

На правах рукописи

**Мурашова Наталья Александровна**

**РАЗРАБОТКА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ,  
ЗАКОНОМЕРНОСТИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ  
И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРИ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИИ**

Специальность: 05.02.01. – Материаловедение (машиностроение)

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**



Н. Новгород, 2004г.

Работа выполнена в Нижегородском государственном техническом университете

Научный руководитель доктор технических наук,  
профессор Сорокин Всеволод Константинович

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор Шмаков Геннадий Сергеевич (Н. Новгород)  
кандидат ~~ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК~~  
Глебов Владимир Васильевич (Н.Новгород)

Ведущее предприятие – ОАО «Выксунский металлургический завод», г. Выкса  
Нижегородской обл.

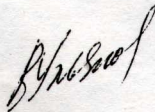
Защита состоится «14» декабря 2004 г. в «15.00» часов на заседании диссертационного  
совета Д 212.165.07 в Нижегородском государственном техническом университете по  
адресу: 603600, ГСП-41, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24, корп. №1, ауд. 1258.

Ваш отзыв на автореферат, заверенный печатью организации, просим высылать по  
указанному адресу на имя секретаря диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Нижегородского государственного  
технического университета.

Автореферат разослан «12» 1 12 2004 г.

Ученый секретарь диссертационного совета \_\_\_\_\_ а,  
доктор технических наук, профессор



В.А. Ульянов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Задачи ускорения научно-технического прогресса вызывают необходимость разработки материалов и эффективных технологий их изготовления, основанных на изучении структурообразования и формирования свойств, в частности, в порошковой металлургии.

Одним из важных направлений развития в материаловедении является расширение области применения порошковых материалов, что связано с повышением уровня физико-механических свойств. Закономерности консолидации порошковых тел и достижения заданных свойств изучали А.Зауэрвальд, Я.И.Френкель, Б.Я.Пинес, М.Ю.Бальшин, Г.Г.Кучинский, Х.Хауэзер, Р.Кинджери, Р.А. Андриевский, Я.Е. Гегузин, В.А.Ивсенен, В.В.Скорород, Г.В.Самсонов, И.М. Федорченко, М.С.Ковальченко и др. Установление закономерностей структурообразования порошковых материалов остается актуальной задачей, в частности, создание оптимальных технологических процессов изготовления порошковых материалов с заданным комплексом свойств, способами формования и спекания порошков. Исследуемые композиционные материалы широко применяются в машиностроении, так система «металл-графит» используется при изготовлении антифрикционных материалов, система «металл-алмаз» - изготовления инструмента, система Cu-Ni – в качестве антифрикционных и конструкционных материалов, для изготовления высокопрочных материалов применяется композиция Ni-Mo, а так же псевдосплавы типа Cu-W, Cu-Mo.

Среди множества композиций широкое применение имеют композиции на основе железа, никеля и меди, особенно многокомпонентные дисперсионно-твердеющие. Их использование позволяет создавать порошковые материалы с высокой прочностью, вследствие образования дисперсных фаз в процессе закалки и старения.

Однако, эти композиции и их структурообразование изучены недостаточно полно.

**Цель работы.** Установление закономерностей процессов структурообразования и формирования физико-механических свойств при формовании и спекании двухкомпонентных порошковых композиций на основе железа, никеля и меди с различным типом взаимодействия компонентов в твердом состоянии и разработка технологии изготовления некоторых дисперсионно-твердеющих четырехкомпонентных порошковых материалов на основе железа и никеля с высокими прочностными свойствами.

Достижение поставленной цели осуществлялось посредством решения следующих задач:

1. Установление закономерностей уплотнения пористых тел при прессовании двухкомпонентных порошковых композиций.
2. Изучение влияния твердых дисперсных наполнителей на процессы прессования и спекания порошковых композиций.
3. Получение концентрационных зависимостей усадки, пористости и микротвердости порошковых двухкомпонентных материалов при спекании для случаев полной растворимости, ограниченной растворимости и отсутствия растворимости компонентов в твердом состоянии.
4. Изучение влияния химического состава четырехкомпонентных композиций Fe-Cu-Mo-Co и Ni-Fe-Cu-Sn на механические свойства после формования и спекания.
5. Получение математических моделей и графоаналитических зависимостей «свойства – состав» с целью установления влияния легирующих элементов на характеристики дисперсионно-твердеющих композиций, оптимизации химического состава четырехкомпонентных листовых материалов и режимов обработки, обеспечивающих изготовление высокопрочных порошковых материалов.
6. Разработка программы для ЭВМ «Система моделирования двухкомпонентных порошковых композиций»
7. Разработка технологии изготовления дисперсионно-твердеющих листовых материалов из композиций Fe-Cu-Mo-Co и Ni-Fe-Cu-Sn.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. Установлены закономерности уплотнения пористых тел при прессовании порошковых композиций на основе железа, никеля и меди с введением дисперсных твердых наполнителей в

зависимости от концентрации второго компонента с использованием аналитических формул М.Ю. Бальшина, К.Конопицкого, А.Н. Николаева, И.Д. Радомыслевского и Н.Н. Щербаня.

2. Получены концентрационные зависимости линейной и объемной усадки, пористости, микротвердости для порошковых двухкомпонентных композиций на основе железа, никеля и меди для случаев с полной и ограниченной растворимостью и отсутствия растворимости компонентов в твердом состоянии.

3. Установлены закономерности влияния дисперсных алмазных наполнителей и других твердых включений, состава порошковых композиций на уплотняемость пористых тел, показатели прессуемости и спекаемости порошков.

4. Создана программа для ЭВМ «Система моделирования двухкомпонентных порошковых композиций», позволяющая анализировать показатели прессуемости серии порошковых композиций из базы данных и предназначенная для решения задач выбора оптимальных порошковых композиций.

5. Получены математические модели зависимости объемной усадки, изменения пористости, предела прочности при растяжении и микротвердости в зависимости от химического состава четырехкомпонентных композиций железо-медь-молибден-кобальт и никель-железо-медь-олово, в соответствии с матрицами планирования экспериментов.

6. Разработаны технологические процессы изготовления листовых материалов из дисперсионно-твердеющих четырехкомпонентных порошковых композиций железо-медь-молибден-кобальт и никель-железо-медь-олово.

Достоверность полученных результатов обеспечивается значительным объемом и воспроизводимостью экспериментальных данных, применением современных методов изучения прессуемости, спекаемости и физико-механических свойств порошковых композиций, применением и обоснованностью методов математического моделирования с получением адекватных моделей, промышленным опробованием технологии изготовления материалов.

#### Практическая ценность работы.

1. Получены численные значения показателей прессуемости порошковых двухкомпонентных композиций, апробированы по формулам разных авторов, создана программа для ЭВМ «Система моделирования двухкомпонентных порошковых композиций».

2. Установлены численные значения усадки, пористости и микротвердости двухкомпонентных порошковых композиций на основе железа, никеля и меди для случаев с полной и ограниченной растворимостью и отсутствием растворимости компонентов в твердом состоянии при спекании.

3. Установлены составы и технологические режимы и технологии изготовления дисперсионно-твердеющих четырехкомпонентных порошковых материалов Ni-Fe-Cu-Sn и Fe-Cu-Mo-Co, обеспечивающие высокие прочностные свойства по сравнению с существующими аналогами для изготовления отрезных кругов.

4. Проведено промышленное опробование технологии изготовления четырехкомпонентных листовых материалов в производственных условиях цеха пористого проката ОАО «Выксунский металлургический завод».

5. Результаты работы использованы при проведении учебных практических занятий по дисциплине «Управление структурой и свойствами порошковых материалов» для магистрантов 6-го курса по магистерской программе 551606 в Нижегородском государственном техническом университете.

#### Основные положения, представляемые на защиту.

1. Установленные закономерности уплотнения пористых тел при прессовании порошковых двухкомпонентных композиций различного состава на основе железа, никеля и меди.

2. Установленные концентрационные зависимости усадки, пористости, микротвердости и микроструктуры двухкомпонентных порошковых композиций для случаев с наличием полной растворимости и ограниченной растворимости компонентов и отсутствия растворимости компонентов в твердом состоянии.

3. Установленные закономерности и математические модели влияния химического состава четырехкомпонентных порошковых композиций железо-медь-молибден-кобальт и никель-железо-медь-олово на их характеристики после спекания и ряда циклов холодной прокатки и термической обработки.
4. Технология изготовления высокопрочных четырехкомпонентных материалов Fe-Cu-Mo-Co и Ni-Fe-Cu-Sn.

**Апробация работы.** Основные результаты работы доложены и обсуждены на научно-технических конференциях: XI международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых: «Современные техника и технологии СТТ 2003», г. Томск, 2003 г., по результатам работы конференции получен диплом: «Fifth International Young Scholar's Forum of the Asia-Pacific Region Countries.», Russia, с. Vladivostok, 2003, по результатам работы конференции получен диплом за лучший доклад: «Международный форум по проблемам науки, техники и образования.», Россия, г. Москва, г. 2003.; III межвузовская научно-техническая конференция «Фундаментальные проблемы металлургии», г. Екатеринбург, 2003 г.; Нижегородская сессия молодых ученых: секция «Технические науки», 2002 г., 2003 г., 2004 г.; II региональная молодежная научно-техническая конференция «Будущее технической науки нижегородского региона», г. Н. Новгород, 2003 г.; III Всероссийская молодежная научно-техническая конференция «Будущее технической науки», г. Н. Новгород, 2004 г.; научно-техническая конференция ФМВТ «Материаловедение в машиностроении», г. Н. Новгород, 2000 г.; научно-техническая конференция ФМВТ «Материаловедение в машиностроении», г. Н. Новгород, 2001 г.

Представленная работа получила диплом лауреата премии Ученого Совета НГТУ и стипендии имени академика Г.А.Разуваева № 797 за 2002 г., № 944 за 2003 г., стипендию правительства РФ за 2003 г. и выполнена в соответствии с направлением научных исследований, проводимых по заданию Министерства образования и науки РФ «Разработка фундаментальных основ создания новых материалов с заданными свойствами». Тема зарегистрирована во Всероссийском научно-техническом информационном центре, номер государственной регистрации 01.0.40.000342 от 24 марта 2004 года.

#### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 20 печатных работ в сборниках статей, научных трудов и тезисах докладов, получено свидетельство РФ об официальной регистрации программы для ЭВМ.

**Личный вклад автора.** Состоит в выполнении всего объема экспериментальных исследований, получении теоретических и экспериментальных результатов, участии в проведении промышленного опробования технологических процессов изготовления четырехкомпонентных листовых материалов состава железо-медь-молибден-кобальт и никель-железо-медь-олово.

#### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы из 192 наименований, приложений. Изложена на 229 страницах, имеет 112 рисунков и 34 таблицы.

### **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность исследований связей между видом взаимодействия элементов двухкомпонентных и четырехкомпонентных порошковых композиций, параметрами технологии изготовления высокопрочных материалов, структурой и комплексом физико-механических свойств, отмечается научная новизна и практическая ценность диссертационной работы, сформулированы положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** сделан обзор литературных данных об основных закономерностях формирования структуры порошковых материалов, определяющих уровень их физико-механических свойств. Проанализированы методы образования структурных составляющих и математические зависимости, описывающие процессы уплотнения порошковых тел при формовании и спекании.

Показаны основные зависимости изменения в зеренной структуре и поровом пространстве при спекании порошковых композиций. Установлено, что на процесс спекания

многокомпонентных порошковых систем оказывают влияние явления гетеродиффузии; в системах с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии наряду с монотонными концентрационными зависимостями усадки наблюдаются аномалии, связанные с образованием интерметаллидной фазы, которая ухудшает спекаемость порошкового тела. В системах с отсутствием растворимости компонентов в твердом состоянии усадка лимитируется поведением элемента с меньшим значением температуры плавления; в системах с полной растворимостью компонентов в твердом состоянии усадка уменьшается по мере увеличения содержания одного из компонентов, а при малых временах спекания наблюдается рост, который зависит от начальной пористости.

Обзор литературных источников показал, что теории, описывающие поведение порошкового тела в условиях упругой и вязкой деформации, не учитывают пластическую деформацию при наличии больших сдвиговых деформаций. Не сформулированы общие закономерности по границам стадий уплотнения порошковых композиций при формовании. Существующие закономерности процесса спекания носят качественный характер, основные параметры спекания принимаются опытным путем, без глубоких объяснений и обоснований, т.к. к порошковым материалам нельзя применять режимы и технологические процессы термической обработки компактных сплавов. На основе анализа состояния исследуемого вопроса сформулированы приведенные выше цель и задачи исследования, решение которых и составило основное содержание работы.

**Во второй главе**, исходя из поставленных задач, обоснован выбор материалов (объектов исследования), методов исследований, оборудования, режимов проведения исследований. Приведены характеристики исходных металлических порошков. В качестве исходных порошков для композиций, подвергнутых исследованиям, были выбраны порошки железа (ПЖРВу.22.200.28., ПЖРВу.23.056.21), никеля (ПНК-ОТ1, ПНК-1Л5), меди (ПМС-1), кобальта (ПК-1у), вольфрама (ПВТ) и молибдена (МПИ). Материалы на основе железа, никеля и меди занимают большой объем в промышленности и широко используются для изготовления порошковых изделий.

Определение численных значений показателей прессуемости осуществляли в соответствии с методиками, предложенными следующими исследователями: М.Ю. Бальшин, А.Н. Николаев, К. Конопицкий, И.Д. Радомысльский и Н.И. Щербань. Для изучения механических свойств (микротвердость, прочность при растяжении) применены стандартные методы. Микротвердость определяли вдавливанием алмазного наконечника с нагрузкой 0,490 Н на приборе ПМТ-3. Микрофотографии шлифов получены на микроскопе при увеличении  $\times 500$ . Результаты измерений обрабатывались с применением методов математической статистики. Для определения оптимального состава и технологии изготовления четырехкомпонентного высокопрочного материала использован метод математического моделирования.

**В третьей главе** выполнено исследование изменений пористости и показателей уплотняемости композиций «металл-алмаз» при прессовании смесей порошков в брикеты, давление прессования изменялось в интервале от 0 до 100 МПа. Изучены концентрационные зависимости пористости, а также влияние размера зерна алмазов от 3/5 до 80/63 мкм на пористость алмазосодержащих композиций на основе меди (ПМС-1) и железа (ПЖРВу.22.200.28.):

1. Увеличение содержания алмаза в образцах на медной основе марки ПМС-1, спрессованных при давлении, равном 39 МПа, от 0 до 18,83 мас.% увеличивает пористость от 28,7% до 50,2%.
2. Уменьшение дисперсности алмазного порошка ведет к снижению пористости с 32,4% до 22,2% (давление прессования 39 МПа) и с 14,7% до 12,4% (давление прессования 72 МПа).
3. Установлены численные значения показателей уплотняемости по формулам М.Ю. Бальшина, К. Конопицкого, А.Н. Николаева, И.Д. Радомысльского и Н.И. Щербаня и выполнен анализ характеристик уплотняемости смесей «медь-алмаз», «железо-алмаз» и «железо-графит» (рис. 1, табл. 1).

4. Показано, что логарифмическое уравнение М.Ю. Бальшина описывает процесс прессования в большом интервале изменений давления прессования.

Выполнено исследование изменений пористости и других характеристик прессуемости композиций «металлическая матрица - твердый наполнитель» при формировании смеси порошков в брикеты. Изучено влияние содержания твердого наполнителя (от 0 до 20 мас.%) при использовании в качестве основы композиций меди марки ПМС-1, никеля ПНК-0Т1 и ПНК-1Л5, железа марки ПЖРВу.22.200.28., а также влияние формы частиц фракций никелевого порошка: 1.Пористость двухкомпонентных прессовок уменьшается с введением порошка вольфрама; 2.Введение медного порошка в двухкомпонентную порошковую композицию снижает пористость прессовок;

Таблица 1 – Расчет характеристик прессуемости по формулам М.Ю. Бальшина (L, m), К. Конопицкого (A), А.Н. Николаева (C), И.Д. Радомысльского – Н.И. Щербаня (n) для композиций железо – графит

Концентрация наполнителя, мас.%	L	m	A	C	n <sub>1</sub>	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>
0,0	1,55	4,75	1750,0	-	-	-	-
1,0	1,04	4,26	1222,2	0,65	0,27	0,40	0,40
3,0	1,28	4,69	1122,2	0,71	0,25	0,32	0,30
5,0	1,44	5,16	1044,0	0,72	0,18	0,27	0,20
10,0	1,78	5,95	970,0	0,73	0,15	0,17	0,13
15,0	4,43	7,23	855,0	0,73	0,07	0,11	0,13
20,0	6,50	7,65	-	-	0,06	0,10	0,01

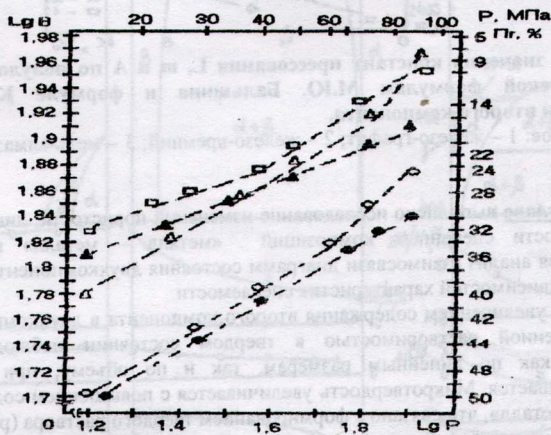


Рис.1. Зависимость относительной плотности прессовок от давления прессования на основе меди с алмазным наполнителем: ▲ - 10,39 мас.% АСР 20/14; □ - 10,39 мас.% АСР 80/63; △ - 5,48 мас. % АСР 80/63 и на основе железа с наполнителями: ● - 10,39 мас.% АСР 80/63; ○ - 1,95 мас.% графита.

3. Введение порошка кобальта в двухкомпонентную порошковую композицию повышает значения пористости прессовок;
4. Насыпная плотность определяет прессуемость порошковых композиций на начальном этапе прессования, с увеличением насыпной плотности наблюдается снижение прессуемости брикетов. В дальнейшем насыпная плотность не оказывает существенного воздействия на прессуемость порошковых двухкомпонентных композиций;
5. Сферическая форма частиц порошка ухудшает характеристики прессуемости порошковой двухкомпонентной композиции.

Выполнен анализ прессуемости смесей «металлическая матрица - твердый наполнитель» с использованием литературных данных по формулам М.Ю. Бальшина, К. Конопицкого, А.Н. Николаева, И.Д. Радомысльского и Н.И. Щербаня, установлены численные значения констант (рис.2). Проведенный анализ поэтапного уплотнения пористых порошковых двухкомпонентных композиций показал, что композиции на никелевой и железной основах при прессовании проходят все три этапа прессуемости.

Результаты, полученные при анализе прессуемости, вошли в программу для ЭВМ «Система моделирования двухкомпонентных порошковых композиций». Программа позволяет анализировать показатели прессуемости серии порошковых композиций и предназначена для решения задач оптимизации процесса прессования порошковых композиций.

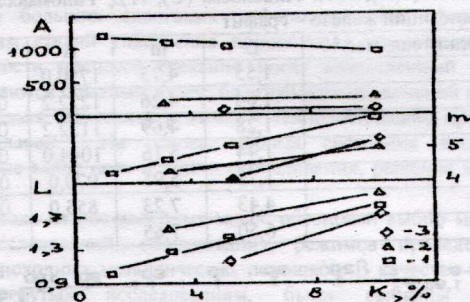


Рис.2. Зависимость значения констант прессования  $L$ ,  $m$  и  $A$  по полулогарифмической и логарифмической формулам М.Ю. Бальшина и формуле К.Конопицкого от концентрации второго компонента.

Смеси порошков: 1 – железо-графит; 2 – железо-кремний; 3 – медь-алмазный порошок АСР 80/63

**В четвертой главе** выполнено исследование изменений пористости, линейной и объемной усадок, микротвердости спеченных композиций «металл – металл» и «металл-алмаз». Результатами является анализ взаимосвязи диаграмм состояния двухкомпонентных композиций и концентрационных зависимостей характеристик спекаемости:

1. Установлено, что с увеличением содержания второго компонента в двухкомпонентной системе Ni-Co с неограниченной растворимостью в твердом состоянии наблюдается небольшое увеличение усадки как по линейным размерам, так и по объему; при этом пористость незначительно уменьшается. Микротвердость увеличивается с повышением содержания кобальта в системе «металл - металл», что связано с формированием твердого раствора (рис. 3).

2. Система Cu-Ni с неограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии отличается тем, что с увеличением содержания меди до 50 мас.%, происходит рост размеров, обусловленный гетеродиффузией. Микротвердость композиции Cu-Ni максимальна при равном соотношении компонентов.

3. В системах с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии наряду с монотонными зависимостями усадки от количества наполнителя в сплавах наблюдаются аномалии в случаях образования на этом этапе интерметаллидных фаз. Повышенное содержание кобальта и железа в системах с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии без образования интерметаллидных соединений Cu-Co (рис. 3) и Cu-Fe приводит к увеличению усадки. Максимальное значение усадки достигается в системе Cu-Fe при содержании меди в интервале от 90 до 100 мас.%.  
4. В системах Ni-W, Ni-Mo, Fe-Mo, Fe-W (рис.3), Ni-Sn с ограниченной растворимостью компонентов при образовании интерметаллидов в твердом состоянии наблюдается уменьшение линейной и объемной усадок. Концентрационные кривые усадок имеют параболический характер, при содержании второго компонента в интервале от 20 до 90 мас.% происходит рост, затем усадка



увеличивается. Пористость при увеличении содержания изученных вторых компонентов увеличивается. Микротвердость таких систем растет с увеличением концентрации W и Mo, достигает максимальных значений в интервале их содержания от 60 до 80 мас.% в результате образования интерметаллидных соединений.

5.В системах Cu-W (рис.4) и Cu-Mo, а так же Cu- алмаз, с отсутствием растворимости компонентов в твердом состоянии, с увеличением содержания W, Mo или алмаза наблюдается уменьшение усадки. Показано, что в системе Cu-W с отсутствием растворимости компонентов усадка уменьшается до нуля при содержании вольфрама 80 мас.%, а в системе Cu-Mo усадка уменьшается до нуля при содержании молибдена 50 мас.%. Концентрационная кривая микротвердости по характеру аналогична концентрационной кривой усадки. В системах Cu-Mo с отсутствием растворимости компонентов в твердом состоянии пористость растет при содержании в композиции Mo более 20 мас.%.

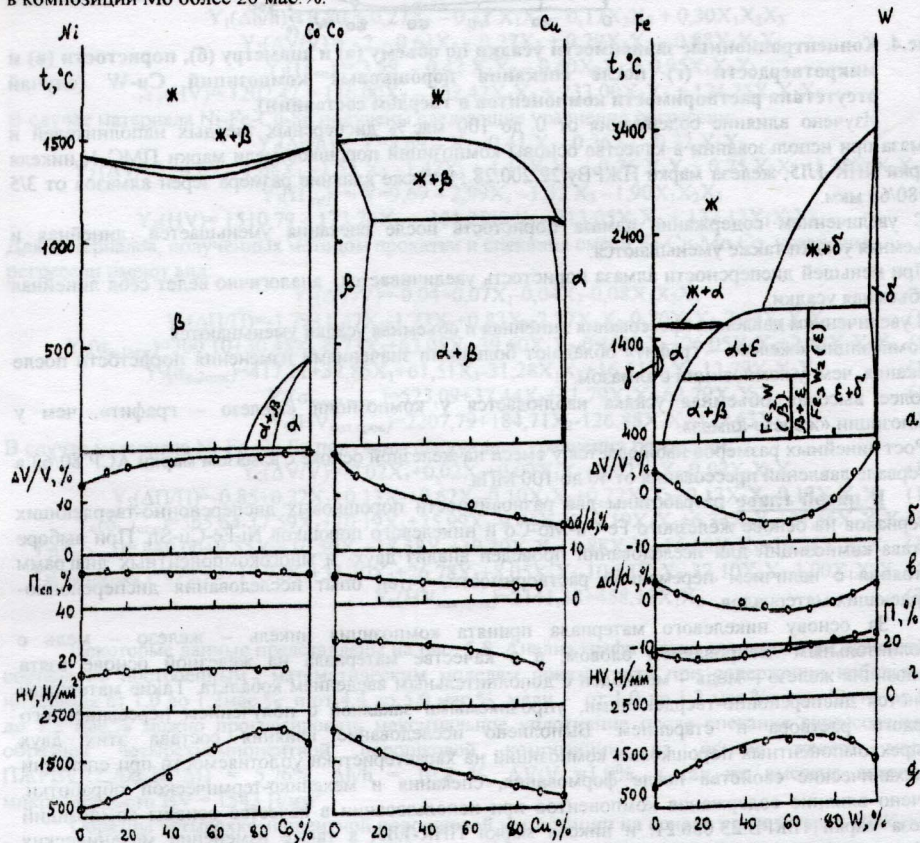
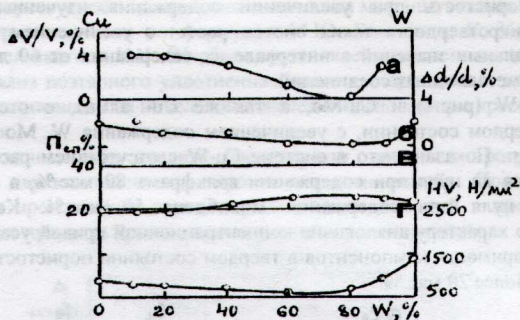


Рис.3. Диаграммы состояний Ni-Co, Co-Cu, Fe-W (а), концентрационные зависимости усадки по объему (б) и диаметру (в), пористости после спекания (г) и микротвердости (д).



**Рис.4.** Концентрационные зависимости усадки по объему (а) и диаметру (б), пористости (в) и микротвердости (г) после спекания порошковых композиций Cu-W (случай отсутствия растворимости компонентов в твердом состоянии).

Изучено влияние содержания от 0 до 100 мас.% дисперсных твердых наполнителей и алмаза при использовании в качестве основы композиций порошков меди марки ПМС-1, никеля марки ПНК-1Л5, железа марки ПЖРВу.22.200.28, а также влияние размера зерен алмазов от 3/5 до 80/63 мкм.:

1. С увеличением содержания алмаза пористость после спекания уменьшается, линейная и объемная усадки также уменьшаются.
2. При меньшей дисперсности алмаза пористость увеличивается, аналогично ведет себя линейная и объемная усадки.
3. С увеличением давления прессования линейная и объемная усадки уменьшаются.
4. Композиции «железо – графит» обладают большими значениями изменения пористости после спекания, чем у композиции с алмазом.
5. Более высокая объемная усадка наблюдается у композиции «железо – графит», чем у композиции «железо-алмаз».
6. Рост линейных размеров наблюдается у смеси на железной основе с алмазом марки АСР 80/63 в интервале давлений прессования от 40 до 100 МПа.

**В пятой главе** разработаны две разновидности порошковых дисперсионно-твердеющих материалов на основе железного Fe-Cu-Mo-Co и никелевого порошков Ni-Fe-Cu-Sn. При выборе состава композиций для исследований проведен анализ двух- и многокомпонентных диаграмм состояния с наличием переменной растворимости, учтен опыт исследования дисперсионно-твердеющих материалов.

За основу никелевого материала принята композиция никель – железо – медь с дополнительным легированием оловом, а в качестве материала на железной основе взята композиция железо – медь – молибден с дополнительным введением кобальта. Такие материалы являются дисперсионно-твердеющими, упрочняемыми закалкой с получением пересыщенного твердого раствора и старением. Выполнено исследование влияния состава этих двух четырехкомпонентных порошковых композиций на характеристики уплотняемости при спекании и механические свойства после формования, спекания и механико-термической обработки. Изучено влияние содержания компонентов при использовании в качестве основы композиций железа марки ПЖРВ.23.056.21. и никеля марки ПНК-1Л5, а также изменение механических свойств при изготовлении листовых материалов. С целью прогнозирования характеристик и определения оптимальных составов порошковых композиций и технологических режимов изготовления порошковых лент использована методика полного факторного эксперимента.

Для композиции Fe-Cu-Mo-Co изменяемыми факторами являются содержание следующих компонентов:  $X_1$  – медь;  $X_2$  – молибден;  $X_3$  – кобальт. В качестве основного уровня и интервала варьирования приняты для  $X_1$  – 5 и 2 мас.%,  $X_2$  – 3 и 2 мас.%,  $X_3$  – 3 и 2 мас. %.

В случае порошковой композиции Ni-Fe-Cu-Sn изменяемыми факторами приняты содержание:  $X_1$  – железо;  $X_2$  – медь;  $X_3$  – олово. В качестве основного уровня и интервалов варьирования установлены для  $X_1$  – 20 и 3 мас.%,  $X_2$  – 10 и 3 мас.%,  $X_3$  – 8 и 2 мас.%

На основании экспериментальных данных получены уравнения регрессии. У образцов, изготовленных способом прессования и спекания; определяли линейную ( $Y_1$ ) и объемную усадку ( $Y_2$ ), пористость после спекания ( $Y_3$ ), микротвердость ( $Y_4$ ). Для листового порошкового материала изучали объемную усадку ( $Y_2$ ), изменения пористости после спекания ( $Y_3$ ), предел прочности при растяжении после 1-го ( $Y_6$ ) и 2-го циклов механико-термической обработки ( $Y_7$ ), заключительной холодной прокатки ( $Y_8$ ), а также микротвердость после последней прокатки ( $Y_9$ ) от содержания компонентов композиции Fe-Cu-Mo-Co и Ni-Fe-Cu-Sn ( $X_1, X_2, X_3$  соответственно).

Для материалов, полученных методом прессования смесей Fe-Cu-Mo-Co, уравнения регрессии имеют вид:

$$Y_1(\Delta h/h) = 0,80 + 0,27X_1 - 0,12 X_1 X_3 - 0,17X_2 X_3 + 0,30X_1 X_2 X_3 \quad (1)$$

$$Y_2(\Delta V/V) = -2 - 0,61X_1 - 0,27X_3 + 0,29X_2 X_3 - 0,88X_1 X_2 X_3 \quad (2)$$

$$Y_3(\Pi_{\text{сп}}) = 3,59 - 0,42 X_1 X_2 - 0,40X_2 X_3 + 0,95X_1 X_2 X_3 \quad (3)$$

$$Y_4(\text{HV}) = 1202,42 + 116,00X_2 - 132,42X_1 X_3 + 233,00X_2 X_3 + 124,25X_1 X_2 X_3 \quad (4)$$

В случае материала Ni-Fe-Cu-Sn получены следующие уравнения регрессии:

$$Y_1(\Delta h/h) = Y = 3,69 - X_1 - 0,41 X_2 - 0,36X_3 - 0,32 X_2 X_3 \quad (5)$$

$$Y_2(\Delta V/V) = 4,65 - 1,68X_1 - 1,55 X_2 - 1,47X_3 + 1,10X_1 X_2 + 0,76 X_1 X_3 + 0,75 X_2 X_3 - 1,35X_1 X_2 X_3 \quad (6)$$

$$Y_3(\Pi_{\text{сп}}) = Y = 9,69 - 2,99X_1 - 1,32 X_3 - 1,90X_1 X_2 X_3 \quad (7)$$

$$Y_4(\text{HV}) = 1510,79 - 173,26X_1 - 101,25X_1 X_2 - 213,05X_1 X_3 + 132,12X_1 X_2 X_3 \quad (8)$$

Для материалов, полученных методом прокатки и спекания смеси Fe-Cu-Mo-Co, уравнения регрессии имеют вид:

$$Y_2(\Delta V/V) = -0,04 + 0,07X_1 - 0,04X_2 - 0,08X_1 X_2 X_3 \quad (9)$$

$$Y_3(\Delta \Pi/\Pi) = -1,79 + 1,47X_1 - 1,73X_2 + 0,83X_3 - 2,27X_1 X_2 - 0,70X_2 X_3 - 2,34X_1 X_2 X_3 \quad (10)$$

$$Y_6(\sigma_{\text{в,1отж}}) = 300,10 + 30,48X_1 - 6,73X_2 + 63,08X_3 - 39,60X_1 X_2 - 0,10X_1 X_3 + 26,05X_2 X_3 + 2,43X_1 X_2 X_3 \quad (11)$$

$$Y_7(\sigma_{\text{в,2отж}}) = 417,21 + 32,86X_1 + 61,51X_3 - 31,28X_1 X_2 + 16,51X_2 X_3 - 13,79X_1 X_2 X_3 \quad (12)$$

$$Y_8(\sigma_{\text{в,хол.прок.}}) = 523,09 + 37,44X_3 + 21,79X_1 X_3 - 62,79X_1 X_2 X_3 \quad (13)$$

$$Y_9(\text{HV}_{\text{хол.прок.}}) = 2207,79 + 184,71X_2 - 126,88X_1 X_3 - 122,63X_2 X_3 \quad (14)$$

В случае материала Ni-Fe-Cu-Sn получены следующие уравнения регрессии:

$$Y_2(\Delta V/V) = -0,02X_1 + 0,02X_3 + 0,02X_1 X_2 + 0,02X_1 X_3 - 0,02X_1 X_2 X_3 \quad (15)$$

$$Y_3(\Delta \Pi/\Pi) = -0,85 + 0,22X_1 + 0,13X_2 + 0,62X_3 - 0,10X_1 X_2 + 0,22X_1 X_3 + 0,13X_2 X_3 - 0,13X_1 X_2 X_3 \quad (16)$$

$$Y_6(\sigma_{\text{в,1отж}}) = 365,64 - 17,59X_1 + 10,19X_2 + 25,99X_3 - 9,74X_1 X_2 - 9,19X_1 X_3 + 6,34X_2 X_3 + 31,66X_1 X_2 X_3 \quad (17)$$

$$Y_7(\sigma_{\text{в,2отж}}) = 449,00 + 9,55X_1 + 10,50X_2 + 18,58X_3 + 19,30X_1 X_2 + 1,88X_1 X_3 - 15,18X_2 X_3 + 10,28X_1 X_2 X_3 \quad (18)$$

$$Y_8(\sigma_{\text{в,хол.прок.}}) = 698,93 + 17,73X_1 + 31,30X_2 + 26,78X_3 + 8,05X_1 X_2 - 10,88X_1 X_3 - 32,10X_2 X_3 - 1,00X_1 X_2 X_3 \quad (19)$$

$$Y_9(\text{HV}_{\text{хол.прок.}}) = 2141,38 + 458,13X_1 X_2 \quad (20)$$

Некоторые данные представлены на рис. 5-8. Анализ графических зависимостей «свойство-состав» по построенным математическим моделям показал, что при содержании кобальта в интервале от 1,0 до 1,2 мас.% и от 4,4 до 5,0 мас.%; меди – от 1,0 до 1,2 мас.%; молибдена от 1,0 до 1,2 мас.% можно прогнозировать максимальное уплотнение после спекания спрессованных образцов четырехкомпонентной порошковой композиции на основе железа марки ПЖРВу.22.200.28:  $\Delta \Pi = 5,26\%$ ,  $\Delta h/h = 10,8\%$ ,  $\Delta V/V = 1,0\%$ , а так же высокие значения микротвердости  $\text{HV} = 1543 \text{ Н/мм}^2$ .

Образцы четырехкомпонентной порошковой композиции на основе никеля марки ПНК-1Л5 будут обладать максимальными значениями характеристик уплотняемости после спекания при содержании олова в интервалах от 6,0 до 6,2 мас.% и от 9,4 до 10,0 мас.%; меди – от 12,2 до 13,0 мас.%; железа от 17,0 до 17,5 мас.% и от 22,4 до 23,0 мас.%;  $\Delta \Pi = 12,90\%$ ,  $\Delta h/h = 4,88\%$ ,  $\Delta V/V = 3,68\%$  и иметь высокие значения микротвердости  $\text{HV} = 2198 \text{ Н/мм}^2$ .

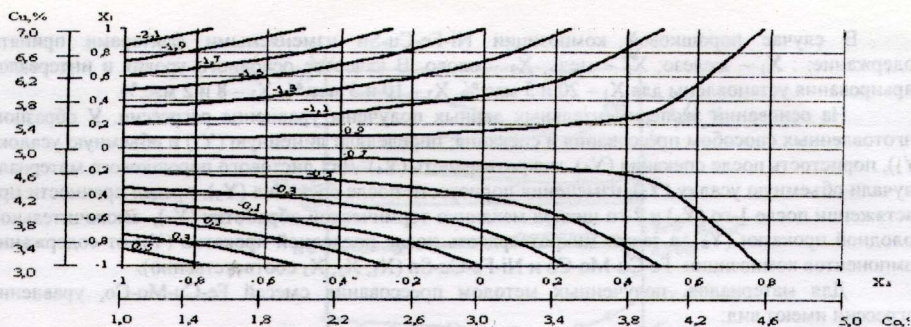


Рис. 5. Расчетные данные по уравнению регрессии (9) зависимости изменения объемной усадки ленты при спекании композиции Fe-Cu-Mo-Co от содержания меди  $X_1$  и кобальта  $X_3$ . Числа у кривых показывают значения  $\Delta V/V, \%$ . (5 мас.% Mo).

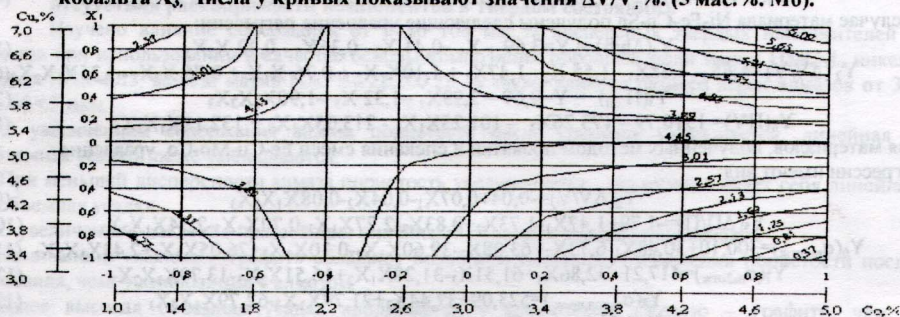


Рис. 6. Расчетные данные по уравнению регрессии (10) зависимости изменения пористости ленты при спекании композиции Fe-Cu-Mo-Co от содержания меди  $X_1$  и кобальта  $X_3$ . Числа у кривых показывают значения  $\Delta P/P, \%$ . (5 мас.% Mo).

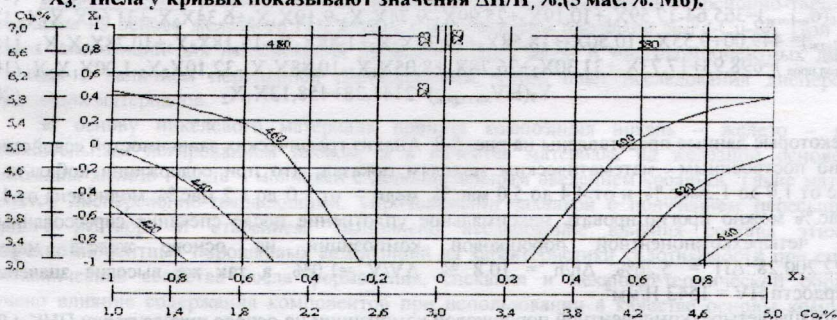


Рис. 7. Расчетные данные по уравнению регрессии (13) зависимости предела прочности ленты после заключительной холодной прокатки композиции Fe-Cu-Mo-Co от содержания меди  $X_1$  и кобальта  $X_3$ . Числа у кривых показывают значения предела прочности, МПа. (5 мас.% Mo).

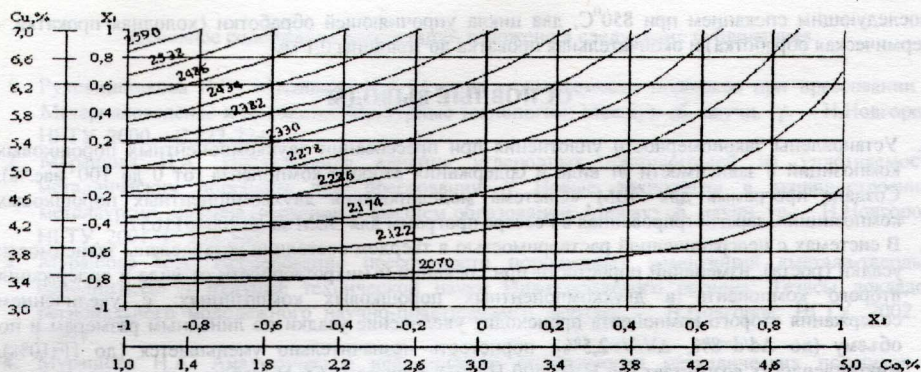


Рис. 8. Расчетные данные по уравнению регрессии (14) зависимости микротвердости ленты после заключительной холодной прокатки композиции Fe-Cu-Mo-Co от содержания меди  $X_1$  и кобальта  $X_2$ . Числа у кривых показывают значения микротвердости, HV, Н/мм<sup>2</sup> (5 мас.% Мо).

Проведенные исследования показали, что листовый материал на основе железа марки ПЖРВу.23.056.21. при содержании кобальта в интервале от 1,0 до 1,3 мас.% и от 4,9 до 5,0 мас.%; меди – от 1,0 до 1,1 мас.% и от 4,7 до 5,0 мас.%; молибдена от 1,0 до 1,5 мас.% и при 5,0 мас.% имеет максимальные значения характеристик уплотняемости после спекания  $\Delta P = 6,09\%$ . Предел прочности при растяжении с каждым последующим циклом прокатки и отжига повышается на ~100 МПа, происходит вследствие наклепа и снижения пористости. Анализ показывает что возможно получение микротвердости HV = 2605 Н/мм<sup>2</sup>. После каждого цикла механико-термической обработки HV увеличивается на ~100 Н/мм<sup>2</sup>, что подтверждает эффект упрочнения за счет наклепа. Относительное удлинение образцов после первой прокатки и отжига составляет 3%, после второй прокатки и отжига и после заключительной прокатки – 2%. Листовой материал на железной основе может быть использован для изготовления высокопрочных изделий в качестве металлической связки для алмазосодержащих композиций.

У листового материала на никелевой основе марки ПНК-1Л5. с концентрацией 23 мас.% железа, 13 мас.% меди и 6 мас.% олова получено наибольшее снижение пористости после спекания  $\Delta P = 14,9\%$ . При спекании формируется твердый раствор железа и меди в никеле. Предел прочности при растяжении увеличивается на ~100 МПа при проведении каждого цикла холодной прокатки и отжига и на 260 МПа после заключительной холодной прокатки в результате упрочнения материала при наклепе. Высокие значения микротвердости HV = 2829 Н/мм<sup>2</sup> будут при содержании олова от 6,0 до 10,0 мас.%; меди при 13,0 мас.%; железа при 23,0 мас.%. После проведения двух циклов холодной прокатки и отжига микротвердость увеличивается на 150 HV, а после операции заключительной прокатки микротвердость возрастает от 2564 до 2829 Н/мм<sup>2</sup>. Относительное удлинение после проведения заключительной операции прокатки составило 3,0%. Полученный листовый материал на никелевой основе может быть использован в качестве связки для алмазосодержащих композиций.

В результате проведенных экспериментов установлено, что листовый материал на основе железного порошка марки ПЖРВу.23.056.21. с высокими прочностными свойствами можно получить по следующей технологии: прокатка из смеси порошков ленты толщиной 0,4 мм с последующим спеканием при 1120°C, уплотняющая холодная прокатка – термическая обработка (два цикла) до толщины 0,1 мм и заключительная холодная прокатка до 0,05 мм.

Исследования, проведенные с листовым материалом четырехкомпонентной порошковой композиции на основе никелевого порошка марки ПНК-1Л5, показали возможность обеспечения высокой прочности при следующей технологии: прокатка смеси порошков до толщины 0,4 мм с

последующим спеканием при 850<sup>o</sup>C, два цикла упрочняющей обработки (холодная прокатка – термическая обработка) и окончательная прокатка до толщины 0,1 мм.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Установлены закономерности уплотнения при прессовании двухкомпонентных порошковых композиций в зависимости от вида и содержания второго компонента (от 0 до 100 мас.%). Создана программа для ЭВМ «Система моделирования двухкомпонентных порошковых композиций», зарегистрированная в Реестре программ для ЭВМ за № 2004611657.
2. В системах с неограниченной растворимостью в твердом состоянии установлены зависимости усадки (роста), изменений пористости при спекании и микротвердости от вида и содержания второго компонента в двухкомпонентных порошковых композициях: с увеличением содержания второго компонента происходит увеличение усадки по линейным размерам и по объему (до  $\Delta d/d=8\%$ ,  $\Delta V/V=2,5\%$ ); пористость незначительно уменьшается (до  $P=10\%$ ), микротвердость возрастает (до  $HV=2500$  Н/мм<sup>2</sup>); в системе Cu-Ni наблюдается явление роста размеров (до  $\Delta d/d=-2\%$ ,  $\Delta V/V=-5\%$ ) и величины микротвердости (до  $HV=900$  Н/мм<sup>2</sup>), соответствующее 60 мас.% меди; наибольшая усадка наблюдается при спекании прессовок из отдельных порошков меди и никеля (до  $\Delta d/d=6\%$ ,  $\Delta V/V=15\%$ ).
3. Установлено, что в системах с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии и образованием интерметаллидов наблюдаются особенности, связанные с образованием при охлаждении от температуры спекания интерметаллидных соединений (WFe<sub>2</sub>, W<sub>2</sub>Fe<sub>3</sub>, Mo<sub>2</sub>Fe<sub>3</sub>, WNi<sub>4</sub> и др.). У материалов Ni-W, Ni-Mo, Fe-W, Fe-Mo с увеличением содержания второго компонента микротвердость возрастает (у композиций на железной основе в 2 раза, а у композиций на никелевой основе в 7 раз) и достигает максимума (у композиций на железной основе до 1800 HV, а у композиций на никелевой основе до 3500 HV) в интервале концентрации второго компонента от 60 до 80 мас.%. Для систем Fe-Cu и Cu-Co с отсутствием интерметаллидов имеет место менее значительное изменение микротвердости (у композиции Fe-Cu от 500 до 1500 HV, у композиции Cu-Co от 500 до 2500 HV). В системе Cu-Co концентрационные кривые изменения размеров при спекании имеют параболический характер.
4. Показано, что в системах с отсутствием растворимости компонентов в твердом состоянии Cu-W и Cu-Mo с увеличением содержания второго компонента усадка уменьшается в 2 раза, а микротвердость возрастает в 2 раза; пористость увеличивается до 50% в порошковых композициях Cu-Mo с возрастанием молибдена более 20 мас.%.  
5. Для композиций «металл-алмаз» с увеличением содержания алмаза линейная и объемная усадки, пористость при спекании уменьшаются в 2 раза; с возрастанием размеров кристаллов алмаза пористость увеличивается в 2 раза, аналогично ведет себя линейная и объемная усадки. В композициях «железо-графит» пористость и объемная усадка при спекании изменяются в большей степени (в 4 раза), чем у композиции с алмазом (в 2 раза).
6. Для четырехкомпонентных дисперсионно-твердеющих порошковых композиций Ni-Fe-Cu-Sn и Fe-Cu-Mo-Co установлены закономерности влияния состава на усадку, пористость, микротвердость и предел прочности при растяжении методом полного факторного эксперимента.
7. Разработаны технологии изготовления ленты из рассматриваемых четырехкомпонентных порошковых композиций Ni-Fe-Cu-Sn и Fe-Cu-Mo-Co, обеспечивающие высокие прочностные свойства. Проведено промышленное опробование технологии изготовления ленты из этих композиций на ОАО «Вуксунский металлургический завод». Материалы показали высокую микротвердость и прочность: (на основе никеля – до 2829 HV и предел прочности при растяжении до 761 МПа, а на основе железа – 2600 HV и предел прочности при растяжении до 640 МПа). Они могут быть использованы в качестве металлической связи для алмазосодержащих композиций, применяемых в производстве отрезных кругов в микроэлектронике.

Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях:

1. Руковишникова И.Г., Мурашова Н.А. Анализ уплотняемости порошков при прессовании // *Материаловедение и высокотемпературные технологии: Межвуз. сб. научн. тр.* - Н.Новгород: НГТУ, 2000. - С.222-224.
2. Мурашова Н.А. Исследование влияния углеродных наполнителей на уплотняемость металлических порошков при прессовании // *Новые технологии в машиностроении, металлургии, материаловедении и высшем образовании: Межвуз. сб. научн. тр.* - Н.Новгород: НГТУ, 2001.-С. 338-340.
3. Мурашова Н.А. Исследование прессуемости порошковых композиций «металл-твердый наполнитель» // *Будущее технической науки Нижегородского региона: Тезисы докладов регионального молодежного научно-практического форума.* - Н.Новгород: НГТУ, 2002. - С.297.
4. Мурашова Н.А. Аналитическое исследование прессуемости металлических порошков с твердыми наполнителями // *Современные материалы и технологии – 2002: Сб. статей международной научно-технической конференции.* - Пенза: Приволжский дом знаний, 2002.- С. 65-67.
5. Сорокин В.К., Мурашова Н.А. Исследование консолидации двухфазных смесей порошков металл-алмаз// *Материаловедение и металлургия :Сб. науч. тр.НГТУ., Т.32.* - Н.Новгород: НГТУ, 2002.- С.190-193.
6. Сорокин В.К., Мурашова Н.А. Аналитическое исследование прессуемости порошковых композиций с твердыми наполнителями // *VII Нижегородская сессия молодых ученых.(Технические науки): Тезисы докладов- Н. Новгород: Нижегородский гуманитарный центр, 2002. - С. 54-56.*
7. Мурашова Н.А. Влияние твердых включений на процессы прессования металлических порошков // *Вестник УГТУ-УПИ №5 (20):Фундаментальные проблемы металлургии: Сборник материалов III межвузовской научно-технической конференции – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2003.- С. 42-45.*
8. Мурашова Н.А. Изучение прессуемости порошковых композиций металл-твердый наполнитель // *Современные технологии в машиностроении – 2003: Сб. статей VI Всероссийской научно-практической конференции.* - Пенза: Приволжский Дом знаний, 2003.- С.15-17.
9. Мурашова Н.А. Аналитическое исследование прессуемости порошковых смесей // *Проблемы машиностроения и технологии материалов на рубеже веков: Сб. статей VIII Международной научно-технической конференции.* - Пенза: Приволжский Дом знаний, Ч.2. 2003.- С.15-17.
10. Мурашова Н.А. Влияние твердых включений на прессуемость металлических порошков// *Материаловедение и металлургия : Труды НГТУ. - Н.Новгород: НГТУ, Т38. 2003. - С.280-281.*
11. Мурашова Н.А. Исследование влияния композиции порошков на прессуемость // *Будущее технической науки Нижегородского региона: Тезисы докладов II региональной молодежной научно-технической конференции - Н. Новгород: НГТУ. 2003.- С.153.*
12. Murashova. N.A. The investigation of influence of the fast inclusions on the formability of metallic powders. // *Современные техника и технологии СТТ'2003: Сб. докладов XI международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск .Т.1. 2003. -С.169-171.*
13. Мурашова Н.А. Исследование уплотняемости порошков // *Современные техника и технологии СТТ'2003: Сб. докладов XI международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск. Т2. 2003.- С. 83-84.*
14. Мурашова Н.А. Особенности уплотняемости двухфазных порошковых композиций // *Успехи современного естествознания – М.: Российской академия естествознания, 2004.-№4- С. 12-16.*
15. Мурашова Н.А. Исследование влияния твердых наполнителей на прессуемость металлических порошков // *VIII Нижегородская сессия молодых ученых.(Технические науки): Тезисы докладов – Н. Новгород: Нижегородский гуманитарный центр, 2003.- С. 116-117.*

16. Murashova. N.A. Analytical investigation the formability of two-phases mixture of the powder // Materials of the Fifth International Young Scholar's Forum of the Asia-Pacific Region Countries.- Russia, Vladivostok: Far-Eastern State Technical University, 2003- P.276-280.
17. Мурашова Н.А. Моделирование и изучение уплотняемости композиционных материалов // Труды Международного Форума по проблемам науки, техники и образования. Т2./ Под ред.: В.П. Савиных, В.В. Вишневого.-М.: Академия наук о земле, 2003.-С.60-62.
18. Мурашова Н.А. Влияние насыпной плотности на уплотняемость порошковых двухкомпонентных композиций // IX Нижегородская сессия молодых ученых (Технические науки): Тезисы докладов – Н. Новгород: Нижегородский гуманитарный центр, 2004.- С.51-53.
19. Мурашова Н.А. Изучение влияния концентрации твердого наполнителя на уплотняемость при формовании // III Всероссийская молодежная научно-техническая конференция «Будущее технической науки»- Н. Новгород: НГТУ, 2004.- С. -259.
20. Свидетельство РФ об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2004611657. от 13.07.04 г. Система моделирования двухкомпонентных порошковых композиций. // В.К. Сорокин, Н.А. Мурашова, А.В. Петухов, Ю.А. Климашов.

Подписано в печать 10.11.2004. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.  
Печать офсетная. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 702.

---

Нижегородский государственный технический университет.  
Типография НГТУ. 603600, Нижний Новгород, ул. Минина, 24.