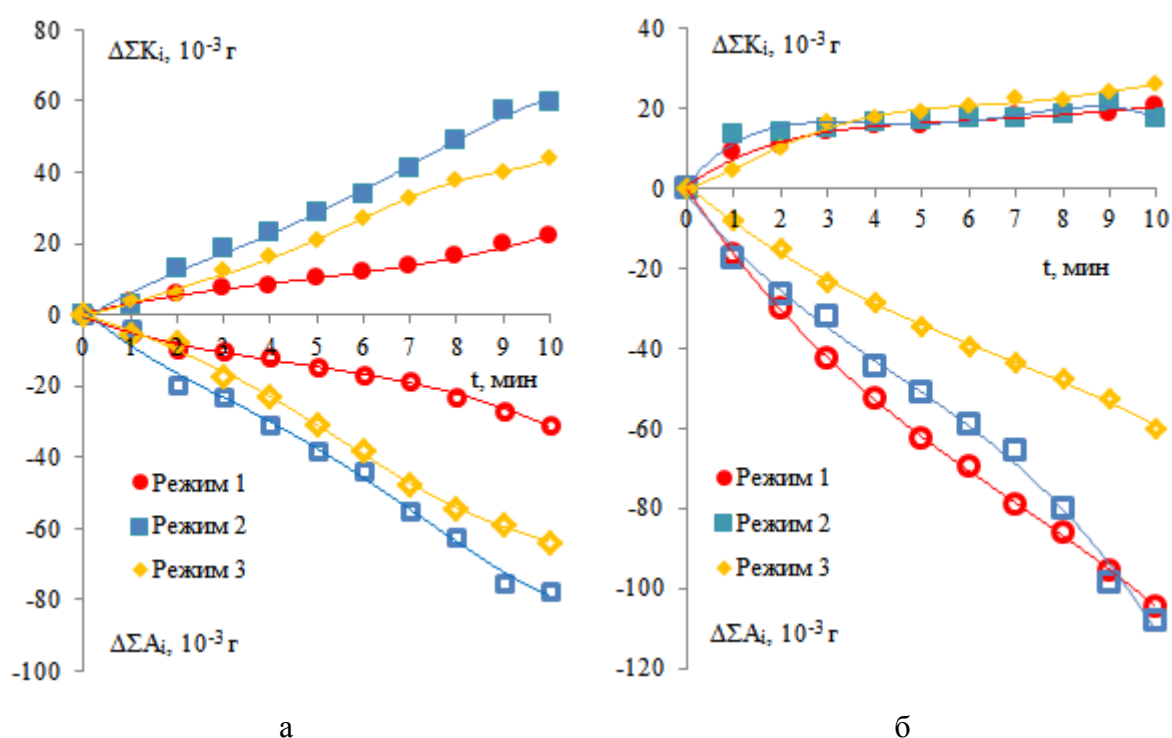


Рисунок 7 – Зависимость привеса суммарной массы катода $\Delta \Sigma K_i$ и суммарной эрозии анода $\Delta \Sigma A_i$ от длительности ЭИО электродами P6M5K5 (а) и P6M5K5-K (б)

Таблица 3 – Значения коэффициента переноса K_n и шероховатости R_a от режима ЭИО

Режим	P6M5K5		P6M5K5-K	
	K_n , %	R_a , мкм	K_n , %	R_a , мкм
1	72,67	7	32,86	14
2	81,03	6	46,11	13
3	69,76	12	68,51	18

По результатам исследования кинетики массопереноса, коэффициента переноса и шероховатости оптимальным режимом для ЭИО выбран режим 2, который обеспечивает минимальную шероховатость при относительно высоком для электрода Р6М5К5 (81,03 %) и среднем для электрода Р6М5К5-К (46,11 %) коэффициенте переноса.

Полученное при оптимальном режиме покрытие (которое состоит из аустенита) из электрода Р6М5К5 демонстрируют высокую однородность, практически отсутствие трещин, толщина составляет 20 - 22 мкм, твердость 9,1 ГПа, шероховатость 6 мкм. Покрытие из электрода Р6М5К5-К имеет толщину 35 - 50 мкм, твердость 15,8 ГПа при шероховатости 13 мкм. Фиксируются фаза на основе железа (α -Fe), борид и силицид железа, а также оксид гафния.

На рисунке 8 представлена топография и микроструктура покрытий из электродов Р6М5К5 и Р6М5К5

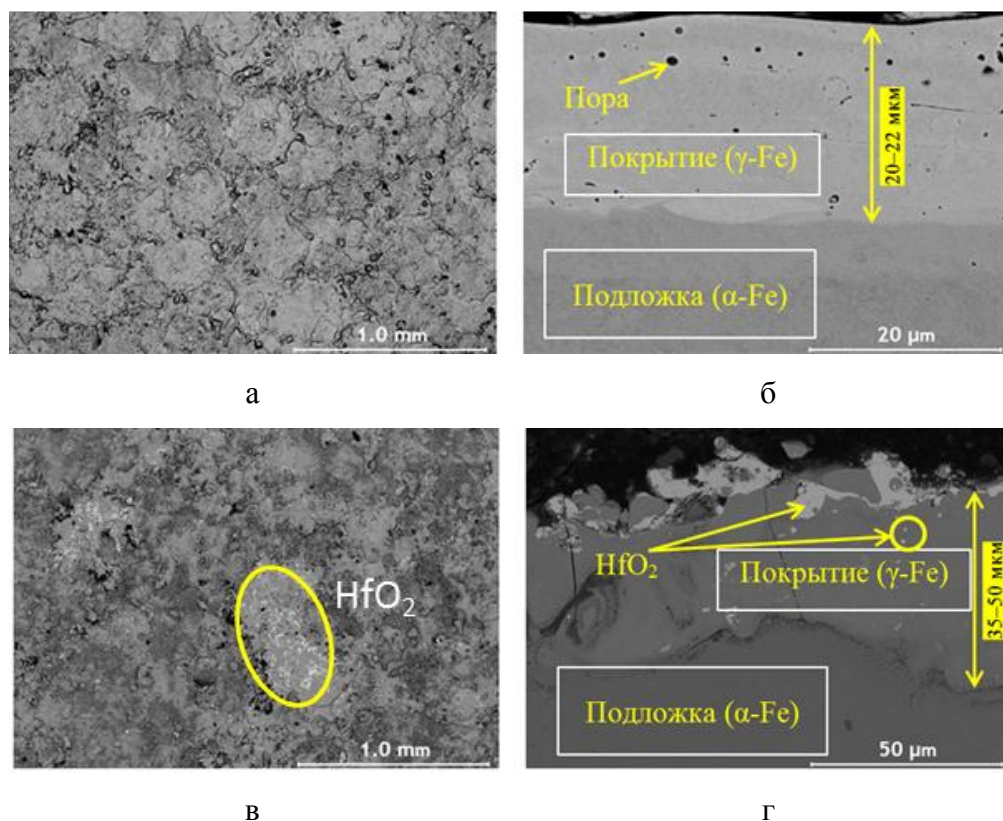


Рисунок 8 – РЭМ-изображения топографии (а, в) и микроструктуры покрытий (б, г) из электродов Р6М5К (а, б) и Р6М5К5-К (в, г)

Из приведенных изображений видно, что покрытия из электрода Р6М5К5 без введения керамической добавки относительно однородны, в нем практически отсутствуют трещины, в поверхностном слое имеются поры. Толщина слоя составляет 20 – 22 мкм, в шлифах наблюдается неоднородность, выражаемая в незначительной разнице в концентрациях молибдена и вольфрама. Основная фаза ЭИО слоя представлена аустенитом, поскольку в процессе обработки происходит оплавление частиц, наносимых на поверхность стальной подложки с их дальнейшей кристаллизацией при высоких скоростях, что практически представляет собой процесс закалки.

При введении гетерофазной керамики наблюдается увеличение шероховатости поверхностного слоя, меньшая однородность, отдельно наблюдаются частицы оксида гафния и матрица на основе железа, в которой растворены легирующие элементы как стали, так и керамической добавки. Согласно результатам РФА присутствуют фазы α -Fe, HfO_2 , HfSiO_4 , Fe_3Si и Fe_3B . Данные результаты согласуются с результатами ЭДС по фазам α -Fe и HfO_2 .

Были проведены высокотемпературные трибологические испытания, по результатам которых покрытие из электрода Р6М5К5-К ($2,82 \times 10^{-5} \text{ мм}^3/\text{Н/м}$) демонстрирует значительно большую износостойкость в сравнении с покрытием из электрода Р6М5К5 ($38,24 \times 10^{-5} \text{ мм}^3/\text{Н/м}$): приведенный износ меньше в 13,5 раз. Это, вероятно, связано как с высокой твердостью покрытия из-за содержания боридных фаз, так и с более высокой жаростойкостью из-за наличия в нем оксида гафния.

Общие выводы и результаты работы

1. Установлен оптимальный режим получения диффузионно-легированной добавки, содержащей вольфрам, молибден, кобальт и железо для получения порошковой смеси БРС Р6М5К5, которая демонстрирует высокую уплотняемость при холодном прессовании (до 84,0 % при 900 МПа). Выбрана оптимальная температура спекания (с ростом плотности до 90,6 % для заготовок, спрессованных при 900 МПа), которая обеспечивает получение структуры с меньшим размером зерна и отсутствием карбидной сетки. Проведено ГП с дальнейшей ТО, обеспечившее высокую плотность (97,2 %), микроструктуру с более мелкими структурными составляющими, с повышенной твердостью в сравнении со спеченными заготовками (63,3 HRA против

48,0 HRB), с $\sigma_{изг.}$ 630 МПа и $\sigma_{сж.}$ 1721 МПа. По результатам исследований получено ноу-хау «Способ получения диффузионно-легированной смеси на основе железа, содержащей вольфрам, молибден, кобальт и карбид тантала» и зарегистрировано в депозитарии НИТУ МИСИС. Также получена опытно-промышленной партия смеси в условиях ПАО «Северсталь».

2. Установлена оптимальная длительность обработки (30 мин) в ПЦМ для получения механолегированной порошковой смеси БРС Р6М5К5 при скорости вращения барабанов 800 об/мин и соотношении мелющих тел к порошку 10 к 1. Порошковая смесь, полученная при данном режиме, характеризуется высокой уплотняемостью при холодном прессовании. Определена оптимальная температура спекания (1200 °С), которая обеспечивает достижение малой остаточной пористости (7 %) за счет образования малого количества жидкой фазы в результате контактного плавления эвтектики, при сохранении мелкозернистой структуры без образования карбидной сетки, с дисперсным распределением карбидных включений M_6C . Проведено ГП при 1000 °С при давлении прессования 50 МПа с последующей ТО, с достижением твердости и красностойкости (66,0 и 59,0 HRC соответственно), сопоставимых с требованиями, прописанными в ГОСТ, при прочности $\sigma_{изг.}$ 1288 ± 12 МПа и $\sigma_{сж.}$ 2371 ± 12 МПа. Заготовка из порошковой смеси композиционной дисперсно-упрочненной БРС Р6М5К5 с добавкой 3 % VC характеризовалась более высокими прочностными показателями $\sigma_{изг.}$ 1946 ± 15 и $\sigma_{сж.}$ 2641 ± 10 .

3. Проведена промышленная апробация результатов работы, в том числе испытания стойкости режущих пластин из ГП-заготовок, на лабораторно-исследовательской базе ПАО «Туполев». Согласно результатам испытаний, пластины из порошковых смесей БРС Р6М5К5 с диффузионно-легированной добавкой и механолегированных порошковых смесей 10Р6М5, Р6М5К5 и Р6М5К5 с добавлением 3 % VC продемонстрировали стойкость в 1,13 – 1,60 раз выше, чем режущая пластина из горячекатаного прутка литой БРС Р6М5. Проведены опытно-промышленные испытания резцов БРС из ГП-заготовок в условиях ООО НПФ «УМГ».

4. Получены электроды из ГП-заготовок механолегированной порошковой смеси БРС Р6М5К5 и Р6М5К5 и 40 % гетерофазной керамики $MoSi_2 - MoB - HfB_2$ (Р6М5К5-К) для нанесения покрытий методом ЭИО на инструментальные стали. Разработана технологическая инструкция на процесс получения электродов ТИ № 58-11301236-2023. По результатам трибологических испытаний при температуре 500 °С, покрытия,

нанесенные из перечисленных электродов при выбранных оптимальных режимах на подложку из стали 5ХНМ, было определено, что введение гетерофазной керамики уменьшает приведенный износ в 13,5 раз. При этом покрытия из электродов Р6М5К5-К более шероховатые (R_a 13 мкм против 6 мкм для покрытий из Р6М5К5), но более толстые (35 – 50 мкм против 20 – 22 мкм).

Публикации автора по теме диссертации

Статьи, опубликованные в журналах, рекомендованных ВАК и входящие в базы данных Web of Science и Scopus:

1. Еремеева Ж.В., **Ахметов А.** Получение порошка быстрорежущей стали методом совместного восстановления оксидов вольфрама и молибдена и оксалата кобальта на железном порошке. Материаловедение. 2020. № 7. С. 30-33. DOI: 10.31044/1684-579X-2020-0-7-30-33

2. **Ахметов А.С.**, Еремеева Ж.В. Перспективы широкого применения водорода в порошковой металлургии. Металлург. 2021. № 3. С. 63-67. DOI: 10.52351/00260827_2021_03_63

3. **Ахметов А.С.**, Еремеева Ж.В. Изучение характера протекания диффузионного легирования смеси для порошковой быстрорежущей стали. Материаловедение. 2021. № 6. С. 13-16. DOI: 10.31044/1684-579X-2021-0-6-13-16

4. **Ахметов А.С.**, Еремеева Ж.В. Исследование структуры спеченных заготовок из порошковой смеси быстрорежущей стали Р6М5К5, содержащей диффузионно-легированный порошок. Металлург, 2022. № 3. С. 57 – 60. DOI 10.52351/00260827_2022_03_57

5. Бычкова М.Я., Манакова О.С., **Ахметов А.С.**, Кайсинов А., Авдеенко Е.Н., Логинов П.А., Воротыло С. Механические свойства и износостойкость металломатричных композитов на основе сплава Fe–Ni–Cu с полыми корундовыми микросферами. Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2022;(1):66-75. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2022-1-66-75>

6. **Ахметов А. С.**, Еремеева Ж. В., Рупасов С. И.. Исследование процесса горячего прессования порошковой смеси быстрорежущей стали с диффузионно-легированной добавкой // Материаловедение. – 2022. – № 9. – С. 35-40. – DOI 10.31044/1684-579X-2022-0-9-35-40.

7. **Ахметов А. С.**, Еремеева Ж. В. Изменение микроструктуры и твердости после

термической обработки заготовки из порошковой быстрорежущей стали P6M5K5, содержащей диффузионно-легированную добавку // Перспективные материалы. – 2023. № 3. - С. 43-48. DOI: 10.30791/1028-978X-2023-3-43-48

8. Loginov, P.A.; Fedotov, A.D.; Mukanov, S.K.; Manakova, O.S.; Zaitsev, A.A.; **Akhmetov, A.S.**; Rupasov, S.I.; Levashov, E.A. Manufacturing of Metal–Diamond Composites with High-Strength CoCrCuxFeNi High-Entropy Alloy Used as a Binder. Materials 2023, 16, 1285. <https://doi.org/10.3390/ma16031285>

Результаты интеллектуальной деятельности:

9. Еремеева Ж.В., Ахметов А.С., Лопатин В.Ю. Способ получения диффузионно-легированной смеси на основе железа, содержащей вольфрам, молибден, кобальт и карбид тантала. Свидетельство о регистрации ноу-хау № 02-340-2023 ОИС от «14» марта 2023 г. Депозитарий ноу-хау НИТУ МИСИС

10. Еремеева Ж.В., Пацера Е.И., Ахметов А. Способ получения порошка быстрорежущей стали механическим легированием. Патент РФ № 2799363 от 10.06.2022, бюл. изобретения № 19 от 05.07.2023;

Публикации в материалах научно-технических конференций:

11. Еремеева Ж.В., **Ахметов А.С.** Получение диффузионно-легированной порошковой смеси быстрорежущей стали восстановлением исходного сырья в водороде. В сборнике: СНК-2020. материалы Юбилейной LXX открытой международной студенческой научной конференции Московского Политеха. Москва, 2020. С. 21-24

12. **Ахметов А.С.**, Еремеева Ж.В. Исследование возможности получения высокоуплотняемой порошковой смеси порошковой быстрорежущей стали. Новые материалы и перспективные технологии. Шестой междисциплинарный научный форум с международным участием. Москва, 2020. С. 370-373.

13. Еремеева Ж. В., **Ахметов А.** Метод получения порошковой смеси для быстрорежущей стали с диффузионным легированием. 12-й международный симпозиум «Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы, сварка». Минск. 2021. С 198-202.

14. **Ахметов А.С.** Получение порошковой смеси порошковой быстрорежущей стали 10P6M5K5 механическим легированием. Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2021» / Отв. ред. И.А. Алешковский,

А.В. Андриянов, Е.А. Антипов, Е.И. Зимакова. [Электронный ресурс] – М.: МАКС Пресс, 2021. – 1 электрон. опт. диск (DVD-ROM); 12 см. – 2000 экз.

15. **Ахметов А.С.**, Еремеева Ж.В. Совместное восстановление неорганических соединений в водороде. 2021. Труды Международной научно-практической online конференции «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации» (Сагиновские чтения №13), посвященной 30-летию Независимости Республики Казахстан, 17-18 июня 2021 г. Министерство образования и науки РК, Карагандинский технический университет. – Караганда: Изд-во КарТУ, 2021 С. 1286 – 1288.

16. **Ахметов А.С.**, Еремеева Ж.В., Арапбай Е.А. Исследование технологических свойств порошковой смеси быстрорежущей стали Р6М5К5 с добавкой карбида титана. Сборник научных статей 7-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении» (10-11 февраля 2022 года)/ редкол.: Разумов М.С. (отв. ред.). Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2022. С. 34 – 36

17. **Ахметов А.С.**, Еремеева Ж.В. Микроструктурное исследование спеченных и горячепрессованных заготовок из порошковой смеси быстрорежущей стали с диффузионно-легированной добавкой. Сборник тезисов XI конференции молодых специалистов по перспективам развития металлургических технологий. М.: ЦНИИЧермет им. И.П. Бардина, 2022. С. 33-34

18. **Ахметов А.С.**, Еремеева Ж.В., Арапбай Е.А., Чударин Ф.И. Методы улучшения прессуемости порошковой быстрорежущей стали. Сборник трудов Международной научно-технической конференции «Машиностроительные технологические системы» (METS-2022). Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2022. С. 244 – 247.

19. **Ахметов А.С.**, Еремеева Ж.В. Спекание механоактивированного порошка быстрорежущей стали 10P6M5 с добавкой карбида ванадия VC. Сборник научных статей 3-й Международной научно-практической конференции «Современные проблемы и направления развития металловедения и термической обработки металлов и сплавов». Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2022. С. 44-48

20. **Ахметов А.С.**, Еремеева Ж.В. Влияние добавки карбида бора на свойства порошковой быстрорежущей стали Р6М5К5. Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении». Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет. 2022 г. С. 56-58.