

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ**

Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Оренбургский государственный университет»

**С. И. БОГОДУХОВ, А. Д. ПРОСКУРИН, Е.С. КОЗИК**

# **ПОЛУЧЕНИЕ И СВОЙСТВА ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Рекомендовано Ученым советом государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Оренбургский государственный университет» в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по программам высшего профессионального образования по специальности «Оборудование и технология повышения износостойкости и восстановление деталей машин и аппаратов»

Оренбург 2009

УДК 621.762(075.8)

ББК 34.39 я 73

Б 74

Рецензенты

д-р техн. наук А.Н.Поляков, д-р техн. наук, проф. А.И.Сердюк

Б72 **Богодухов, С.И.**  
**Получение и свойства порошковых материалов: учебное пособие**  
**/ С.И. Богодухов, А.Д. Проскурин, Е.С. Козик. - Оренбург,**  
**ГОУ ОГУ, 2009. – 178 с.**

**ISBN 5-7410-0415-6**

В учебном пособии описаны стадии технологического процесса получения порошковых материалов и изделий, приведены составы и свойства основных групп порошковых материалов, даны практические рекомендации по их применению.

При написании учебного пособия использовались как данные из литературных источников, так и результаты научных исследований, выполненных на кафедре МТМ ГОУ ОГУ.

Представлена рекомендуемая литература по порошковым материалам и покрытиям.

Пособие предназначено для студентов специальностей 150002, 150205, 151001, 160201, 190601, 19603, 220301, 260601.

Б 2606000000

ББК 34.39Я7

ISBN 5-7410-0415-6

© Богодухов С.И.,  
Проскурин А.Д.,  
Козик Е.С., 2009  
© ГОУ ОГУ, 2009

## Содержание

Введение.....	5
1 Основы порошковой металлургии .....	7
1.1 Основные сведения о порошковой металлургии.....	7
1.2 Основные методы производства металлических порошков.....	9
1.3 Подготовка порошковой шихты.....	30
1.4 Технология прессования порошковых материалов.....	31
1.5 Спекание порошковых заготовок.....	38
1.6 Маркировка и структура порошковых сталей.....	42
2 Порошковые конструкционные материалы.....	45
2.1 Классификация порошковых конструкционных материалов.....	45
2.2 Изготовление порошковых конструкционных материалов.....	47
2.2.1 Приготовление шихты.....	47
2.2.2 Формование деталей из порошков.....	48
2.2.3 Спекание .....	55
2.2.4 Дополнительные технологические операции.....	60
2.3 Конструкционные материалы на железной основе.....	68
2.4 Основы проектирования порошковой детали и прессформы.....	75
2.4.1 Оценка технологичности детали.....	75
2.4.2 Расчет проектируемых размеров, высоты засыпки и усилия прессования порошковых деталей.....	77
3 Антифрикционные материалы.....	79
3.1 Материалы на основе железа.....	81
3.2 Материалы на основе меди.....	92
3.3 Материалы на основе никеля и кобальта.....	97
3.4 Материалы на основе алюминия.....	97
3.5 Материалы на основе тугоплавких металлов.....	99
3.6 Металлографитовые материалы.....	102
3.7 Металлические двухслойные материалы на стальной подложке.....	104
4 Фрикционные материалы.....	105
4.1 Материалы на основе железа.....	108
4.2 Материалы на основе меди.....	111
5 Инструментальные материалы.....	114
5.1 Твердые сплавы.....	114
5.1.1 Классификация и маркировка твердых сплавов.....	115
5.1.2 Свойства и области применения твердых сплавов.....	120
5.2 Порошковые карбидостали.....	122
5.3 Порошковые быстрорежущие стали.....	126
5.4 Сверхтвердые материалы.....	128
5.4.1 Маркировка алмазных шлифопорошков.....	130
5.4.2 Обработка порошковых сталей .....	130
6 Материалы со специальными свойствами.....	134
6.1 Материалы со специальными электрическими свойствами.....	134

6.2	Магнитные материалы.....	139
6.3	Фильтры и пористые изделия.....	141
6.3.1	Фильтрующие элементы на основе железа.....	142
6.3.2	Фильтрующие элементы из пористого вольфрама.....	144
6.4	Свойства спеченных изделий из порошков титана.....	146
6.5	Свойства дисперсноупрочненных сплавов (титана, никеля, кобальта, бериллия).....	148
7	Газотермические порошковые покрытия.....	158
7.1	Общая характеристика метода.....	158
7.2	Газопламенное напыление.....	159
7.3	Плазменное напыление.....	161
7.4	Детонационное напыление.....	164
7.5	Электродуговое напыление.....	165
7.6	Порошки для газотермических покрытий.....	166
7.7	Композиционные материалы.....	168
7.7.1	Способы производства металлокомпозитов.....	169
7.7.2	Полимерные композиционные материалы.....	169
7.7.3	Композитные материалы, упрочненные частицами.....	170
7.7.4	Композитные материалы, армированные волокнами.....	171
7.7.5	Слоистые металлические композиты.....	172
7.8	Гранулированный материал.....	172
7.9	Наноматериалы и нанотехнологии.....	173
	Список использованных источников.....	179

## Введение

Производство и применение металлических порошков было начато в далекой древности. Методы получения порошков драгоценных металлов (серебро, золото) описаны в древнеегипетских рукописях за 3000 лет до н.э., а тысячелетия спустя стали получать металлические изделия из железа, минуя стадию их расплавления.

Начинается порошковая металлургия с получения кричного железа, первые находки которого датируются XV в. до н.э., становление порошковой технологии в современном понимании происходит гораздо позже. В 1826 г. русские инженеры П.Г. Соболевский и В.В. Любарский разработали способ получения монет и медалей из порошковой платины (производство металлических порошков началось в нашей стране в 1923 г. с получения порошка вольфрама).

Одним из самых ранних способов получения металлических порошков является метод восстановления металлов из оксидов. Металлические порошки и порошки металлических сплавов являются основным сырьем для производства изделий методами порошковой металлургии: конструкционных, антифрикционных, пористых, уплотнительных, электротехнического назначения, коррозионностойких, жаропрочных и др. Чистые металлические порошки и порошки металлических сплавов используют также для нанесения на поверхность деталей износостойких и коррозионностойких покрытий, а также в сварочной технологии. Порошки металлов применяют в различных отраслях народного хозяйства: в медицине, где восстановленный железный порошок используется в качестве лекарства; в сельском хозяйстве – для магнитной сепарации семян; в полиграфии – для специальных видов печати; в машиностроении и т.д.

В таблице 1 даны примерные объемы годового выпуска металлических порошков в различных странах.

Таблица 1 - Примерные объемы годового выпуска металлических порошков (тыс. т) в некоторых странах

Регион, страна	Порошок	Годы		
		1975	1980	1990
США и Канада	Железный	130,00	160,00	200,00
	Медный и сплавов на основе меди	18,2	18,0	30,0
	Никелевый	9,7	16,8	20,0
Япония	Железный	48,0	80,0	155,0
	Медный и сплавов на основе меди	3,2	6,0	7,0
Западная Европа	Железный	96,0	110,0	120,0

Для разработки международных стандартов, призванных облегчить международный товарооборот и расширить сотрудничество в области интеллекту-

альной, научной, технической и экономической деятельности, в 1947 г. двадцатью пятью странами создана Международная Организация по стандартизации (ИСО), в настоящее время насчитывающая более 100 стран. В ее составе в 1966 г. по предложению Швеции создан технический комитет 119 (всего в ИСО более 200 технических комитетов), занимающийся стандартизацией в области порошковой металлургии (ИСО / ТК 119 «Порошковая металлургия»).

Порошковые материалы находят широкое применение для изготовления нагруженных деталей машин, деталей узлов трения, электрических контактов, металлорежущего и штампового инструмента, фильтров и др. Значительная часть металлических порошков применяется для получения покрытий различными способами. Потребность в порошковых материалах существует также на предприятиях Оренбургской области (в машиностроении, на транспорте, в текстильной промышленности, на нефтегазовом комплексе, в сельском хозяйстве). Быстроизнашиваемые детали из цветных сплавов могут быть успешно заменены на порошковые или восстановлены нанесением порошковых покрытий. При этом производство таких деталей может быть организовано не только на специализированных предприятиях и цехах, но и на небольших участках, ремонтных цехах.

Оренбуржье обладает достаточным сырьевым, научно-техническим производственным потенциалом для более широкого внедрения технологий порошковой металлургии на предприятиях ремонта. В Оренбургском государственном университете и Институте металлургии УрО РАН проводились исследования, которые показали, что из железных руд, прокатной окалины и хромоникелевого чугуна АО "Носта" можно получать железные и легированные порошки и порошковые материалы на их основе.

В 1972 году на Оренбургском машиностроительном заводе при непосредственном участии к.т.н. Богодухова С.И., доцента кафедры Технологии металлов Оренбургского Политехнического Института был создан участок по производству твердосплавного инструмента, который работает до настоящего времени, а в 1975 году был создан участок по изготовлению деталей и заготовок на основе железа.

# 1 Основы порошковой металлургии

## 1.1 Основные сведения о порошковой металлургии

Современное развитие техники постоянно выдвигает задачи изыскания новых материалов с высокими эксплуатационными свойствами. В связи с этим перспективными являются методы порошковой металлургии.

Порошковой металлургией называют отрасль, охватывающую совокупность методов изготовления металлических порошков и металлоподобных соединений, а также изделий из них или из их смесей, при этом основной компонент не доводят до расплавления.

**а) Страна, фирма, местонахождение заводов по производству порошков и изделий из них:**

### **США**

Галлатин, шт. Теннесси. «Ervin Industries» («Эрвин идастрис»);

Батлер, шт. Пенсильвания;

«Rygon» («Пайрон»), Ниагара Фоллз, шт. Нью-Джерси.

### **Канада**

«Quebec Metal Powders» («Квебек метл паудерз»), Трейси, пров. Квебек  
«Domfer Metal Powders» («Домфер метл паудерз»), Монреаль, пров. Квебек.

### **Швеция**

«Höganäs» («Хёганес»), Хёганес.

### **ФРГ**

«Mannesmann Demag» («Манессман Демаг»), Мёнхенгладбах  
«Metallhüttenwerke» («Метальхюттенверке»), Любек.

### **Италия**

«Metallurgia Toniolo» («Металлурджиа Тониоло»), Местре.

### **Япония**

«Кавасаки сэйтэцу», Тиба;

«Кобе сэйкосё», Кобэ;

«Дова тэппун», Окаяма;

«Ниппон тэппун», Касива.

**б) Железосодержащий материал:**

1) магнетитовый концентрат;

2) стальной лом;

3) прокатная окалина;

4) обрезь и стружка низкоуглеродистой листовой стали.

**в) Способы производства:**

1) распыление водой и воздухом;

2) восстановление водородом;

3) восстановление твердым углеродом;

4) измельчение в шаровой мельнице.

Промышленность выпускает следующие порошковые материалы: конструкционные, антифрикционные, пористые, проницаемые, тугоплавкие, электротехнические, твердые сплавы и др.

Преимущества порошковой металлургии по сравнению с традиционными методами изготовления деталей машин и приборов состоят в следующем:

1) получение изделий, которые невозможно изготовить никакими другими методами (фильтры, пористые подшипники, контакты из псевдосплавов на основе тугоплавких металлов и др.);

2) экономия материалов, возможность получения исходных материалов из отходов металлургической и машиностроительной промышленности, например, стружки, окалины и т.п.;

3) получение изделий без дальнейшей механической обработки - что приводит к значительному снижению себестоимости материалов и готовой продукции.

Ресурсо- и энергосберегающие возможности порошковой металлургии можно проиллюстрировать данными о коэффициенте использования металла (КИМ) и энергозатратах на 1 кг продукции для различных методов изготовления (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Методы изготовления заготовок и энергозатраты

Метод изготовления	КИМ, %	Энергозатраты, МДж/кг
порошковая металлургия	95	29
точное литье	90	30-38
холодная штамповка	85	41
горячая штамповка	75-80	46-49
обработка резанием	40-50	66-82

Металлургия чугуна, стали и получение металлопроката сопровождаются значительным загрязнением окружающей среды.

Порошковая металлургия - экологически чистый процесс, не создающий продуктов, загрязняющих воздух или воду, приближающийся к идеальной безотходной технологии. Фактически для получения металлического порошка используют отходы других производств в качестве исходного сырья. Так, железный порошок, полученный восстановлением различными методами, изготавливается в большинстве случаев из прокатной окалины, которая является отходом при изготовлении стального проката. Продуктами восстановления, кроме железного порошка, здесь являются вода и углекислый газ, жизненно важные элементы для биологических систем.

Недостатки метода порошковой металлургии: нестабильность свойств, трудность изготовления крупногабаритных и сложных по форме изделий, высокая стоимость порошков и другие.

Производство порошковых материалов и изделий включает следующие процессы:



- 1) получение порошков;
- 2) приготовление шихт (смешивание);
- 3) формообразование (прессование или прокатка заготовок);
- 4) спекание;
- 5) дополнительная обработка (механическая, химико-термическая и др.)

Промышленностью выпускаются следующие металлические порошки: железный, медный, кобальтовый, вольфрамовый, молибденовый, титановый, ниобовый, циркониевый и др.

## **1.2 Основные методы производства металлических порошков**

Производство порошка является первой технологической операцией при изготовлении порошковых изделий.

Существующие методы получения порошков весьма разнообразны, что позволяет варьировать их свойства. Это дает возможность придать изделиям требуемые физико-механические и другие специальные свойства. Кроме того, метод изготовления порошка в значительной мере определяет качество и экономические показатели его производства. Вот почему, выбирая метод получения, учитывают достигаемый уровень свойств металлического порошка и его стоимость.

Принято делить методы получения порошков на физико-химические и механические (рисунок 1.1).

К первым относятся восстановление, диссоциация, синтез, электролиз, испарение, т. е. процессы, в результате которых получение порошков сопряжено с изменением химического состава исходного сырья или его агрегатного состояния.

Для механических методов характерно измельчение исходного сырья в порошок без изменения химического состава путем дробления, размола, истирания твердых тел, распыления (грануляции) жидких металлов, сплавов и соединений. Физико-химические методы в целом более универсальны, механические методы, в частности, распыление, весьма производительны.

При получении порошков железа, которые всегда содержат небольшие количества углерода и других примесей, применяют распыление расплава энергоносителем (рисунок 1.2).

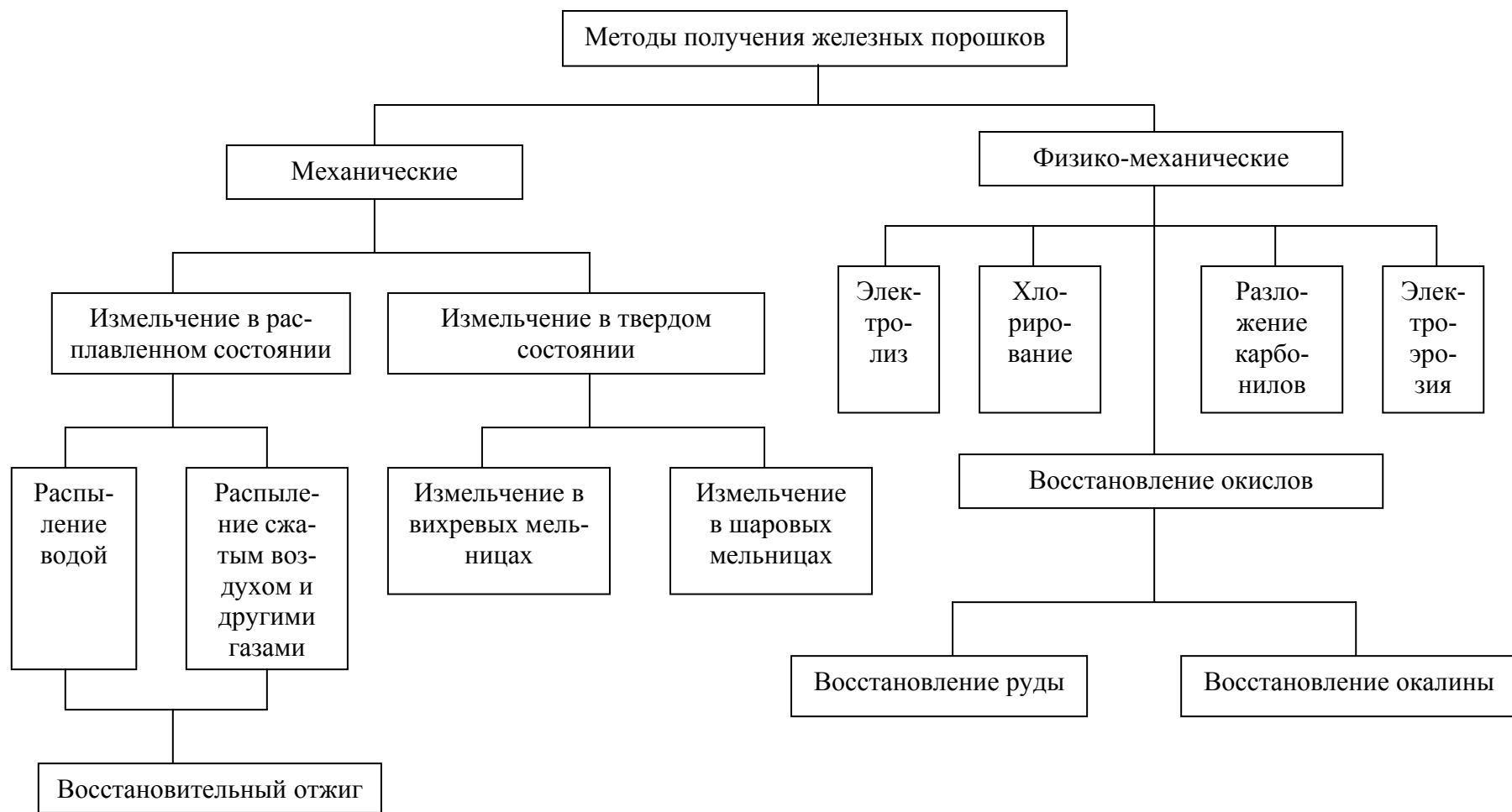


Рисунок 1.1 – Классификация методов получения железных порошков

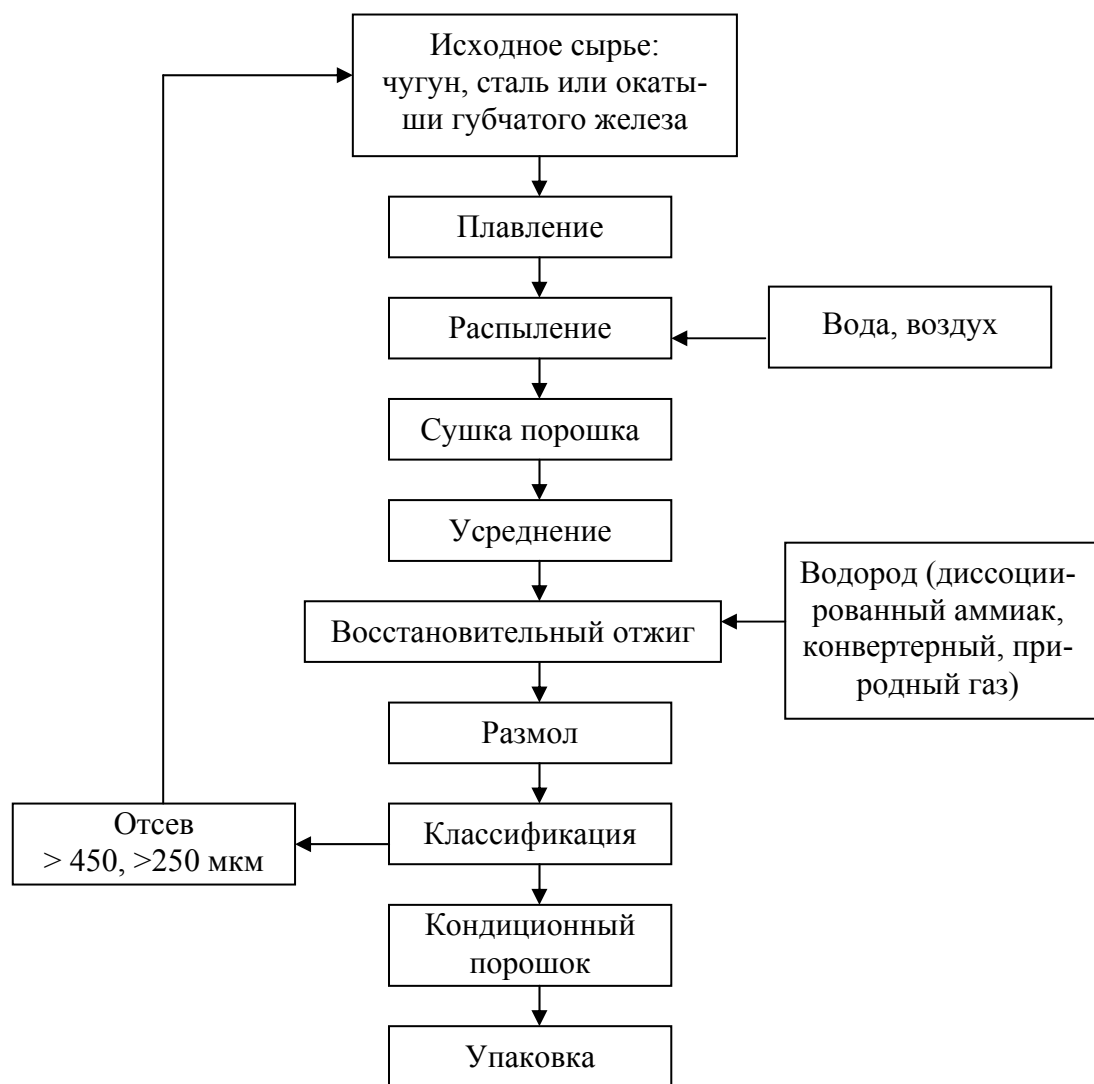


Рисунок 1.2 – Технологическая схема получения распыленного порошка железа

За рубежом основными являются RZ-процесс (распыление жидкого синтетического чугуна воздухом), WP-процесс (распыление стального расплава водой высокого давления) и Domtar-процесс (распыление жидкого чугуна водой высокого давления).

В России основные промышленные мощности по выпуску распыленных железных порошков имеются на АО «Сулинский металлургический завод» (СМЗ).

В конце 1985 г. на СМЗ был пущен в эксплуатацию цех по производству распыленных водой высокого давления железных порошков. Металлизированные окатыши Оскольского электрометаллургического комбината или металлошихту, типа применяемой на Броварском заводе порошковой металлургии, плавят в дуговой электросталеплавильной печи емкостью 25 т. Расплав при температуре от 1680 до 1690 °С выпускают в нагретый до 700-800 °С разливочный двухсторонний ковш и распыляют водой (форсунка кольцевого, щелевого типа) при давлении от 9 до 12 МПа. Порошок-сырец обезвоживают в три стадии (сгущение, фильтрование и сушка) аналогично указанным выше и затем в печах с ша-

гающими балками отжигают на поддонах при 1050 °С в диссоциированном аммиаке или водороде. Спек выбивают из поддонов, дробят в валковых дробилках в две стадии и материал крупностью < 10 мм измельчают в молотковых мельницах. Полученный порошок классифицируют на виброгрохотах. Усреднение порошка после грохочения (партиями до 12 т) проводят в двухконусном смесителе, после чего готовую партию порошка в антисепарационном контейнере передают на автоматизированную упаковку: упаковочная машина изготавливает мешки из полиэтиленовой пленки, заполняет их порошком (до 25 кг), вакуумирует каждый мешок, сваривает герметичный шов и устанавливает мешки на поддоны (по 40 шт.).

В таблице 1.2 приведены характеристики распыленных железных порошков некоторых марок (всего три по химическому составу ПЖР2, ПЖР3, ПЖР5 и пять по насыпной плотности 2,2; 2,4; 2,6; 2,8; 3,0 г/см<sup>3</sup>), выпускаемых в нашей стране в соответствии с ГОСТ 9849-86 и за рубежом.

Таблица 1.2 – Характеристика распыленных железных порошков

Страна, завод или фирма-изготовитель, марка порошка	Содержание примесей, %, не более						Физические и технологические свойства			
	C	Si	Mn	S	P	O	Максимальный размер частиц, мкм	Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>	Текучесть, г/с,	Уплотняемость, г/см <sup>3</sup> , при давлении 700 МПа, не менее
СМЗ, Россия										
ПЖР 2.200.26	0,02	0,05	0,15	0,02	0,02	0,2	200 <sup>1)</sup>	2,5-2,7	3,5	7,0
ПЖР 2.200.28	0,02	0,05	0,15	0,02	0,02	0,2	200 <sup>1)</sup>	2,7-2,9	3,2	7,0
ПЖР 3.200.28	0,05	0,08	0,20	0,02	0,02	0,5	200 <sup>1)</sup>	2,7-2,9	3,2	6,9
БЗПМ, Украина										
ПЖР 2.200.26	0,02	0,05	0,05	0,02	0,02	0,2	200 <sup>1)</sup>	2,5-2,7	3,5	6,9
ПЖР 3.200.26	0,05	0,01	0,03	0,02	0,02	0,4	200 <sup>1)</sup>			
ПЖР 3.200.28										
"Mannesmann-Demag" Германия										
RZ-150	0,032	0,075	0,18	0,008	0,026	0,35	150	2,6	3,0	6,2
WPL-150	0,03	0,075	0,18	0,008	0,026	0,35	150	2,6	3,0	6,9
WPL-200	0,03	0,05	0,20	0,02	0,02	0,20	200	2,6	3,0	7,15
"Höganäs", Швеция										
ASC 100.29										
ABC100.30	0,01	-	-	-	-	-	-	2,9	2,6	7,25

Знак «-» означает, что данных нет или контроль параметра не проводится  
<sup>1)</sup> до 1,5% частиц >200 мкм

Измельчение дроблением, размолотом или истиранием, старейшим методом перевода твердых веществ в порошкообразное состояние, может быть как самостоятельным способом получения металлических порошков, так и дополнительной операцией при других способах их изготовления. Для грубого дробления применяются щековые, валковые и конусные дробилки, а также бегуны. Продукт грубого дробления имеет размер частиц от 1 до 10 мм. Окончательный

размол материала проводится в шаровых вращающихся, вибрационных или планетарных центробежных, вихревых и молотковых мельницах. Частицы порошка имеют размер от 0,2 до 0,002 мм.

Восстановление металлов из их оксидов - один из распространенных методов получения металлических порошков. Этим методом производят порошки железа, меди, никеля, вольфрама и других металлов, а также порошки сталей, металлических сплавов – легированных и нержавеющей сталей, нихрома, инвара и др.

В общем случае простейшую реакцию восстановления можно представить как:



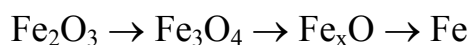
где Me – любой металл, порошок которого хотят получить;

A – неметаллическая составляющая (кислород, хлор, фтор, солевой остаток и др.) восстанавливаемого химического соединения Me;

X – восстановитель;

Q – тепловой эффект реакции.

Процесс восстановления  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  до железа происходит по трехступенчатой (выше 572 °С)



или двухступенчатой (ниже 572 °С)



схемам, что соответствует принципу последовательности восстановления:



Методы восстановления оксидов классифицируются по применяемому восстановителю и агрегатам, виду шихты и методу ее подачи в зону восстановления, давлению восстановительных газов и температуре процесса (рисунок 1.3).

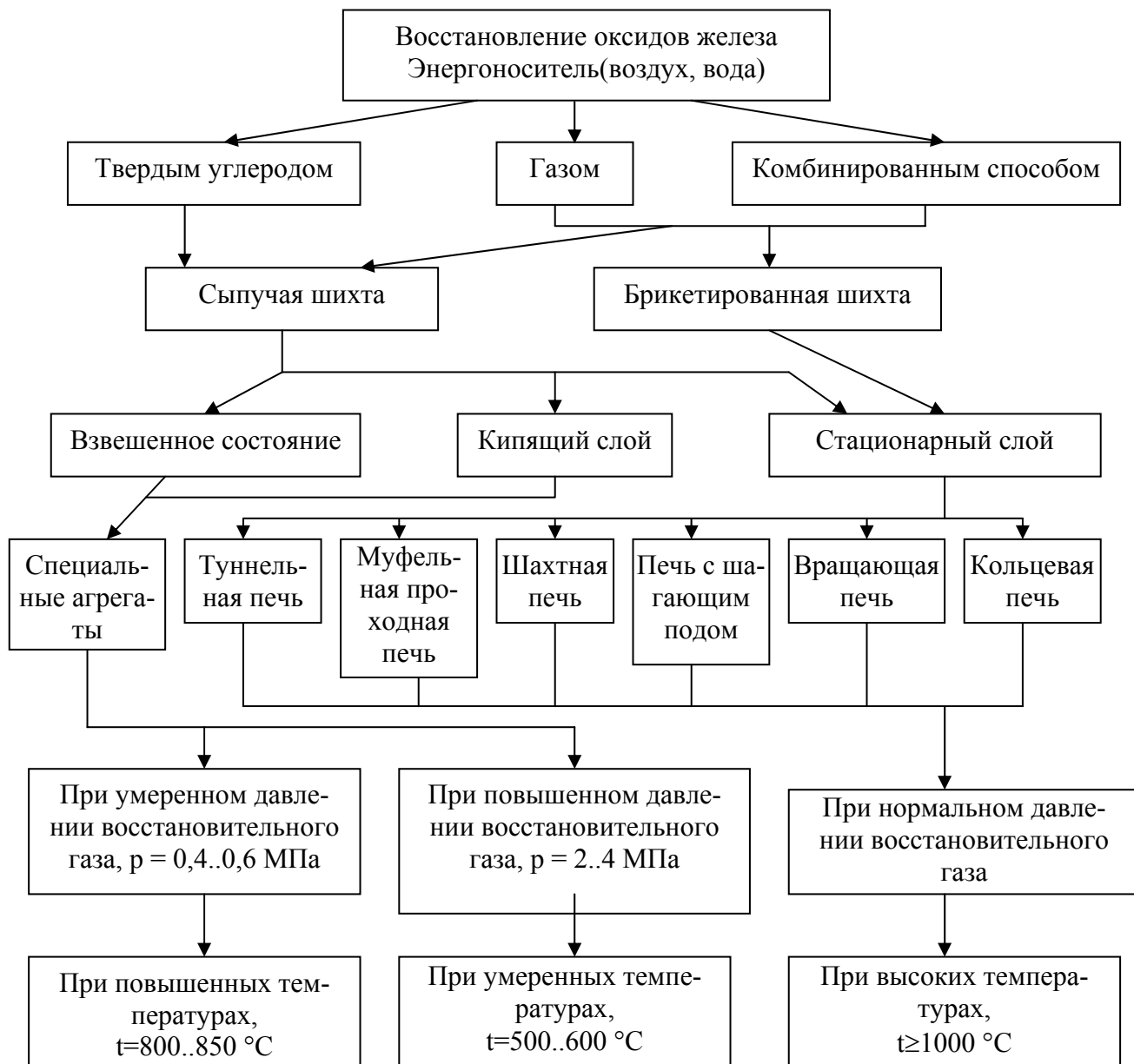


Рисунок 1.3 – Классификация существующих методов восстановления оксидов железа.

Железный порошок, полученный методом восстановления, подразделяется по химическому составу на марки: ПЖВ1, ПЖВ2, ПЖВ3, ПЖВ4, ПЖВ5 (ГОСТ 9849-86). Где ПЖ – порошок железа, последующие цифры – степень химической неоднородности порошка по примесям.

Характеристики основных промышленных методов производства порошков приведены в таблице 1.3.

Наличие большого числа восстановителей предопределяет возможность получения металлических порошков различными методами. В качестве сырья при изготовлении железных порошков восстановлением применяют окисленные руды и прокатную окалину. Порошки меди, никеля, кобальта получают из оксидов восстановлением и электролизом водных растворов.

Таблица 1.3 - Характеристики основных методов получения металлических порошков

Метод	Сущность метода	Получаемый порошок	Исходное сырье
Восстановление водородом, оксидом углерода и их смесями.	$MeO + H_2 \rightarrow Me + H_2O$ $MeO + CO \rightarrow Me + CO_2$ Восстановленную губку измельчают, классифицируют и отжигают	Fe, W, Ni, Re, Mo, Ca, Cu легированные сплавы и стали.	Окалина, рудный концентрат, химические соединения
Металлотермическое восстановление натрием, магнием	$MeO + [ТВ] \rightarrow [ТВ] O + Me$	Ti, Zr, Ta, Hf, Cr, Nb	Оксиды, комплексные фториды (Ta, Nb, Zr)
Распыление жидкого металла воздухом или газами	Диспергирование струи расплавленного металла газами под давлением 0,4-1,5 МПа. Сушка и восстановление порошка-сырца	Железо, быстрорежущие и нержавеющие стали, цветные сплавы	Синтетический чугун, металл заданного состава
Электролиз водных растворов	Осаждение металлического порошка из водного раствора соли при пропускании постоянного тока.	Fe, Ni, Co, W, Mo, Cu, Cr, Fe-Ni, Fe-Ni-Mo, Ni-Cu, Ag	Растворы сульфатных солей и др.
Электролиз расплавленных солей	Осаждение металлического порошка из растворов расплавленных солей при $t = 700 - 800^\circ C$	Ta, Nb, Al, Zr, Th, Be, Ti	Смеси оксидов с комплексными фторидами
Измельчение в мельницах, ступах, толчеях, триаторах, дезинтеграторах	Измельчение за счет ударов и истирания	Fe, Al, бронзы	Стружка

Восстановление проводят в муфельных или трубчатых печах водородом, диссоциированным аммиаком или конвертированным природным газом. Температуры восстановления сравнительно низки и составляют от 400 до 500 °С (медь), от 700 до 750 °С (никель) и от 520 до 570 °С (кобальт). Длительность процесса восстановления зависит от толщины слоя исходного сырья (обычно от 20 до 25 мм), скорости потока газа, скорости перемещения материала через печь, температуры и других факторов и составляет от 1 до 3 ч.

После восстановления губка легко растирается в порошок, который просеивают. Применение температур выше указанных нежелательно, так как возможно сильное спекание порошковых частиц, весьма затрудняющее последующее измельчение губки.

При совместном восстановлении оксидов различных металлов получают легированные порошки или порошковые сплавы, например: медь – никель, никель – кобальт.

С 1960 по 1990 годы в Оренбургском политехническом институте (ОрПИ) на базе кафедры «Технология металлов» работала большая группа исследователей в области порошковой металлургии.

Это направление возглавлял доктор технических наук, профессор Буланов В.Я., а также кандидаты технических наук Мокшанцев Г.Ф., Богодухов С.И., Домогацкий В.И., Синюхин А.В., Небольсинов В.Н., Казармшиков И.Т., Муллин А.Х., Кузнецов П.М., Шакиров А.Н., Рудаков В.И., Проскурин А.Д., Павлов С.И., доцент Недыхалов В.А., инженер Плужников В.А., учебный мастер Васильева Г.П. и др.

Известно, что наиболее простым и дешевым способом получения порошков является восстановление окалины металлургического производства. Наибольшее количество окалины образуется в цехах листового и сортового проката. Среднесуточный выход окалины в сортопрокатном цехе ОХМК составляет от 120 до 130 т, в листопрокатном цехе – от 70 до 80 т. За сутки катают более 15...20 марок сталей, в том числе Ст 45, Ст 3, Ст 5, 17ХСНД. Среднесуточный анализ показал, что состав окалины в течение суток изменяется в пределах, в процентах: по углероду – от 0,1 до 0,5, по хромю – от 0,3 до 1,5, по кремнию – от 0,17 до 0,37, по никелю – от 0,3 до 3,15.

Для получения качественного порошка исходная окалина должна иметь более стабильный химический состав. Поэтому с целью повышения стабильности состава необходимо усреднение окалины в смесителях или составление графика прокатки с учетом возможности ее селективного отбора (рисунок 1.4).

В Оренбургском Политехническом Институте была разработана технологическая схема получения порошка из окалины стали 17ХСНД восстановлением в конвертированном газе. Технология включает магнитную сепарацию окалины, сушку, размол и смешивание окалины с сажой. Восстановление шихты, содержащей 80 % окалины + 10 % сажи + 10 % восстановленного порошка крупных фракций, проводили при температуре 1100 °С в течение 5,5 часов. Полученный низколегированный железный порошок имеет хорошие технологические характеристики и может быть использован для получения порошковых изделий конструкционного и антифрикционного назначения. Испытания показали, что материалы на основе этих порошков имеют более высокие, чем у материала на основе нелегированного железного порошка, твердость - на 10 %, предел прочности - на 8 %, износостойкость в 1,5-2 раза.

Наряду с окалиной, сырьем для получения низколегированных порошков на ОХМК могут быть природно-легированные чугуны, выплавляемые из полиметаллических руд Халиловского месторождения. Природно-легированные чугуны используются в сталеплавильном процессе и литейном производстве. Содержание основных легирующих элементов в них изменяется в пределах, в процентах: хрома – от 1,2 до 2,6, никеля – от 0,46 до 1,0, кремния – от 1,6 до 3,4. Передел легированного хромом, никелем, кремнием чугуна в сталь сопровождается неизбежной потерей легирующих элементов: вместе с кремнием переходит в шлак и основная масса хрома. Поэтому одним из вариантов рационального использования природно-легированных чугунов может быть применение их для получения металлических порошков.

Была предложена и отработана в условиях ОХМК технологическая схема получения низколегированного порошка путем распыления чугуна воздухом с охлаждением в воде (к.т.н., доцент Проскурин А.Д.).



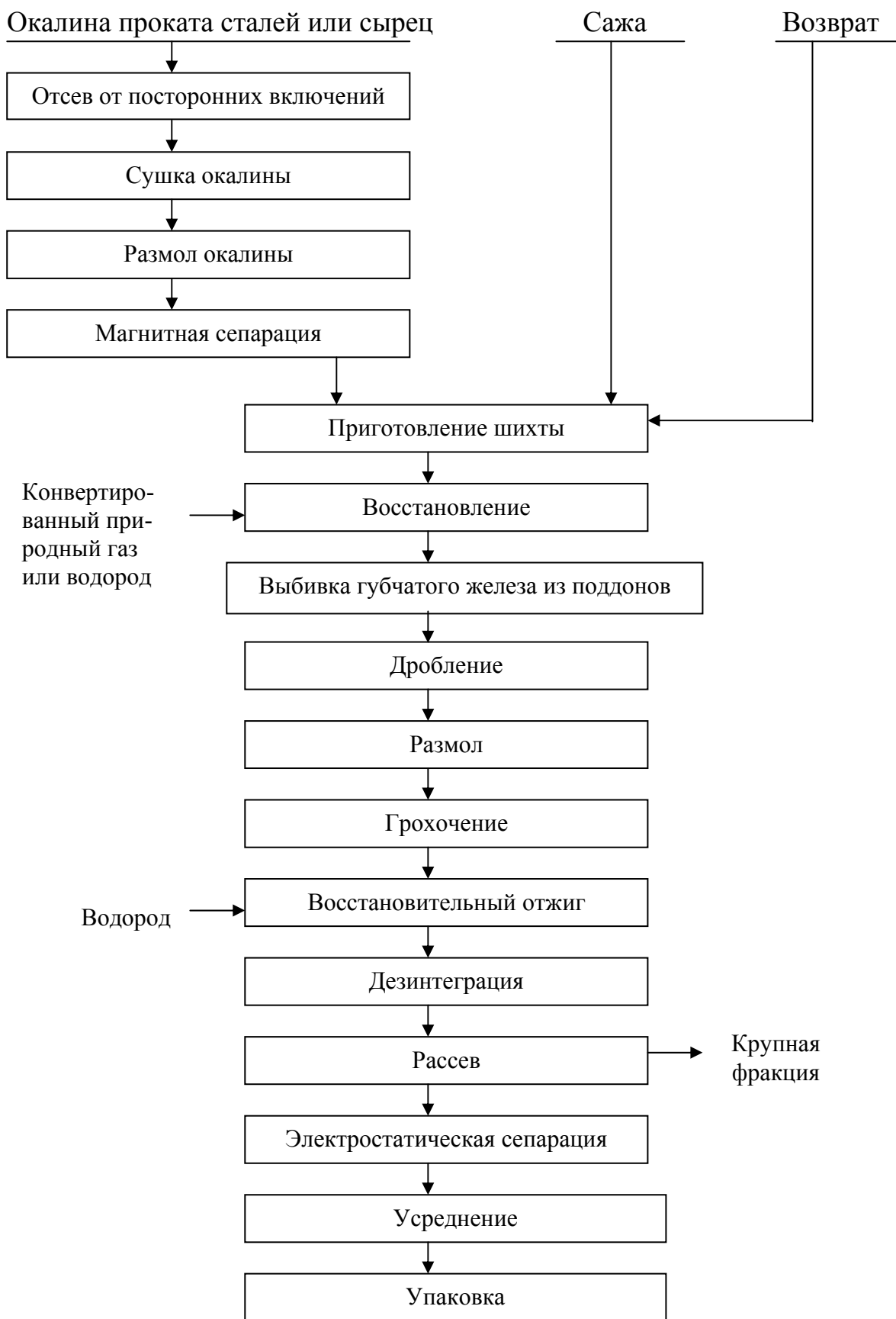


Рисунок 1.4 - Технологическая схема производства легированных железных порошков восстановлением прокатной окалины

Исследовали влияние температуры расплава, давления воздушного дутья, диаметра струи, угла атаки на выход фракции с размером частиц менее 250 мкм. Установлено, что процесс следует вести при температуре расплава около 1500 °С, удельном расходе воздуха не менее 0,6 м<sup>3</sup>/кг, давлении воздуха 0,8 МПа. Высокая скорость охлаждения частиц, предпочтительное окисление углерода, легирование элементами, повышающими окислительную стойкость, способствуют уменьшению окисленности частиц легированного чугуна при распылении. Восстановительный отжиг порошка проводили в конвертированном газе при температуре от 1100 до 1120 °С в течение 2 часов. Полученный порошок имеет высокие значения насыпной плотности и текучести (таблица 1.4)

Таблица 1.4 - Свойства легированных железных порошков

Исходное сырье	Процесс получения	Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>	Пикнометрическая плотность, г/см <sup>3</sup>	Текучесть, г/с	Уплотняемость, г/см <sup>3</sup>	Микротвердость, МПа
Окалина проката стали 17ХСНД	Восстановление конвертированным газом	2,35	7,48	3,6	6,4	1900
Чугун природно-легированный	Распыление	3,45	7,40	4,3	5,6	2460... 3490
Пиритный концентрат	Обжиго-восстановительный	2,55	7,55	3,2	6,1	1070
	Хлоридный	1,57	7,45	2,4	6,7	630
Оборотный кек	Обжиго-восстановительный	2,68	7,30	4,2	4,67	4140
	Хлоридный	1,62	7,50	2,5	6,37	1760

Наиболее целесообразным является использование низколегированного чугунного порошка в качестве углеродосодержащего и легирующего компонента шихты для получения порошковых материалов на основе железа, а также в качестве основного компонента порошковой проволоки для износостойкой наплавки. Порошковый материал, полученный из шихты на основе железа, содержащей от 30 до 40% легированного чугунного порошка, имел предел прочности на растяжение от 380 до 420 МПа, ударную вязкость – от 140 до 160 кДж/м<sup>2</sup>, твердость – от 220 до 240 НВ при пористости от 14 до 17%.

Возможным сырьем для производства легированного порошка является пиритный концентрат – вторичный продукт производства Гайского горно-обогатительного комбината. Инженер Резницкий Б.М. и Богодухов С.И. исследовали технологическую схему переработки концентрата, содержащего, в процентах: Fe - 40,9, S - 40,4, Cu ~ 0,6, SiO<sub>2</sub> - 7; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 6, Zn - 1,2, CaO - 1. Были разработаны обжиго-восстановительная и хлоридная схемы переработки.

По первой схеме пиритный концентрат обжигали в окислительной атмосфере при температуре от 800 до 900 °С до полного удаления серы в виде сернистого газа. Огарок восстанавливали в атмосфере водорода при температуре

1500 °С в течение 2 часов, размалывали и подвергали магнитной сепарации. Полученный порошок содержит дисперсные включения кремнезема и окиси алюминия.

Наиболее перспективна хлоридная схема переработки. По этой схеме концентрат подвергали окислительному обжигу при 900 °С в течение 3 часов, затем пиритный огарок растворяли в технической соляной кислоте. Раствор выпаривали при 115 °С в течение 2 часов. Полученные кристаллы сушили при 150 °С на воздухе и затем восстанавливали в атмосфере водорода при от 650 до 700 °С в течение 1 часа. Данная технология позволила получить порошок, не содержащий кремнезема, имеющий высокую прессуемость.

Выбор оборотного кека Южуралникелькомбината в качестве сырья для получения высоколегированного железного порошка обусловлен высоким содержанием в нем железа, никеля, кобальта, меди и низкой стоимостью. Кек содержит, в процентах: железо - 40, никель - 3,4, медь - 5,7, кобальт - 0,32, SiO<sub>2</sub> - 4, сера - 7,4 и другие оксиды. При выборе технологических схем получения порошков учитывалось, что металлы находятся в кеке, в основном, в виде гидратированных сульфатных солей гидрооксидов и карбонатов. Инженер Резницкий Б.М., доцент Синюхин А.В., доцент Богодухов С.И., Казармщиков И.Т. разработали обжиго-восстановительную и хлоридную схему переработки кека (рисунки 1.5, 1.6).

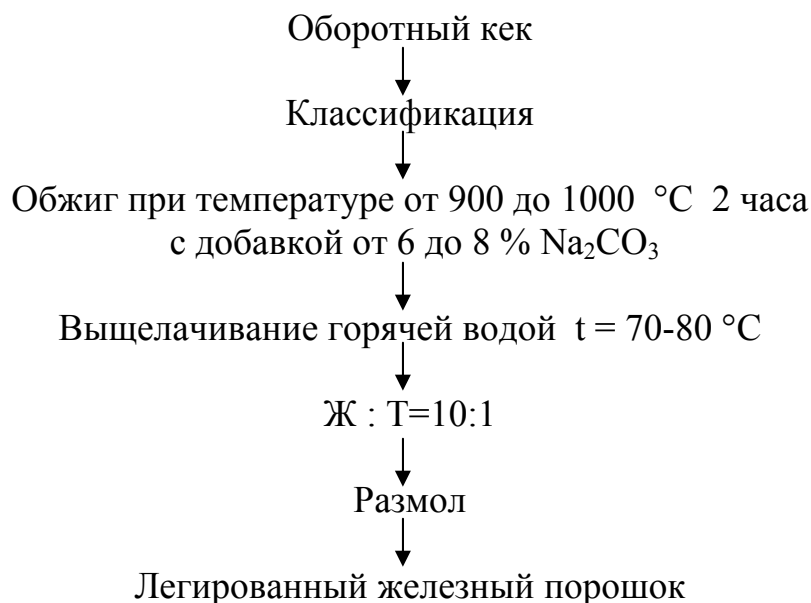


Рисунок 1.5 - Обжиго-восстановительная схема получения высоколегированного железного порошка

По хлоридной схеме исходное сырье (кек) растворялось в технической соляной кислоте при соотношении 250 г : 0,5 л. Полученный раствор хлоридов металлов подвергали выпариванию и кристаллизации при температуре 115 °С, после чего кристаллы подвергались сушке в окислительной атмосфере. Восстановление высушенных кристаллов проводилось в среде водорода.

Разработанные технологические схемы переработки вторичного сырья могут быть осуществлены на базе предприятий Оренбургской области, имеющих богатые источники энергетических и сырьевых ресурсов.

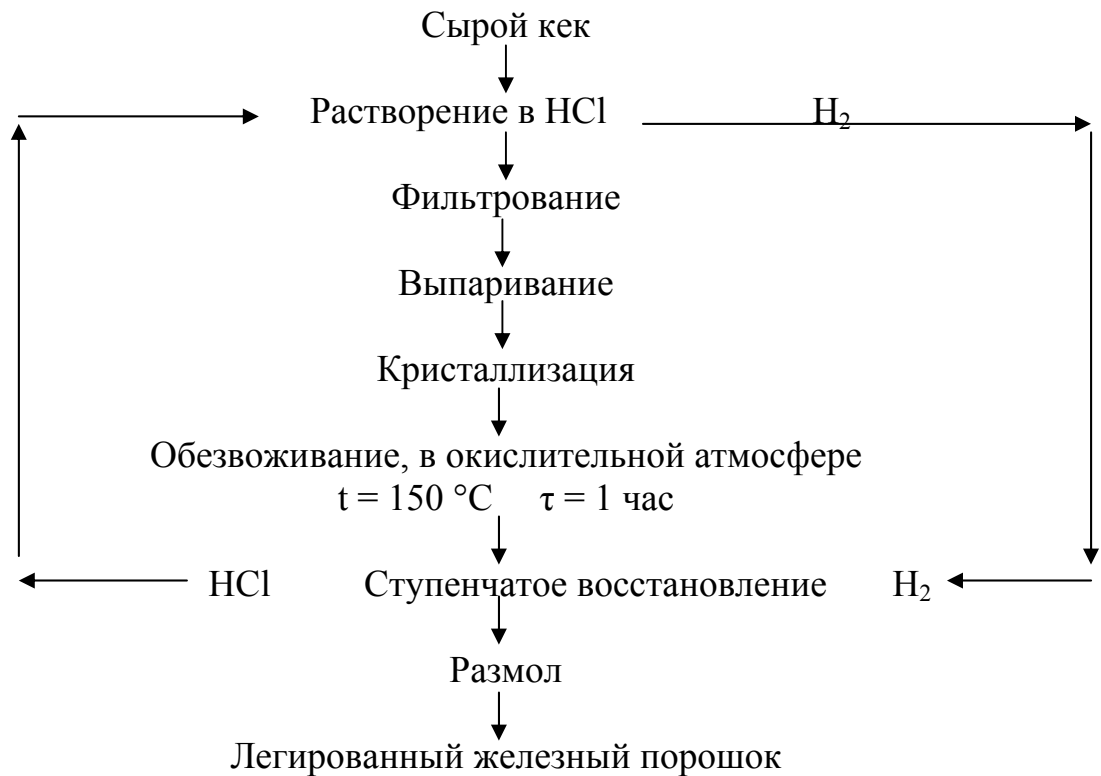


Рисунок 1.6 - Хлоридная схема получения высоколегированного железного порошка

Использование вторичного сырья позволяет получить легированные порошковые материалы, имеющие улучшенные характеристики и меньшую стоимость.

Химический состав и свойства порошков, полученных в ОрПИ, приведены в таблицах 1.5 и 1.6.

Таблица 1.5 – Химический состав железных порошков

Марка порошка	В процентах														
	Fe <sub>общ</sub>	Fe <sub>мет</sub>	C <sub>общ</sub>	C <sub>граф</sub>	C <sub>связ</sub>	Ni	Cr	Mn	Si	Cu	S	P	Co	O <sub>2</sub>	Прочие, нерастворимый осадок
ПЖ2М	97,80-98,20	96,30	≤0,127	0,095	0,032	0,076	0,017	0,37	0,20	0,020	0,010	0,023	-	0,75	НО-0,28
ППЛ-15ГС	96,15-96,50	94,4	≤0,205	0,137	0,068	0,290	0,216	0,950	0,870	0,130	0,010	0,017	-	1,21	НО-0,52
ППЛ-18ХСНД	95,50-97,50	93,85	≤0,180	0,112	0,068	0,522	0,680	0,560	0,850	0,233	0,010	0,020	0,1	0,95	НО-0,49
ППЛ-РКП-Х	96,50-97,50	95,50	≤0,4-0,08	-	0,04-0,08	1,0-1,8	0,6-0,9	0,06-0,08	0,05-0,07	-	-	0,01-0,02	0,2	До 1,0	Al-0,05-0,07; Zn-до 0,03
ППЛ-ПВ-РПФ	83,0	78,41	≤0,15	-	0,03	1,28	1,45	0,24	1,05	0,21	0,010	0,015	-	1,30	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -9,35; прочие-НО
ППЛ-ПВ-РПХ	92,9-97,4	91,0-96,0	≤0,04-0,08	-	0,04-0,08	1,76	0,56	0,16	0,15	-	-	0,23	0,17	1,0	V-0,08; Ca-0,04; Ti-0,29; Mo-0,22; Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -0,18; НО-1,54
ПВЛЖ-Х	80,50	79,1	≤0,04-0,08	-	0,04-0,04	10,06	0,30	0,01	0,05	8,2	0,15	0,01	0,80	До 1,0	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -0,54; Ti-0,1; Ca-0,2
ПВЛЖ-ОВ	75,16	74,0	≤0,12	0,15	0,04	6,32	0,06	0,017	2,11	8,60	0,03	0,020	1,7	Ост.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -4,6-5; НО-0,5

Таблица 1.6 – Физико-технологические свойства природнолегированных порошков.

Порошок	Форма частиц	Удельная по- верхн., м <sup>2</sup> /г	Пикно- метри- ческая плотн. г/см <sup>3</sup>	На- сыпной вес, г/см <sup>3</sup>	Плотность г/см <sup>3</sup> , при давлении прес- сования, МПа			Круп- ность порош- ка, мкм
					200	400	700	
ППЛ-18 СНД	Губчатая, неправиль- ная	0,29	7,43	4,35	5,1	5,7	6,3	75-100
ППЛ-РКП	Неправиль- ная, иногда губчатая	0,5	7,6	1,9	4,9	5,8	6,5	10-15
ППЛ-ПВ- РПХ	Неправиль- ная	0,4	7,2	2,0	4,6	5,3	5,8	10-15
ПВЛЖ-Х	Неправиль- ная	0,4	7,5	2,6	4,6	5,6	6,5	10-15
ППЛ- 15 ПГС	–	0,26	7,5	2,18	4,8	5,6	6,3	40-125
ППЛ-ПВ- РПФ	–	1,17	6,5	1,65	5,2	5,7	6,7	10-63
ПВЛЖ-ОВ	–	0,43	7,35	2,7	3,9	4,3	4,7	10-250
ПЖРЗ (БЗПМ)	Сферическая			2,65	-	-	6,9	76 (ср)

Получение железного порошка из чугунной стружки проводилась д.т.н., проф. Кипарисовым и к.т.н. Козик Е.С. Сепарация стружки и чугунного порошка преследовала цель выделения из него свободного углерода и фаз, богатых кремнием. Применяются следующие методы: магнитная сепарация и гравитация.

В результате обогащения чугунного порошка по различным схемам с применением магнитной сепарации получен продукт, содержащий от 2,64 % до 2,71 % С против 3,3 % в исходном порошке. Содержание SiO<sub>2</sub> не изменилось. Это показывает на неэффективность магнитной сепарации чугунной стружки. Поэтому в следующей серии опытов были проведены исследования сепарации чугунного порошка с применением гравитационных методов. Испытания проводили на короткокonusном гидроциклоне, концентрационном столе и флотационной машине. Порядок проведения эксперимента на короткокonusном гидроциклоне приведен на рисунке 1.7. Получен продукт, содержащий 0,9 % С и 2,02 % SiO<sub>2</sub>. Однако желаемый результат при гравитации на короткокonusном гидроциклоне не получен и были продолжены исследования на другом гравитационном оборудовании.

При обогащении чугунной стружки на концентрационном гидростоле отмечается недостаточная селективность процесса: в продукте содержится 2,8 % С и 2,12 % SiO<sub>2</sub>.



Рисунок 1.7 – Сепарация стружки в короткоконусном гидроциклоне

Флотацию чугунного порошка проводили в лабораторной флотационной машине механического типа с объемом камеры 1 л, при концентрации 30-33 % твердого вещества. Для оптимизации процесса флотации графита разработан и опробирован технологический процесс. В качестве собирателя для флотации применяли керосин с бутиловым ксантогенатом калия, т.к. графит относят к аполярным минералам.

Перед флотацией порошок перемешивают с ПАВом (алкиларилсульфонатом) с целью снижения сил сцепления частиц графита с составляющими чугунного порошка. Флотацию проводили при температуре от 313 до 333 °С, рН=8,0..9,5, при соотношениях порошок – ПАВ – аполярные масла 1 : 0,003..0,009 : 0,0018..0,0025.

Результаты флотационных опытов приведены в таблице 1.7. Полученные порошки могут быть использованы как углеродосодержащая добавка при производстве порошковых сталей, а также для получения фрикционных железочугунных материалов.

На способ пропитки пористых спеченных изделий получен патент № 2096132. Сущность изобретения заключается в том, что пропитку спеченных изделий осуществляют путем погружения их в кремнийорганический лак с последующей полимеризацией.

Таблица 1.7 – Результаты флотации порошка серого чугуна после размола в течении 2, 3 и 5 ч

Наименование продукта	Выход, %	Содержание, %			Распределение, %			Условия опытов, время размола
		C	Fe	SiO <sub>2</sub>	C	Fe	SiO <sub>2</sub>	
Пенный продукт	15,2	5,58	88,96	5,46	28,3	15,0	94,6	3 ч РН- 9; 12
Остаток	84,4	2,5	95,74	1,76	71,7	85,0	5,4	
Исходный	100	3,0	92,1	4,9	100	100	100	
Пенный продукт	44,5	6,2	86,4	7,4	99,0	44,5	84,1	2 ч РН- 9
Остаток	55,5	0,06	98,18	1,76	1,00	55,5	15,9	
Исходный	100	2,75	92,35	4,9	100	100	100	
Пенный продукт	25,3	6,41	87,61	5,98	60,0	25,0	91,3	5 ч РН-9; 12
Остаток	74,7	1,46	96,85	1,69	40,0	75,0	8,7	
Исходный	100	2,7	92,4	4,9	100	100	100	

Образцы массой 100 г из шихты чугуновой стружки фракции (- 1,25 - 0,63) мм прессовали при удельном давлении 700 МПа подвергали спеканию в среде водорода при температуре 1100 °С в течение 2 ч.

После спекания образцы имели пористость 28 – 32 % и твердость 30 – 40 НВ. Пропитку образцов производили кремнийорганическим лаком с конденсацией 55 % (остальное толуол) при давлении 13,3 Па в течение 3-4 мин.

Для пропитки применялся кремнийорганический лак марки КО на основе полимера  $[\text{CH}_3/2\text{SiO}_{1,5}]_n$ . Кремнийорганический лак обладает высокой термостойкостью 1500 °С.

Образец после пропитки подвергали нагреву 10 мин при 100 °С до удаления растворителя. После чего образец подвергался повторной пропитке и полимеризации лака при температуре 200 °С и выдержке при заданной температуре в течение 1 ч.

Полученные образцы были испытаны с целью определения коэффициента трения. Испытания проводили по схеме колодка – ролик в течение 1 ч. Удельная нагрузка 21 кг/мм<sup>2</sup>, скорость  $v_{\text{скол.}} = 1,15$  м/с по стали 1Х19 с твердостью 58 – 60 НRC, при этом коэффициент трения составил  $f = 0,3$ .

В настоящее время все более широкое распространение получает производство никелевого, медного и кобальтового порошков восстановлением их воднорастворимых соединений водородом под давлением.

#### *Получение порошков титана*

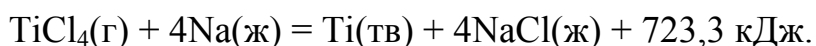
Исходным сырьем для получения титана являются рутил (содержащий TiO<sub>2</sub>) и ильменит (содержащий FeTiO<sub>3</sub>). Основным источником ильменита являются титано-магнетитовые руды (смесь ильменита и магнетита – Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>).

Промышленный способ производства титана состоит в обогащении и хлорировании титановой руды с последующим ее восстановлением из четыреххлористого титана металлическим магнием.



Металлический титан впервые был получен в 1910 г. восстановлением его тетрахлорида  $TiCl_4$  натрием, имеющим высокое сродство к хлору. Четыреххлористый титан – сравнительно дешевый и недефицитный продукт, получаемый хлорированием рудных концентратов рутила, ильменита или продуктов их первичной обработки (например, шлаков или карбидов). Чистый  $TiCl_4$  представляет собой при комнатной температуре бесцветную жидкость (при загрязнении низшими хлоридами окраска становится желтоватой).

В промышленной практике восстановление  $TiCl_4$  натрием ведут в интервале температур между точкой плавления  $NaCl$  ( $801\text{ }^\circ C$ ) и температурой кипения натрия ( $914\text{ }^\circ C$ ), и взаимодействие должно бы происходить между газообразным  $TiCl_4$  и жидким натрием по суммарной реакции:



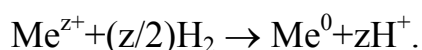
Полученную титановую губку размалывают в порошок.

Исходным сырьем служат рудные концентраты: никель медно-цинковый, медно-свинцово-цинковый, медно-цинковый скрап или отходы металлообработки.

#### *Получение порошков автоклавным способом*

Автоклавная технология получила широкое распространение для производства порошков никеля, меди и кобальта: соответствующий металл, вытесняемый в растворе из его соединения водородом под давлением, осаждается в виде твердых частиц (порошинок). Исходное сырье (рудные концентраты, например, никель-кобальтовый, медно-цинковый, медно-свинцово-цинковый и др., медно-цинковый скрап или отходы металлообработки) подвергают обработке серной кислотой или окислительному аммиачно-карбонатному выщелачиванию, которое часто проводят при повышенном давлении в автоклавах. Полученный раствор сульфата или комплексной аммиачной соли металла очищают от примесей и подают в автоклав на восстановление водородом.

Реакция восстановления катиона металла:



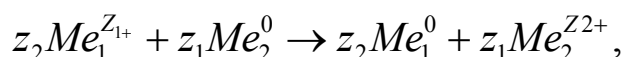
По зарубежным данным, для восстановления применяют горизонтальные автоклавы с паровой рубашкой емкостью около  $25\text{ м}^3$ , с несколькими вертикальными мешалками; производительность одного автоклава около 3 тыс.т порошка в год.

Получаемые порошки меди имеют насыпную плотность от 0,5 до  $3,8\text{ г/см}^3$ .

Химическая чистота автоклавных порошков высока ( $99,7-99,9\%$   $Cu$ ,  $\leq 0,1\%$   $O$ ,  $\leq 0,01\%$   $Fe$ ), а себестоимость примерно вдвое меньше себестоимости электролитических порошков меди; форма частиц самая разнообразная – дендритная, округлая, губчатая и др.

### *Получение порошков цементацией*

Цементация – электрохимический процесс, который часто называют контактным восстановлением или внутренним электролизом. Если какой-либо металл погрузить в раствор соли более благородного металла, то при таком «химическом коротком замыкании» произойдет процесс, аналогичный протекающему в гальваническом элементе: металл с более отрицательным потенциалом вытеснит из раствора металл с более положительным потенциалом, а сам при этом перейдет в раствор. Электрохимическую реакцию между металлом-цементатором и ионом вытесняемого металла в общем виде можно записать так:



где  $z_1$  и  $z_2$  – заряды ионов или валентности соответственно вытесняемого металла и металла-цементатора.

Исходным сырьем для получения медных порошков служат медные аноды и катоды марки М1 и медный купорос.

Электролитическое получение порошков заключается в разложении водных растворов или его расплавленных солей при пропускании через них постоянного электрического тока и последующей разрядке соответствующих ионов металла на катоде.

При наложении электрического поля движение ионов становится более упорядоченным, и катионы приближаются к катоду, а анионы – к аноду. Чем выше напряжение, приложенное к электродам, тем больше скорость движения ионов. Так как восстановление иона металла, т.е. превращение его в атом, связано с расходом некоторого количества энергии, который требует меньших затрат энергии, то в первую очередь протекает тот процесс разрядки, который требует меньших затрат энергии. В связи с этим электролиз – есть одновременно и рафинирование, так как при данном напряжении не все имеющиеся в электролите катионы могут выделиться на катоде.

Электролитический метод производства порошков характеризуется относительно невысокой производительностью труда и высокой себестоимостью получаемого порошка, в основном из-за значительных затрат дорогой электроэнергии. Однако чистота и высокие технологические свойства электролитических порошков вполне искупают недостатки метода.

Электролитическое получение медных порошков заключается в разложении водных растворов или его расплавленных солей при пропускании через них постоянного электрического тока и последующей разрядке соответствующих ионов металла на катоде.

При наложении электрического поля движение ионов становится более упорядоченным, и катионы приближаются к катоду, а анионы – к аноду. Чем выше напряжение, приложенное к электродам, тем больше скорость движения ионов. Так как восстановление иона металла, т.е. превращение его в атом, связано с расходом некоторого количества энергии, который требует меньших за-

трат энергии, то в первую очередь протекает тот процесс разрядки, который требует меньших затрат энергии. В связи с этим электролиз – есть одновременно и рафинирование, так как при данном напряжении не все имеющиеся в электролите катионы могут выделиться на катоде.

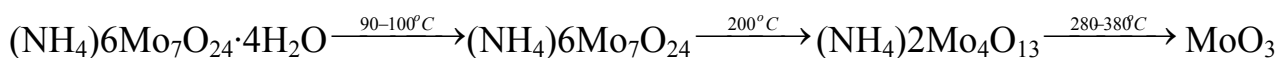
Электролитический метод производства порошков характеризуется относительно невысокой производительностью труда и высокой себестоимостью получаемого порошка, в основном из-за значительных затрат дорогой электроэнергии. Однако чистота и высокие технологические свойства электролитических порошков вполне искупают недостатки метода.

### *Порошки молибдена*

Исходным материалом для получения молибдена служит чистая трехоксида молибдена, получаемая прокаливанием молибдата аммония паром при 450-500 °С в муфельных печах или печах с вращающейся трубой.

Промышленный способ производства порошка молибдена предусматривает восстановление трехоксида молибдена водородом. Этот процесс реально протекает по схеме  $\text{MoO}_3 - \text{MoO}_2 - \text{Mo}$ .

Исходным материалом служит чистый триоксид молибдена  $\text{MoO}_3$  (его цвет от белого до бледно-зеленого), получаемый прокаливанием при 450-500 °С парамолибдата аммония  $3(\text{NH}_4)_2\text{O} \cdot 7\text{MoO}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  в муфельных печах или печах с вращающейся трубой:



Промышленный способ производства порошка молибдена предусматривает восстановление  $\text{MoO}_3$  хорошо осушенным водородом. Этот процесс реально протекает по схеме  $\text{MoO}_3 \rightarrow \text{MoO}_2 \rightarrow \text{Mo}$ , хотя молибден с кислородом образует промежуточные оксиды  $\text{Mo}_4\text{O}_{11}$  (темно-фиолетовый),  $\text{Mo}_8\text{O}_{23}$  (сине-черный) и др.

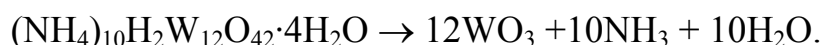
### *Порошки вольфрама*

Мировое производство вольфрамового порошка, по-видимому, превышает 30 000 т в год и обеспечивает удовлетворение более 80 % потребности в вольфрамовой продукции (твердых сплавах, проволоке, листах и пр.).

Наиболее часто исходным материалом для получения порошкообразного вольфрама служит вольфрамовый ангидрид  $\text{WO}_3$  с размером частиц от десятых долей до 10-15 мкм; в качестве восстановителя используют водород или твердый углерод (сажу). Этот триоксид вольфрама получают прокаливанием вольфрамовой кислоты  $\text{H}_2\text{WO}_4$  при 750-850 °С



или паравольфрамата аммония  $(\text{NH}_4)_{10}\text{H}_2\text{W}_{12}\text{O}_{42} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  при 500-850 °С

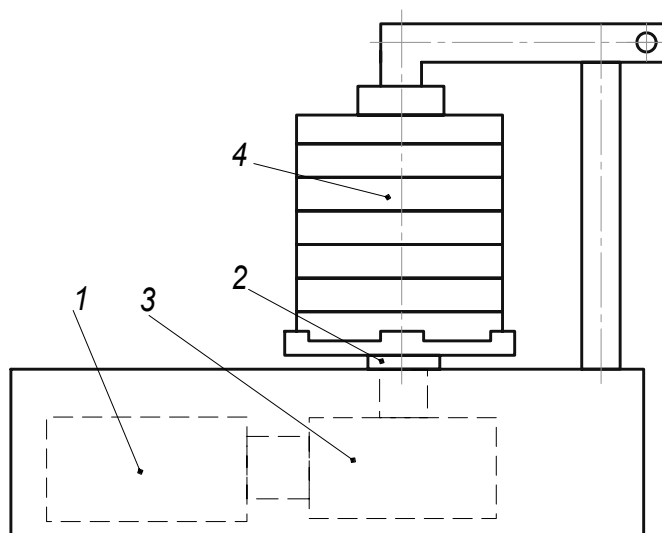


Порошки металлов маркируются в зависимости от метода производства, чистоты и размеров частиц. Так, например, медные порошки маркируются: ПМС-Ву, ПМА, ПМС-1 и т.д., где ПМ - порошок медный электролитический, а следующие индексы определяют физико-химические свойства порошка: С - стабилизированный, Н - низкодисперсный, К - конопаточный, А, У, В – специальные свойства, Ву - для авиационной промышленности.

Металлические порошки характеризуются физическими и технологическими свойствами, химическим составом. К физическим свойствам металлических порошков относятся форма и размер частиц порошка, гранулометрический состав, удельная поверхность частиц порошка и т.д. В зависимости от химической природы металла и способа получения частицы порошка могут иметь различную форму: сферическую, осколочную, губчатую, тарельчатую, дендритную, волокнистую.

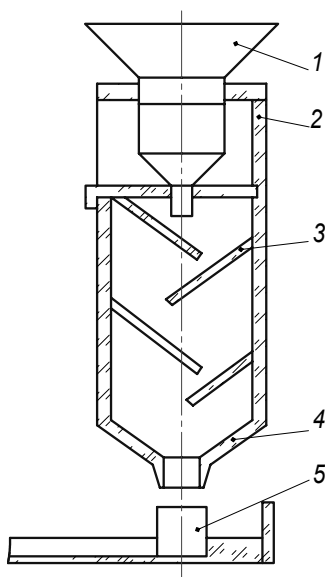
Гранулометрический состав порошка – это соотношение частиц разных размеров – фракций, выраженное в процентах, определяется с помощью ситового анализа (рисунок 1.8). От гранулометрического состава в сочетании с другими свойствами зависят плотность, прессуемость, усадка при спекании и физико-механические свойства готовых изделий.

Для определения насыпной плотности используется система воронок с пластинками (волюмометр Скотта, рисунок 1.9), представляющую собой прямоугольный сосуд с внутренними наклонными стеклянными полочками, по которым под действием силы тяжести ссыпается порошок.



1 - электродвигатель; 2 - редуктор; 3 - вибратор, 4 – набор сит

Рисунок 1.8 - Прибор для ситового анализа

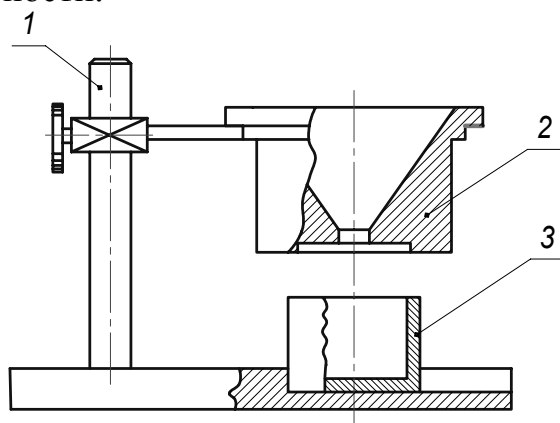


1 - приемная воронка; 2- штатив; 3 - полочки; 4 - конус; 5 - мерный стакан

Рисунок 1.9 - Волюмометр

Относительная плотность – отношение насыпной плотности к плотности компактного материала ( $Q, \%$ ).

Текучесть характеризует способность заполнять собой определенную форму. Определение текучности порошка основано на регистрации времени истечения навески порошка 50 г через калиброванное отверстие (измеряется в граммах в секунду) (рисунок 1.10). Прессуемость порошка определяется двумя технологическими характеристиками: формуемостью и уплотняемостью. Уплотняемость – зависимость плотности брикета от величины давления прессования. Формуемость - способ порошка сохранять заданную форму при определенных значениях плотности.



1 - стойка; 2 - воронка; 3 - емкость

Рисунок 1.10 - Прибор для определения текучности порошка

Хорошая уплотняемость порошка облегчает прессование, так как при этом требуется меньшее давление при достижении данной плотности, а при хо-

рошей формуемости получают более прочные и неосыпающиеся заготовки. Существенное влияние на прессуемость оказывают размеры и форма частиц порошка.

Под химическими свойствами металлических порошков понимается: содержание основного металла или основных компонентов, входящих в состав легированного порошка, содержание примесей, различных механических загрязнений и газов.

В технических условиях на порошки заводами-поставщиками обычно указывается содержание основного металла и примесей, поэтому иногда возникает необходимость в определении полного химического состава. В этом случае содержание компонентов определяют химическим и спектральным анализами.

В зависимости от размера частиц порошки классифицируются на ультра-тонкие с размером частиц менее 0,5 мкм; очень мелкие (обозначение ОМ) с размером от 0,5 до 10 мкм; мелкие (М) - от 10 до 40 мкм; средние (С) - от 40 до 150 мкм и крупные (К) - от 150 мкм и выше.

От размера частиц порошков в сочетании с другими свойствами зависят насыпная плотность, давление прессования, усадка при спекании и механические свойства готовых изделий. Чем мельче порошки, тем большее давление требуется при прессовании для достижения заданной плотности прессовок, а полученные заготовки обладают повышенной прочностью и спекаются при более низких температурах.

Следующей важной физической характеристикой порошков является удельная поверхность частиц, под которой понимается суммарная поверхность всех частиц, взятых в единице объема или массы. Величина удельной поверхности зависит от размера и формы частиц.

Технологические свойства порошков характеризуются насыпной плотностью, текучестью, прессуемостью. Насыпная плотность - это масса единицы объема свободно насыпанного порошка.

Насыпная плотность порошков - это объемная характеристика, представляющая собой массу объема порошка при свободной насыпке. Насыпная плотность выражает способность частиц порошка к укладке и зависит от плотности металла порошка, фактического заполнения порошком определенного объема, дисперсности, формы частиц и удельной поверхности.

### **1.3 Подготовка порошковой шихты**

Подготовка порошков к прессованию является ответственным этапом при изготовлении порошковых изделий, т.к. качество смеси отражается на свойствах готовых изделий. Приготовление шихты связано с дозировкой порошков заданного химического и гранулометрического составов с последующим смешиванием.

Приготовление шихты включает предварительный отжиг, сортировку порошка по размерам частиц и смешивание их. Предварительный отжиг порошка способствует восстановлению поверхностных оксидов и снимает наклеп, возникающий при механическом измельчении исходного материала. Отжигу под-

вергают обычно порошки, получаемые механическим измельчением, электролизом и разложением карбониллов. Отжиг проводят при температуре, составляющей 0,5-0,6 температуры плавления, в защитной атмосфере.

Порошки с размерами частиц более 40 мкм разделяют по фракциям рассеиванием в ситах, а с более мелкими частицами – воздушной сепарацией. В металлические порошки вводят технологические присадки различного назначения: пластификаторы (парафин, стеарин, олеиновую кислоту и др.), облегчающие прессование и получение заготовок высокого качества; легкоплавкие присадки, ускоряющие спекание; различные летучие вещества (для получения деталей с заданной пористостью).

В зависимости от свойств исходных порошков – компонентов смешивание может быть сухое и мокрое (в последнем случае в смеситель вместе с исходными компонентами добавляется спирт, бензин, глицерин и т.п.). Смешивание производится в специальных агрегатах-смесителях (в течение 1-5 часов) различных типов: барабанные (в том числе со смещенной осью), шнековые и лопастные, центробежные, планетарные, конусные и установки непрерывного действия (УНД). Автоматизация процессов приготовления смеси обеспечивает ее качество.

#### **1.4 Технология прессования порошковых материалов**

Прессование (формование) металлических порошков и их смесей - операция, при которой из сыпучего порошка получают относительно прочные полуфабрикаты или заготовки, имеющие форму и размеры готовых деталей с учетом изменения размеров при спекании, а также припусков связанных с какой-либо обработкой (рисунок 1.11). Заготовки, полученные после прессования, как правило, имеют пористость 15-20 %, обладают низкими механическими свойствами.

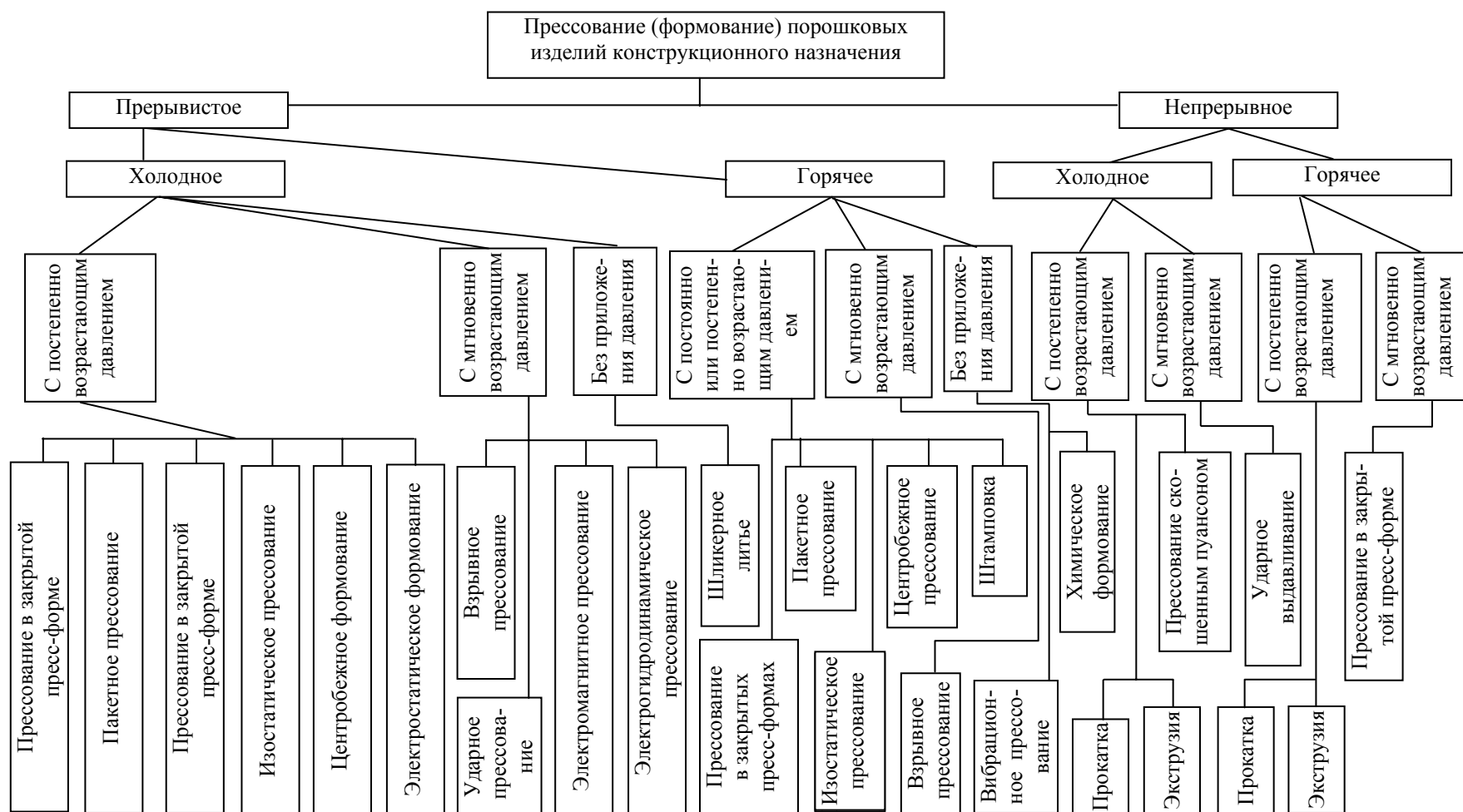


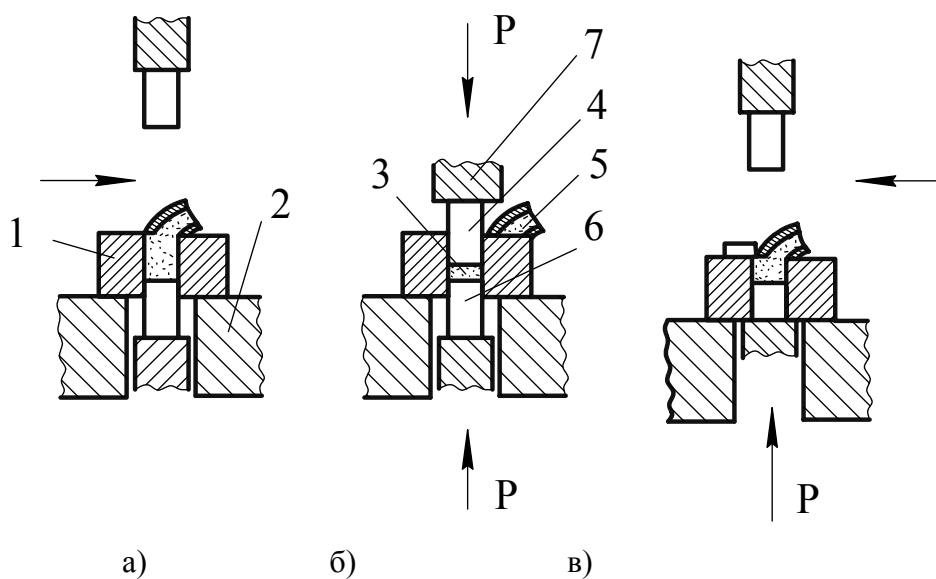
Рисунок 1.11 – Технологические методы прессования порошковых конструктивных деталей



Высота прессовки обычно бывает в 3-5 раз меньше по сравнению с высотой засыпанного в матрицу порошка, что приводит к деформационной анизотропии свойств прессовок (механических, формы и размеров пор, проницаемость и др.)

Уплотнение порошка, сопровождающееся зачастую формоизменением его частиц, обеспечивают прессованием в пресс-формах, формованием в оболочках под воздействием жидкости или газа высоких давлений, шликерным формованием, прокаткой и другими методами, в том числе при высоких скоростях приложения давления.

Наибольшее применение получил метод холодного прессования в закрытых пресс-формах. В установленную на плиту пресса пресс-форму засыпается порция шихты, через пуансон прикладывают заданное давление, после выдержки нагрузку снимают, затем производится выпрессовывание заготовок из пресс-формы. Прессование в закрытых пресс-формах может быть односторонним и двусторонним. Одностороннее прессование применяется при изготовлении изделий простой формы, у которых отношение длины или высоты к диаметру или толщине меньше 1 (рисунок 1.12).



а – засыпка порошка в рабочую полость матрицы пресс-формы;  
 б – прессование; в – выпрессовывание; 1 – матрица пресс-формы;  
 2 – плита пресса; 3 – прессуемый порошок; 4, 6 – пуансоны;  
 5 – питатель дозирующего устройства; 7 – плунжер пресса

Рисунок 1.12 – Схема прессования заготовки

На рисунке 1.13 представлена поэтапная технологическая схема изготовления порошковых конструкционных изделий методом однократного прессования в закрытых пресс-формах и спекания.

В ОГУ под руководством к.т.н. доц. А.Д. Проскурина проводились исследования по прессуемости железочугунных шихт (рисунки 1.14, 1.15).

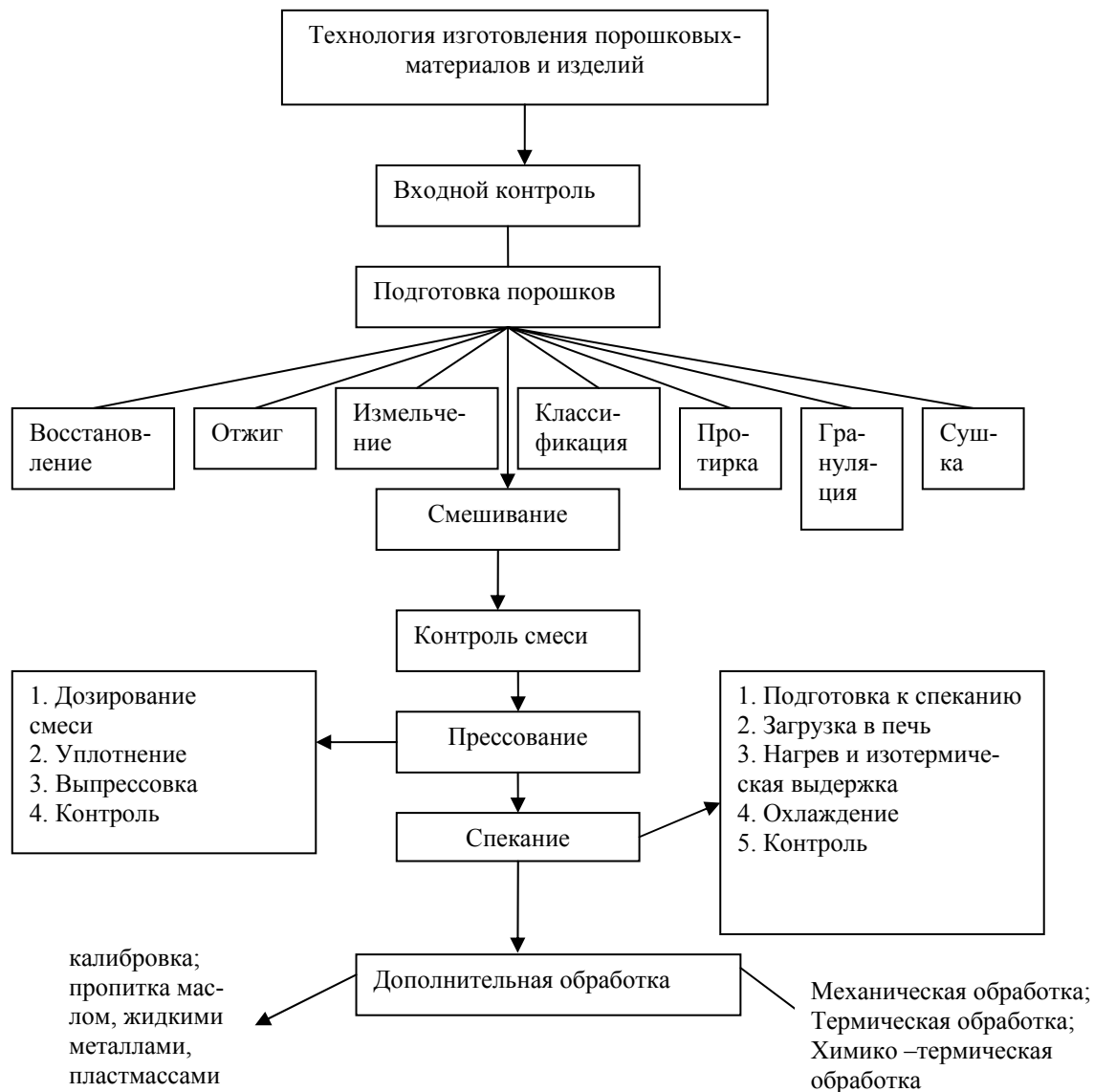
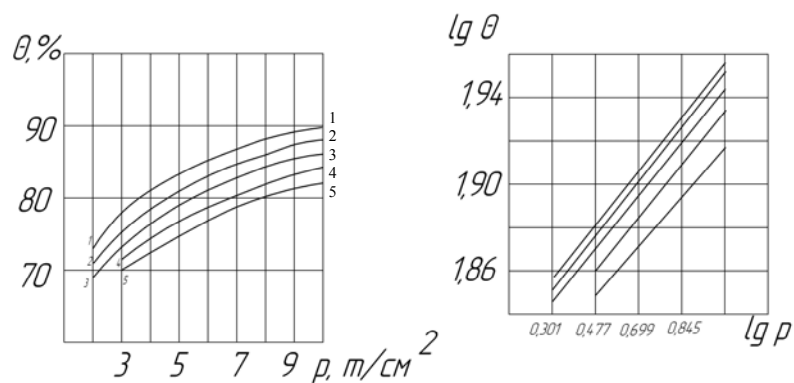


Рисунок 1.13 - Поэтапная технологическая схема изготовления порошковых конструктивных деталей путем прессования в закрытых пресс-формах



1 – насыпная плотность; 2 – плотность утряски; 3 – текучесть

Рисунок 1.14 – Влияние содержания чугунного порошка на технологические свойства шихт.



1 – 10 %; 2 – 20 %; 3– 30 %; 4– 40 %; 5 – 50 %.

Рисунок 1.15 – Влияние давления прессования на относительную плотность прессовок, содержащих чугунный порошок.

При прессовании смеси, состоящей из пластичного железного порошка и твердых частиц чугуна, уплотнение происходит за счет пластической деформации частиц железного порошка и твердых частиц чугуна. Частицы чугунного порошка при этом в основном сохраняют свою форму и размеры.

Уплотняемость железо-чугунных шихт достаточно высока, так как при давлении прессования 700 МПа плотность прессовок, содержащих от 30 % до 40 % чугунного порошка, составляет от 6,35 до 6,45 г/см<sup>3</sup>. Это позволяет получать достаточно плотные прессовки из смесей порошков железа и чугуна методом холодного прессования.

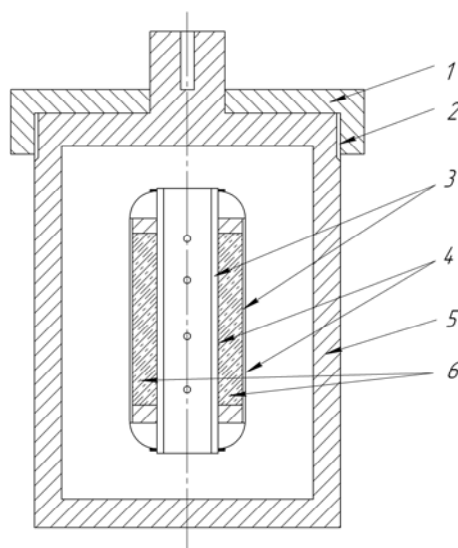
Прессование массивных заготовок, а иногда и изделий простой формы производится в гидростатах и изостатах (рисунок 1.16). Обычно объемное прессование в гидростатах производится при комнатной температуре. Порошковая смесь, помещенная в резиновые оболочки, равномерно обжимается жидкостью, в результате получают однородные по плотности заготовки с минимально достигаемой пористостью до 12-14 %.

*Шликерное формование* - формование металлического порошка заполнением шликером пористой формы, обеспечивающей удаление жидкости из шликера. Шликер – устойчивая суспензия металлического порошка.

Другой разновидностью шликерного формования является электрофоретический метод, при котором заготовку получают путем постепенного наращивания слоя из твердых частиц шликера, которые под влиянием электрического поля перемещаются к электроду-форме и осаждаются на нем.

Ещё одну разновидность представляет формование термопластичных шликеров, состоящих из твердой фазы и термопластичной связки, которая при комнатной температуре твердая, а при нагреве плавится и придает шликеру необходимые литейные свойства.

Шликерное формование (его иногда продолжают называть «шликерное литье») позволяет получать изделия сложных форм, мало- и крупногабаритные, полые с равномерной толщиной стенок, с высокой чистотой поверхности и точных размеров.



1 – винтовая крышка, 2– прокладка, 3 – стальные трубки, 4 – резиновая оболочка, 5 –контейнер, 6 – порошок

Рисунок 1.16 – Гидростатическое прессование

Существенными недостатками шликерного формования являются высокая суммарная длительность процесса получения заготовок, необходимость изготовления и хранения больших количеств адсорбирующих форм, потребность в мощном сушильном хозяйстве.

Прессование в газостатах (обжигание с помощью газов) производится при температурах от 1050 °С до 1300 °С. В этом случае процесс прессования совмещается со спеканием. В результате такого процесса получают однородные по плотности заготовки с остаточной пористостью от 2 % до 6 % (объемных).

Горячее формование представляет собой процесс получения изделий, осуществляемый в закрытых пресс-формах при повышенных и высоких температурах и давлении, необходимых для уплотнения порошка.

Прокатка металлических порошков, т.е. непрерывное их формование, не требующее применения дорогостоящих пресс-форм, является одним из перспективных способов порошковой металлургии и занимает все большее место в металлообработке, становясь конкурентоспособным методом получения полуфабрикатов из металлов и сплавов (рисунок 1.17).

Прокаткой порошков можно получать биметаллические и многослойные ленты и полосы.

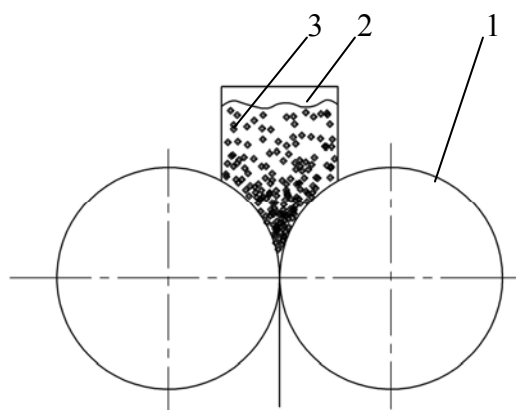
Основные закономерности прессования:

Усилие прессования  $P$ , МПа определяется зависимостью

$$P = p \cdot F ,$$

где  $p$  – удельное давление прессования, МПа;

$F$  – площадь поперечного сечения, м<sup>2</sup>.



1 – валки, 2 – бункер для порошка, 3 - порошок

Рисунок 1.17 Схема прокатки

Под давлением (при основном сжатии) порошок, засыпанный в пресс-форму, растекается в стороны, в результате чего возникает боковое давление  $P_2$ , МПа, действующее на стенки пресс-формы:

$$\xi = \frac{\nu}{1-\nu} = \frac{P_2}{P},$$

где  $\xi$  - коэффициент бокового давления;

$\nu$  - коэффициент Пуассона металлического порошка.

Свойства порошков из некоторых материалов и значения коэффициентов бокового давления приведены в таблице 1.8.

Таблица 1.8 - Свойства порошков

Материал порошка	Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>	Плотность компактного материала, г/см <sup>3</sup>	Твердость, НВ	Коэффициент Пуассона, $\nu$	Коэффициент бокового давления, $\xi$
Железо	1,8 - 3,0	7,8 - 7,85	126 - 133	0,28	0,39
Медь	1,5 - 2,5	8,3 - 8,9	92- 109	0,35	0,54
Вольфрам	2,4 - 4,0	19,3	400	0,17	0,21

Величина бокового давления не является постоянной по высоте прессуемых изделий, а уменьшается (при одностороннем прессовании) от верха пресс-формы, то есть места приложения давления, к нижней части пресс-формы. Понижение бокового давления объясняется падением общего давления прессования по высоте заготовки, вызываемого трением частиц друг о друга и о стенки матрицы. Вследствие снижения давления прессования по высоте прессуемого

изделия возникает неравномерная плотность спрессованной заготовки по ее объему.

После выпрессовывания изделий из пресс-формы размеры их под действием внутренних напряжений увеличиваются. Это явление называется упругим последствием. Обычно упругое последствие сильнее проявляется по направлению прессования, чем перпендикулярно ему. Так, по направлению прессования величина упругого последствия  $\delta_1 = 5-6\%$ , а перпендикулярно ему –  $\delta_D = 2-3\%$ .

Величина упругого последствия определяется по формулам:

$$\delta_1 = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100 ,$$

$$\delta_D = \frac{D_1 - D_0}{D_0} \cdot 100 ,$$

где  $D_0, l_0$  – диаметр и высота брикета, находящегося в пресс-форме под действием давления прессования;

$D_1, l_1$  – диаметр и высота брикета после выпрессовывания из матрицы.

Объемная величина упругого последствия  $\delta_v$ , в процентах определяется по аналогичной зависимости:

$$\delta_v = \frac{V_1 - V_0}{V_0} \cdot 100 ,$$

где  $V_0$  – объем брикета, находящегося в пресс-форме под действием давления прессования;

$V_1$  – объем брикета после выпрессовывания из матрицы.

Установление величины упругого последствия имеет большое значение при проектировании пресс-форм для учета возможного изменения размеров изделия после выпрессовывания.

Для получения достаточно прочных заготовок при холодном прессовании применяются значительные давления, которые в зависимости от требуемой плотности и свойств порошковой шихты могут колебаться от 50 МПа до 150 МПа для твердосплавных смесей с пластификатором и от 500 МПа до 800 – 1000 МПа для железных и стальных порошков.

## 1.5 Спекание порошковых заготовок

Холодное прессование не обеспечивает механической прочности прессовок. Для повышения механических свойств и придания порошковым изделиям необходимых физико-механических свойств заготовки подвергают спеканию.

Спеканием называют процесс развития межчастичного сцепления и формирования свойств материала, полученного нагревом сформированного или свободно насыпанного порошка или волокна без расплавления основного компонента.

Спекание производится в вакууме или контролируемой атмосфере (восстановительной: водород, диссоциированный аммиак, конвертируемый газ; нейтральной: аргон, гелий и др.). Длительность выдержки при температуре спекания в зависимости от состава шихты может быть до нескольких часов.

Плотность, прочность и другие физико-механические свойства спеченных изделий зависят от свойств исходных порошков и условий изготовления: давления прессования, температуры, времени и атмосферы спекания и других факторов. Образцы для определения физико-механических свойств показаны на рисунке 1.18. Возможны две основные разновидности спекания – твердофазное, т. е. без образования жидкой фазы, и жидкофазное, при котором легкоплавкие компоненты смеси порошков расплавляются.



Рисунок 1.18 – Образцы для определения физико-механических свойств порошковых сталей. Лопаточки – для определения прочности и образцы прямоугольного сечения – для определения ударной вязкости

Появление жидкой фазы при спекании, образующейся за счет расплавления более легкоплавкого компонента, приводит к увеличению скорости диффузии компонентов и облегчает перемещение частиц твердой фазы относительно друг друга, способствует заполнению пор. В связи с этим при жидкофазном спекании можно обеспечить получение практически беспористых изделий.

Спекание производится при температуре 0,7 – 0,9 от термодинамической температуры плавления основного компонента в многокомпонентной порошковой смеси.

В процессе спекания за счет качественного и количественного изменения контактов, связанных с большой подвижностью атомов при повышенных температурах, увеличивается поверхность сцепления частиц, повышается плотность и прочность изделий, достигаются необходимые физико-механические свойства. Ориентировочные режимы приведены в таблице 1.9.

Таблица 1.9 – Ориентировочные режимы прессования и спекания порошковых антифрикционных материалов

Порошковый материал	Давление прессования, МПа	Режим спекания		
		Температура, °С	Выдержка, мин	Защитная среда
Железографит (0,5 -3 % С); железографит, легированный медью	400-800	1050-1150	60-180	Конвертированный газ, эндогаз
Бронза пористая и бронзографит (1-4 % С)	200- 400	720-850	30-120	Водород, диссоциированный аммиак

В результате спекания предел прочности при растяжении  $\sigma_v$  увеличивается и составляет от 100 МПа до 300 МПа (в зависимости от материала, режимов, пористости от 10 % до 20 %), а твердость увеличивается от 60 НВ до 100 НВ - для железографитовых материалов.

Пористость определяется по формуле:

$$P = 100 - \theta,$$

$$\theta = \frac{\gamma}{\gamma_k} \cdot 100,$$

где  $P$  – пористость, %

$\gamma$  – плотность спеченного изделия, г/см<sup>3</sup>;

$\gamma_k$  – плотность компактного сплава, г/см<sup>3</sup>.

$\theta$  - относительная плотность, %

Плотность изделий возрастает с повышением температуры спекания и давления прессования.

С целью уменьшения длительности спекания используют различные технологические приемы. Под активированным спеканием понимают интенсификацию изменения плотности и свойств порошковых материалов. Существует два направления активации: химическое и физическое. Химические методы активации процесса спекания основаны на использовании реакций окисления – восстановления, диссоциации оксидов, гидридов и галогенов; физические – на циклическом изменении – температуры спекания, воздействии при спекании на порошковую массу ультразвуковых колебаний и др.

Для получения порошковых беспористых или малопористых изделий применяют многократное прессование и спекание или горячее прессование.

При спекании происходит сближение частиц, уменьшение линейных размеров и объема спекаемого тела, называемое усадкой. Усадку необходимо учитывать при проектировании оснастки для прессования. Количественно усадка характеризуется относительным изменением размеров или объема:



$$\delta = \frac{\Delta l}{l_0},$$

$$\delta = \frac{\Delta V}{V_0}.$$

Точность размеров изделий после спекания соответствует квалитетам, шероховатость поверхности 10, 0 – 5,0 мкм.

Калибровка повышает точность размеров до 8 -11 квалитетов.

С целью снижения температуры спекания железо-графитовых материалов с температуры от 1150 - 1200 °С до 1000 °С в Оренбургском политехническом институте и на Броварском заводе порошковой металлургии были проведены исследования. Снижение температуры спекания до 1000 °С получено при введении в шихту на основе железа 0,2 - 0,4 %  $\text{CaCO}_3$ .

Новейшим направлением в порошковой металлургии является получение порошковой быстрорежущей стали. Производство порошковых заготовок быстрорежущей стали осуществляется следующим образом. В индукционной печи расплавляют отходы соответствующей марки быстрорежущей стали. После экспресс-анализа химсостава производят выпуск жидкой стали, тонкой струей, в герметически закрытую камеру-распылитель. Здесь струю стали подвергают распылению струей чистого аргона или азота. После сортировки (рассеивания) порошка и приготовления шихты ее загружают в капсулу диаметром 500 мм и высотой 1720 мм, изготовленной из листовой стали толщиной 3 мм, уплотняют вибрацией на вибростенде, откачивают из капсулы воздух (вакуумируют) и заваривают ее (герметизируют). Для повышения теплопроводности порошка его, при комнатной температуре, подвергают предварительному изостатическому уплотнению в специальной камере (гидростате) под давлением 400 МПа.

Далее каждую капсулу с порошком быстрорежущей стали в специальном предохранительном цилиндре нагревают в электропечи до 950 °С и помещают в газостат, по конструкции аналогичный гидростату, но в него в качестве рабочей среды подают горячий аргон, поступающий в газостат при давлении 100 МПа, осуществляют изостатическое горячее прессование порошкового материала в капсуле. Относительная плотность получаемой заготовки достигает 99,9 %. После повторного нагрева полученную заготовку подвергают ковке на прессе усилием 5000 кН до получения сортовых поковок заданного сечения. Такие поковки поступают на инструментальные заводы для изготовления различного металлорежущего инструмента.

Горячую штамповку порошковых материалов осуществляют в подогреваемых штампах. Исходным материалом служат предварительно спрессованные заготовки – брикеты. Для горячей штамповки порошковых брикетов используют стандартные кривошипные горячештамповочные прессы.

## 1.6 Маркировка, структура и свойства порошковых сталей

Конструкционные порошковые материалы на основе железа (порошковые стали), предназначенные для замены компактных материалов (литых, катаных, штампованных) и используемые для изготовления разнообразных деталей машин, по маркам, химическому составу и физико-механическим свойствам регламентируются ГОСТ 28378-89. Порошковые стали подразделяются на несколько классов:

- малоуглеродистые, углеродистые и медистые;
- никельмолибденовые, медьникелевые и медьникельмолибденовые;
- хромистые, марганцовистые и хромоникельмарганцовистые;
- нержавеющие.

Марки порошковых сталей обозначают сочетанием букв и цифр. Для порошковых сталей – наиболее распространенных материалов общего назначения - приняты следующие обозначения: первые две буквы ПК – указывают, что методом порошковой металлургии получена сталь конструкционная. Число после буквы «П» показывает среднее содержание углерода в сотых долях процента (например, СП30 – сталь с содержанием примерно 0,3 % С). Следующие за этим числом буквы обозначают легирующие элементы (обозначения, как в легированных сталях: А – азот, Б – ниобий, В – вольфрам, Г – марганец, Д – медь, К – кобальт, М – молибден, Н – никель, П – фосфор, С – кремний, Т – титан, Ф – ванадий, Х – хром, Ц – цирконий). Цифры после символов элементов отражают среднее содержание легирующего элемента в процентах.

Цифра после дефиса указывает плотность материала данной подгруппы: 1 - пористость 25 - 16 %, плотность  $(6,0 - 6,6) \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>; 2 - пористость 15-10 %, плотность  $(6,7 - 7,1) \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>; 3 - пористость 9 - 2 %; 4 - пористость не более 2 %.

Свойства некоторых материалов приведены в таблицах 1.10 и 1.11

Свойства порошковых сталей зависят от их макро – и микроструктуры. Структурными составляющими порошковых материалов являются металлические фазы, образующие основу материала, и неметаллические включения (например, графит, оксиды, карбиды, нитриды и др.)

Металлическая основа порошковых сталей, как у литых сталей: ферритная, ферритно-перлитная или перлитно-цементитная, согласно диаграмме Fe-Fe<sub>3</sub>C.

Пористость может рассматриваться как совокупность сообщающихся пор – каналов, которые могут быть тупиковыми, изолированными, а также выходить на поверхность и сообщаться между собой. Для определения формы пор и их распределения готовят шлифы по различным направлениям относительно направления прессования и изучают пористость на непротравленных или слегка протравленных шлифах.

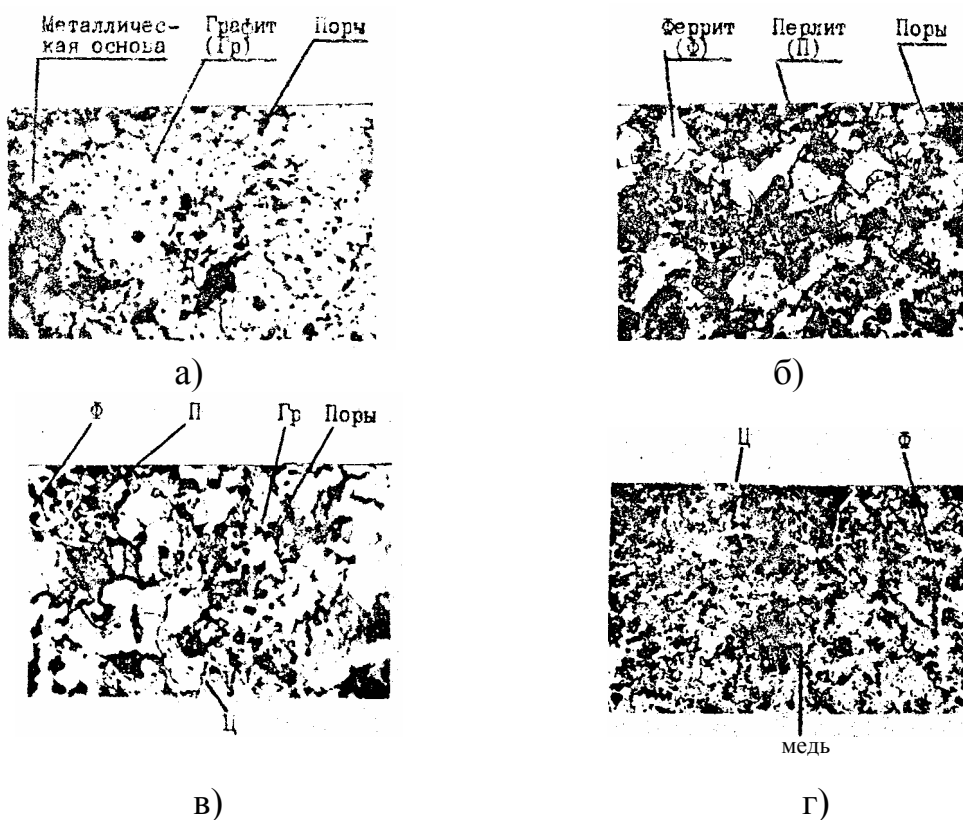
Таблица 1.10 – Свойства порошковых конструкционных материалов

Марка материала	Состав	Предел прочности при растяжении $\sigma_B$ , МПа, не менее	Относительное удлинение, %, не менее	Твердость, НВ	Ударная вязкость, $a_{H_2}$ , кДж/м <sup>2</sup>
Материалы на основе железа					
СП10 -2	0,1 % С	120	8	70-80	200
СП10 -4	0,1 % С	150	18	90-130	700
СП70 -2	0,5 – 0,8 %С	200	8	70-90	300
СП70 -4	0,5 – 0,8 %С	360	15	110-150	600
СП70ДЗ-2	0,5 – 0,8 %С 2-3 %Cu	260	3	80-100	200
СП70ДЗ-2	0,5 – 0,8 %С 2-3 %Cu	450	8	120-160	450
Материалы на основе природно –легированных порошков					
ППЛ – 15 ГС		230-250		79 - 81	220-250
ППЛ – 18 ХСНД		240-260		85- 86	270-300
ППЛ - РКН		380-420		82- 87	420-460
Материалы на основе меди					
БРПО10-2	9,5 - 10,5 % Sn	100	8	60-80	80
БРПО10-3	9,5 - 10,5 % Sn	200	12	80-90	120
ЛП68-2	31-33 % Zn	80	8	40-50	150

Таблица 1.11 – Свойства сложнoleгированных порошковых сталей

Марка	$\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	НВ	$\sigma_B$ , МПа	$\Delta$ , %
	не менее			
ПК40Н2Д2	6,4	100	300	1
	6,8	120	360	2
	7,4	150	700	5
ПК40Н3Д2Х	6,4	120	350	1
	6,8	150	500	2
ПК40Н2Д2М	6,8	150	440	3
	7,4	180	780	6
ПК40Н4Д2М	6,8	180	600	1
	7,4	220	880	4
ПК70Н2Д2	6,4	120	330	-
	6,8	150	440	-
	7,4	200	800	3

Порошковые стали характеризуются значительной химической и структурной неоднородностью. Это определяется тем, что спекание выполняется ниже температуры плавления: скорости диффузии элементов, входящих в состав сплава, не обеспечивают полного растворения (1.19).



Ф – феррит, П – перлит, Ц – цементит, Гр – графит  
 а – спрессованный образец, б, в, г – спеченная сталь СП80 и СП100Д2,5

Рисунок 1.19 – Структуры порошковых сталей

При травлении железографитовых сплавов 4 % раствором азотной кислоты в спирте выявляются цементитные и ферритные составляющие. Перлит окрашивается в коричневый цвет, феррит остается светлым. В этом случае следует обращать внимание на резкость очертания границ. Границы пор очерчены более четко, в то время как включения графита не имеют резких очертаний. Поры легко отличить от включений графита при изменении фокусировки микроскопа, так как при приближении к окуляру выявляется дно поры.

## 2 Порошковые конструкционные материалы

### 2.1 Классификация порошковых конструкционных материалов

Порошковые конструкционные материалы – наиболее распространенный вид продукции порошковой металлургии общемашиностроительного значения, охватывающий различные типы материалов (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Типы порошковых материалов

Тип порошкового материала	Назначение	Исходные материалы
Антифрикционные	Подшипники скольжения	Порошки железа и его сплавов, различные добавки (графит, сульфиды, фториды и др.)
Фрикционные	Тормозные колодки	Порошки Cu, Fe, Sn, Pb и др. неметаллические добавки асбест, графит, оксид кремния
Плотные	Детали машин	Fe, C, Cu, Cr, Ni, W, Mo
Пористые	Фильтры	Порошки бронзы, нержавеющей стали, сплавов, сплавов Ti
Тугоплавкие	Проволока и электроды для ламп, детали машин	Порошки W, V, Nb, N
Электротехнические	Контакты, сердечники, электр. машин, магниты	Порошки Cu, Fe, Co, Ag, Ni, оксиды металлов
Твердые сплавы	Режущий инструмент, волокна, буры	

Типовыми деталями конструкционного назначения, изготовленного методами порошковой металлургии являются шестерни, звездочки, кулачки, накладки, корпуса, кольца, шайбы, крышки, фланцы, колпачки, заглушки, рычаги, детали машин и приборов. Они выпускаются в виде готовых изделий или заготовок, требующих незначительной механической обработки. В зависимости от условий эксплуатации конструкционные порошковые материалы можно подразделить на две группы (рисунок 2.1):

- 1) материалы, заменяющие обычные углеродистые и легированные стали, чугуны и цветные металлы;
- 2) материалы со специальными свойствами - высокой износостойкостью, твердостью, жаропрочностью, жаро – и коррозионностойкие, со специальными магнитными, электро – и теплофизическими свойствами, с большой или малой удельной массой.



Рисунок 2.1 – Классификация конструкционных порошковых материалов

По степени нагруженности порошковые конструкционные детали можно подразделить на четыре группы: малонагруженные, умереннонагруженные, средненагруженные, тяжело нагруженные (таблица 2.2.).

Таблица 2.2 – Основные технологические схемы производства заготовок методами порошковой металлургии при серийном, массовом производстве

Степени нагруженности деталей	Квалитет	Группа сложности	Технологические операции	
			основные	дополнительные
Малонагруженные	11-14 5-10	1 - 7	А А, Б	К, И, П
Умереннонагруженные	11-14 5-10	1 – 7 1 - 4	Б, Е, Ж Б	И, П, ТО, И, ПТО, Д, П
Средненагруженные	11-14 5-10	1 - 7	Г, Е, Ж В, Г, Ж	то, пто, д, п
Тяжелонагруженные	11-14 5-7	1 - 7	В, Г, Н	то, пто, д, п

Обозначения: А - холодное прессование + спекание; Б – двойное прессование + спекание; В - холодное прессование + спекание + холодная штамповка + отжиг; Г - холодное прессование + спекание + горячая штамповка + отжиг; Д – шлифование или доводка; Е - холодное прессование + пропитка легкоплавким металлом; Ж - спекание порошка в форме + пропитка легкоплавким металлом; И - пропитка кремнийорганической жидкостью и полимеризация; К - калибровка; М - механическая обработка; Н - холодное прессование + спекание + горячая штамповка с истечением металла + отжиг; П - нанесение покрытий; ТО - термическая обработка.

К малонагруженным и умереннонагруженным можно условно отнести детали, работоспособность у которых при действующих напряжениях обуславливает необходимость использовать порошковый материал, предел прочности которого не превышает соответственно 20-25 % и 50-55 % предела прочности беспористого материала. Большинство таких деталей не подвергаются расчету на прочность, а их размеры выбираются из конструкционных и технологических соображений.

К средненагруженным и тяжелонагруженным можно условно отнести детали, у которых работоспособность при действующих удельных нагрузках обуславливает необходимость использовать порошковый материал, предел прочности которого соответственно составляет 70-75 % и более 90 % предела прочности беспористого материала (шестерни, рычаги, кулачки и т.д.). Детали этой группы подвергаются расчетам на прочность, жесткость и долговечность в заданных условиях эксплуатации.

Для малонагруженных деталей можно применять материалы высокой пористости (порядка 15 -25 %), для умереннонагруженных - материалы пониженной пористости (10-15 %), средненагруженные детали имеют пористость в пределах 2-9 %, а тяжелонагруженные не более 2 %.

## **2.2 Изготовление порошковых конструкционных материалов**

Технологические процессы изготовления порошковых конструкционных материалов в первую очередь определяются степенью нагруженности деталей.

Допустимая пористость (или минимальная допустимая плотность деталей первой степени нагруженности позволяет изготавливать традиционными методами порошковой металлургии (холодным прессованием и спеканием), средне- и тяжелонагруженных деталей двойным прессованием и спеканием, а также высокоэнергетическими методами формования (рисунок 2.2).

Технологии изготовления деталей машин из порошковых конструкционных материалов состоит из операций приготовления шихты, формования, спекания и дополнительной обработки (термической, химико-термической, механической, пропитки и т.д.).

### **2.2.1 Приготовление шихты**

Целью приготовления шихты является обеспечение равномерного распределения компонентов, введение которых необходимо для достижения заданного состава, структуры и свойств материала. Приготовление шихты обычно включает операции рассева порошков, смешивания и предварительной обработки.

Рассев порошков производят с помощью различных ситовых металлических полотен (при размере частиц более 40 мкм), установленных на виброситах. Смешивание производят механическим методом – в барабанах, конусных смесителях, шнековых, шаровых и вибромельницах и т.д. Емкость барабанов обычно составляет от 100 л до 500 л. Барабан заполняют шихтой примерно на 1/2 - 1/3 объема.

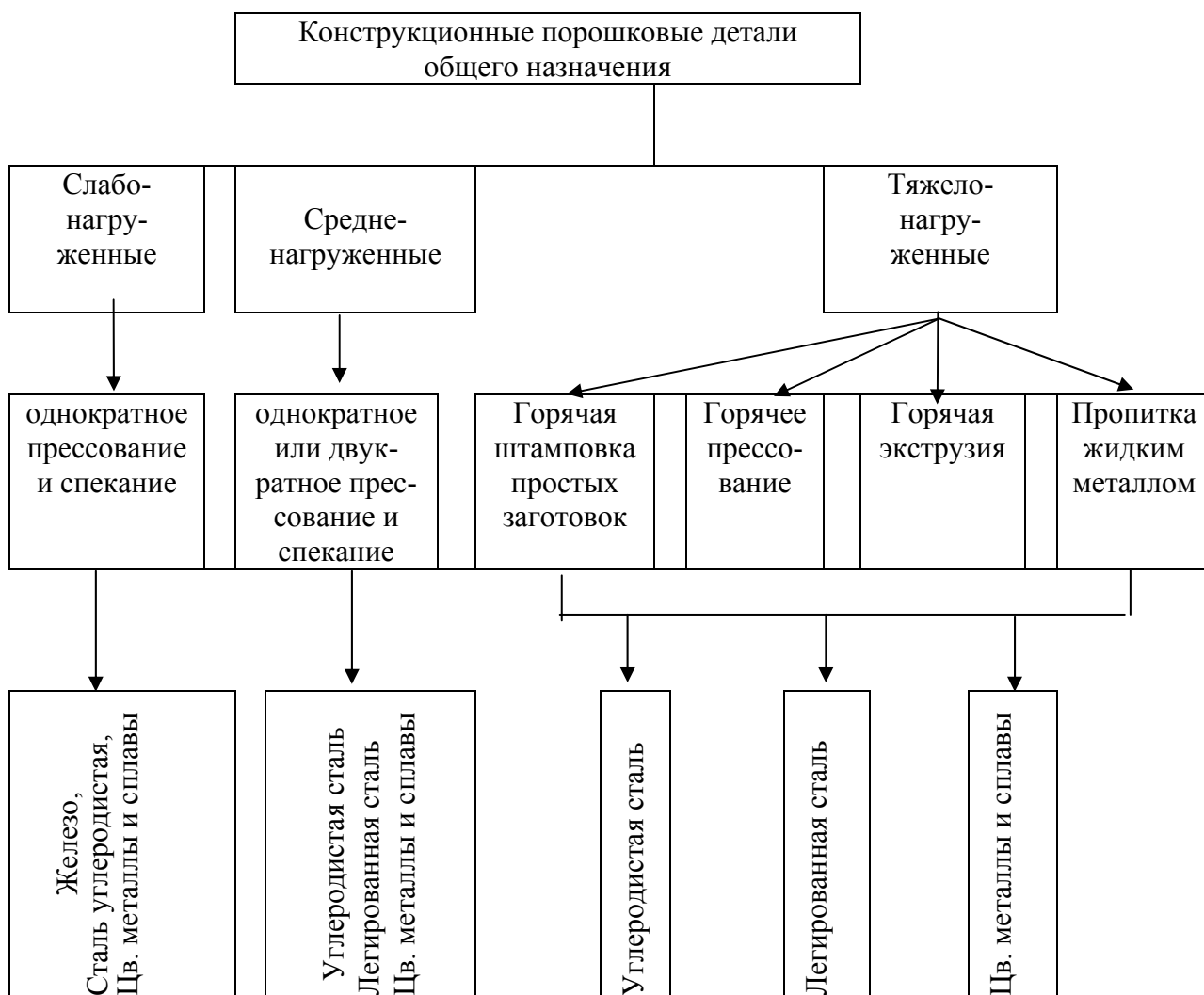


Рисунок 2.2 – Классификация технологических схем изготовления и материалов для порошковых конструкционных деталей общего назначения

Критическое число оборотов, выше которого прекращается смешивание, вычисляют по формуле  $n=42,2 D$ , где  $D$  - диаметр барабана, см.

Скорость вращения смесителя составляет 30-40 % критической и обычно равна 30-60 об/мин.

Длительность смешивания 2-8 часов.

Отжиг порошка применяют главным образом для восстановления оксидов, удаления летучих примесей, снятия наклепа и повышения прессуемости. Температуру отжига порошка выбирают из условия минимального спекания частиц и легкости растирания порошка. Обычно она составляет  $T_{отж} = (0,4-0,6)T_{пл}$ . Отжиг производят в защитной восстановительной среде или в вакууме.

### 2.2.2 Формование деталей из порошков

Формование деталей из порошков представляет собой получения изделия определенной формы и размеров. Прочностные характеристики деталей зависят от метода формования. При холодных методах формования деталь имеет отно-



нительно высокую пористость и малую прочность, но достаточную для извлечения ее из полости пресс-формы, дальнейшей транспортировки и обработки. Горячие методы формования обеспечивают получение плотной (практически беспористой) детали с высокими физико-механическими свойствами.

Методы формования подразделяются на прерывистые и непрерывные и в зависимости от способа приложения давления – на с постепенным и мгновенным приложением давления. Известны методы формования, выполняемые без приложения давления (рисунок 2.3).

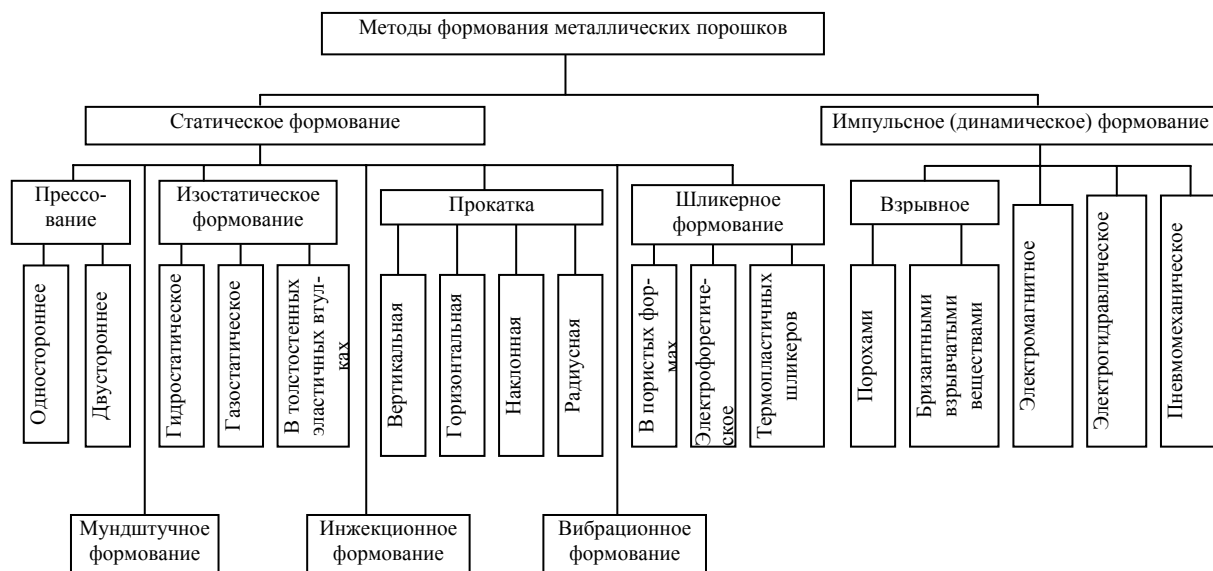
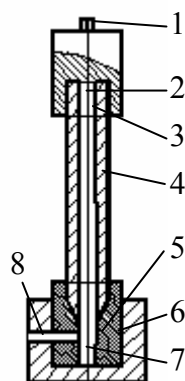


Рисунок 2.3 – Обобщенная схема классификации методов формования металлических порошков

Первая установка для взрывного формования порошка в жидкости запатентована в США в 1953 г., а ее аналог для лабораторных исследований был разработан в СССР в Белорусском республиканском научно-исследовательском производственном объединении порошковой металлургии (1976 г.). Такая машина (рисунок 2.4), рама и контейнер, которой выполнены с обмоткой из высокопрочной ленты, конструктивно напоминает современный гидростат, но вместо насосов высокого давления и мультипликаторов для сжатия жидкости в рабочей камере используют небольшой заряд пороха. При инициировании (воспламенении) заряда давление пороховых газов передается в рабочую камеру через разделительный поршень и обеспечивает уплотнение порошка, расположенного в рабочей жидкости (смесь воды и эмульсола) в эластичной герметизированной оболочке.

Максимальное импульсное давление в рабочей камере машины ГДМб-190/700 равно 600 МПа, длительность действия импульса давления обычно не превышает  $5 \cdot 10^{-2}$  с, а продолжительность рабочего цикла от 2 до 4 мин. Разработаны различные типы таких гидродинамических машин: максимальное давление формования от 500 – до 1500 МПа, наибольший диаметр рабочей камеры 500 мм, а длина 1200 мм. В таких машинах нарастание давления в рабочей камере формования связано с тремя периодами развития процесса горения пороха



1 – боек; 2 – пороховой заряд; 3 – снаряд; 4 – ствол; 5 – пуансон; 6 – матрица; 7 – уплотняемый порошок; 8 – отверстие для выхода воздуха.

Рисунок 2.4 – Схема баллистического пресса

в камере сгорания: предварительный (горение взрывчатого вещества); начало движения поршня под действием продуктов сгорания пороха при продолжающемся горении ВВ; порох сгорел, а расширение продуктов сгорания продолжается, и поршень машины все еще движется. В машине ГДМ6-190/700 скорость поршня через  $0,25 \cdot 10^{-3}$  с составляет  $\sim 5-10$  м/с, через  $0,4 \cdot 10^{-3}$  с  $\sim 25$  м/с и через  $1 \cdot 10^{-3}$  с  $\sim 50$  м/с (в этот момент давление в жидкости достигает максимума).

Характеристики и применение некоторых методов формования приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Методы формования

Формование	Краткое описание процесса	Примечание
1	2	3
Двустороннее	Помещенный в замкнутую полость стальной пресс-формы порошок уплотняется при перемещении двух подвижных пуансонов при неподвижной матрице или подвижном верхнем пуансоне при неподвижной матрице при неподвижном нижнем пуансоне	Наиболее распространенный процесс формования изделий из порошков. Детали типа дисков и пластин $1 < h < 5$ или гладких втулок при $3 < h/b_{ст} < (17-20)$
Одностороннее	Уплотнение за счет перемещения одного из пуансонов или матрицы при неподвижных пуансонах.	Детали типа дисков и пластин при $h/d = 1$ , втулок $h/b = 3$ (где $h$ – высота, $d$ – диаметр, $b$ – толщина стенок втулки)
Пакетное	Засыпку порошка чередуют с укладкой стальных шайб толщиной 2,0 - 3,5 мм	Фрикционные диски 0,4 – 1,5 мм
Гидростатическое	Уплотнение порошка в эластичной оболочке после предварительного вакуумирования происходит за счет равномерного всестороннего обжатия под действием жидкости, находящейся под давлением до 1000 МПа	Крупные заготовки типа цилиндров или труб.

Продолжение таблицы 2.3

1	2	3
Ударное	Уплотнение порошка происходит аналогично прессованию с непрерывно возрастающим давлением в закрытых пресс –формах с мгновенным приложением нагрузки от молота или быстроходного пресса	Аналогично статическому прессованию в закрытой пресс-форме.
Взрывное	Уплотнение порошка, помещенного в пластичную или эластичную оболочку, мгновенно возрастающим давлением взрывной волны.	Плиты, трубы, цилиндрические заготовки
Шликерное литье	Пульпу из порошка, жидкости (вода и спирты) и поверхностно активных веществ (алгинаты натрия и аммония) заливают в формы из керамики, гипса или специального картона, отфильтровывают жидкость, сушат осадок вместе с формой и извлекают изделие пористостью 40 -70%.	Изделия сложной формы из плохо уплотняющихся порошков.
Штамповка	Помещенный в замкнутую полость пресс-формы порошок или холоднопрессованную заготовку уплотняют при давлении до 1000 МПа и температурах выше температуры рекристаллизации основного компонента за счет деформации частиц порошка путем передвижения одного или двух пуансонов: а) нагрев порошка теплопередачей от стенок матрицы, разогретой токами высокой или промышленной частоты; б) нагрев порошка теплопередачей от стенок матрицы, разогреваемых нагревателями	Те же изделия, что и при холодном формовании
Штамповка на пресс –формах с непосредственным нагревом порошка	а) нагрев пропусканием электроэнергии через порошок посредством токопроводящих пуансонов; б) нагрев порошка токами высокой частоты	Те же изделия, что и при холодном формовании

Холодное прессование в закрытых пресс-формах является наиболее распространенным способом холодного прессования, применяющимся при изготовлении изделий из порошков черных, цветных и тугоплавких металлов. Холодное прессование в закрытой пресс-форме производят с одно- или двухсторонним приложением нагрузки.

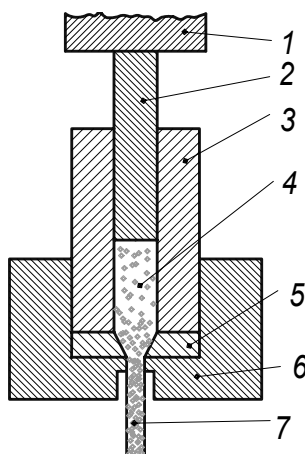
Одностороннее прессование применяют при изготовлении изделий простой формы типа втулок и колец с отношением высоты изделия к диаметру не более единицы. Недостаток этого способа в значительной неоднородности распределения плотности прессовок в направлении прессования: наибольшее ее значение наблюдается у стенки матрицы и под подвижным пуансоном, наименьшее – у стенки матрицы возле подвижного пуансона.

Двустороннее прессование, используется при изготовлении деталей с повышенным отношением высоты к диаметру, позволяет получить бо-

лее равномерное распределение плотности по сечению изделий. Наиболее распространен способ, при котором давление одновременно прикладывается к верхнему и нижнему пуансону.

*Мундштучное формование* – формование металлического порошка продавливанием через отверстие, определяющее форму и размеры поперечного сечения порошковой формовки.

Продавливать через отверстие (рисунок 2.5) можно не только порошок, но и спрессованную из него заготовку, в том числе подвергнутую предварительной термической обработке. Важной операцией является подготовка порошкового тела к выдавливанию, предусматривающая обязательное применение пластификатора, который для каждого порошка выбирают с учетом его влияния на процесс спекания и качество готового изделия. В качестве пластификатора применяют парафин, крахмал, раствор каучука в бензине, раствор бакелита в спирте, раствор поливинилового спирта в воде, декстрин и др.; его количество обычно составляет от 6 до 10 %.



1 - плунжер гидравлического пресса; 2 - пуансон; 3 - матрица; 4 - конус; 5 - мундштук; 6 - сформованная заготовка; 7 - порошок.

Рисунок 2.5 - Схема мундштучного формования

Большое значение имеет влажность пластифицированной смеси: недостаточно влажные смеси имеют большую прочность и требуют большего усилия выдавливания (оптимальное количество влаги для разных смесей составляет от 10 до 16 %). Смесь порошка с пластификатором или спрессованные заготовки при формовании подогревают. Пористость получаемых после выдавливания заготовок зачастую близка к нулю. Мундштучным формованием готовят прутки, трубы, сверла, уголки и другие большие по длине изделия с равномерной плотностью из трудно прессуемых материалов (тугоплавкие металлы и соединения, твердые сплавы, керметы на основе оксидов металлов и др.)

Получение изделий методом прокатки. Этим методом прессуют ленту малой толщины.

Существуют различные схемы прокатки: вертикальная, горизонтальная, наклонная, радиусная.

Вертикальная: (рисунок 2.6 а-в, ж), оси прокатных валков расположены в одной горизонтальной плоскости; горизонтальная: (рисунок 2.6 г, д), оси валков расположены в одной вертикальной плоскости; наклонная: (рисунок 2.6 е, и), оси валков расположены в плоскости наклоненной под углом (обычно 30-60°) к горизонту; радиусную (рисунок 2.6 з, к, л), когда порошок уплотняется между валком и кольцом. Порошок силами трения о поверхность валков, вращающихся навстречу один другому, увлекается в зазор между ними и спрессовывается в полосу (ленту, пластину и т.п.) с определенной плотностью и прочностью.

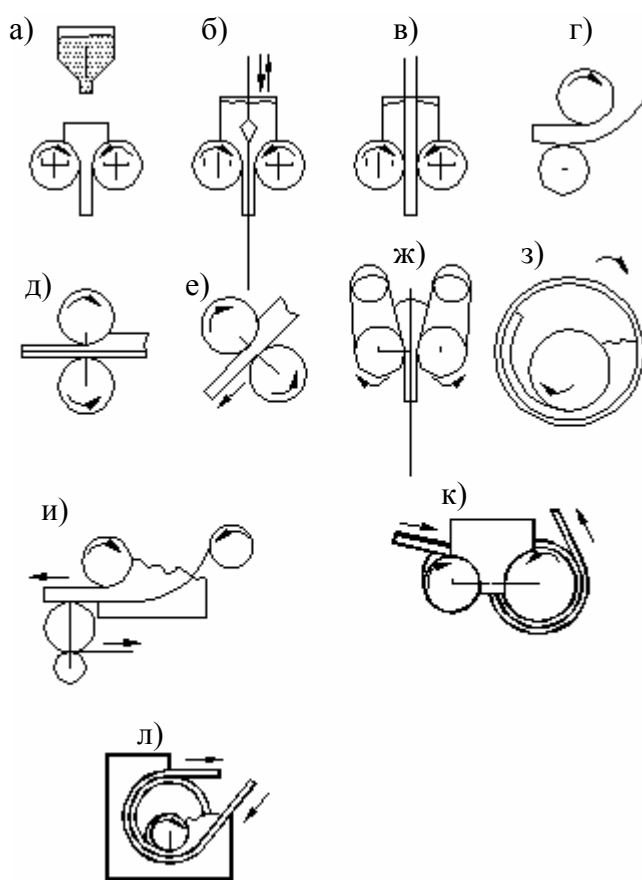
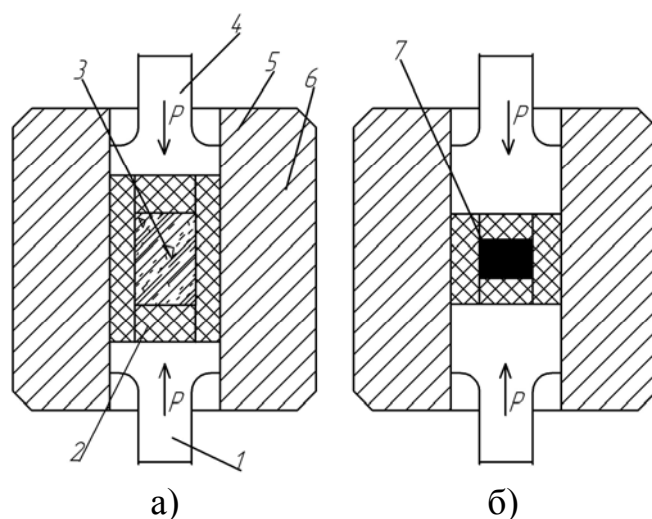


Рисунок 2.6 – Способы прокатки порошка

*Изостатическое формование* — формование металлического порошка в эластичной или деформируемой оболочке в условиях всестороннего сжатия (рисунок 2.7).



а – до прессования; б – после прессования;  
 1 – нижний пуансон; 2 – резиновая пробка; 3 – порошок; 4 – верхний пуансон; 5 – матрица; 6 – эластичная втулка; 7 – спрессованный брикет.

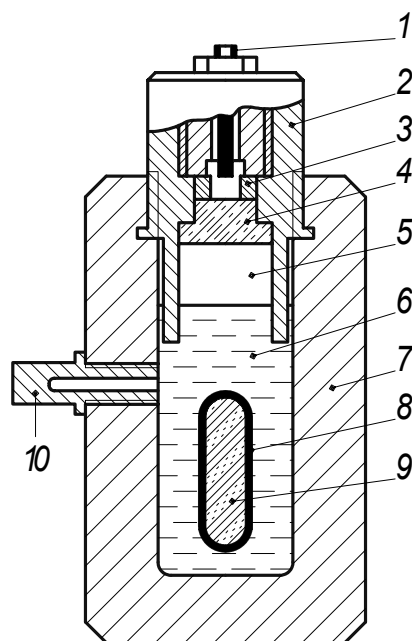
Рисунок 2.7 – Двустороннее прессование в эластичной втулке

Изостатическое формование позволяет получать из порошка крупногабаритные заготовки (порошковые формовки), в том числе с большим отношением длины к диаметру (ширине) и тонкими стенками, обладающие равномерной объемной плотностью.

Первое сообщение о таком формовании появилось в 1913 г. (патент США 1081618, выданный Мэддену), а 1-я Международная конференция по изостатическому формованию была проведена в Англии (г. Лафборо) в сентябре 1978 г.; к концу 80-х годов XX в. насчитывалось порядка 100 патентов и несколько тысяч публикаций по различным аспектам уплотнения порошков в условиях всестороннего сжатия.

В настоящее время выделяют три базовые разновидности изостатического формования: гидростатическое, газостатическое и в толстостенных эластичных оболочках (втулках).

*Метод гидродинамического формования* успешно используют для изготовления с равномерной объемной плотностью крупногабаритных фильтров из порошков титана и нержавеющей стали, заготовок из вольфрама и молибдена, изделий сложной формы из порошков ферритов, тиглей и погружаемых сталеразливочных стаканов (рисунок 2.8).



1 - ударный механизм; 2 -боек; 3 -капсоль-жевелю; 4 - порошок; 5 - поршень; 6 - жидкость; 7 - корпус; 8 - оболочка; 9 - порошок; 10 – манометр

Рисунок 2.8 – Схема установки для гидродинамического формования

Холодное формование не обеспечивает механической прочности прессовок. Для придания порошковым изделиям необходимых свойств их подвергают спеканию.

### 2.2.3 Спекание

Спекание порошковых изделий – это термическая обработка, состоящая в нагреве и выдержке при  $T = (0,7- 0,9)T_{пл}$  основного компонента спекаемой композиции.

Спекание можно выполнять в любых печах, обеспечивающих необходимую температуру и атмосферу спекания.

При крупносерийном и массовом производстве порошковых изделий применяют специализированные печи непрерывного действия, обеспечивающие создание необходимой атмосферы спекания и высокую производительность.

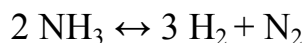
Спекание выполняют в различных средах: в защитной атмосфере, в вакууме или в закрытом контейнере.

Наиболее широкое применение в качестве защитных атмосфер получили водород, диссоциированный аммиак, конвертируемый природный газ или пропан – бутановая смесь, эндогаз.

Водород получают электролизом воды специальными электролизами или применяют привозной водород в баллонах под давлением 15 МПа. Водород является хорошим восстановителем, обеспечивающим высокое качество спекания. Однако высокая стоимость водорода, и его взрывоопасность в смеси с воз-

духом существенно ограничивают его применение на предприятиях порошковой металлургии.

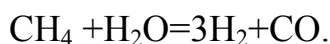
Диссоциированный аммиак является хорошим заменителем водорода. Аммиак из баллона подается в установку для диссоциации, где при температуре от 600 °С до 650 °С разлагается по реакции:



В печи спекания создается азото-водородная атмосфера. Высокое содержание водорода в атмосфере делают ее легковоспламеняющейся и взрывоопасной в смеси с воздухом.

Конвертированный природный газ в 8-10 раз дешевле водорода, широко применяется при производстве порошковых изделий на предприятиях порошковой металлургии.

Процесс конверсии заключается во взаимодействии метана с водяным паром при температуре от 900 до 1100 °С в присутствии катализатора по реакции:



Поступающие в печь спекания газы предварительно очищаются от примесей и осушаются.

Спекание в вакууме способствует удалению адсорбированных газов, предохраняет материал от взаимодействия с кислородом, создает условия для восстановления оксидов. Спекание в вакууме не обеспечивает высокой производительности.

При небольших объемах производства изделие спекают в закрытых контейнерах с затвором, обеспечивающим герметичность (расплавленное стекло, огнеупорная глина). В контейнер помещают вещества, создающие защитную атмосферу (древесный уголь, парафин и т.д.).

Для порошковых материалов на основе железа, как правило, температура спекания варьируется в пределах от 1100 °С до 1250 °С. Спекание при более низких температурах в обычном случае не обеспечивает формирования структуры и свойств порошкового материала. Вместе с тем, понижение температуры спекания, без снижения свойств является одним из методов, позволяющих повысить эффективность производства порошковых материалов.

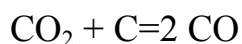
В Оренбургском государственном университете проведены исследования процесса спекания материалов на основе железа с добавками графита и карбонатов натрия и кальция (таблица 2.4).



Таблица 2.4– Свойства порошковой стали в зависимости от температуры спекания и содержания активирующих добавок

Со- став	Содержание компонентов, %	Температура спекания, °С	Предел прочности, $\sigma_B$ , МПа	Относительное изменение прочности	Твер- дость, HV
1	Железо + гра- фит 1%	950	16,9	0,52	58
		1050	29,4	0,90	65
		1100	32,6	1,00	83
2	Железо + гра- фит 1 % + 0,2 % $\text{Na}_2\text{CO}_3$	950	27,1	0,83	64
		1050	30,1	0,94	80
		1100	31,1	0,97	83
3	Железо + гра- фит 1 % +0,3 % $\text{Na}_2\text{CO}_3$	950	27,2	0,83	68
		1050	33,8	0,97	80
		1100	31,7	0,93	83
4	Железо + гра- фит 1 % + 0,4 % $\text{Na}_2\text{CO}_3$	950	30,5	0,93	74
		1050	31,3	0,96	87
		1100	33,0	1,01	89
5	Железо + гра- фит 1 % + 0,1 % $\text{CaCO}_3$	950	21,3	0,65	65
		1050	30,1	0,92	70
		1100	31,5	0,96	84
6	Железо + гра- фит 1 % + 0,2 % $\text{CaCO}_3$	950	32,1	0,98	78
		1050	34,2	1,05	87
		1100	34,4	1,05	90
7	Железо + гра- фит 1 % + 0,3 % $\text{CaCO}_3$	950	31,5	0,96	95
		1050	34,6	1,06	102
		1100	36,0	1,1	105
8	Железо + гра- фит 1 % + 0,4 % $\text{CaCO}_3$	950	31,2	0,95	89
		1050	34,3	1,06	89
		1100	35,0	1,07	98

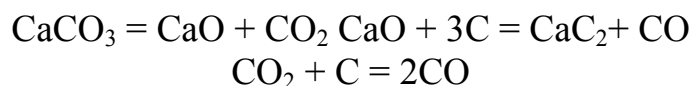
Введение карбоната кальция оказывает каталитическое воздействие на протекание реакции Будуара:



При этом протекают реакции:



Одновременно происходит разложение карбоната:



Таким образом, состав шихты, содержащей карбонат кальция, обеспечивает активирование процесса спекания, позволяет снизить температуру спекания и повысить прочность материала. Подобное влияние оказывает и карбонат натрия.

Снижение температуры спекания ведет к уменьшению энергозатрат, выполнение спекания становится возможным в печах, имеющих меньшую рабочую температуру.

Исследованы образцы сталей пористостью 25 %, 20 % и 15 % с подшихтовкой карандашного графита в количестве 0,75 %; 1,25 %; 1,75 %; 2,0 %. Спекание проводили при температуре 1120 °С и выдержке 2 ч в проходных печах БЗПМ. Свойства материалов после спекания (по данным Оренбургского политехнического института) приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 - Свойства железуграфитных материалов

Шихта	Пористость, %	Содержание углерода $C_{\text{связ}}$ , %	Предел прочности при срезе, $\sigma_{\text{ср}}$ , МПа	Твердость НВ, МПа
ЖГр 0,75	25	0,43	304	700
ЖГр 0,75	20	0,45	336	830
ЖГр 0,75	15	0,42	378	1330
ЖГр 1,25	25	0,79	376	780
ЖГр 1,25	15	0,72*	495	1380
ЖГр 1,25	25	0,15	312	830
ЖГр 1,75	20	1,22	392	1290
ЖГр 1,75	15	1,31 **	423	1420
ЖГр 1,75	25	1,35	350	870
ЖГр 2	20	1,40	361	1300
ЖГр 2	15	1,42	380	1590
*Содержание свободного углерода 0, 2 %.				
**То же, 0,24 %.				

Увеличение степени деформации в микрообъемах обеспечивается процессами межфазного наклепа при формировании перлитной структуры. С увеличением содержания углерода, т.е. количества перлитной фазы, в структуре порошковых материалов растет степень деформации, и соответственно растут микронапряжения. Анализ фазового состава материалов показал, что при различной их пористости в состав шихты необходимо вводить разное количество углерода, и чем больше, тем выше пористость. Это способствует заторможенности в релаксации микронапряжений и уменьшению времени отжига линейных дефектов (таблица 2.6).

Таблица 2.6 – Фазовый состав и характеристики тонкой структуры железистографитовых порошковых материалов

Пористость, %	Количество углерода в шихте	Фазовый состав	Интенсивность линии (022)	Микронапряжения $(\Delta\alpha/\alpha) \cdot 10^3$	Величина блоков мозаики $D \cdot 10^3$ , мкм	Средняя плотность дислокаций $\rho \cdot 10^2$ , мкм <sup>2</sup>
20	0,75	$\alpha$ -Fe; Fe <sub>3</sub> C	Оч. сл.	0,60	1,23	1,68
	1,25	$\alpha$ -Fe; Fe <sub>3</sub> C	Сл.	0,74	1,29	1,8
	1,75	$\alpha$ -Fe; Fe <sub>3</sub> C	Сл	0,83	1,18	2,2
	2,0	$\alpha$ -Fe; Fe <sub>3</sub> C	Ср.	0,88	1,12	2,37
15	0,75	$\alpha$ -Fe; Fe <sub>3</sub> C	Оч. сл.	0,38	1,72	0,98
	1,25	$\alpha$ -Fe; Fe <sub>3</sub> C	Сл.	0,46	1,61	1,16
	1,75	$\alpha$ -Fe; Fe <sub>3</sub> C	Сл	0,51	1,42	1,48
	2,0	$\alpha$ -Fe; Fe <sub>3</sub> C	Ср.	0,63	1,26	1,89

Величина мозаичных блоков и концентрация линейных дефектов в малоугловых границах слабо зависят от содержания углерода, что связано с особенностями его диффузии, которая носит преимущественно зернограничный характер, а диффузия по малоугловым границам не получает значительного развития. Это находит отражение в росте полной плотности дислокаций, в малоугловых границах оно уменьшается.

Степень растворения углерода повышается с увеличением как его концентрации, так температуры и времени спекания. Это находит отражение в изменении параметра элементарной ячейки аустенита по данным высокотемпературных рентгеновских исследований, а также в уменьшении интегральной интенсивности малоугловых дифракционных отражений, характеризующих степень статических искажений кристаллической решетки аустенита. Миграция атомов углерода проходит по межзеренным границам, с образованием цементита в районе этих границ, что вызывает деформацию матрицы.

Исследование кинетики спекания чистого железного порошка и железистографита, с позиций структурных и субструктурных изменений, отражает большое разнообразие и сложность протекающих тесно взаимосвязанных структурных процессов, что оказывает большое влияние на формирование структуры порошковых материалов и соответственно на их свойства.

Процессы структурообразования зависят от температуры и длительности спекания. В связи с этим целесообразно рассмотреть вопрос о влиянии материалов с учетом последующей термической обработки. Для проведения работ были изготовлены стандартные образцы на растяжение из материала ЖГр0,8 с пористостью 10, 15, 20 %.

Спекание в течение 1 ч уменьшает области феррита, увеличивает перлитные поля. Твердость перлита повышается до 2100 МПа. Спекание в течении 2 ч приводит к образованию перлита (до 70 % площади шлифа) и уменьшает поля феррита. Увеличение продолжительности спекания до 20 ч вызывает сильный рост зерна аустенита. При охлаждении получают феррит и перлит с крупным зерном и выделениями цементита по границам зерен. Металлографический анализ микроструктур образцов подтверждает результаты механических испытаний. Особенно заметен рост прочности и твердости в интервале времени от 1 до 2 час.

#### 2.2.4 Дополнительные технологические операции

Многие требования, предъявляемые к порошковым деталям, могут быть выполнены только после их дополнительной обработки. Многие порошковые детали после спекания подвергаются термической и химико-термической обработке, калиброванию, пропитке, обработке резанием и т.д.

Термическая обработка порошковых материалов является эффективным методом повышения физико – механических свойств и износостойкости. Практика показывает, что свыше 50 % изделий конструкционного назначения, изготавливаемых методом порошковой металлургии, должны подвергаться тем или иным видам термической или химико-технологической обработки из-за повышенных требований к физико – механическим свойствам этих материалов.

Для повышения механических свойств порошковых материалов применяют закалку с отпуском, цементацию, азотирование.

Возможность термического упрочнения порошковых материалов основана на том, что в каждой частичке порошка при нагреве и охлаждении совершаются такие же превращения, как в больших объемах литого или ковального металла.

Однако порошковые материалы имеют резкое отличие от литых и кованых по термодинамическому состоянию и структурному строению (наличие пор, межчастичных границ, повышенная дефектность кристаллического строения).

Порошковые детали, имея большую активную поверхность, при нагревании склонны к обезуглероживанию и окислению; в связи с этим при их обработке необходимо применять скоростной нагрев, либо нагрев в защитных средах.

Порошковые материалы имеют невысокую теплопроводность, поэтому скорости их нагрева и охлаждения значительно отличаются от соответствующих кованых и литых сталей. Поры в порошковых материалах являются концентраторами напряжений, что при резком охлаждении может способствовать короблению и появлению трещин. Закалка порошковых сталей, выполненная с учетом их структурных особенностей, позволяет повышать прочностные характеристики в 1,5-2 раза.

Основными факторами, определяющими особенности структурных превращений порошковых сталей при термической обработке, являются остаточ-

ная пористость, неомогенность твердого раствора, наличие неметаллических включений. Наличие пор, заполненных газом, снижает теплопроводность и ухудшает прокаливаемость по сравнению с компактными материалами. Так, с увеличением пористости и величины сечения, сокращается протяженность закаленной зоны, которая постепенно переходит в трооститную и даже сорбитную. С повышением пористости прокаливаемость сталей значительно снижается. Поэтому для пористых деталей рекомендуется закалка с резким охлаждением в струе воды или с энергичным перемещением деталей для быстрого срыва паровой рубашки, затрудняющей охлаждение. При выборе нагревающих и охлаждающих жидких сред необходимо учитывать трудности, связанные с полным удалением солей, влаги и масла из пор порошковых деталей. Поэтому в качестве охлаждающих сред при закалке необходимо использовать жидкости, не представляющие опасности с точки зрения коррозии и в процессе хранения изделий после закалки.

В Оренбургском политехническом институте проводились исследования процессов термического упрочнения порошковых сталей.

Проведение термической обработки обеспечит возможность повышения физико-механических свойств при снижении легирующих добавок в твердом растворе.

Пористость, количество углерода и легирующих в материалах оказывают значительное влияние на прочностные свойства деталей и изделий. Поэтому были проведены исследования материалов в интервале пористости от 15 до 28 %, полученных однократным прессованием при 500 МПа; 750 МПа и двойным прессованием с промежуточным отжигом по режимам БЗПМ при 750 МПа для первого прессования и 950 МПа прессования и последующим спеканием всех материалов в соответствии с режимами для заданных материалов в условиях БЗПМ.

Исследования велись с использованием методов математического планирования эксперимента.

Одновременно с этим была сделана попытка определения оптимального количества легирующих компонентов в материалах, предназначенных для термического упрочнения, и сокращения неоправданно большого числа марок спеченных сталей, применяемых в промышленности.

Основываясь на опыте термической обработки углеродистых сталей с соответствующим содержанием углерода и литературных данных по термической обработке спеченных материалов, за основной уровень была принята закалка от температуры 800 – 850 °С и интервал варьирования 50 – 100°С.

Охлаждение при закалке проводилось в масло, в воду, в раствор поваренной соли в воде, то есть с различной скоростью в области перлитных превращений. После закалки проводили отпуск для улучшения структуры, снятия внутренних напряжений и ударной вязкости. При этом за основной уровень при отпуске принимали температуры 200–350 °С с интервалом варьирования от 50 до 150 °С. Наличие легирующих элементов в материалах БЗПМ (С, Cu, Ni, Cr) поставило перед нами задачу исследования их влияния на физико-механические свойства при термической обработке. В связи с этим учитывали

опыт работы ряда исследователей, опыт завода по изготовлению материалов. В первом приближении за основной уровень взяли материалы с содержанием легирующих в соответствии с ТУ БЗПМ.

Как указывалось ранее, были изготовлены стандартные образцы на растяжение и ударную вязкость. Исследование режимов термической обработки образцов и деталей было проведено в лабораториях ОрПТИ и на Оренбургском инструментальном заводе. Ниже приведены результаты этих опытов.

На первом этапе исследования проводили для материала ЖГр1Д2,5Н2 с пористостью 20 %, полученного однократным прессованием при давлении 7,5 т/см<sup>2</sup> и последующем спеканием в соответствии с режимами (образцы спекали с деталями данного состава) (таблица 2.7).

Для получения большей информации при многофакторных исследованиях при планировании исследований режимов термообработки были использованы дробные реплики от полных факторных экспериментов.

Для материала ЖГр1Д2,5Н2 (пористость 20 %) была взята полуреплика 2<sup>4-1</sup> с генерирующим соотношением  $X_4 = X_1 X_2$  и определяющим контрастом  $1 = X_1 X_2 X_4$ .

Испытания провели на предел прочности при растяжении, предел прочности на срез, твердость НВ, относительное удлинение. Основные уровни и интервалы варьирования указаны в матрице.

С учетом доверительных интервалов получили уравнения регрессии:

$$Y_1 (\sigma_B) = 40,8 + 4,77 X_1 - 2,8 X_3 - 3,35 X_1 X_3 - 4,45 X_2 X_3$$

$$Y_2 (\tau_{cp}) = 40,0 + 5,5 X_1 - 1,93 X_2 X_3$$

$$Y_3 (HB) = 208 + 34,1 X_1 - 20,4 X_4 + 210 X_1 X_2 X_3$$

$$Y_4 (\epsilon) = 0,82 - 0,17 X_1 - 0,19 X_2$$

Проверку адекватности полученных уравнений проводили по критерию Фишера. Полученные уравнения адекватны.

Наилучшее сочетание прочностных свойств и твердости достигнуто в опыте № 2 ( $\sigma_B = 538$  МПа и 256 НВ) и в опыте № 6 ( $\sigma_B = 422$  МПа и 269 НВ).

В продолжение работы были проведены исследования при различном содержании легирующих (Cu, Ni) в составе материала. Из-за большого количества экспериментального материала матрицы не приводятся.

Лучшие результаты приведены в таблице 2.8.

Таблица 2.7 – Условия и результаты опытов для материала ЖГр1Д2,5Н2 (П≈20%)

Факторы	Темпера- тура за- калки, °С	Скорость охлажде- ния, град/с	Темпера- тура от- пуска, °С	Крат- ность отпуска, °С	Действие			Предел проч- ности на рас- тяже- ние, $\sigma_b$ МПа	Предел проч- ности на срез, $\tau_{cp}$ МПа	Твер- дость, НВ	Отно- си- тельное удлине- ние, $\epsilon$ , %	
	Основной уровень (0)	800	400	300								2
	Предел варьирова- ния (I)	50	200	150								1
	Верхний уровень (+)	850	600	450								3
	Нижний уровень (-)	750	200	150								1
Код	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4 = X_1$ $X_2$	$X_1 X_3$	$X_2 X_3$	$X_1 X_2 X_3$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	
Опыт № 1	+	+	+	+	+	+	+	348	452	244	0,49	
Опыт № 2	+	-	+	-	+	-	-	538	438	256	0,92	
Опыт № 3	-	+	+	-	-	+	-	379	344	158	0,69	
Опыт № 4	-	-	+	+	-	-	+	450	364	173	1,11	
Опыт № 5	+	+	-	+	-	-	-	515	515	201	0,47	
Опыт № 6	+	-	-	-	-	+	+	422	416	269	0,74	
Опыт № 7	-	+	-	-	+	-	+	307	362	232	0,90	
Опыт № 8	-	-	-	+	+	+	-	305	312	134	1,27	

Таблица 2.8 – Свойства материалов с учетом термической обработки при пористости 20 %

Марка материала	Предел прочности при растяжении, $\sigma_B$ , МПа	Предел прочности на срез, $\tau_{ср}$ , МПа	Твердость, НВ	Относительное удлинение, $\epsilon$ , %
ЖГрО,75Д1,5Н1	48,8	38,4	339	0,34
ЖГр1,25Д1,5Н1	62,0	47,3	230	0,76
ЖГрО,75Д3,5Н3	43,8	26,0	279	0,48
ЖГр1Д2,5Н2	53,8	43,8	256	0,92
ЖГр1Д2,5Н3	39,5	35,6	346	0,92

Как видно из таблицы 2.8, с увеличением содержания никеля и меди свойства материалов по прочности и твердости уменьшаются. Максимальные свойства по прочности и твердости достигаются для материала ЖГр1,25Д1,5Н1 при меньшем содержании легирующих элементов. Можно рекомендовать этот состав взамен материалов ЖГр1,5Д2,5Н3 и ЖГр1Д2,5Н3.

На кафедре МТМ Оренбургского политехнического института проводились работы по спеканию порошковых заготовок типа поршневых колец, так и термической обработке с использованием токов высокой частоты.

В 1970 – 1980-х группой под руководством к.т.н. доцента Домогацкого В.И. проводились работы по изготовлению для магистральных тепловозов поршневых колец с размерами: наружный диаметр 207,7 мм, внутренний диаметр 197,7 мм, высота 8 мм, величина замка 16 – 28 мм; и для маневровых тепловозов: наружный диаметр 145 мм, внутренний диаметр 135 мм, высота 4 – 5 мм, величина замка 13 – 15 мм из порошковых заготовок с использованием токов высокой частоты.

Нагрев порошковых колец проводился на установке ИЗ 2,4/100. Во всех опытах поддерживалось одно и то же значение тока в индукторе. Проверялась кинетика нагрева двух заготовок, прессовка с удельным сопротивлением 70 мкОм·м и относительной магнитной проницаемостью 27 и спеченное разорванное кольцо с  $\rho = 0,7$  мкОм·м.

На жидкостной модели при более частом изменении движения воды на концентраторах вихрей возникает больше и они мощнее, возвращаясь к оригиналу, этим объясняется большее тепловое воздействие большей частоты. Если вихревые токи невозможно непосредственно измерить, то контурный ток возможно измерить, в опыте с разорванными кольцами, вставив в разрыв амперметр (рисунок 2.9).



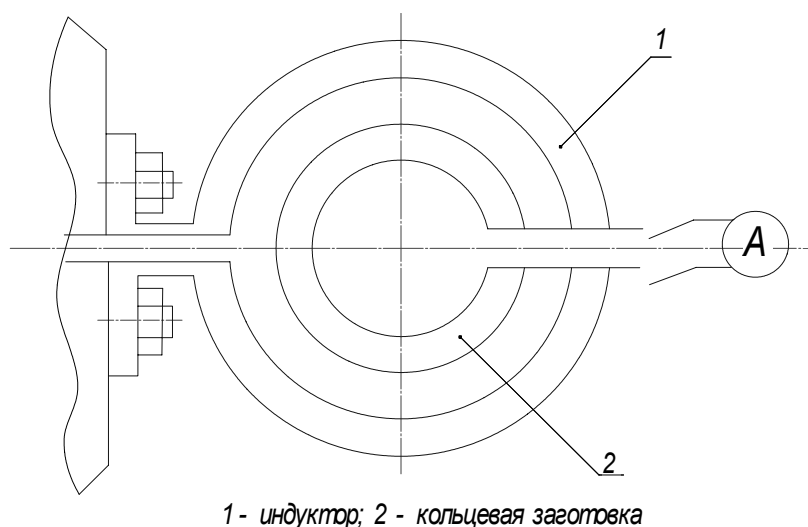


Рисунок 2.9 – Схема нагрева детали индуктивными токами

На (рисунке 2.10) даны графики изменения контурного тока в процессе индукционного нагрева, для сравнения на этом графике приведена кривая изменения удельного электрического сопротивления.

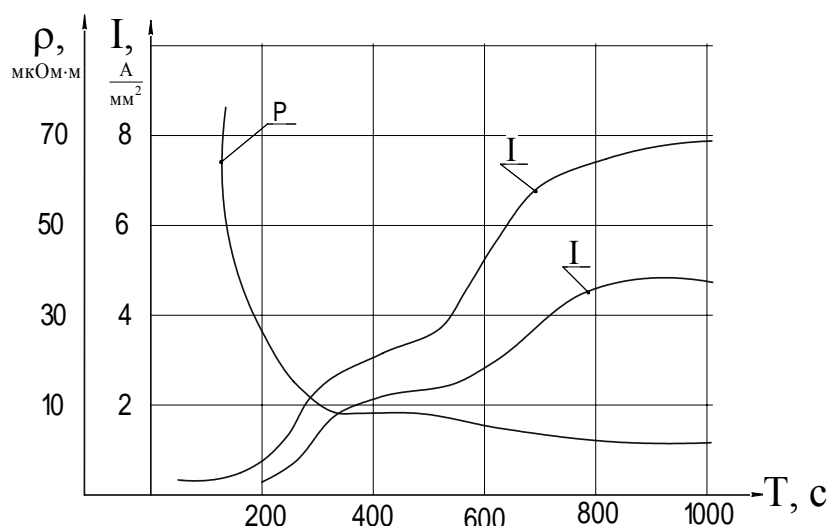


Рисунок 2.10 – Изменение контурных токов и удельного электрического сопротивления в процессе индукционного нагрева

В процессе разработок материала порошковых колец для дизеля Д 100 и выявления влияния легирующих элементов на механические свойства материала исследовались свойства различных композиций.

Анализ средних значений твердости спеченных на автоматической линии заготовок поршневых колец показал, что минимальное значение твердости 71,0 HRB, максимальное – 79,5 HRB (таблица 2.9). Твердость поршневых заготовок из материала ЖГр1,303Н2Х определялась в четырех точках с обеих сторон.

Наиболее широкие исследования механических свойств были проведены для материалов поршневого кольца дизеля Д100, предполагаемых взамен серого и высокопрочного чугунов. Сравнительные свойства приведены в таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Механические свойства порошковых и чугунных поршневых колец.

Материал кольца	Твердость HRB	Упругость $E \cdot 10^{-3}$ МПа	Остаточная деформация, %	Предел прочности при изгибе
ЖГр1,3ДЗНХ	78	7,2	5	680
ЖГр1,503НХ	82	9	3,9	880
ЖГр1,703Н2Х	90	8,3	3,3	1020
ЖГр1,303Н2М	78	7,1	4,6	850
Серый чугун	81	6,6	7,7	800
Высокопрочный чугун	106	10,7	4,1	1150

Автоматическая установка спекания хорошо согласуется с работой прессов холодного прессования и горячего доуплотнения (рисунок 2.11).

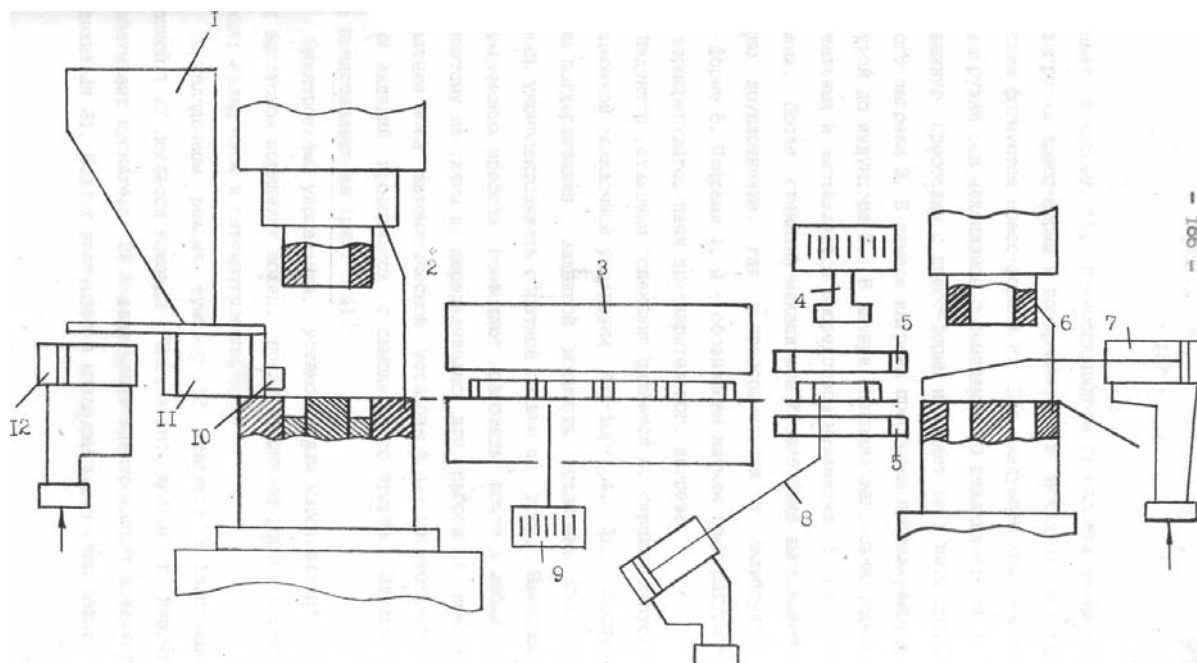


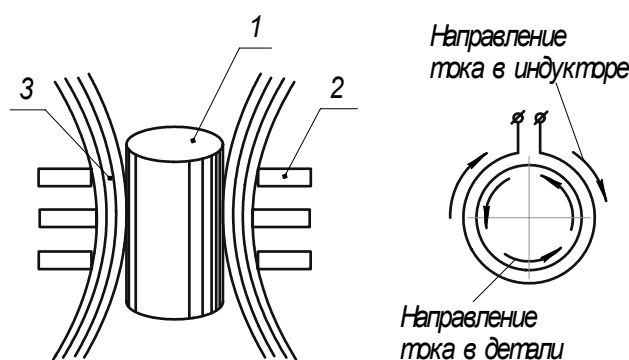
Рисунок 2.11 - Схема установки для изготовления порошковых изделий

Установка работает следующим образом. Порошок из бункера 1 поступает в кассету 11, пневмоцилиндром 12 кассета передается в зону загрузки пресс – формы и возвращается в исходное положение. Заготовки формируются пресс – формой 2. При следующем ходе кассеты в зону загрузки она механизмом перемещения 10 сталкивает ранее отформованную прессовку с пресс – формы и

подает ее в печь предварительного нагрева 3. В камере нагрева прессовки проталкиваются одна другой до индуктора 5. В камере спекания заготовка отделяется от остальных и выставляется посредством механизма 8 на позицию доуплотнения, где допрессовывается и калибруется в пресс – форме 6. Цифрами 4, 9 – обозначены датчик температуры кольца и терморегулятор печи предварительного нагрева.

Индуктор установки спекания питается от серийно выпускаемой индукционной закалочной установки ИЗ1 – 100/2,4. Для обеспечения режима поддержания заданной мощности установку ИЗ1-100/2,4 пришлось укомплектовывать обратной связью по току.

Нагрев токами высокой частоты (т.в.ч.) осуществляется за счет теплового действия тока, индуктируемого в детали, которую помещают в переменное магнитное поле (рисунок 2.12).



1- деталь; 2 – индуктор; 3 – силовые линии

Рисунок 2.12 - Схема нагрева токами высокой частоты

Для нагрева деталь 1 помещают в индуктор 2, представляющий собой один или несколько витков медной трубки или шины. При протекании по индуктору 2 электрического тока высокой частоты создается переменное магнитное поле, силовые линии 3 которого пронизывают установленную в индуктор деталь 1. В результате в поверхностном слое детали возникают индуктируемые токи, вызывающие нагрев этого слоя до высоких температур.

Плотность индуктированного переменного тока по сечению изделия неодинакова. В основном токи высокой частоты протекают в поверхностном слое. Это явление называется поверхностным эффектом.

Использование установок ТВЧ для спекания и термообработки может быть применено и в мелкосерийном производстве.

Порошковые детали, предназначенные для работы в качестве подшипников в узлах трения, подвергают пропитке машинным маслом, которое служит смазкой в процессе их эксплуатации. Пропитку обычно проводят погружением деталей в нагретое масло при температуре от 0 до 120 °С и выдержке от 0,5 до 2 часов с охлаждением в холодном масле. Хорошие результаты дает пропитка деталей в вакууме, что повышает содержание масла в изделиях на 25-27 %.

Калибрование заключается в обжати спеченной детали с целью получения требуемых размеров и качества поверхности. Оно обеспечивает получение изделий с размерами 7-8 квалитета точности, Ra от 0,063 до 0,032. Калибрование способствует улучшению механических свойств деталей в поверхностном слое.

### **2.3 Конструкционные материалы на железной основе**

Конструкционные материалы на железной основе, используемые для замены литых и кованных сталей и изготовленные методом порошковой металлургии, называют порошковыми сталями.

Сталью называется сплав железа с углеродом. В зависимости от химического состава стали подразделяются на простые углеродистые и легированные.

В углеродистых сталях помимо углерода, содержание которого колеблется от 0,08 до 1,7 %, могут находиться элементы, наличие которых обусловлено либо особенностями технологического процесса (марганца до 0,7 %, кремния до 0,5 %), либо невозможностью их полного удаления из металла (серы до 0,04 %, фосфора до 0,05 %, кислорода, азота, водорода). Кроме того, в углеродистой стали могут встречаться случайные примеси (хром, никель, медь и др.).

Легированной сталью называется сталь, в которую для получения требуемых свойств вводятся специальные легированные элементы.

В зависимости от назначения порошковые стали делятся на конструкционные общего машино- и приборостроительного назначения, высокопрочные, нержавеющие, инструментальные, а также специальные.

По равновесной структуре порошковые стали классифицируются на доэвтектоидные, имеющие в структуре избыточный феррит; эвтектоидные с перлитной структурой; заэвтектоидные, содержащие в перлитной структуре избыточные (вторичные) карбиды и ледебуритные, имеющие в структуре первичные карбиды, которые выделились из жидкой фазы, например, при распылении.

Кроме приведенной классификации, порошковые стали необходимо разделять по пористости и технологии их производства. В зависимости от объемного содержания пор порошковые стали подразделяются на непроницаемые (пор менее 5-8 %), полупроницаемые (пор 8-14 %) и проницаемые (пор более 12-14 %).

Для обозначения конструкционных порошковых сталей принята следующая маркировка. Первый буквенный индекс характеризует класс материала: С – сталь, а второй П – что сталь получена методом порошковой металлургии. Первый числовой индекс после буквы П означает среднее содержание углерода в сотых долях процента (свободный углерод не должен превышать 0,2 %). Следующие за первым числом буквы обозначают следующие легирующие элементы: А – азот, Б – ниобий, В – вольфрам, Г – марганец, Д – медь, К – кобальт, М – молибден, Н – никель, П – фосфор, С – кремний, Т – титан, Ф – ванадий, Х – хром, Ц – цирконий. Цифры после символов элементов означают их среднее содержание в процентах.

Применение в качестве исходного материала одного железного порошка при изготовлении конструкционных деталей ограничено в связи с его низкими механическими свойствами. В основном он применяется для изготовления ненагруженных деталей, различных уплотнительных изделий и т. п. Свойства таких изделий зависят от их плотности, величины и характера контакта между исходными частицами порошка, которые определяются методом изготовления порошка, гранулометрическим составом, удельной поверхностью частиц, внутренней их рыхлостью, а также технологией прессования изделий – величиной и скоростью прессования, кратностью и температурой прессования, температурой и временем спекания.

В связи со сравнительно низкими твердостью и прочностью железа основная его масса используется в виде сплавов с углеродом, под действием которого железо приобретает способность закаливаться и во много раз повышать свою твердость и прочность.

Углеродистые порошковые стали и стальные изделия могут быть получены путем непосредственного введения в железный порошок углерода в виде графита, сажи или чугуна порошка, а также посредством науглероживания деталей в процессе спекания или их цементации после спекания. Наиболее распространенным является метод введения в порошковую смесь графита. Однако (как было показано выше) из-за неравномерного распределения графита по объему смеси стали, полученные на основе механических смесей, отличаются неравномерным распределением углерода в аустените, а в спеченном состоянии – непостоянством соотношения структурных составляющих. Наиболее насыщенные углеродом микрообъемы аустенита располагаются вблизи графитных включений, что способствует появлению в структуре спеченной стали свободного избыточного цементита и феррита в соотношениях, не соответствующих диаграмме состояния железо – углерод.

Несмотря на сравнительно высокие прочностные свойства углеродистых порошковых сталей, изделия из них отличаются нестабильностью свойств из-за высокой чувствительности процесса формирования структуры и свойств сталей при спекании к воздействию внешних технологических факторов, что является большим недостатком в условиях массового производства.

Установлено, что предельное суммарное содержание легирующих компонентов в порошковых конструкционных сталях не должно превышать 6-8 % (по массе). Дальнейшее увеличение этих компонентов, хотя и повышает прочность на разрыв, но из-за увеличения гетерогенности структуры резко снижает пластичность и ударную вязкость.

В качестве легирующих элементов применяют никель, медь, хром, молибден и др.

Для изготовления ответственных конструкционных деталей применяются сложнолегированные порошковые детали.

В таблице 2.10 приведены свойства наиболее широко применяемых порошковых сталей.

Таблица 2.10 – Свойства спеченных и термически обработанных порошковых сталей

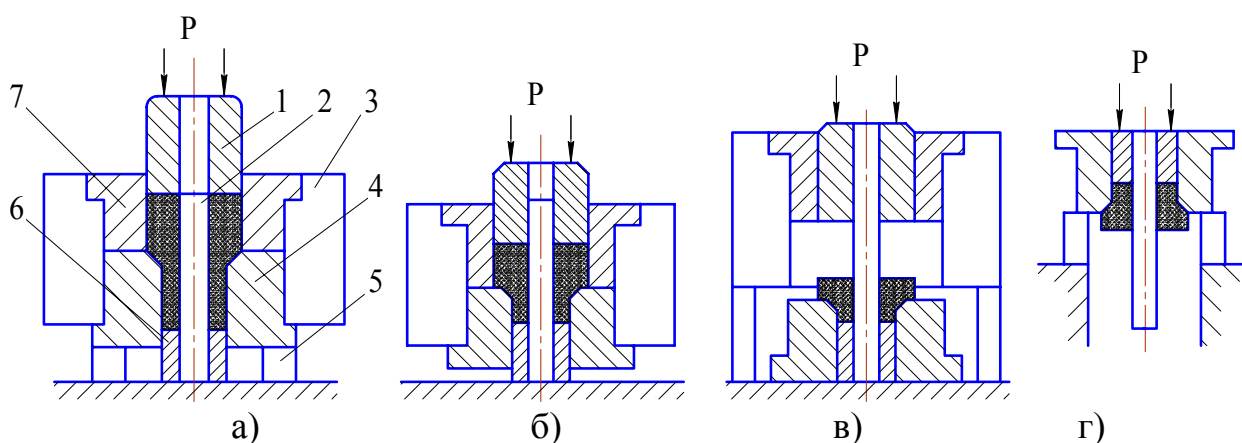
Марка материала	Пористость, %	Содержание углерода, %	Температура нагрева под закалку, К	Охлаждающая среда	Температура отпуска, К	Предел прочности при растяжении, МПа	Увеличение предела прочности при растяжении с т. о.	Твердость, НВ	Увеличение твердости с учетом т.о.
СП100	22	0,75 <sup>1)</sup>	1023	вода	423	122/235 <sup>2)</sup>	1,92	58/170	2,94
СП100	13	0,76	1123	вода	423	291/590	1,72	77/316	4,10
СП150Д2,5	15	0,68	1123	вода	423	304/450	1,48	98/344	3,51
СП150Д2,5	15	0,67	1123	масло	723	283/570	1,49	120/194	1,61
СП150Д2,5	15	1,28	1073	вода	573	268/400	1,49	95/291	3,06
СП100Д2,5НЗ	12	0,92	1073	вода	573	400/740	1,85	140/306	2,18
СП100Н0,4Х0,6	18	0,76	1093	вода	573	205/470	2,23	98/380	3,88
СП100Н0,4М0,6	18	0,85	1073	вода	623	270/410	1,50	97,5/382	3,92
<p><sup>1)</sup> Количество свободного углерода в материалах составляет от 0,1 % до 0,25 %.</p> <p><sup>2)</sup> Числитель – свойства спеченных материалов, знаменатель - свойства термообработанных.</p>									

Порошковые детали из легированных сталей могут быть изготовлены прессованием и спеканием легированных порошков и гранул, смесей порошков железа с порошками легирующих элементов, а также пропиткой жидкими металлами пористых спеченных заготовок и диффузионным насыщением при высоких температурах.

#### *Технология изготовления шестерен из спеченных материалов*

Метод порошковой металлургии позволяет получить шестерни с одновременным чистовым формованием зуба и ступичной части, ликвидировать потери металла в стружку, уменьшить трудоемкость и повысить степень механизации и автоматизации производства. В Оренбургском государственном университете проводятся исследования по разработке технологии изготовления шестерен из спеченных материалов с модулем  $m = 2,5$  мм и числом зубьев  $z = 19$ . Намеченный технологический процесс состоит из следующих операций: приготовление шихты - холодное прессование заготовок - спекание - калибровка - термическая обработка. Для изготовления шестерен приготавливалась шихта двух составов: ЖГр1,0 (99 % ПЖ2М2 + 1 % С) и ЖГр1,0Д1,5 (97,5 % ПЖ2М2 + 1 % С + 1,5 % Сu). Для лучшей прессуемости в состав шихт вводилось 0,8 % стеарата цинка. Шихты смешивались в течение двух часов. Дозировка шихты производилась весовым методом.

Шестерни получали двусторонним холодным прессованием в неразъемной пресс-форме, (рисунок 2.13). На первом этапе производили одностороннее прессование верхним зубчатым пуансоном до давления 100 МПа, на втором - двусторонне прессование от давления 700 МПа. Для получения прочного сцепления венечной и ступичной части шестерни величина хода нижнего гладкого пуансона должна быть не менее 20 мм. На третьем этапе производили выпрессовку шестерни из верхней зубчатой матрицы, а на четвертом - из нижней гладкой матрицы. После этого шестерню снимали с центрального стержня.



а - одностороннее прессование; б - двусторонне прессование; в - выпрессовка из верхнего пуансона; г- выпрессовка из нижнего пуансона; 1 - верхний зубчатый пуансон; 2 стержень; 3 - обойма; 4 - нижняя гладкая матрица; 5 - подкладка; 6 - нижний гладкий пуансон; 7 - верхняя зубчатая матрица.

Рисунок 2.13 - Схема прессования

Полученные шестерни и образцы-свидетели из материалов ЖГр1,0 и ЖГр1,0Д5 спекали в проходных печах в среде конвертированного газа (т. росы от (-18) °С до (-20) °С) при (1120±10) °С. Свойства материала спеченных шестерен приводятся в таблице 2.11.

Таблица 2.11 - Свойства материала спеченных шестерен

Марка материала	Плотность г/см <sup>3</sup>	Содержание углерода		Предел прочности на растяжение	Твердость НВ, кг/мм <sup>2</sup>	Относительное удлинение, %	Ударная вязкость, кДж/м <sup>2</sup>
		общее	связан.				
ЖГр1,0	6,4	0,73	0,46	14,3/45	57,6/282	2,1/0,6	1,3/0,94
ЖГр1,0Д5	6,36	0,78	0,42	16,7/40,3	90,0/315	2,5/0,76	1,45/1,05
В числителе - свойства спеченных материалов, в знаменателе - свойства термообработанных материалов							

Структура материала ЖГр1,0 – феррито-перлитная с наличием структурно-свободного цементита. Феррит имеет твердость от 169 до 192 НВ. Структура материала ЖГр1,0Д5 - феррито-перлитная с включениями структурно свободного цементита. Феррит легирован медью и имеет твердость от 136 до 150 НВ, перлит пластичный - от 136 до 224 НВ.



Таблица 2.12 – Свойства конструкционных порошковых сталей после спекания и термической обработки (числитель – пористость 10-15 %, знаменатель – пористость до 2 %)

Марка стали	Свойства								
	После спекания				После термической обработки				
	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$a_H$ , кДж/м <sup>2</sup>	НВ, МПа	$t_{\text{закалки}}$ , °С	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$a_H$ , кДж/м <sup>2</sup>	HRC
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
СП10*	120	8	350	700-800	-	-	-	-	-
	150	18	700	900-1300	-	-	-	-	-
СП30*	160	8	350	700-800	-	-	-	-	-
	250	18	700	900-1300	-	-	-	-	-
СП70*	200	8	300	700-800	820-840**	350	2	100	31-37
	360	15	600	1110-1500	820-840	650	10	450	46-53
СП70Д3*	260	3	200	800-1000	820-840	550	1	100	33-42
	450	8	450	1200-1600	820-840	900	6	250	47-54
СП90Д3**	280	3	200	800-1000	820-840	550	1	50	33-42
	540	8	450	1200-1700	820-840	900	6	200	47-52
СП60Н2Д2**	300	3	350	900-1100	800-830	650	1	100	34-42
	450	8	650	1400-1800	800-830	1050	10	350	46-52
СП30Н3М**	200	4	350	700-900	-	-	-	-	-
	450	12	650	1100-1500	-	-	-	-	-
СП60Н3М**	220	4	220	1100-1400	820-840	500	1	100	34-40
	500	12	400	1800-2200	820-840	900	6	350	46-53
СП80Н2М**	360	3	80	1400-1700	800-820*	600	1	80	34-40
	600	10	150	2000-2500	800-820	1200	5	150	46-53

Продолжение таблицы 2.12

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
СП50Х**	400	5	100	1800-2100	840-860	630	1	100	36-42
	700	12	300	1400-2800		1050	4	250	50-56
СП60-ХН*	450	3	250	1500-1800	840-860	650	1	100	36-44
	700	10	600	2200-2500		1250	3	250	50-56
СП50ХМ**	440	4	250	1500-1700	840-860	630	2	100	32-41
	600	12	600	1900-2300		1300	6	300	58-55
СП60ХМ2**	430	4	300	1500-1700	830-850	640	2	100	31-42
	650	10	600	2000-2400		1400	5	250	49-53
СП60ХН2М*	450	3	200	1500-1700	820-840	630	1,5	150	31-42
	650	10	550	1900-2100		1300	6	400	47-53
СП40ХН3М	400	3	200	1500-1700	820-840	680	3	150	32-41
	650	10	450	1900-2400		1200	6	400	46-53
СП40Г2	350	4	250	1600-1900	810-840	550	2	160	31-38
	550	10	650	2200-2500		1100	5	350	42-51

## 2.4 Основы проектирования порошковой детали и пресс-формы

### 2.4.1 Оценка технологичности детали

Наибольшее применение при изготовлении конструкционных деталей имеет метод прессования изделия в закрытых пресс-формах, который в большинстве случаев обеспечивает получение изделий, не требующих механической обработки.

После прессования и спекания можно получать детали с поверхностью 10 и 11 качества точности. При применении калибрования можно получить детали с поверхностью до 10 класса шероховатости и 7-8 качества точности.

Прессуемые изделия подразделяются по сложности на 7 групп (рисунок 2.14):

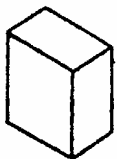
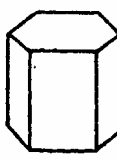


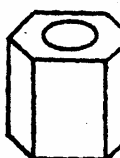
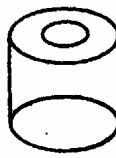
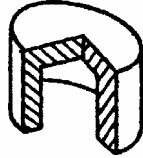
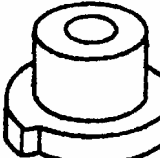
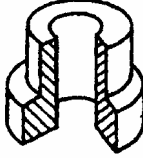
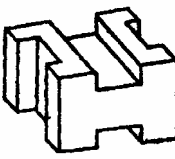
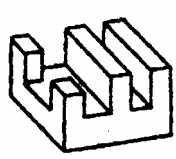
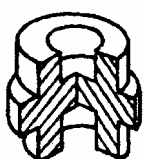

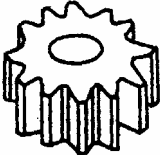
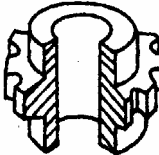
При проектировании деталей, предназначенных для изготовления методом порошковой металлургии, следует учитывать ряд ограничений (рисунок 2.15), обусловленных технологией порошковой металлургии:

- не допускать боковых впадин или отверстий, круговых канавок, обратной конусности;
- должны отсутствовать углы, тонкие (менее 1 мм) кромки, узкие пазы;
- стремиться использовать круглые сечения взамен квадратных и прямоугольных;
- в местах сопряжения поверхностей следует предусмотреть закругления радиусом не менее 0,25 мм;
- конструкция детали должна исключать острые углы на торцах пуансонов;
- отношение высоты детали к максимальному размеру поперечного сечения не должно превышать трех, в противном случае наблюдается значительная неоднородность распределения плотности прессовок в направлении прессования;
- изменения размеров по толщине и диаметру должны быть минимальными;
- при однократном холодном прессовании с последующим спеканием может быть достигнута следующая точность размеров: 0,03-0,05 мм (радиальные размеры); до 0,12 мм (размеры по высоте);
- шероховатость поверхности спеченных деталей определяется шероховатостью поверхности пресс-форм, однако наличие пористости в деталях не позволяет получать полированные поверхности.

При расчете и конструировании пресс-форм необходимо учитывать упругое последствие при прессовании и усадку при спекании.

После выпрессовки брикетов из пресс-форм размеры их под действием внутренних напряжений увеличиваются. Это явление называется упругим последствием. Его усилению способствует уменьшение размеров частиц порошка, повышение их твердости, увеличение содержания оксидов и давления прессования. Эффект упругого последствия по высоте прессовки больше, чем в поперечном направлении. Диаметр сквозного отверстия в прессовке после извле-

чения её из пресс-формы также увеличивается, что позволяет снять прессовку со стержня.

I			
II-III			
IV-V			
VI			
VII			

I – без отверстия, с неизменным сечением по высоте;

II – с отверстиями, с неизменным сечением по высоте, с отношением высоты к толщине стенки  $h/s < 8$ ;

III – с отверстиями, с неизменным сечением по высоте, с отношением высоты к толщине стенки  $h/s > 8$ ;

IV – с буртом при отношении  $h/s_{\text{мин}} < 6$ ;

V – с буртом при отношении  $h/s_{\text{мин}} > 6$ ;

VI – без отверстий, имеющие по высоте несколько переходов;

VII – с отверстиями по высоте, а также с криволинейными поверхностями.

Рисунок 2.14 – Классификация прессуемых изделий по группам сложности

В процессе спекания происходит изменение размеров спекаемых порошковых тел. В большинстве случаев увеличивается их плотность и уменьшается объем, то есть происходит усадка. Иногда наблюдается увеличение размеров брикетов, в частности, при использовании порошков меди, никеля, хрома, некоторых сталей и сплавов. Усадка в направлении прессования обычно больше, чем в поперечном направлении.

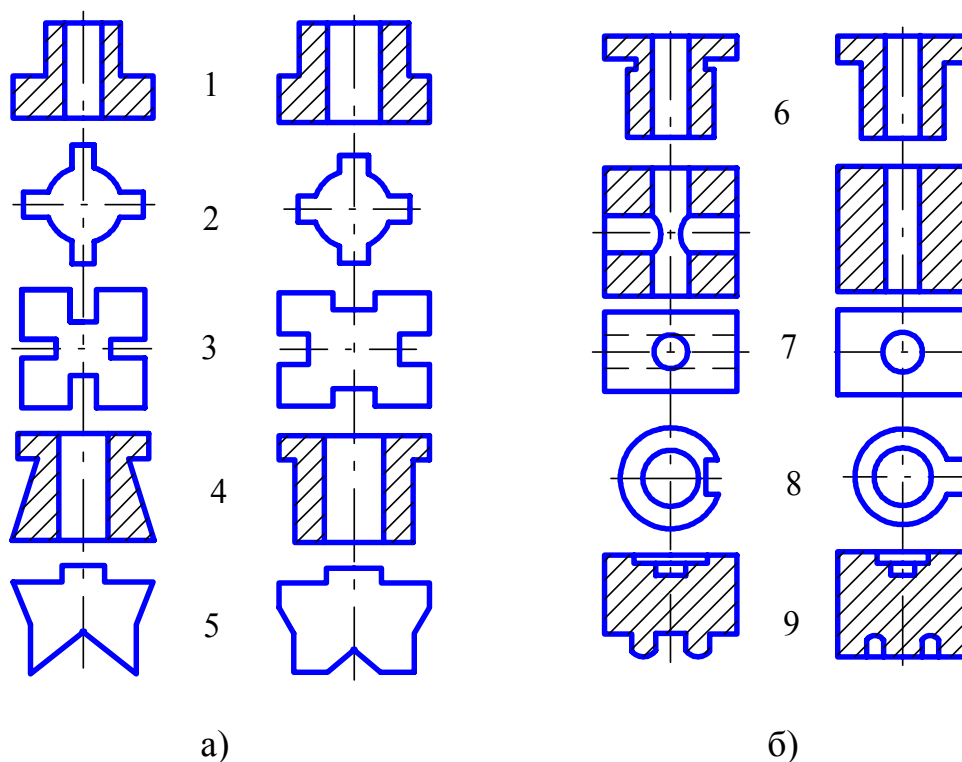


Рисунок 2.15 – Примеры нетехнологичной (а) и технологичной (б) конструкций порошковых деталей

#### 2.4.2 Расчет проектируемых размеров, высоты засыпки и усилия прессования порошковых деталей

Для расчета проектируемых размеров на деталь, коэффициента высоты засыпки и усилия прессования необходимо иметь следующие данные:

- чертеж детали;
- максимальный и минимальный размер детали с учетом плюсового и минусового допуска;
- величину упругого последствия прессованного изделия;
- величину усадки (роста) при спекании;
- коэффициент высоты засыпки;
- насыпной вес шихты (железной, медной);
- давление прессования;
- плотность прессуемой детали;
- площадь прессования.

Расчет проектируемых размеров детали по диаметрам производится для получения прессовки нужных размеров с учетом упругого последствия и усадки (роста).

1 Расчет проектируемого размера детали по наружному диаметру ведется, исходя из минимального размера готового изделия, т.к. в процессе работы диаметр матрицы увеличивается за счет износа.

Расчет проводится по формуле:

$$D_{н.пр.} = D_{\min \text{ гот.изд.}} - l_d + E_d - 0,5\mu,$$

где  $D_{\min \text{ гот.изд.}}$  – минимальный диаметр готового изделия,  $l_d$  – величина упругого последействия,  $E_d$  – усадка (+) или рост (–) при спекании,  $0,5\mu$  – величина допуска на изготовление.

Величина упругого последствия по диаметрам на основе железа составляет 0,2-0,3 % для порошков марок ПЖ4М2, ПЖ4М3, ПЖ3М3.

Величина усадки по диаметрам составляет 0-0,3 % (без наличия серы в шихте), при наличии серы в шихте наблюдается рост по диаметрам 0,2-0,3 % (насыпной вес порошка 2,2-2,5 г/см<sup>3</sup>).

2 Расчет проектируемого размера детали по внутреннему диаметру ведется исходя из максимального размера готового изделия, так как в процессе работы диаметр стержня уменьшается за счет износа.

Расчет производится по формуле:

$$d_{\text{вн. проек.}} = d_{\text{мак. гот. изд.}} - l_d + E_d + 0,5\mu,$$

где  $d_{\text{мак. гот. изд.}}$  – максимальный диаметр готового изделия;

$l_d$  – величина упругого последействия;

$E_d$  – усадка (+), рост (–) при спекании,

$0,5\mu$  – величина допуска на изготовление.

3) расчет производится по формуле:

$$H_{\text{пр.}} = H_{\text{мак гот. изд.}} - l_h + E_h$$

Величина упругого последействия по высоте детали на основе железа составляет 0,3-0,6 %.

Примечание – Изменение высоты прессуемого изделия вызывает изменение упругих последствий. Для правильного выбора величины упругости последействия необходимо пользоваться данными из таблицы 2.13.

Таблица 2.13 – Упругое последействие при прессовании железа

Максимальный размер готового изделия, мм	до 30	30-50	50-70	70-120
Величина упругого последействия, %	0,3	0,4	0,5	0,6

Величина усадки по высоте составляет 0,5 % (без наличия серы в шихте). Присутствие серы (0,3-0,8 %) в шихте вызывает рост от 0,3 до 0,5 %;

4) расчет высоты загрузочной камеры пресс-формы.

Расчет насыпной высоты камеры пресс-формы производится для того, чтобы её объем мог вместить необходимое для прессования детали количество шихты. Для этого определяют расчетным путем высоту загрузочной камеры пресс-формы по формуле:

$$H = h \cdot k,$$

где  $H$  – высота загрузочной камеры матрицы, мм;

$h$  – высота прессуемой детали, мм;

$k$  – коэффициент высоты засыпки, зависящий от плотности спрессованной детали и от насыпного веса шихты. Определяется по формуле:

$$K = g/p,$$

где  $p$  – насыпной вес шихты, г/см<sup>3</sup>;

$g$  – плотность прессуемой детали, г/см<sup>3</sup>, которая определяется по формуле:

$$g = \gamma \cdot \pi,$$

где  $\gamma$  – плотность компактного материала, г/см<sup>3</sup>;

$\pi$  – относительная плотность ( $\pi = 0,8$ ).

5) определение усилия прессования.

Возможность изготовления детали методом порошковой металлургии может быть ограничена мощностью прессового оборудования. Для выбора пресса необходимо определить усилие прессования  $P$ :

$$P = p \cdot S \cdot n,$$

где  $p$  – давление прессования,

$S$  – площадь поперечного сечения рабочей полости матрицы;

$n$  – количество одновременно прессуемых деталей.

Усилие пресса:

$$P_n = p \cdot k,$$

где  $k$  – коэффициент запаса мощности, равный 1,5.

Давление прессования для различных порошков обычно определяется на основе опытных данных. Для изделий на железной основе давление прессования обычно составляет от 600 до 800 МПа.

### 3 Антифрикционные материалы

Антифрикционные материалы, работающие в узлах трения, должны обладать низким коэффициентом трения (обычно, не более 0,3 без применения смазочных материалов и менее 0,1 со смазкой), высокой износостойкостью, способностью быстро прирабатываться и легко приспособливаться к изменению условий работы трибосистемы, повышенной сопротивляемостью к заеда-

нию и задиру, в значительной мере определяющей допустимые величины рабочих давлений и скоростей, достаточной прочностью и сопротивляемостью усталости, кавитационным, коррозионным и другим повреждениям.

Кроме того, материалы конкретного назначения должны обладать определенными специальными свойствами. Так материалы, предназначенные для работы при повышенных температурах и при отсутствии жидкой смазки, должны хорошо сопротивляться окислительному разрушению при рабочих температурах. Материалы, предназначенные для работы в вакууме, должны противостоять адгезии и схватыванию трущихся пар, иметь низкое значение коэффициента трения при отсутствии жидких смазочных материалов. Материалы, работающие в тяжело нагруженных узлах трения, должны обладать высокой объемной механической прочностью. Материалы, работающие в химической, пищевой, текстильной и некоторых других отраслях промышленности, должны хорошо сопротивляться действию агрессивных сред.

Не существует универсальных материалов, пригодных для работы в любых узлах трения. Для конкретных условий необходимо создание материалов, удовлетворяющих именно этим условиям.

Антифрикционные сплавы должны обладать гетерогенной структурой, состоящей из мягкой и твердой составляющих, обеспечивающих быструю прирабатываемость триботехнической пары и высокую износостойкость подшипника. В порошковых антифрикционных материалах, роль мягкой составляющей играют поры, которые к тому же могут быть заполнены жидкими смазочными материалами, предохраняющими подшипник и вал от катастрофического износа и схватывания при аварийном прекращении смазки.

При использовании методов порошковой металлургии возможно получение антифрикционных материалов, с равномерно распределенными включениями веществ, выполняющих функции твердой смазки (графит, сульфиды, селениды, фториды и другие соединения), участвующих в создании вторичных структур на поверхности трения. В структуру антифрикционного материала можно вводить износостойкие твердые добавки, например, карбиды, обладающие невысоким коэффициентом трения и способные принять на себя нагрузку, увеличивающую несущую способность подшипника. В широких пределах можно регулировать дисперсность включений и их распределение в материале подшипника.

Повышение физико-механических свойств антифрикционных порошковых материалов достигается применением химико-термической обработки (цементация, азотирование, фосфатирование и т. п.). Для повышения прочности и несущей способности подшипников проводится армирование их волокнами и уплотнение спеканием под давлением, горячим прессованием, инфильтрацией медью, бронзой и др. материалами.

Методами порошковой металлургии изготавливают в основном антифрикционные материалы на основе железа, меди и их сплавов. Физико-механические характеристики порошковых материалов уступают однотипным по составу литым сплавам (из-за наличия пор), однако, по триботехническим свойствам они значительно превосходят их (таблица 3.1). Срок службы порош-



ковых материалов на основе железа и меди в полтора-три раза превышает время эксплуатации подшипников скольжения, изготовленных из бронзы, латуни, баббита, чугуна, стали и также подшипников качения.

Таблица 3.1 – Сравнительные физико-механические и антифрикционные свойства литых и порошковых материалов общемашиностроительного назначения

Материал	П, %	НВ, МПа	$\sigma_{в}$ , МПа	Макс. режимы работы в присутствии смазки			$f_{тр}$	Относительная износостойкость
				V, м/с	PV, МПа·м/с	t, °C		
Литые								
Бр06Ц6С3	0	680	153	3	10	60-80	0,005	1
Бр010Ц2	0	-	-	2,5	-	60-80	0,06-0,8	1
Баббит Б83	0	-	91,8	6-8	20	60-80	0,0045	1
Баббит БК	0	300	-	15	6	80-100	0,004	1
Порошковые								
Ж (пористое)	20	500	100	1-2	1,0-1,6	100	0,01	1,5-3
Бр0(8-10)Гр(2-4)	20	300-500	50	1-2	2,5-3,0	60-80	0,005	1,5-3
ЖГр(1-3)	15-25	500-900	100	3-4	7-10	150	0,06-0,006	1,5-3
ЖГр1К1	15-25	600-900	150	5	8-10	200	0,06-0,006	2-6
ЖГр(1-2)Д(2-3)	15-25	800-1200	180	4	5-8	200	0,09-0,009	1,5-3
ЖГр1ДЗКО,4	15-20	800-1200	150	4-8	10-15	200	0,05	2-6
ЖГр3Цс4	15-20	600-1000	150	10	20		0,05-0,1	2-10

### 3.1 Материалы на основе железа

Пористое железо представляет собой наиболее простой тип антифрикционных материалов. Заполнение пор маслом обеспечивает стабильно низкий коэффициент трения триботехнической пары, предохраняет металл от коррозии и создает эффект самосмазывания, делающий ненужным подвод смазочного материала извне.

При невысоких скоростях скольжения на поверхности трения появляется смазочная пленка, возникающая при поступлении масла из капилляров, образованных пораами в объеме тела подшипника. Количество масла регулируется капиллярными силами, удерживающими масло в порах. Чем больше скорость скольжения, тем в большей степени нагревается поверхность трения, тем более обильно поступает на нее смазочный материал.

Пористые подшипники при малых скоростях скольжения способны выдерживать нагрузки, более высокие, чем литые подшипники. При увеличении скоростей допустимые нагрузки на литые подшипники увеличиваются, а на пористые – уменьшаются. Однако, если к пористым подшипникам подвести смазку извне, то при повышении скоростей значения допустимых нагрузок увеличиваются.

При стабильной подаче смазки длительная работоспособность пористого железа обеспечивается при нагрузках от 2,0 до 2,5 МПа и скорости скольжения 1-2 м/с ( $PV = 2,5-5,0$  МПа·м/с).

С увеличением скорости скольжения в режиме самосмазывания допустимая величина нагрузки резко уменьшается и значение  $PV$  превышает 0,7-1,6 МПа·м/с. При нормальной работе такого материала температура не должна превышать 70 - 80 °С.

Железографит является наиболее распространенным антифрикционным порошковым материалом на основе железа. Его используют как в режиме самосмазывания, так и при дополнительной подаче масла. Железографитовые материалы обладают ферритно-перлитной (феррита – менее 50 %) структурой металлической основы и содержат около 1,5 % свободного углерода. Материал обладает твердостью, обеспечивающей восприятие достаточно высоких скоростей скольжения и нагрузок при минимальном износе. При удовлетворительной смазке коэффициент трения композиции находится в пределах 0,005 - 0,09, при ограниченной – 0,02 - 0,125. Критерий  $PV$  в условиях самосмазывания составляет 1,6 МПа·м/с, при стабильной смазке до 10 МПа·м/с, а при смазке под давлением до 40 МПа·м/с. Предельная скорость скольжения допускается до 2 - 3 м/с. Порошковые железографитовые материалы по триботехническим характеристикам близки к серым чугунам, но обладают более высокой прирабатываемостью. Износ контртела, работающего в паре с железографитом, обычно не превышает износа контртела в паре с чугуном. Длительность службы подшипника в среднем не превышает 3 - 5 тысяч часов. Применяют железографитовые материалы марок ЖГр (0,8 - 1,5), ЖГр1, ЖГр2, ЖГр3 и другие.

Композиции на основе железа и меди нашли широкое применение главным образом в связи с более высокими физико-механическими и технологическими свойствами по сравнению с пористым железом и железографитом. Антифрикционные свойства железомедных и железомеднографитных материалов сопоставимы с материалами на основе железа. Высокие механические характеристики позволяют применять их в узлах трения, где требуется повышенная прочность. Они способны выдерживать статистические нагрузки до 60 - 290 МПа, но критерий  $PV$  их не превышает 2 МПа·м/с в условиях ограниченной смазки. В состав железомедных и железомеднографитовых антифрикционных композиций обычно вводят от 5 % до 9 % меди. Подшипники из таких материалов работают обычно с подводом смазочных веществ и реже в режиме самосмазывания. К железомедным относятся, например, сплавы ЖД3, ЖД5, к железомеднографитовым – ЖГр1Д5, ЖГр4Д7, ЖГр (1-2) Д (2-3) и другие.

Доцентом Недыхаловым В.А. проведены исследования химического состава, структуры, физико-механических и антифрикционных свойств спеченных материалов на основе природно-легированных железных порошков в сравнении с известными порошковыми материалами и применяемым чугуном (таблица 3.2).

Таблица 3.2 - Составы шихт, принятых в качестве основы для получения втулок

Наименование шихт	Основа материала	Вводимые добавки, %			
		Углерод	Медь	Сера	Хром
Состав №1	ПЖ2М	1,5	3,0	0,5	1,0
Состав №2	ПЖ2М	1,5	2,65	0,5	1,0
Состав №3	ППЛ-18ХСНД	1,5	2,8	0,5	1,0
Состав №4	ППЛ-РПХ	1,5	1,5	0,5	1,0

Наибольшее количество легирующих элементов (6,97 %) у материала состава №3, минимальное – у состава №4 (4,68 %). Структура спеченных материалов – гетерогенная, состоящая из мелкозернистого перлита, феррита (5-30 %), разорванной цементитной сетки, незначительного количества графита, твердых карбидных включений, структурно-свободной меди и оксидов (таблица 3.2).

Микротвердость перлита в спеченных материалах составляет от 1800 до 3200 Н/мм<sup>2</sup>, феррита – от 800 до 1400 Н/мм<sup>2</sup>, карбидных включений – от 7000 до 13000 Н/мм<sup>2</sup>.

Фазовым анализом структурных составляющих установлено, что карбиды в спеченных материалах представляют собой легированный цементит. Большая часть хрома (около 90 %) находится в виде карбидов, остальная – в виде оксидов и в твердом растворе.

Общее количество оксидов в материалах не превышает 3,4 %. В спеченных материалах никель находится в растворенном состоянии, а медь как в свободном состоянии (0,3 - 0,6 %), так и в виде твердого раствора и сульфидов. Сера образует сернистые соединения с железом и медью.

Принятое в исследовании двухстороннее прессование в неподвижной матрице обеспечивало получение в заготовках симметричных физико-механических характеристик от торца к середине, изменяющихся в пределах 10%. Уменьшение пористости в спеченных заготовках приводит к увеличению физико-механических свойств.

Физико-механические свойства (предел прочности при растяжении, изгибе, срезе и твердость) материалов на основе природно-легированных порошков выше на 15 - 20 %, чем аналогичные свойства материалов на основе стандартного порошка ПЖ2М и на 70 – 90 % выше, чем свойства серого модифицированного чугуна.

Лабораторными исследованиями антифрикционных свойств установлено, что прирабатывание материалов на основе природно-легированных порошков проходило в течение 8 часов, что на 30-50 % продолжительнее чугуна, модифицированного сурьмой. Удельное давление до схватывания материала состава №4 составляло от 1600 до 1700 Н/мм<sup>2</sup>, а коэффициент трения – 0,028, минимальная величина изнашивания у материалов состава № 4 при нагрузке 300 Н/мм<sup>2</sup>, скорости скольжения 1,5 м/с составила 0,02-0,03 мкм/ч, что в 2,8-3,0 раза меньше величины изнашивания чугуна и в 1,2-1,4 раза меньше, чем

у материалов на основе порошка ПЖ2М. Проведенные лабораторные исследования данных материалов при температуре до 400 °С, нагрузке 20 Н/мм<sup>2</sup> и скорости скольжения 1,0 м/с так же показали меньший износ в 1,9-2,0 раза по сравнению с применяемыми чугунами (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Физико-механические свойства спеченных материалов и чугуна

Наименование материалов	Предел прочности при растяжении, $\sigma_p$ , МПа	Предел прочности при сжатии, $\sigma_{сж}$ , МПа	Предел прочности при сгибе, $\sigma_{из}$ , МПа	Ударная вязкость, $a_n$ , МПа	Средняя твердость НВ
Состав №1	330	960	450	73	88,0
Состав №2	360	1147	583	76	87,0
Состав №3	360	1192	540	78	92,0
Состав №4	400	1350	676	88	94,0

Результаты исследования лабораторных испытаний спеченных материалов и чугуна при сухом трении, удельном давлении 20 Н/мм<sup>2</sup>, скорости скольжения 1 м/с, температуре испытания +300 °С показали, что материалы составов №4 на основе природно-легированного порошка ППЛ-РПХ имели износ за 15 часов работы от 78,6 до 82,2 мкм, а материалы из чугуна от 160 до 165 мкм (таблица 3.4).

Таблица 3.4 – Результаты исследования лабораторных испытаний спеченных материалов и чугуна при сухом трении

Наименование материалов	Основа материала	Износ за 15 часов, мкм	Износ в % к износу чугуна	Коэффициент трения	Температура в узле трения, °С.
Состав №1	ПЖ2М	106,5	66,5	0,30	300
Состав №2	ПЖ2М	119,7	74,6	0,37	300
Состав №3	ППЛ-18ХСНД	93,4	58,3	0,26	300
Состав №4	ППЛ-РПХ	82,6	51,6	0,22	300

Проводились исследования процесса получения низколегированного железочугунного материала. Готовили шихты, содержащие от 10 % до 50 % чугунного порошка и, соответственно, от 90 % до 50 % порошка железа. Исследование влияния чугунного порошка на свойства шихт показало, что увеличение его концентрации улучшает текучесть шихт, повышает их насыпную плотность. Уплотняемость шихт достаточно высока, так при давлении прессования 686 МПа плотность прессовок, содержащих 30-40 % чугунного порошка, составляет от 6,35 до 6,45 г/см<sup>3</sup>. С повышением насыпной плотности чугунного

портика уплотняемость шихт возрастает. Это позволило получать достаточно плотные прессовки методом холодного прессования.

Процесс спекания прессовок исследовали в интервале температур 1147-1300 °С при продолжительности изотермической выдержки до  $1,92 \cdot 10^4$  с.

Спекание начинается с образования железной матрицы при температуре 747-800 °С. После нагрева прессовки до 900 °С вокруг частиц чугуна появляются участки перлита, количество которого увеличивается в основном в течение первых  $6,0 \cdot 10^2$  с, что свидетельствует о преимущественной диффузии углерода в начале спекания. Заметное растворение частиц хромоникелевого порошка начинается при температурах выше 1147 °С. При температуре 1200 °С частица диаметром до 70 мкм полностью растворяются после  $2,4 \cdot 10^3$  с спекания, а частицы размером более 100 мкм сохраняются. Из этого следует, что при использовании порошка полидисперсного состава мелкие фракции, растворяясь при спекании, способствуют равномерному легированию железной матрицы, а неполное растворение более крупных частиц позволяет получать материалы с гетерогенной микроструктурой.

Существенного улучшения физико-механических, технологических и эксплуатационных характеристик железографитовых и железомеднографитовых материалов достигают дополнительным легированием серой или сульфидами металлов (таблица 3.5). Легирование серой повышает несущую способность подшипников при увеличении скорости скольжения. Применение композиций Fe-Cu-C-S вместо чугунных втулок позволяет продлить срок их службы в десятки раз и ограничить смазку узлов трения до одного раза в сезон.

Материал № 1 применяется как заменитель бронз в тракторах при изготовлении втулок, шестерен переключателей скоростей, дисков регулятора крышки регулятора, шестерен механизмов смазки.

Таблица 3.5 – Характеристика сульфидированных железографитовых материалов

Материал	Содержание элементов, %				Условия смазки	Предельно допустимые	
	C	S	P	Cu		P, МПа	V, м/с
1	1	0,8-1	0	0	Ограниченная смазка	4,9-24,5	2,4
2	1,5	0,4-0,8	0	2,5-3	То же	4,9-7,85	2,8
3	1,3-2	0,4	0	3-10	-	14,7-18,6	0,1
4	1,5	0,7-0,1	0,5-0,7	0	Огранич. (Π=18-20%), без смазки (Π=0%)	14	-

Материал № 2 применяют при температуре до 200 °С для направляющих втулки клапана автомобилей, втулки рычажно-тормозной передачи железнодорожных вагонов, втулки оборудования текстильного производства, втулки транспортеров, кормораздатчиков и др. Материал № 3 используют для втулок лебедок и петель дверей грузовых автомобилей, шайб шкворней и шарниров поворотных кулаков, при повышенных (до 500 °С) температурах – для направляющих втулок клапанов автомобилей.

Из материала, обозначенного № 4, изготавливают детали токарно-винторезных станков.

При легировании сульфидами цинка образуется структура тонкодисперсного перлита с повышенной износостойкостью, несущей способностью и обрабатываемостью материала, что значительно расширяет возможные области применения железуграфитовых материалов в связи с достижением повышенных предельных параметров как при работе со смазочными материалами, так и без дополнительной смазки (таблица 3.6). Введение в такие материалы до 1 % олова существенно улучшает их антифрикционные свойства.

Узлы трения, оснащенные сульфидированными материалами на основе железа, обладают работоспособностью, в несколько раз превышающей работоспособность бронз, баббитов, а также порошковых материалов на основе бронз.

Следует учитывать, что материалы, содержащие сульфиды обладают повышенным, по сравнению с железуграфитом, коэффициентом теплового расширения и несколько меньшей коррозионной стойкостью.

Таблица 3.6 – Эксплуатационные характеристики и области применения порошковых антифрикционных материалов на основе железа (по ГОСТ 26802-86)

Марка	Условия работы материалов	Область применения
1	2	3
ПА-Ж, ПА-ЖК	Работают при обильной смазке при давлении до 2,5 МПа и скоростях скольжения 1-2 м/с. В режиме самосмазывания нагрузки до 1,5 МПа. коэффициент трения 0,03-0,06. Присутствие серы увеличивает срок службы и улучшает обрабатываемость материала	Прецизионные подшипники приборов, бытовой аппаратуры, счетно-решающих машин, текстильного оборудования
ПА-ЖД, ПА-ЖД5, ПА-ЖДК, ПА-ЖГр, ПА-ЖГр2, ПА-ЖГр3, ПА-ЖГрД, ПА-ЖГрД5, ПА-ЖГр2Д	Работают в условиях ограниченной и обильной смазки при давлениях до 4 и 10 МПа соответственно и скорости скольжения до 3 м/с, в режиме самосмазывания давление до 2 МПа. Коэффициент трения 0,035-0,0125 в зависимости от количества смазки и состава материала. Материалы с увеличенным содержанием графита работают на верхнем пределе указанных нагрузок, при скоростях скольжения до 5 м/с имеют большой срок службы, меньший износ и коэффициент трения. Присутствие серы увеличивает износостойкость и улучшает обрабатываемость материала	Подшипники тракторов, сельхозмашин, станков, приборов, аппаратов бытовой техники, автомобилей, например, деталей телескопических амортизаторов, редукторов лебедки и др.

Продолжение таблицы 3.6

1	2	3
ПА-ЖГрК, ПА-ЖГр2К, ПА-ЖГрДК, ПА-ЖГрДК1, ПА-ЖГрДК6, ПА-ЖГрЦс	Работают в режиме самосмазывания и ограниченной подачи смазки при давлении до 12 МПа, при скоростях скольжения 3-8 м/с, при повышенных температурах (до 250 °С). Коэффициент трения 0,01-0,1	Подшипники скольжения, другие детали узлов трения автомобилей, станков, различных машин и механизмов, например втулка направляющей клапана, компрессора бытового холодильника и др.
ПА-ЖГрЛ	Работает в условиях ограниченной смазки при давлении 8 МПа, скорости скольжения 2-5 м/с и температуре от минус 60 до +100 °С; коэффициент трения не более 0,1 и улучшенная притираемость по сравнению с латунью	Пробки кранов воздушных, водных, паромасляных и других систем, например, кранов тормозных систем паровозов, вагонов
ПА-ЖГрЦс	Работает в режиме самосмазывания и ограниченной смазки при скоростях скольжения до 100 м/с; при давлениях до 20 МПа в случаях скорости 5-10 м/с. Работает в паре с закаленными сталями, имеет высокую износостойкость (до 8 раз большую, чем бронзы, баббиты, подшипники качения, чугуны), низкий коэффициент трения (0,02-0,2), величина которого зависит от условий трения	Подшипники, втулки, вкладыши, торцовые уплотнения быстровращающихся валов различных машин, двигателей, приборов

Введение в железомеднографитовые материалы фосфора позволяет повысить их сопротивление пластической деформации при трении, что уменьшает возможность закупорки поровых каналов при возможном увеличении нагрузки. Они обладают более высокой износостойкостью при трении без смазки. При дополнительной смазке они способны работать с нагрузкой до 7,65 МПа и скорости скольжения 4 м/с. Оптимальны материалы на основе железа, содержащие 1,2 % С и 0,2-0,4 % Р; 0,6 % С и 0,9 % Р.

Присутствие молибдена в антифрикционных материалах на железной основе значительно улучшает их антифрикционные свойства, особенно при тяжелых условиях работы.

Так, пористое железо, содержащее 10 % молибдена, при трении без смазки со скоростью скольжения 46 м/с и температуре 540 °С имеет коэффициент трения 0,075. Влияние молибдена на антифрикционные свойства малопористого железографита (3 % С) показано в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Влияние содержание Мо на свойства малопористого железозографита

Содержание Мо, %	Твердость НВ, МПа	Несущая способность $P_{max}$ , МПа	Коэфф. трения, $f$	Износ I, мкм/км
0	167-177	0,78-0,98	0,35-0,40	15
5	196-216	1,77-1,96	0,25-0,35	15
10	245-275	1,96-2,35	0,20-0,33	15
15	343	3,92-4,9	0,20-0,26	5-10

Для материала, содержащего 15 % Мо, характерно уменьшение коэффициента трения с увеличением скорости скольжения и нагрузки. По этому параметру он превосходит оловянную бронзу (таблица 3.8).

Таблица 3.8 – Сравнительные испытания материала ЖГр3М15 и бронзы БрОФ в условиях трения без смазки по стали 45 (HRC = 43-47)

Скорость скольжения V, м/с	Нагрузка P, МПа	БрОФ		ЖГр3М15	
		Коэфф. трения $f$	Износ I, мкм/км	Коэфф. трения $f$	Износ I, мкм/км
2	1,96	0,38	20	0,56	10
4	1,96	0,30	40	0,43	69
6	1,96	0,43	160	0,42	50
8	1,96	0,38	322	0,42	65
10	1,96	0,37	500	0,14	93
12	1,96	-	-	0,41	111
12	2,94	-	-	0,38	160
12	3,92	-	-	0,34	174
12	4,90	-	-	0,33	190

Создан ряд сложнолегированных сплавов, содержащих молибден и обладающих высоким сопротивлением износу при повышенных температурах, например сплавы, содержащие 5-20 % Мо и 0,5-1,5 % С, в которые дополнительно могут вводиться до 1-15 % Ni, 1,5-25 % Со, 3-25 % Cr.

Антифрикционные материалы на основе железа, содержащие в качестве твердой смазки фториды кальция, могут работать без смазки в вакууме, при повышенных температурах и нагрузках. Дополнительное легирование таких материалов молибденом до 15 % существенно улучшает их свойства. Оптимальным по характеристикам жаропрочности и рекомендуемым для работы при температурах до 650 °С, является сплав, содержащий 79 % Fe, 15 % Мо и 6 % CaF<sub>2</sub>.

Для улучшения антифрикционных свойств и повышения прочности применяют порошковые сплавы на железной основе, содержащие свинец или сплавы на основе цветных металлов. Для подшипников, работающих при давлении более 1 МПа, предложен материал, состоящий на 60-90 % из Fe, остальное сплав (85 % Cu, 5 % Sb, 5 % Pb, 5 % Zn), вводимый в виде порошка при шихтовании.



Улучшение свойств материалов на основе железа достигается введением 15-30 % Pb и 3-5 % Cu с последующей пропиткой маслом. Свинцом пропитывают порошковые материалы, содержащие 0,5-15 % C, 2-4 % Cu, 1-3 % Ni, 1-0,5 % Mo, 2,5 % Si. Железомедные материалы, содержащие свинец обладают повышенной пластичностью, поэтому их применяют при ударных нагрузках.

Для деталей, работающих при больших нагрузках, создан сплав на основе железа с повышенными антифрикционными и антикоррозионными свойствами (0,8 % C, 2,5 % Si, 3-5 % Cr, 6-10 % Mo, до 2 % Ni, остальное Fe), в который дополнительно вводят инфильтрацией сплав 90 % Cu + 10 % Sn.

Существует значительное количество антифрикционных сплавов на основе железа, легированных хромом, никелем, кобальтом и другими элементами. Составы некоторых из этих сплавов приведены в таблице 3.9, а схема изготовления материалов на рисунке 3.1.

Таблица 3.9 – Составы некоторых сложнолегированных антифрикционных материалов на основе железа

Обозначение материала	Массовая доля, %				
	C	Cr	Ni	Mn	Другие элементы
1	0	5-10	0	0	Cu≤40, Sn 3-7
2	0,8-0,9	4-5	0	0	2-5 Mo, 0.25-2.5 Si
3	0,8-1,4	1-5	0	0,03-0,25	0.1-0.5 Si, 0.1-0.25 B
4	0,6-2,0	0	0,4-4,0	0	0.5-5.0 Mo, 6-11 Co
5	1,0	16-20	0	0	1-2 BN
6	5-10	0	0,2-10	0,2-10	Один или несколько порошков металлов или соединений Cr, Mo, W, Nb, V, Ta, Si, P

Введение тех или иных элементов связано с потребностью усиления какого-либо из свойств материала. Введение хрома, например, преследует цель повысить износостойкость и термическую устойчивость (сплав 1), прочность и коррозионную стойкость (сплав 5). Введение кобальта и молибдена (сплав 4) повышает стойкость против абразивного износа и теплостойкость до 500 °С. олово и медь (сплав 1) улучшают свойства при трении.

Сульфидирование и борирование позволило создать класс жаростойких, коррозионно-стойких антифрикционных материалов на основе нержавеющей сталей марок X23H18, X18H9, X18H15, X17H2 и др.

Совмещение сульфидирования с борированием или цементацией обеспечивает получение у этих композиций более высоких физико-механических и антифрикционных свойств (таблица 3.10).

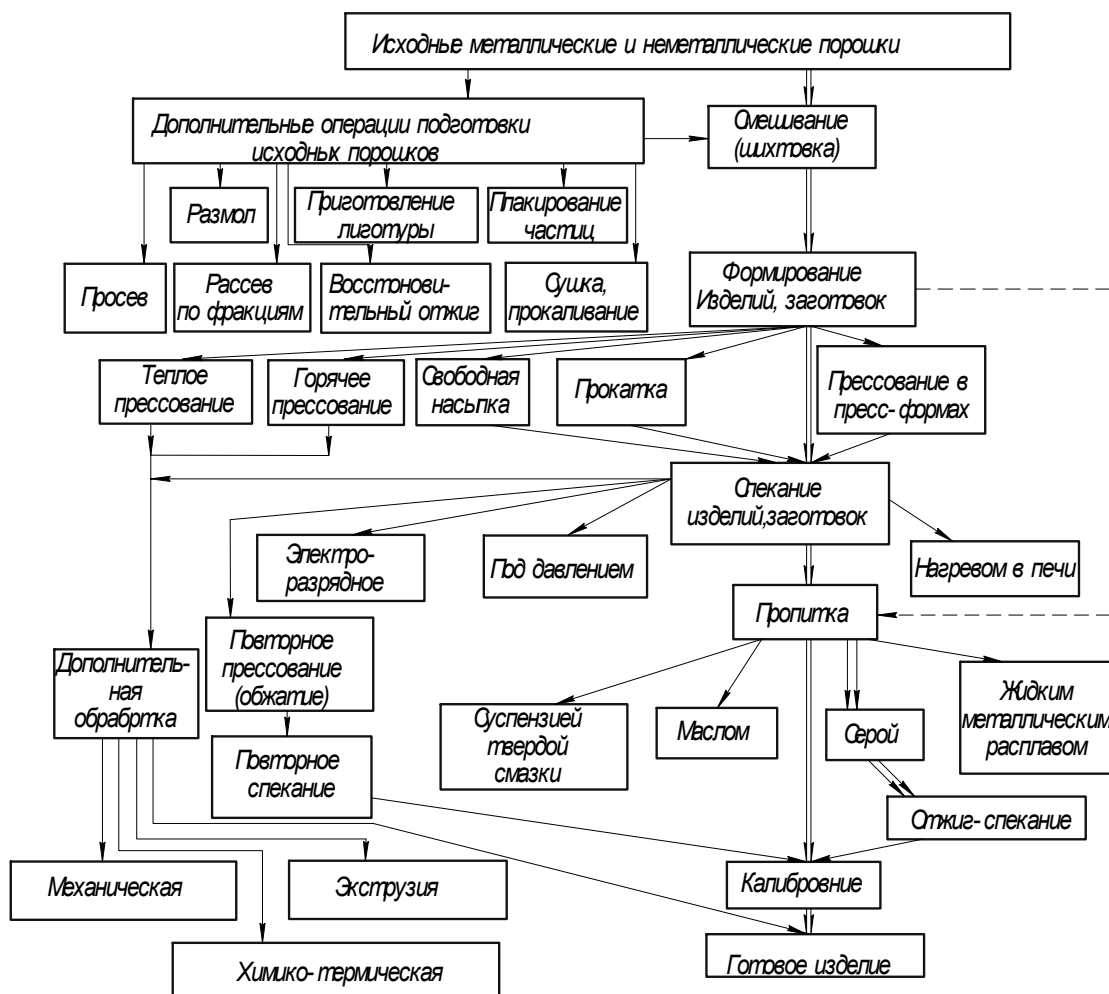


Рисунок 3.1 - Детальная схема изготовления композиционных антифрикционных материалов методом порошковой металлургии

Таблица 3.10 – Антифрикционные свойства материалов на основе сплава Х23Н18 (нагрузка 0,1 МПа)

Марка материала	Скорость трения, м/с	Коэффициент трения	Износ, мкм/м	Температура на поверхности образца, °С
Х23Н18КБ (сульфоборированная)	11	0,40-0,67	2,58	130
	75	0,19-0,25	6,65	400
Х23Н18Б (борированная)	11	0,40-0,04	68,00	120
	75	0,15-0,20	3,30	300
Х23Н18МсБ (сульфоборированная)	11	0,17-0,25	3,00	85-90
	22	0,17-0,23	5,00	140-145
Х23Н18МсЦ (сульфоцементованная)	75	0,18-0,26	20,00	450
	11	0,13-0,21	4,00	45-65
	22	0,16-0,23	20,00	95-120
	75	0,23-0,38	68,00	350

Сера, сульфиды, а также образующиеся при спекании в результате взаимодействия компонентов основы с введенными добавками и насыщающими

элементами (бором, углеродом) новые фазы, позволяют получать материалы с высокогетерогенной структурой, обеспечивающей хорошую износостойкость и низкий коэффициент трения в различных условиях эксплуатации.

Эти материалы обладают высокой коррозионной стойкостью и могут работать в условиях трения без подвода смазочных материалов при температурах до 600 °С, нагрузках до 100 МПа и малых скоростях скольжения, при скоростях скольжения до 60-75 м/с и невысоких нагрузках без смазки и в присутствии агрессивных газов и жидкостей.

Основные области применения нержавеющей сульфидированных порошковых материалов – подшипники насосов, агрегатов подачи и распределения топлива, торцевые уплотнения газотурбинных двигателей и химической аппаратуры, детали узлов трения насосов водоподъема, электродвигателей, работающих в воде и пр.

Антифрикционные материалы с улучшенными характеристиками могут быть получены на основе природно-легированных металлических порошков.

В таблице 3.11 приведен состав шихт порошковых материалов, использованных для изготовления поршневых колец быстроходных транспортных двигателей типа Д6, Д12, Д100.

Таблица 3.11 – Состав шихт материалов для поршневых колец, %

Обозначение материала	Металлический порошок-основа		Графит	Медь	Хром	Сернистый цинк	Порошок отбеленного чугуна
	наименование*	%					
1	ПЖ2М2	93,50	3,00	1,50	2,00	-	-
2	ПЖ2М2	82,63	1,35	2,00	-	4,0	10
3	ППЛ-15ГС	93,80	2,90	1,50	1,80	-	-
4	ППЛ-15ГС	83,00	1,15	1,85	-	4,0	10
5	ППЛ-18ХСНД	95,00	2,80	1,30	0,90	-	-
6	ППЛ-18ХСНД	82,90	1,30	1,80	-	4,0	10
7	ППЛ-РКП	93,60	3,00	1,50	0,90	-	-
8	ППЛ-РКП	82,60	1,40	2,00	-	4,0	10

\* Расшифровка марок порошков приведена в тексте

Работа таких колец характеризуется высокой скоростью скольжения (до 11,2 м/с), высокотемпературным режимом (нагрев верхнего кольца достигает 350-400 °С), большим удельным давлением (до 10 МПа), граничным трением.

Характеристики износа материалов, полученные при различных скоростях скольжения и удельных нагрузках в условиях смазки контртела (сталь 38ХМЮА) сальником приведены в таблице 3.12.

Из данных таблицы следует, что наибольшей износостойкостью и наименьшей износостойкостью обладают материалы ХСНД и РКН соответственно.

Таблица 3.12 – Характеристики износа антифрикционных материалов

Обозначение материала	Износ, мкм/ч, при $v = 6,8$ м/с и нагрузках		Износ, мкм/ч, при нагрузке $p = 5$ МПа и $v$ скольжения		Износ, мкм/ч, контртела, при $v = 8,3$ м/с и $p = 6$ МПа
	5 МПа	10 МПа	8,3 м/с	12,5 м/с	
1	8,2	24,5	14,0	40,1	7,0
2	1607	70,0	22,0	85,0	9,1
3	9,8	34,9	14,9	52,0	8,0
4	14,2	71,1	34,1	44,0	9,5
5	7,9	22,9	13,9	34,3	6,0
6	12,0	59,5	30,5	80,0	9,4
7	8,2	23,0	14,5	39,5	6,5

Антифрикционные характеристики материалов Н и РКН, обнаруженные при стендовых испытаниях на двигателе Д12, приведены в таблице 3.13.

Таблица 3.13 – Антифрикционные свойства материалов для поршневых колец

Обозначение материала	Продолжительность приработки, ч	Установившийся коэффициент трения	Радиальный износ колец, мкм за 1000 ч	Осевой износ колец, за 1000 ч	Износ гильзы цилиндра за 1000ч
7	8,0	0,004	61	19	31
1	7,5	0,005	81	24	37

Помимо природно-легированных металлических порошков в ОГУ разработана технология получения металлических порошков из шлифованных шламов магнитно-сепарационным методом.

В таблице 3.14 приведен химический состав металлического порошка, полученного из шлифованного шлама подшипникового производства.

Таблица 3.14 – Химический состав металлического порошка

Fe общ.	Cr	C	Mn	Si	S	P	Остальное
96,2	1,2	0,5	0,3	0,3	0,015	0,03	1,5

### 3.2 Материалы на основе меди

Антифрикционные материалы на основе меди получили широкое распространение в связи с их высокими антифрикционными свойствами, коррозионной стойкостью и электропроводностью.

Эти свойства обеспечили эффективное их применение в узлах трения машин и механизмов и в электротехнике в качестве скользящих токосъемных контактов.

К таким материалам относятся: пористая оловянная бронза, легированная пористая бронза (свинцовистая, фосфористая и др.), бронзографит, ленточные беспористые и пористые с пропиткой пластмассой бронзовые материалы на стальной подложке, медь-графит и др.

Из пористой бронзы изготавливают подшипники машин для обработки пищевых продуктов, текстильных и бытовых машин, небольших электродвигателей, пусковых устройств, часовых механизмов, насосов для холодной воды, вентиляторов и т.п., работающих в легких условиях при низких скоростях скольжения (до 1,5 м/с) и нагрузках от 0,5 до 1,0 МПа.

Состав и свойства некоторых марок пористых бронз приведены в таблице 3.15.

В бронзографитовых материалах графит играет роль твердой смазки. В процессе трения он постепенно образует на поверхности контртела графитовую пленку, которая постоянно восстанавливается при механических повреждениях участков поверхности трения.

Таблица 3.15 – Физико-механические и антифрикционные свойства пористых оловянных бронз

Марка	Содержание Sn, %	Плотность, г/см <sup>3</sup>	П, %	Предел прочности $\sigma_B$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %	НВ, МПа	PV, МПа·м/с
Бр010	10	6-7	20-30	75-127	5	245-392	1,5-2,5
Бр100	9,5-10,5	6,4-7,2	.....	93-137	1-3	638-804	5-6

Несущая способность бронзографитовых подшипников в значительной мере определяется их пористостью и скоростью скольжения (таблица 3.16).

Коэффициент линейного расширения бронзографитов, содержащих от 8 % до 10 % Sn и от 2 % до 3 % С, равен (12-17) Ч10-6К-1, теплопроводность в интервале температур от 100 до 600 °С равна 34-43 Вт/(м·К).

Бронзографитовые материалы могут применяться в тех же случаях, что и пористая бронза, а также в циркуляционных насосах для горячей воды, в водомасляных смесях, в мотоциклах, тракторах, для изготовления шестерен. Они заменяют литые бронзы, латуни, подшипники качения.

Таблица 3.16 – Зависимость величины предельных давлений для бронзографитовых подшипников от пористости и скорости скольжения

Материал	П, %	Нагрузки при скорости скольжения в м/с (не выше), МПа					
		0,1	0,5	1	2	3	4
Бронзографит (9-10 % Sn, 1-4 % С, ост.Сu)	15-20	17,6	6,9	5,9	4,9	3,4	1,2
	20-25	14,7	5,9	4,9	3,9	2,9	1,0
	25-30	11,8	4,9	3,9	2,9	2,4	0,8

Свойства некоторых бронзографитов приведены в таблице 3.17. Хорошей прирабатываемостью, но относительно низкой несущей способностью облада-

ют свинцовистые бронзы. При нанесении тонкого слоя бронзы на стальную подложку несущая способность материала значительно повышается (таблицы 3.18, 3.19).

Таблица 3.17 – Физико-механические и антифрикционные свойства бронзографита.

Материал	$\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	П, %	$\sigma_{в}$ , МПа	$\delta$ , %	НВ, МПа	$P_{max}$ МПа	$V_{max}$ , м/с	PV, МПа·м/с	f по стали
БрОГр10-3	-	20	98	2,5	343	4	5-10	1,5-6,9	0,04-0,07
БрОГр9-3	5,6-6,3	18- 20	79- 147	5-10	177- 294	4	5-10	1,5-6,9	0,04-0,07
БрОГр8-4	5,5-6,5	20- 25	-	-	167- 490	4	5-10	1,5-6,9	0,04-0,07
117 НД (9,5-10,5 % Sn, 75 % С)	6,8-7,2	7	137	3	-	-	-	-	-

Таблица 3.18 – Механические характеристики порошковых антифрикционных материалов на основе меди

Марка материала	Предел прочности при растяжении $\sigma_p$ , МПа	Предел прочности при изгибе $\sigma_{и}$ , МПа	Ударная вязкость $a_n$ , кДЖ/м
	не менее		
ПА – БрО	100	60,0	13,0
ПА – БрОГр	-	78,5	-
ПА – БрОГр2	-	70,0	-
ПА – БрОГр4	-	60,0	-
ПА – БрОЖГр	-	78,5	-
ПА – БрОХ	390	176,0	2,0
ПА – БрОХН	430	215,0	2,0
ПА – ДГр10	50	-	8,0

Таблица 3.19 – Эксплуатационные характеристики и области применения порошковых антифрикционных материалов на основе меди.

Марка	Условия работы	Область применения
ПА – БрО	При смазке маслом допустимое давление до 5 МПа при скорости скольжения 2 м/с. При ограниченной смазке маслом и в режиме самосмазывания допустимое давление до 1,9 МПа при скорости скольжения до 1,5 м/с в диапазоне температур от минус 60 °С до + 120 °С. Материалы не требуют дополнительной смазки в течение 3 - 5 тыс. ч, имеют низкий и стабильный коэффициент трения (0,01 – 0,04), низкий уровень шума.	Подшипники узлов трения приборов магнитной записи и воспроизведения, малогабаритных редукторов, электродвигателей, акустических приборов, машин по обработке пищевых продуктов, бытовых приборов, текстильных машин. Применяются вместо подшипников качения, литых сплавов на основе цветных металлов (бронз, баббитов).
ПА – БрОГр, ПА – БрОГр2, ПА – БрОГр4, ПА – БрОЖГр	При смазке маслом допустимое давление до 6 МПа при скорости скольжения до 2 м/с. В режиме самосмазывания допустимое давление до 3 МПа при скорости скольжения 1 – 2 м/с; материалы имеют коэффициент трения 0,03 – 0,06, низкий износ, бесшумные в работе.	Подшипники узлов трения швейных машин, аппаратов и приборов бытовой техники, соковыжималок, фенов, магнитофонов, электрических двигателей малой мощности, конвейеров, счетно-вычислительных машин, плат малогабаритных редукторов, автомобилей, тракторов, комбайнов, мотоциклов. Заменяют оловянные литые бронзы, латуни, подшипники качения.
ПА – БрОХ, ПА – БрОХН	Материалы предназначены для работы в условиях смазки при средних и тяжелых нагрузках (7 – 10 МПа), при незначительных скоростях скольжения (около 1 м/с). Могут подвергаться термообработке (закалке, старению), повышающей их физико-механические свойства. Коэффициент трения при смазке до 0,1, без смазки до 0,7.	Подшипники узлов трения в машино-, авто-, судо-, приборостроении, для гидронасосов; заменяют баббиты, литые бронзы типа марок БрО5Ц5С5; БрО12; БрО30; БрАЖ9-4.
ПА – ДГр10	Материалы предназначены для работы без смазки, при высоких скоростях скольжения (до 50 м/с), в присутствии активных жидких и газовых сред.	Узлы трения насосов, приборов и других механизмов, торцевые уплотнения быстровращающихся валов.

Сплавы системы медь-свинец предназначены для работы в масле, но в случае прекращения подачи смазочного материала роль его начинает играть свинец, который покрывает пленкой поверхность контртела.

Сравнительные свойства литых и порошковых свинцовистых бронз приведены в таблице 3.20.

Свойства пористых бронз и бронзографитов могут быть улучшены при сложном легировании такими элементами, как Ti, Ni, Pb, Zn, Co, Fe, Al, а также введением веществ, играющих роль твердых смазок.

Дальнейшее улучшение свойств бронз может быть обеспечено введением присадок, вызывающих упрочнение материала после закалки и отпуска. Состав и свойства некоторых специальных бронз, склонных к старению, приведены в таблице 3.21.

Таблица 3.20 – Сравнительные свойства литых и порошковых свинцовистых бронз

Массовая доля элементов, %			$\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	HV, ГПа	$\sigma_B$ при t=150 °C, МПа		R <sub>max</sub> , МПа
Cu	Pb	Sn			минимальное	среднее	
Литые сплавы							
70	30	0	9,10	3,43	-	55	24,0
Порошковые стали							
60	38	0	9,55	3,43	43	59	24,0
70	30	0	9,25	3,92	47	71	27,5
72	24	4	9,10	4,55	82	120	41,2

Таблица 3.21 – Состав и свойства специальных бронз, склонных к старению

Массовая доля, %					$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	1/ $\rho$ , % к 1/ $\rho$ Cu		HRB	
Ni	Cr	P	Be	добавки			твердый раствор	после старения	после получения	после старения
1	0	0,25	0	-	-	-	23,3	30,0	22	20
2	0	0,5	0	-	314	4	21,0	30,0	19	29
0	0	0,25	0	Mn-0.75	-	-	24,4	40,0	33	14
0	0	0,15	0	Mn-0.5	-	-	32,2	44,1	44	44
4	0	0	0	Sn-4	-	-	11,7	55,6	42	35
5	0	0	0	Sn-8	-	-	7,25	12,8	46	40
0	3	0,5	0	-	-	-	-	8,4	-	53
0	3	0,1	0	-	334	7	32,2	64,3	35	51
0	3	0,1	0	TiH <sub>2</sub> -0.5	353	8	33,5	69,1	38	68
0	0	0,5	0	Co-2	255	15	28,5	43,4	30	39
2,5	0	0,5	0,5	-	353	7	-	61,0	35	72
2,5	0	0,5	0,5	Si-0.5	422	2,5	-	35,5	35	80
0	0	0	0,5	So-2.5	540	3,1	-	41,6	35	85

Сложнолегированная бронза, содержащая 2,4 % Ni, 0,8 % Si, 0,3 % P, после закалки в воде от 850 °C и старения при 450 °C при пористости 12 % имеет предел прочности при растяжении около 340 МПа, удлинение 1 % и



HRB – 35-40. Подшипники из этого материала могут работать при нагрузке 15,7 МПа и скорости скольжения 9,4 м/с ( $PV = 147$  МПа·м/с).

В оловянные бронзы могут также вводиться Ag, В, Вi и др.

Для изготовления подшипников, работающих со смазкой при режимах, характерных для бронз, могут применяться порошковые латуни, содержащие от 10 до 50 % Zn.

В некоторых случаях в них дополнительно вводят до 1,5 % Pb и от 0,25 до 0,8 % P.

Такие материалы имеют предел прочности при растяжении от 127 до 274 МПа и относительное удлинение от 8 до 40 %.

Меднографитовые материалы применяют в основном для изготовления электроконтактов, радиальных уплотнений и электрощеток. В этих материалах медь обеспечивает высокую электрическую проводимость, а графит повышает износостойкость и регулирует контактное сопротивление.

Содержание графита в зависимости от назначения материала составляет от нескольких процентов до 75 %. Для улучшения свойств материалов, предназначенных для изготовления щеток, в них добавляют Sn, Pb, Zn.

### **3.3 Материалы на основе никеля и кобальта**

Порошковые материалы на основе никеля и кобальта предназначены для узлов трения, работающих в тяжелых условиях, связанных со значительными температурами, коррозионной активностью среды, высокими скоростями скольжения, ограниченной подачей смазочных материалов или их отсутствием и т.п.

Антифрикционные свойства улучшают введением свинца, графита и фторидов.

В качестве упрочняющих добавок в состав никелевых сплавов вводят Fe, Be, В, Мо, тугоплавкие соединения ( $SiC$ ,  $B_4C$ ,  $TiC$ ,  $WC$ ,  $MoB_2$ ,  $ZrB_2$ ).

В таблице 3.22 приведены состав и области применения некоторых антифрикционных сплавов на основе никеля и кобальта.

### **3.4 Материалы на основе алюминия**

Антифрикционные сплавы на основе алюминия являются перспективными заменителями оловянных бронз при работе со смазкой и в условиях трения без смазки.

Повышение антифрикционных свойств сплавов достигают введением 0,1-5 % кремния, до 4 % олова, 0,1-5 % магния. Комплексное легирование порошковых алюминиевых сплавов позволяет значительно расширить параметры и условия их работы.

Высокую жаропрочность, износостойкость и теплопроводность имеют материалы, содержащие 5-10 % одного или нескольких металлов из группы Fe, Ni, Cr и 0,5-5 % Si.

Наличие оксидной пленки на частицах алюминия повышает износостойкость материала, предотвращая заволакивание пор под нагрузкой, а мягкая основа обеспечивает его хорошую обрабатываемость.

Таблица 3.22 – Состав и области применения некоторых антифрикционных сплавов на основе никеля и кобальта

Массовая доля, %	Области применения
<b>Сплавы на основе никеля</b>	
Fe-41; Mo-15; C-3	Узлы трения, работающие в коррозионных средах, при ограниченной смазке, в режиме самосмазывания, при сухом трении, высокой скорости скольжения, t до 400 °C
Fe-18-45; MoB <sub>2</sub> , ZrB <sub>2</sub> или их смесь-5-10; BaF <sub>2</sub> , CaF <sub>2</sub> или их смесь-5-10	Подшипники, работающие без смазки и в вакууме
Fe-5-30; B-0.1-0.15; BaF <sub>2</sub> -1-30	Подшипники для работы без смазки при v = 5-25 м/с, p=0,1-1,5 МПа
Fe-18-45; CaF <sub>2</sub> или BaF <sub>2</sub> -5-10; MoB <sub>2</sub> , ZrB <sub>2</sub> -5-10	Подшипники для работы без смазки при скоростях скольжения 11-75 м/с
Fe-1-25; Cr-10-18; CaF <sub>2</sub> , BaF <sub>2</sub> , SrF <sub>2</sub> или их эвтектики-7-15	Подшипники для работы при t = 500-1000 °C
Cr-13.5-33; Mo-0.35-0.4; Al-0.5-0.25; Nb-15-40; один из карбидов Ti, Cr, V, Ta	Детали насосов, работающие в морской воде, детали турбин
Zn-6-9; Mn-1.5-2.5; Be-0.1-0.5; Pb-3-5; Sb-7-9; C до 0.3	Подшипники оборудования пищевой промышленности
<b>Сплавы на основе кобальта</b>	
Ni-9-11; Cr-2.5; W-7-8	Для работы в интервале 20-800 °C
Mo-28; Cr-8; Si-2.5	Детали для работы в условиях сильной коррозии и износа при t до 980 °C, в химической аппаратуре

Состав и области применения некоторых антифрикционных материалов на основе алюминия приведены в таблице 3.23.

Таблица 3.23 – Состав и области применения некоторых антифрикционных материалов на основе алюминия

Массовая доля, %	Области применения
Cu-3-4; Mg-0,5-0,8; Si-0,2; Sn-3; Fe-0,15; Pb-1,35-1,25; Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -0,3	Пористые подшипники
Cu-0,5-0,6; Mg-0,3-2; Si-5-50; Sn-1-4; Sb-0,2-2; Pb-инфильтрация	Подшипники для повышенных нагрузок
Cu-0,3-5; Mg-0,3-3; Cr-4-5; Fe-4-5; Ni-4-5; SiC-0.5-5	Поршни двигателей внутреннего сгорания
Cu-10; Sn-10; C-10-50	Подшипники, работающие в условиях самосмазывания
Cu-0,25; Mg-1; Si-0,6	Подшипники для сельхозмашин

Свойства графитизированных алюминиевых сплавов приведены в таблице 3.24.

Таблица 3.24 – Свойства графитизированных алюминиевых сплавов

Марка	Плотность $\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	Пористость П, %	Твердость НВ, МПа	Предел прочности на сжатие $\sigma_{сж}$ , МПа	$R_{max}$ , при $v = 2,3$ м/с	$t_{max}$ , °С
АЖГр6-3	2,6-2,8	5-10	196-235	137-147	3,9-5,9	100-200
АМГр10-3	2,8-2,9	5-10	294-343	226-235	3,4-4,9	100-120

### 3.5 Материалы на основе тугоплавких металлов и их соединений

Порошковые антифрикционные металлы на основе тугоплавких металлов и соединений обладают высокой износостойкостью и хорошими антизадирными свойствами.

Коэффициент трения их близок к 0,2 в области оптимальных условий работы и снижается с повышением температуры.

В связи с невысокой стойкостью к окислению сплавы на основе карбидов, нитридов, боридов и некоторых интерметаллидов используют при трении в воздушной среде при температурах не выше 500-540 °С.

Состав и области применения антифрикционных материалов рассматриваемого типа приведены в таблице 3.25.

Таблица 3.25 – Состав и области применения некоторых антифрикционных материалов на основе тугоплавких металлов и их соединений

Массовая доля, %	Области применения
W- основа; TiC-30-60	Детали, работающие в условиях гидроабразивного износа
Mo-основа; ZrC-40-55	То же
Fe-основа; Cr-20,5; Mo-2,0; Ni-0,2; C-0,5; Mn-1,0; TiC или WC-5-80	Быстроизнашивающиеся детали и уплотнительные элементы, работающие при $t > 300$ °С в коррозионно-активных средах
WB-основа; Ni-10,0; Ag-инфильтрация	Детали, работающие при $t$ до 450 °С в паре с инструментальной сталью и сплавом на основе Ni, Cr, Fe
Бронза или Al-сплав – основа; твердые сплавы состава WC-34-94; TiC-1-60; Co-5-6 или TiC-35-75; Ni-15-50; Co-5-15; Cr-5-15	Подшипники для тяжелых условий работы
W-основа; Cr-25; Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -15,0	Детали, работающие при температуре от минус 68 °С до + 940 °С на воздухе и в вакууме
Cr-основа; Mo-20; FeO-2; Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -19	То же
(Mo, Nb, Ta, W)-основа; MoS <sub>2</sub> , NbS <sub>2</sub> , TaS <sub>2</sub> , WS <sub>2</sub> -20-97	Для работы в интервале температур от 20 до 1300 °С

Тугоплавкие металлы играют и будут играть очень важную роль в космонавтике. Термин «тугоплавкий металл» определяет положение данного металла в ряду других в соответствии с положением точки его плавления относительно произвольно выбранного уровня, например, 1800 °С или 2000 °С.

Все четыре металла: вольфрам, молибден, тантал, ниобий окисляются на воздухе при относительно низких температурах, поэтому нагрев их до высоких температур должен осуществляться в вакууме, в защитной атмосфере или с применением специальных покрытий. Вольфрам, например, используемый для нитей накаливания в электролампах, начинает окисляться на воздухе при 300 °С.

Многие детали космических аппаратов, например, сопла ракет, работают в восстановительной атмосфере, или в вакууме. В этих условиях можно использовать чистый вольфрам, а не его сплавы, так как он обладает большой прочностью при температурах выше 1900 °С.

Одна из интересных областей применения пористого вольфрама – это использование его в качестве ионизатора в ионных ракетных двигателях.

Использование этих металлов в других областях зависит от создания сплавов с хорошей устойчивостью против окисления и новых защитных покрытий.

Данные о применении некоторых сплавов этих металлов приведены в таблице 3.26.

Таблица 3.26 – Применение тугоплавких материалов в космонавтике

Состав сплава, %	Область применения
Сплавы на основе молибдена Mo + 0,5 Ti Mo + 0,5 Ti + 0,08 Zr Mo + 0,5 Ti + 0,3 C Mo + 25 W Mo + 50 W	В условиях, требующих сочетания твердости и высокой прочности при повышенных температурах, например, для изготовления сопел ракет.
Сплавы на основе тантала Ta + 10 W Ta + 10 W + 1 Zr Ta + 30 Nb + 7,5 V Ta + 8 W + 2 Hf	Изготовление деталей ракетных двигателей, покрытие передних кромок крыла, сопел ракет.
Сплавы на основе вольфрама W + (0,5 ÷ 2) ThO W + Ag	Нити накаливания и другие детали, работающие при температурах вплоть до 1900 °С. Изготовление ракетных сопел.
Сплавы на основе ниобия Nb + 10 W + 1 Zr + 0,1 C Nb + 30 Ta + 0,8 Zr Nb + 20 W + 1 Zr	В условиях, требующих высоких прочностных характеристик при повышенных температурах.

*Сплавы молибдена.* В таблице 3.26 указаны три промышленных сплава молибдена: Mo + 0,5 % Ti, Mo + 0,5 % Ti + 0,08 % Zr и Mo + 0,5 % Ti + 0,3 % C.

Эти сплавы, содержащие титан или титан и цирконий, имеют высокий предел прочности и предел текучести, сохраняя эти свойства при высоких температурах. Два других сплава – Mo + 25 % W и Mo + 50 % W разработаны лишь недавно. Эти сплавы представляют собой твердые растворы, образованию которых способствует сходство кристаллической структуры вольфрама и молибдена. Оба сплава имеют кристаллическую решетку типа о.ц.к., точка плавления сплавов промежуточна по отношению к температурам плавления вольфрама и молибдена. Сплавы молибдена используются в качестве высокотемпературных материалов для работы при температурах, превышающих точку плавления чистого молибдена.

*Сплавы тантала.* Тантал – наименее распространенный из четырех тугоплавких металлов. Повышенный интерес к этому металлу основывается на его способности к образованию сплавов, имеющих эффективные свойства при сверхвысоких температурах и нашедших применение в космических летательных аппаратах и в системах ракетных двигателей.

Четыре сплава на основе тантала указаны в таблице 3.26. Сплавы Ta – W обладают сочетанием высокотемпературных свойств обоих компонентов, например сплав Ta + 10 % W в виде ленты может работать при нагреве до температуры 2480 °С, а в виде цементированной плотной массы в таких деталях, как ракетные сопла, - до температур ~3400 °С. Это свойство очень ценно для космических материалов, так как температура на поверхности космического корабля в короткие периоды может достигать 8500 °С. Сплав T-111, новый сплав с составом Ta + 8 % W + 2 % Hf, обладает сверхпрочностью в диапазоне температур от 1090 °С до 1925 °С. Сплав имеет отличную пластичность и хорошую свариваемость.

*Сплавы вольфрама.* До недавнего времени единственным сплавом вольфрама, имеющим промышленное значение, был сплав вольфрама с окисью тория (W + 0,5..2,0 % ThO). Сплав разработан много лет назад для создания непровисающей нити накала в электролампах. Испытания этого сплава в качестве материала для изготовления сопел ракет дали хорошие результаты. Недавно в соплах, подверженных воздействию выхлопных газов от сгорания твердого топлива, был испытан пористый вольфрам, пропитанный серебром. Введение серебра увеличивает теплопроводность сплава, а его испарение приводит к охлаждению поверхности сопла.

*Сплавы ниобия.* Значительный интерес к сплавам ниобия в конце пятидесятых годов был обусловлен возможностью использования этих сплавов в ядерных космических двигателях.

В настоящее время интерес к разработке сплавов ниобия и потреблению ниобия увеличился.

Сплавы ниобия используются для изготовления радиаторных трубок – носителей жидкого металла в силовых системах ядерных космических ракет.

### 3.6 Металлографитовые материалы

Металлографитовые материалы содержат более 4-5 массовых процента графита. Физико-механические и антифрикционные свойства таких сплавов в значительной мере определяются их составом и плотностью. С увеличением содержания углерода в структуре порошкового материала уменьшается количество межчастичных контактов металл-металл и возрастает число контактов металл-графит и графит-графит, снижающих прочность композиции.

Для повышения прочностных характеристик металлографитовых материалов применяют двукратное прессование и спекание, горячее прессование, жидкофазное спекание и т.д. Высокий уровень свойств позволяет использовать эти материалы для изготовления подшипников скольжения и торцевых уплотнений, применяющихся в различных отраслях машиностроения, для агрегатов текстильной и пищевой промышленности, при изготовлении деталей электротехнического назначения и др. (таблица 3.27).

Таблица 3.27 – Состав и области применения металлографитовых материалов

Массовая доля, %		Области применения, условия работы
С	Добавки	
На основе железа		
2-20 10-30	Cu-до 15 -	Работа в присутствии смазки Работа без смазки в тяжелых условиях трения: при t от минус 200 °С до + 600 °С в среде воды, газов, паров; при t до 900 °С и v ск до 45 м/с
10-15 до 8 4-25	Bi, As, Sb-1.5-3.5 TiH-2-5.0 Ni-18.0	Для работы при t = 50-370 °С, P = 0,2-1,0 МПа и V <sub>ск</sub> = 4,35-35,6 м/с Для работы без смазки Для тяжелых условий работы при высоких нагрузках, повышенной запыленности, при трении без смазки
315	Pb -до 20; Cu-до 25; Ni-15	Ползуны
На основе сплава Fe-Ni		
10	Mn-2; ZnS-2.5	Для работы в режиме самосмазывания при высоких скоростях скольжения, при работе в воде
На основе меди		
4-20	Pb, Al, P, Sn, Zn -9-10	Ползуны, уплотнения, подшипники 15-16 Pb-10-12, Для работы без смазки
На основе бронзы или латуни		
4-25	-	Для работы при температуре от минус 200 °С до + 350 °С в паре, воде, газах
На основе сплава Cr-Co		
15-30 4-17 10-16	- - Mg-2.5-5	Материалы с высокой теплопроводностью и износостойкостью, для изготовления контактов, щеток генераторов То же То же
На основе серебра		
10	-	То же

*Углезрафитовые материалы* характеризуются значительной прочностью при высоких температурах, химической инертностью, малой плотностью, хорошими электрофизическими свойствами, а также возможностью регулирования теплопроводности и электрического сопротивления в широких пределах. В то же время они обладают недостаточными термопрочностью и стойкостью к тепловому удару, малой ударной вязкостью и хрупкостью, что ограничивает их применение.

Эти недостатки в большей степени отсутствуют у композиционных материалов на основе углеродного волокна (УВ) в качестве армирующего элемента и объемно-изотропной матрицы в виде поликристаллической углеродной массы, получивших название углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ).

При получении УУКМ необходимо разделить УВ на филаменты, смешать его с порошком пека и произвести набор пресс-пакетов для дальнейшей переработки. Для реализации этих процессов мы использовали два способа.

*Первый способ.* Углеродистое волокно и пек перемешивают в гидросмесителе. Под действием турбулентных потоков воды волокна измельчаются, разделяются на филаменты и смешиваются с пеком. Диспергированную массу обезвоживают в нутч-фильтрах и сушат до постоянного веса. Полученные пресс-пакеты прессуют, термообработывают при  $t = 900 - 1200$  °С, несколько раз пропитывают пеком, карбонизируют при  $t = 950$  °С и графитизируют при  $t = 2300$  °С. В результате получают УУКМ с плотностью  $\rho = 1,8 - 1,85$  г/см<sup>3</sup>, в котором исходное УВ измельчено до длины 0,5 - 2,0 мм. Прочность при изгибе такого композита (марка ФУУМ-1) составляет 60 - 100 МПа, что примерно соответствует серийному материалу Термар-ДФ ( $\sigma_{изг} = 80 - 85$  МПа). Количество вводимого волокна варьировали от 55 до 95 мас. %. В некоторых экспериментах в исходную шихту добавляли до 3 мас. % порошка ВN; такому материалу присвоена марка ФУУМ-2. Обе композиции имеют одинаковые физические и механические свойства.

*Второй способ.* С целью повышения прочностных характеристик УУКМ применяли другой способ, для реализации которого была изготовлена специальная установка. Принцип ее работы заключается в следующем: углеродное волокно, нарезанное до длины 5 – 10 мм, воздушным потоком направляется в камеру, где разделяется на филаменты и измельчается, затем по трубопроводу оно попадает в смесительную камеру, в которой осуществляется его смешение с порошкообразным пеком. Полученная масса осаждается в наборной гильзе с помощью направленного воздушного потока. После прессования заготовки термообработывают при  $t = 900 - 1200$  °С, пропитывают несколько раз фенолформальдегидной смолой, карбонизируют и графитизируют при  $t = 2300$  °С. В конечном итоге получают УУКМ с  $\rho = 1,8 - 1,85$  г/см<sup>3</sup> и  $\sigma_{изг} = 150-160$  МПа (марка АФФ), прочностные свойства которого несколько выше таковых серийного материала Термар-ДФ. Количество УВ в этих УУКМ также изменяли в пределах 55 – 95 мас. %.

Согласно проведенным исследованиям, оптимальным количеством вводимого углеродного волокна следует считать 75 – 85 мас. %, так как при добавке другого

количества УВ получаемый композиционный материал имел более худшие эксплуатационные показатели. Композиции, армированные УВ с диаметром филамента 5 мкм, показали наилучшие антифрикционные свойства. Фрикционно-износные характеристики в значительной степени определяются структурой продуктов износа, которые формируются в процессе трения на межфазной поверхности. Для материала ФУУМ-1 они представляют собой набор частиц крупностью 0,1-10,0 мкм с превалированием размера 0,5 мкм. Это сравнительно большие агрегаты слоистого строения и отдельные частицы анизотропной формы, являющиеся продуктами разрушения первично возникшей пленки, которая образовалась в ходе дальнейшей графитизации графита высокой степени совершенства. Образующаяся на поверхности трения исследуемых композиционных материалов пленка состоит из частиц продуктов износа в виде пакетов из углеродных слоев и неупорядоченного углерода. Ее поверхностный слой представляет собой паркетную структуру из шестиугольников-гексагонов.

### **3.7 Металлические двухслойные материалы на стальной подложке**

Простота изготовления и высокие эксплуатационные свойства подшипников из материалов этого типа обусловили широкое распространение их в автомобиле-, тракторо-, авиастроении и других областях техники. Подшипники из них изготавливают методом вырубки из полосы и свертывания или выдавливания вкладышей.

Разновидностями таких материалов являются материалы с основой в виде стальной ленты с напеченным бронзовым пористым слоем с дополнительной инфильтрацией антифрикционного сплава (баббита, сплава на основе меди или алюминия), а также слоем, пропитанным фторопластом или смазочным материалом.

Например, применяющийся в промышленности материал с полимерной пропиткой, имеет следующие характеристики: полоса из малоуглеродистой стали с нанесенным на нее тонким подслоем меди, улучшающим условия спекания; пористый слой из сферических частиц бронзы толщиной 0,1-0,4 мм (объемная доля пор 38-40 %); наполнитель – фторопласт с дисульфидом молибдена. Поверхность пористого слоя покрыта тонким слоем фторопласта.

Такой материал способен работать без смазки при температуре 200-300 °С в нейтральных и агрессивных жидкостях, газовых средах, в космическом вакууме. Коэффициент трения при небольших скоростях скольжения равен 0,03-0,04 (при повышении скорости он резко возрастает).

В таблице 3.28 приведены значения PV для материалов этого типа при различных условиях работы.



Таблица 3.28 – Допустимые значения PV, МПа·м/с, для биметаллических вкладышей с пористым слоем, пропитанным фторопластом

Типичные случаи применения	Контртело – мягкая сталь (а также чугуны, нержавеющие стали, анодированный алюминий)		Контртело – закаленная сталь, 530 HV	
	Продолжительность работы, ч			
	1000	10000	1000	10000
Упорные кольцевые подшипники (подпятники)	0,863	0,417	1,040	0,520
Направляющие	0,416	0,206	0,451	0,246
Цилиндрические подшипники: с постоянной нагрузкой	0,554	0,417	0,863	0,657
с вращающейся нагрузкой	0,863	0,657	1,040	0,834
с фиксированной нагрузкой и воз- вратно-поступательным движением	1,040	0,800	1,148	0,834

#### 4 Фрикционные материалы

Использование фрикционных материалов основано на высоких значениях коэффициента трения и повышенной износостойкости. Они предназначены для работы в узлах, передающих кинетическую энергию (устройства сцепления) или рассеивающих ее (тормозные устройства).

Порошковые фрикционные материалы предназначены для работы в различных тормозных и передаточных узлах самолетов, автомобилей, гусеничных машин, дорожных и строительных механизмов, станков, прессов и т.п.

Фрикционные элементы с порошковыми материалами изготавливают в виде дисков, секторных накладок и колодок различной конфигурации. Они представляют собой как правило, конструкцию, состоящую из стального несущего каркаса, облицованную с одной либо с двух сторон слоем спеченного фрикционного материала.

Во фрикционных материалах сочетается металлическая несущая матрица, обладающая необходимыми свойствами: прочностью, износостойкостью, жаропрочностью и пластичностью, с хрупкими наполнителями, обеспечивающими достижение требуемых значений коэффициента трения и их стабильность, и предотвращающие схватывание. В связи с этим порошковые фрикционные материалы представляют собой сложные композиции из металлических и неметаллических порошков. Доля последних нередко достигает 50-60 об. %. Высокое содержание неметаллических добавок снижает прочность металлической основы, ухудшает прессуемость и требует приложения: нагрузки при спекании. Именно из-за хрупкости фрикционного материала, как было сказано выше, изделия изготавливают путем припекания фрикционного слоя к стальной прокладке. В качестве компонентов, образующих металлическую матрицу материалов, обычно используют порошки меди и железа.

Для фрикционных материалов на медной основе наиболее подходящим является медный порошок с дендритной формой частиц, полученный электролизом. Для изготовления обычно используют порошки марок ПМА, ПМ, ПМС-1, ПМС-2, ПМС-К.

Для изготовления фрикционных изделий на железной основе используют порошки марок ПЖ1, ПЖ2, ПЖ3 (ГОСТ 9849-86), изготавливаемые методом восстановления. Они имеют разветвленную форму частиц, уменьшаемую методом различных присадок и улучшающую прессуемость. Рекомендуется применять и очень мелкие железные порошки, так как с увеличением дисперсности порошка улучшаются фрикционные характеристики.

В качестве фрикционной добавки в материалах на бронзовой и железной основах наибольшее распространение получил диоксид кремния. Дисперсность и форма частиц могут изменяться в очень широких пределах и зависят от состава предъявляемых к нему требований. Для изготовления фрикционных материалов на основе железа используют кварцевый песок первого, второго и третьего классов, содержащий не менее 94 % оксида кремния (ГОСТ 2138 - 91).

Основными типами порошковых материалов, предназначенных для тормозных передаточных устройств, являются материалы на железной и медной основах. Обычно они применяются для тяжелых и самых тяжелых условий работы и, как правило, используются в условиях сухого трения. Материалы на медной основе предназначены для работы в более легких условиях и применяются как при сухом трении, так и при работе с жидкостной смазкой.

Сорт графита не влияет существенно на фрикционные свойства материала, поэтому возможно применение порошков графита различного происхождения, выпускаемых по ГОСТ 5279-74.

Форма и размер частиц порошка олова существенно не влияют на технологические свойства и структурообразование. В производстве фрикционных материалов используют порошок олово, получаемый методом распыления (олово марки ПО, ГОСТ 9723-73).

Другие легкоплавкие металлы – свинец, висмут, сурьма, мышьяк – применяют для материалов на медной и железной основах в качестве твердых смазок.

Свинцовый порошок изготавливают методом распыления. У свинца марок ПСА и ПС1 75 – 90 % частиц имеет размер не менее 45 мкм.

К специфическим условиям работы фрикционных материалов относятся: широкий диапазон скоростей скольжения (до 50 м/с) и нагрузок (до нескольких МПа); высокий уровень нагрева трущихся поверхностей вследствие трения без смазки; трение в нестационарных условиях при многократных нагревах и охлаждениях; различная продолжительность контактирования трущихся поверхностей.

Фрикционные материалы состоят из основного металла, компонентов, улучшающих механические и теплофизические свойства основы, и веществ, увеличивающих коэффициент трения трибосистемы и повышающих сопротивление материала схватыванию (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Условия работы и область применения фрикционных материалов

Марка	Условия работы материалов	Область применения
ПА – Ж, ПА – ЖК	Работают при обильной смазке при давлении до 2,5 МПа и скоростях скольжения 1 – 2 м/с. В режиме самосмазывания нагрузки до 1,5 МПа, коэффициент трения 0,03 – 0,06. Присутствие серы увеличивает срок службы и улучшает обрабатываемость материала.	Прецизионные подшипники приборов, бытовой аппаратуры, счетно-решающих машин, текстильного оборудования.
ПА – ЖД ПА – ЖДК ПА – ЖГр2, ПА – ЖГр3, ПА – ЖГрД, ПА – ЖГрД5, ПА – ЖГр2Д	Работают в условиях ограниченной и обильной смазки при давлениях 4 и 10 МПа соответственно и скорости скольжения до 3 м/с, в режиме самосмазывания давление до 2 МПа. Коэффициент трения 0,035 – 0,0125 в зависимости от количества смазки и состава материала. Материалы с увеличенным содержанием графита работают на верхнем пределе указанных нагрузок, при скоростях скольжения до 5 м/с имеют большой срок службы, меньший износ и коэффициент трения. Присутствие серы увеличивает износостойкость и улучшает обрабатываемость материала.	Подшипники сельскохозяйственных станков, приборов, аппаратов бытовой техники, автомобилей, например детали телескопических амортизаторов, редукторов лебедки.
ПА – ЖГрК, ПА – ЖГр2К, ПА – ЖГрДК, ПА – ЖГрДК1, ПА – ЖГрДК6, ПА – ЖГрЦс	Работают в режиме самосмазывания и ограниченной подачи смазки при давлении до 12 МПа, при скоростях скольжения 3 – 8 м/с, при повышенных температурах (до 250 °С). Коэффициент трения 0,01 – 0,1	Подшипники скольжения и другие детали узлов трения автомобилей, станков, различных машин и механизмов, например втулки направляющей клапана, компрессора бытового холодильника.
ПА – ЖГрЛ	Работает в условиях ограниченной смазки при давлении 8 МПа, скорости скольжения 2 – 5 м/с и температуре от минус 60 до + 100 °С; коэффициент трения не более 0,1 и улучшенная притираемость по сравнению с латунью.	Пробки кранов воздушных, водных, паромасляных и других систем, например кранов тормозных систем паровозов, вагонов.
ПА – ЖГр3Цс	Работает в режиме самосмазывания и ограниченной смазки при скоростях скольжения до 100 м/с; при давлениях до 20 МПа в случаях скорости 5 – 10 м/с. Работает в паре с закаленными сталями, имеет высокую износостойкость (до 8 раз большую, чем бронзы, баббиты, подшипники качения, чугуны), низкий коэффициент трения (0,02 – 0,2), величина которого зависит от условий трения.	Подшипники, втулки, вкладыши торцевые уплотнения быстровращающихся валов различных машин, двигателей, приборов

Фрикционные элементы с порошковыми материалами изготавливают в виде дисков, секторных накладок и колодок различной конфигурации. Они представляют собой, как правило, конструкцию, состоящую из стального несущего

щего каркаса, облицованного с одной или с двух сторон слоем порошкового фрикционного материала.

#### 4.1 Материалы на основе железа

Среди материалов на железной основе большое распространение получили ФМК-8, ФМК-11, МКВ-50А и СМК, предназначенные для работы в тяжело-нагруженных колесных и дисковых тормозах. Составы некоторых фрикционных материалов приведены в таблица 4.2.

Таблица 4.2 – Состав некоторых фрикционных материалов на основе железа для сухого трения

Марка материала	Массовая доля, %				
	Fe	Cu	C (графит)	ас-бест	другие добавки
1. ФМК-11	64	15	9	3	BaSO <sub>4</sub> -6; SiO <sub>2</sub> -3
2. МКВ-50А	64	10	8	3	FeSO <sub>4</sub> -5; SiC-5; B <sub>4</sub> C-5;
3. СМК	40-65	9-25	-	-	Mn-6,5-10; BN-6-12; SiC-1-6; B <sub>4</sub> C-8-15; MoS <sub>2</sub> -2-5;
4. СМК-80	48	23	-	-	Mn-6,5; MoS <sub>2</sub> -2,5; BN-6,5; B <sub>4</sub> C-9,5
5. СМК-83	54	20	-	-	Mn-7; MoS <sub>2</sub> -2; BN-6,5; SiC-1; B <sub>4</sub> C-9,5
6. ...	60-75	—	10-25	-	SiC<20; муллит, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; MoS <sub>2</sub> ; Pb, Sn<20
7. ...	55-75	30	-	6	SiO <sub>2</sub> -6; P<1; Al<9

ФМК-11 обладает более высоким и устойчивым коэффициентом трения, чем ФМК-8, но уступает ему в износостойкости. МКВ-50А относительно стабилен при температурах до 600 °С.

По величине и стабильности коэффициента трения он превосходит ФМК-11.

Высокими фрикционными свойствами при работе в тяжелых условиях обладает материал СМК. Его различные модификации применяют в дисковых тормозах открытого и закрытого типа, тяжело нагруженных ленточных и колодочных тормозных устройствах, для оснащения тормозных устройств тяжелых автомобилей (грузоподъемностью до 65 т и более).

Материалы № 1-5 предназначены для использования в тяжелых условиях работы, при которых температура на поверхности трения может достигать 1200 °С.

Материалы № 6-7 рекомендованы для оснащения тормозных устройств скоростных поездов. К примеру, коэффициент трения колодок из материала 6

равен 0,28-0,43, а износ 83 мкм на 1000 км пробега. Материал отличается высоким содержанием фрикционных добавок ( $\text{SiC}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) и противозадирных присадок (графит,  $\text{Mo}_2\text{S}$ ,  $\text{Pb}$ ).

Фрикционные свойства некоторых материалов на основе железа, предназначенных для сухого трения, приведены в таблице 4.3.

В состав материала входили следующие компоненты: железный порошок ПЖР 2.200.28 ГОСТ 9849-86 и графит искусственный специальный малозольный ГИСМ ТУ 48-20-54-84.

Приготовление шихты производилось в планетарной мельнице САНД-1 с соотношением массы шариков к массе шихты 2,5:1 при диаметре шариков от 5 до 10 мм и частоте вращения ротора  $300 \text{ мин}^{-1}$ .

Статическое холодное прессование проводилось на гидравлическом прессе модели 2ПГ-125 при давлении прессования 100-800 МПа. ГШ заготовок производилась на фрикционном молоте и лабораторном копре. Приведенная работа уплотнения составляла  $W=250 \text{ МДж/м}^3$ . Плотность ПМ, полученных по схеме СХП+ГШ составила  $(7,3-7,7) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ .

Из материалов на железной основе наибольшее распространение получили ФМК-11, МКВ-50 А и СМК. Составы и некоторые физико-механические свойства этих материалов приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.3 – Фрикционные свойства некоторых материалов на основе железа

Фрикционная пара	$V_0$ , м/с	Р, МПа	$N_T$ , Вт/мм <sup>2</sup>	$W_T$ , Дж/мм <sup>2</sup>	$f_{CP}$	$f_{CP}/f_{max}$	I за 1 торможение, мкм		$t_s$ , °C
							фрик. мат.	контртело	
ФМК-11 - 38ХС	20	1,2	-	15,7	0,21	0,70	30,0	не ощутим	-
ФМК-11 - СЧ21	12	0,4	-	4,41	0,31	0,85	0,4	0,3	-
ФМК-11 - ЧНМХ	20	0,46	2,45	53,0	0,27	0,90	16,0	2,0	430
ФМК-11 - ЧНМХ	20	0,46	5,10	53,0	0,21	0,70	44,0	0	590
МКВ-50А - 38ХС	20	1,2	-	15,7	0,29	0,74	7,0	1,5	-
МКВ-50А - СЧ21	12	0,4	-	4,41	0,35	0,80	0,6	0,5	-
МКВ-50А - ЧНМХ	20	0,46	2,45	53,0	0,37	0,90	6	5,5	500
МКВ-50А - ЧНМХ	20	0,46	5,10	53,0	0,28	0,70	13	4,0	610
СМК-80 - 35	10,25	1,52	0,88	1,76	0,10	0,67	3,4	-	130
СМК-80 - 35	10,25	5,7	3,52	1,76	0,10	0,67	8,3	-	400
СМК-80 - 35	44	1,52	3,84	31,4	0,11	0,44	9,5	-	720
СМК-80 - 35	44	5,7	11,77	31,4	0,10	0,63	18	-	1060
СМК-80 - СЧ21	20	1,2	-	1,23	0,36	0,80	0,04	0,07	-
СМК-83 - СЧ21	12	0,4	-	4,41	0,37	0,80	0,3	0,2	-

Таблица 4.4 - Составы атифрикционных материалов на основе железа

Марка	Массовая доля, %					
	Fe	Cu	Ni	C(графит)	SiO	Другие добавки
ФМК-11	64	15	0	9	3	BaSiO 6
МКВ-50А	64	10	0	8	0	FeSO 5 Mn6,5
СМК	40-65	9-25	0	0	0	B C8 MoS

#### 4.2 Материалы на основе меди

Применяемые в условиях сухого трения порошковые фрикционные материалы на основе меди и ее сплавов, обладая достаточно высоким коэффициентом трения и хорошей износостойкостью, успешно работают в тормозных и передаточных устройствах различного назначения. По сравнению с материалами на основе железа они значительно меньше истирают сопряженную деталь, изготовленную из стали или чугуна. В таблице 4.5 представлен химический состав некоторых из таких материалов.

Таблица 4.5 – Состав некоторых фрикционных материалов на медной основе для сухого трения

Номер материала	Массовая доля, %				
	Sn	Pb	Fe	C	другие добавки
1	-	-	-	-	муллит - 20; Bi - 15; SiO <sub>2</sub> - 5
2	-	-	-	7,5	Bi-10; Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> или MgO-15
3	7	8	-	8	TiO <sub>2</sub> - 10; SiO <sub>2</sub> - 7
4	8-10	6-12	4-6	5-9	SiO <sub>2</sub> - 4.5-8
5	6-10	<10	<5	1-8	Ti, Y, Si, As-2-10; MoS <sub>2</sub> <6
6	5	0,5	8	4	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -5; MoO <sub>3</sub> -6; SiO <sub>2</sub> -3,5; асбест-2
7	6-10	6-12	4,5-8	5-9	Si-4-6
8	5-12		<10	9	Si, SiO <sub>2</sub> , SiC, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <10

Материалы 1-2 (см. таблицу 4.5) применяют для изготовления авиационных тормозных дисков. Роль фрикционных добавок в них играют оксиды кремния, алюминия или магния.

Материалы 3-4 используют для тормозных дисков железнодорожного транспорта. Материалы на основе оловянных бронз (материалы 3-8) нашли широкое распространение в автомобиле- и тракторостроении. Олово, входящее в их состав придает металлической основе повышенную прочность, свинец и

графит играют роль твердой смазки, железо, диоксид кремния или кремний повышают коэффициент трения.

В таблице 4.6 приведены значения коэффициента трения при работе без смазки некоторых материалов на медной основе.

Таблица 4.6 – Коэффициенты трения (f) некоторых материалов на основе меди при сухом трении

Номер материала	Условия испытаний	f
5	Трение по стальному диску, V до 30-35 м/с, p = 3,0 МПа	0,23-0,28
6	Трение по стальному диску, V до 35 м/с, p = 2,5 МПа	0,51
7	В колодочном тормозе V=12 м/с, p-3,5 МПа, время 3 мин по сырому чугуноу	0,4-0,5
8	Трение по стальному диску, V = 6-8 м/с, p – 2,4-3,2 МПа	0,32-0,35

Наиболее широкое применение нашли порошковые фрикционные материалы на медной основе для работы в тормозных и передаточных узлах трения в условиях жидкой смазочной среды. Преимущества масляных фрикционных устройств состоят в плавности включения, большей долговечности, легкости и надежности охлаждения. При этом, однако, следует иметь в виду, что замена сухого фрикционного узла на устройство, работающее в условиях контакта с жидкими смазочными материалами, влечет за собой снижение фрикционной активности. Поэтому для обеспечения высокой энергоемкости тормозных и передаточных устройств, работающих в масле, давление на поверхностях трения повышают до 6-7 МПа. Порошковые фрикционные материалы на основе меди характеризуются высокой износостойкостью при работе в тяжело нагруженных муфтах сцепления, фрикционах и тормозах. Химический состав некоторых фрикционных материалов на основе меди и ее сплавов, предназначенных для работы в маслах, представлен в таблице 4.7.

Такие материалы как МК-5, МП-11, ФОБ применяют также в условиях сухого трения.

Материалы 6 и 7 (см. таблицу 4.6) при определенных условиях работы обладают повышенными коэффициентами трения. Так при p = 2,53 МПа, V<sub>ск</sub> = 3,9 м/с и t масла 90-110 °С за 1000 торможений имеют износ 0,31 мкм при коэффициенте трения 0,102 (работа в масле АУ) или 0,124 (работа в масле ВНИИ-НП-1). Эти материалы используют в автоматических коробках передач.



Таблица 4.7 – Составы некоторых фрикционных материалов на медной основе для работы в условиях жидкой смазочной среды

Марка материала	Химический состав, %							
	Cu	Fe	Sn	Pb	Ni	C	ас-бест	Другие добавки
М-88Б	основа	6	9	4	-	4	2	бентонит 2
М-110	основа	4	9	7	-	5	3	
М-140	основа	4	9	8	-	4	-	муллит 1,5
МК-5	основа	6-8	8-10	7-9	-	3-5	-	
МП-11	основа	4	10	5	-	4	9	пульвербакелит 11
ФАБ	основа	5	-	8	-	7	-	алюминий 11
ФАОБ	основа	5	2	7	-	8	-	алюминий 4
ФМК-8	-	основа	-	-	25	7	-	Cr 10; W 6; Cu <sub>2</sub> S 7
ФМК-11	15	основа	-	-	-	9	3	BaSO <sub>4</sub> 6; SiO <sub>2</sub> 3
МКВ-50А	18	основа	-	-	-	8	3	FeSO <sub>4</sub> 5; SiC 5; B <sub>4</sub> C 5
СМК-80	23	основа	-	-	-	-	-	Mn 6,5; BN 6,5; B <sub>4</sub> C 10; SiC 3,5; MoS 2,5

Основные служебные характеристики фрикционных материалов на основе алюминиевой бронзы (типа ФАБ), алюминивно-оловянистой бронзы (типа ФАОБ) и оловянистой бронзы (типа МК-5) при работе в условиях жидкой смазки приведены в таблице 4.8 (контртело – сталь 65Г).

Долговечность и мощность узла трения определяется не только фрикционным материалом, но также и материалом контртела. Наиболее часто для изготовления сопряженных деталей (контртел) применяют углеродистые и легированные стали (например, стали 20, 35, 40, 45, 65) и чугуны (СЧ15, СЧ18, МФ, ЧНМ, ЧНМХ и др.).

Таблица 4.8 – Служебные характеристики фрикционных материалов

Материал	V <sub>СК</sub> , м/с	P, МПа	W <sub>T</sub> , Дж/мм <sup>2</sup>	f	I за 100 тормож., мкм
МК-5	20	3,8	2,06	0,05	1,4
МК-5	15	1,45	0,59	0,06	0,4
ФАБ	20	3,8	2,06	0,04	0,5
ФАОБ	20	3,8	2,06	0,05	0,3

Эффективным методом улучшения фрикционных характеристик узлов трения для работы в средне- и тяжело нагруженных условиях является применение контртел из порошковых материалов.

В таблице 4.9 приведены сравнительные характеристики пар трения с контртелами из чугуна и из порошкового материала (диски с наружным диа-

метром 75 мм испытывали при сухом трении в режиме: начальная скорость скольжений – 20 м/с; удельная работа трения 1,47 Дж/мм<sup>2</sup>; давление – 0,25 МПа).

Таблица 4.9 – Характеристики трения фрикционных пар с контртелами из чугуна и порошкового материала

Фрикционная пара	f	F <sub>ср</sub> /f <sub>макс</sub>	I за 100 торможений, мкм		
			ФАБ	СМК	СЧ18
ФАБ-СЧ18	0,38	0,87	15	–	50
СМК-СЧ18	0,34	0,78	-	15	20
ФАБ-СМК	0,60	0,87	10	8	–

## 5 Инструментальные материалы

В эту группу входят материалы, предназначенные для изготовления инструментов, применяемых при обработке резанием, а также при обработке давлением. Основные требования к этим материалам – высокая твердость, износостойкость, инертность по отношению к обрабатываемому материалу, способность противостоять высоким давлениям, вибрационным и ударным нагрузкам, резким изменениям температуры.

В группу инструментальных материалов входят: твердые сплавы, карбидостали, быстрорежущая сталь и сверхтвердые материалы на основе алмаза и плотных модификаций нитрида бора.

### 5.1 Твердые сплавы

Порошковые твердые сплавы впервые появились в 1923-1925 годах (изготовитель – германская фирма "Осрам", по патентам Шреттера), что позволило увеличить скорости резания в 5-10 раз. При эксплуатации инструмента выяснилось, что дорогостоящий вольфрам, используемый при изготовлении твердых сплавов, дает гораздо больший эффект, чем, например, в составе быстрорежущей стали. Так, инструментом с одной и той же массой вольфрама, в случае применения твердосплавного инструмента можно обработать в 6 раз больше металла, чем инструментом из быстрорежущей стали.

В нашей стране промышленное производство твердых сплавов было начато на Московском электрозаводе в 1929 году выпуском вольфрамокобальтового твердого сплава марки ВК10 ("победит").

Большая часть имеющихся твердых сплавов предназначена для обработки резанием различных материалов, в том числе чугуна, нержавеющей, жаропрочных и специальных сталей и сплавов. Важной областью применения твердых сплавов является их использование для волочения и калибрования проволоки, прутков, труб и т. д. Штамповый твердосплавный инструмент высокой прочно-

сти и износостойкости применяют для работы в условиях ударных нагрузок и для высокопроизводительного горного инструмента (таблица 5.1).

Таблица 5.1 - Основные группы применения твердых сплавов по ИСО

Обозначение	Обрабатываемый материал. Тип стружки	Вид обработки. Условия применения
P01 (T30K4)	Сталь. Сливная стружка	Чистовое точение, растачивание, развёртывание (высокая точность обработки)
P10 (T15K6)	Сталь. Сливная стружка	Точение, в том числе по копиру, нарезание резьбы, фрезерование
P20 (T14K8)	Сталь, ковкий чугун и цветные металлы. Сливная стружка.	Точение, в том числе по копиру, фрезерование, чистовое строгание
P25 (TT20K9)	Сталь нелегированная и среднелегированная. Сливная стружка	Фрезерование, в том числе глубоких пазов, другие виды обработки, при которых у сплава должно быть высокое сопротивление тепловым ударам

### 5.1.1 Классификация и маркировка твердых сплавов

Твердые сплавы представляют собой сплавы на основе карбидов тугоплавких металлов (WC, TiC, TaC) и металлической связки (кобальта или никеля). Твердые сплавы обычно содержат 70-97 % тугоплавких карбидов. Они обладают высокой твердостью (86-92 HRA), красностойкостью (800-1000 °C) и износостойкостью при меньшей прочности ( $\sigma_{изг} < 250$  МПа) по сравнению с быстрорежущей сталью.

Твердые сплавы условно делятся на 4 группы:

- 1) однокарбидные вольфрамовые, состоящие из карбида вольфрама (WC) и кобальта;
- 2) двухкарбидные титановольфрамовые, состоящие из карбида вольфрама (основа), карбида титана и кобальта (WC-TiC-Co);
- 3) титанотанталовольфрамовые твердые сплавы, в состав входят карбиды вольфрама (основа), титана, тантала и кобальта (WC-TiC-TaC-Co);
- 4) безвольфрамовые твердые сплавы, состоящие из карбида или карбонитрида титана, связки Ni или сплав Ni-Mo: TiC+Ni+Mo (сплавы ТН); Ni(C,N)+Ni+Mo (сплавы КНТ).

Вольфрамовые сплавы обозначаются буквами ВК и цифрой, указывающей процентное содержание кобальта, например, сплав ВК6 содержит 6 % кобальта, остальное (94 %) – карбид вольфрама. К этой группе относятся сплавы ВК3, ВК4, ВК6, ВК8, ВК10, ВК15, ВК20, ВК25.

Чем больше кобальта в твердом сплаве, тем выше прочность, но ниже твердость и износостойкость. Теплостойкость их – до 800 °C. Для сплавов ВК8, например, предел прочности при изгибе  $\sigma_{изг} = 1717$  МПа, твердость 87,5 HRA, а для сплава ВК25 –  $\sigma_{изг} = 2452$  МПа, 83 HRA.

Буква М в марке сплава обозначает, что сплав мелкозернистый (ВК6-М), буква К – крупнозернистый (ВК20-К), буква В указывает, что изделия спека-

лись в атмосфере водорода (ВК6-В). Сплавы с крупным зерном отличаются повышенной ударной вязкостью. Чем меньше зерно карбидной фазы, тем выше износостойкость твердого сплава.

Титановольфрамовые твердые сплавы обозначаются буквами ТК и цифрами, стоящими после каждой цифры, которые указывают процентное содержание карбида титана и кобальта. Так, сплав Т15К6 содержит 15 % карбида титана, 6 % кобальта, остальное – карбид вольфрама. Теплостойкость сплавов группы ТК – до 900-1000 °С.

Титанотанталовольфрамовые сплавы обозначаются буквами ТТК и цифрами: ТТ7К12 – карбидов титана и тантала – 7 % , кобальта – 12 %. остальное – карбид вольфрама. Теплостойкость сплавов группы ТТК – до 1000 °С.

Для изготовления твердосплавных пластин ВК8 берут готовую смесь сплава ВК8 в количестве 4 кг, которую поставляют комбинаты твердых сплавов, добавляют пластификатор — раствор синтетического каучука в бензине Б70 (примерно 1 л 4 %-ного раствора каучука), перемешивают, сушат, протирают через сито, затем прессуют в изделия необходимой формы. Спекание заготовок производится в печах с молибденовыми нагревателями в защитной среде водорода. Заготовки укладываются в графитовые лодочки, пересыпаются засыпкой из порошка белого электрокорунда.

Предварительное спекание ведут медленно: нагрев до 100 °С проводится ориентировочно со скоростью 100 град/ч, затем до 950 °С – со скоростью 200 град/ч. Нагрев до температуры окончательного спекания с выдержкой 1ч – со скоростью 300-400 град/ч.

В процессе спекания происходит диффузионное растворение карбида вольфрама в частицах твердого кобальта с образованием жидкой фазы, через которую происходит перекристаллизация карбида вольфрама. Жидкая фаза заполняет поры и капилляры и обеспечивает усадку. Объемная усадка при спекании составляет от 25 до 30 %. Допустимая степень пористости спеченного твердого сплава 0,2 %.

После спекания изделия очищают от засыпки в пескоструйных аппаратах.

Для исследования микроструктуры твердых сплавов необходимо приготовить микрошлифы. Шлифование образцов проводят на алмазных кругах зернистостью 100 мкм и 40 мкм, полируют па алмазном круге зернистостью 3 мкм, затем проводят травление.

Толщину кобальтовых прослоек и характер распределения кобальтовой фазы определяют на нетравленном шлифе или после его травления в перексиде водорода.

Микроструктура вольфрамовых сплавов двухфазная: светлые угловатые и шпалообразные кристаллы WC и протравленные темные участки твердого раствора WC в кобальте (рисунок 5.1).

Светлые зерна очень твердые, в режущем инструменте они служат элементарными режущими частицами. Твердый раствор WC в кобальте менее твердый, но более вязкий, служит связкой («цементом»).

Микроструктура титановольфрамовых сплавов Т5К10, Т15К6, Т14К8, Т5К12 -трёхфазная: WC, (Ti, W)C и кобальтовая фаза:

- светлые зерна карбида вольфрама WC;
- темная фаза располагается вокруг светлых зерен WC. состоит из кобальта, в котором растворено некоторое количество карбидов вольфрама и карбидов титана:

- серая титановая фаза твердого раствора карбида вольфрама в карбиде титана (в карбиде титана может раствориться до 7 % карбида вольфрама), (рисунок 5.2).

Сплав Т30К4 — двухфазный.

Структура сплавов ТТК идентична структуре сплавов группы ТК с той лишь разницей, что в состав сложного карбида входит также карбид тантала. Зёрна тройного карбида также имеют округлую форму, а цементирующая кобальтовая фаза представляет собой твердый раствор карбидов в кобальте.

Микроструктура безвольфрамового твердого сплава КНТ16 приведена на рисунке 5.3. Светлые зерна - карбонитрид титана, темное поле - никельмолибденовая связка.

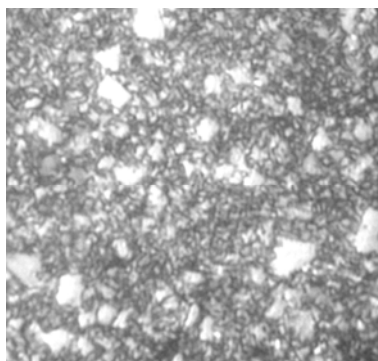


Рисунок 5.1 – Микроструктура твердого сплава BK8 (×1000)

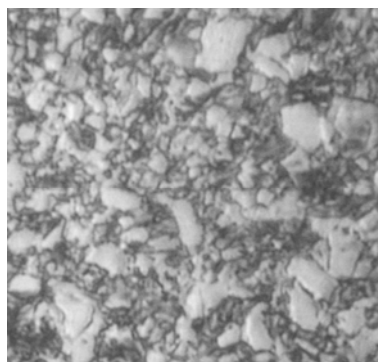


Рисунок 5.2 – Микроструктура твердого сплава T15K6 (×1000)

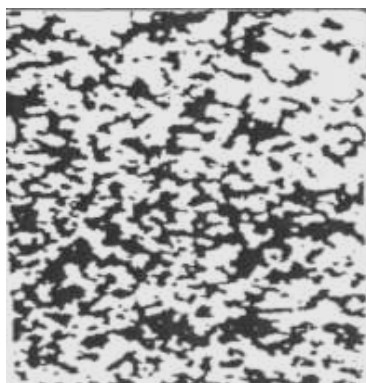


Рисунок 5.3 – Микроструктура твёрдого сплава КНТ16 ( $\times 1000$ )

Сотрудниками кафедры МТМ ОГУ проводились исследования влияния режимов термообработки с нагревом в соляных ваннах на свойства сплавов ВК8, Т15К6 и др. В экспериментах использовались штабики размером 5x5x35 мм и пластины из твердых сплавов ВК8 и Т15К6. В каждом опыте по изотермической закалке исследовались по 6 пластин каждого сплава, шлифованные до  $Ra=0,16-0,32$ . Термообработку проводили в термическом цехе завода Сверл. Составы ванн с интервалом рабочих температур принимали следующие:

- 1) 28 % NaCl+72 % BaCl<sub>2</sub>; T=795-1235 °C;
- 2) BaCl<sub>2</sub>; T = 885-1335 °C;
- 3) 50% KNO<sub>3</sub>+50% NaNO<sub>3</sub>; T=215-535 °C.

Исследования проводились с использованием однократной (таблица 5.2) и двукратной изотермической закалки.

После термообработки проводили измерение твердости, коэрцитивной силы, прочности при изгибе, изучались изменение структуры и жаростойкость.

Создание новых технологий, позволяющих получать материалы с заранее заданными свойствами, приводит к необходимости решения задач по одновременной оптимизации по нескольким параметрам.

В качестве параметров оптимизации были выбраны: предел прочности при изгибе  $\sigma_{изг}$ , коэрцитивная сила  $H_c$ , твердость HV. Факторы, влияющие на параметры, варьировались в следующих пределах: температура нагрева под закалку  $1065 \text{ °C} \pm 150 \text{ °C}$  ( $X_1$ ), температура изотермической закалки  $385 \text{ °C} \pm 150 \text{ °C}$  ( $X_2$ ), время изотермической выдержки  $t = (10 \pm 5)$  мин ( $X_3$ ).

Таблица 5.2 – Условия и результаты опытов изотермической закалки пластин ВК8 с использованием планов 1-го порядка  $2^{3-1}$

Факторы	Температура нагрева под закалку, °С	Тем-ра изотерм. закалки (ванны), °С	Время изотерм. выдержки, мин	Твердость, НV	Предел прочн. при изгибе, МПа	Коэффициентная сила, Н <sub>с</sub>	Износ поверхностей, мм	
							задней, h <sub>з</sub>	передней, h <sub>п</sub>
Основной уровень (0)	1000	350	10					
Предел варьирования	150	150	5					
Верхний уровень (+)	1150	500	15					
Нижний уровень (-)	850	200	5					
Код	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub> =X <sub>1</sub> ·X <sub>2</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	Y <sub>5</sub>
Опыт №1	+	+	+	1516	2430	148	0,93	0,71
Опыт №2	-	+	-	1413	2070	136	0,85	0,71
Опыт №3	+	-	-	1425	1790	138	2,37	2,37
Опыт №4	-	-	+	1370	2120	124	2,04	2,04
Опыт №5	0	0	0	1369	2150	133	1,93	1,89
Опыт №6 исходный								
без термообработки				1372	1520	141	1,96	1,96

С увеличением температуры нагревания под закалку, температура и время изотермической закалки, величины коэрцитивной силы и износа режущих пластинок по задней поверхности уменьшаются. Увеличение параметров термообработки целесообразно в пределах установленного варьирования.

Безвольфрамовые твердые сплавы отличаются высокой окалиностойкостью, отсутствием дефицитного вольфрама, вдвое меньшей плотностью, по сравнению со сплавами группы ВК, однако уступают им по прочности, ударной вязкости и теплопроводности. Химический состав безвольфрамовых твердых сплавов:

- карбидтитановые – 60-80 % TiC, 20-40 % Ni-Mo (ТН-20, ТН-30, ТН-40);
- карбиднитридтитановые – 25-45 % TiC, 25-45 % TiN, 30-35% Ni-Mo (КНТ16).

При обработке сталей используются сплавы группы ТК, чугунов – группы ВК. Сплавы группы ТТК более универсальные, применяются как при обработке сталей, так и чугунов. Безвольфрамовые твердые сплавы рационально используются при получистовой и чистовой обработке углеродистых сталей и цветных металлов.

#### 5.1.2 Свойства и области применения твердых сплавов

В качестве материала для лезвийного инструмента используются твердые сплавы на основе карбида титана с никель-молибденовой связкой (таблицы 5.3, 5.4). Они применяются для получистовой и чистовой обработки резанием углеродистых и нержавеющей сталей, некоторых цветных металлов и сплавов, серых чугунов, а также при изготовлении износостойкого инструмента для обработки металлов давлением мерительного инструмента и др.



Таблица 5.3 – Твердые сплавы, рекомендуемые для обработки сталей резанием

Обработка	Стали					
	Углеродистые качественные, конструкционные	Хромоникелевые, хромомарганцевые, хромоникельмолибденовые, шарикоподшипниковые	Высокомарганцовистые	Коррозионностойкие ферритного и мартенситного классов	Коррозионностойкие, кислотостойкие аустенитного и аустенитно – мартенситного классов	Инструментальные легированные, быстрорежущие хромоникельвольфрамовые
На станках токарной группы: чистовое точение, $t = 0,2-2$ мм, $S=0,1-0,5$ мм/об	ВО-13, ТН20	ВО-13, ТН20, Т30К4	ВОК-71, ВОК-60, ВК6 – Ом, ВК 3 – М	Т15К6, ВК3 – М, ВК: - Ом	ВК6 – Ом, ВК6 – М	ВО-13, ТН20, Т30К4
Получистовое точение, $t = 2 - 4$ мм, $S = 0,1 - 0,5$ мм/об	ВО – 13, ТН20, КНТ16, Т15К6, ВП1325	КНТ16, Т15К6, Т14К8, ВП1255, ВП1325	ВК6-М, ВК10-ХОМ	ВК6-М, ВК10-ХОМ	ВК6-М, ВК10-ХОМ	ТН20, КНТ16, Т15К6, Т14К8, ВП1255, ВП1325
черновое точение, $t = 4-10$ мм, $S=0,5-1,5$ мм/об	Т5К10, Т14К8, Т4К8, ТВ4, ТТ7К12, ТВ4	Т5К10, ВП 1255, ВП 1325, ТТ7К12	ВК10 – ХОМ, ВК10 – Ом, ТТ10К8Б	ВК10 – ХОМ, ВК10 – Ом, ТТ10К8Б	ВК10 – ХОМ, ТТ10К8Б	Т5К10, ТТ10К8Б, ВП1255, ТТ7К12
черновое точение, $t = 20 - 30$ мм, $S = 1$ мм/об	ТТ7К12, Т4К8	ТТ7К12	ВК10 – Ом, ВК10 – ХОМ, ВК15 - ХОМ	ВК10 – Ом, ВК10 – ХОМ, ВК15 - ХОМ	ВК10 – Ом, ВК15 - ХОМ	ТТ7К12, ВК10 - Ом

Таблица 5.4 – Свойства карбидотитановых твердых сплавов

Марка	Хим. состав, %			Физико-механические свойства				
	TiC	Ni	Mo	Плотность, г/м <sup>3</sup>	Твердость, HRA	Предел прочности, МПа при		Модуль упругости E, 10 <sup>4</sup> , МПа
						изгибе	сжатию	
КТС-1	67,5	15,3	17,2	5,8	91-92	1200	4000	42
КТС-2	74,0	17,5	8,5	5,5	92-94	1400	4500	42
ТН-20	79,0	16,0	5,0	5,5	90,0	1000	3500	39
ТН-25	74,0	20,0	6,0	5,7	89,0	1100	3400	40
ТН-30	69,0	24,0	7,0	5,9	88,5	1200	3200	41
ТН-40	61,0	30,0	9,0	6,0	87,0	1300	3000	–
КНТ16	–	19,5	6,5	5,8	89,0	1100		

Карбидотитановые сплавы (КТС) со связками из жаропрочного сплава и быстрорежущей стали (таблица 5.5) заменяют твердые сплавы вольфрамовой группы, а также легированные стали марок ХВГ и 3Х2В8. При токарной обработке стойкость КТС соответствует стойкости твердых сплавов ВК8 и Т30К4. При обработке незакаленной стали 40Х стойкость резцов, оснащенных пластинками сплава типа КТС (при условии затупления их по задней поверхности до 0,2 мм), при скорости резания 100 - 300 м/мин превышает стойкость резцов с пластинками из сплава ВК8 более чем в 10 раз.

Таблица 5.5 – Свойства карбидотитановых сплавов со связкой из жаропрочного сплава на никелевой основе (ЖС) и быстрорежущей стали (БС)

Показатели	50 % TiC + 50 % ЖС	60 % TiC + 40 % БС
Плотность, г/м <sup>3</sup>	5,5 – 6,0	6,0 – 6,5
Твердость НВ, МПа	3800	
Пределы прочности при сжатии, ГПа:		
$\tau_c$ (20 °С)	3,5 – 4,0	3,8 – 4,0
$\tau_c$ (500 °С)	1,3 – 1,4	1,35 – 1,45
$\tau_c$ (800 °С)	1,1 – 1,2	1,3 – 1,4
Модуль упругости, ГПа	330 – 340	400 – 410

## 5.2 Порошковые карбидостали

Карбидосталими называются соединения стали, выполняющие роль связки с равномерно распределенными в ней карбидами тугоплавких металлов.

По свойствам сталь – карбид титана является промежуточным материалом между инструментальными сталями и твердыми сплавами. В таком материале сталь обеспечивает способность к термической и механической обработке, а карбид титана – износостойкость (таблица 5.6).

Таблица 5.6 – Свойства карбидосталей, спеченных в вакууме

Марка	Состав, массовая доля, %		HRC после				$\sigma_{изг}$ , МПа	$\sigma_{сж}$ , МПа
			спека- ния	от- жига	за- калки	от- жига		
	сталь	TiC						
X12M	50	50	62	47	70	70	1200	3100
	70	30	55	31	63	63	1500	2000
5X6BM2	60	40	62	51	70	68	1120	3250
	70	30	58	37	67	67	1250	2900
	80	20	54	26	60	59	1300	2700
	90	10	48	18	56	56	1350	2300

Порошковые сплавы на основе карбида хрома с никелевой связкой (таблицы 5.7, 5.8) обладают более высокой износостойкостью, чем карбидотитановые безвольфрамовые твердые сплавы, имеют высокие твердость и коррозионностойкость.

Таблица 5.7 – Характеристика карбидохромовых сплавов

Марка	Краткая технология изготовления	Область применения	Заменяемые стали
KXH15-70 KXH20-71 KXH30-73	Прессование смеси порошков под давлением 100-200 МПа, спекание при 1290 °С в течении 1 ч в защитной среде (предпочтит. в вакууме). Возможно горячее прессование под давлением 8-15 МПа при T – 1100-1250 °С.	Матрицы и фильеры пресс-форм и штампов, наплавка износост. пов-тей.	ХВГ, ШХ15, 3Х2В8, X12, X12M, P18, P9
KXH15Ф-68	Прессование смеси порошков под давлением 100 МПа, спекание при 850 °С в теч. 1 ч, спекание при 1270 °С в теч. 45 мин в вакууме. Возможно горячее прессование под давлением 10 МПа при 1050 °С.	Матрицы пресс-форм и износостойкие конструкционные детали	

Таблица 5.8 – Свойства карбидохромовых сплавов

Марка сплава	Хим. состав, %			Физико-механические свойства				
	Cr <sub>2</sub> C <sub>2</sub>	Ni	P	плотность, г/см <sup>3</sup>	σ <sub>изг.</sub> , МПа	ударная вязкость, МПа · м	Твердость, НРА	Модуль упругости
КХН15-70	84-85	15-16	-	6,7-7,0	44	0,010	82	32
КХН20-71	78-80	20-22	-	6,8-7,1	500	0,015	80	33
КХН15Ф-68	84,9	15	0,1-0,15	6,7-6,9	1200	0,017	83	34
КХН30-73	67-70	30-33	-	7,2-7,3	200	0,020	78	33

Коэффициент линейного расширения сплавов (20-500 °С) – (11,2-13,3)·10<sup>-6</sup>, теплопроводность – 12,6 Вт/(м·К). Они применяются при изготовлении инструмента для обработки металлов давлением (матрицы для волочения проволоки и прессования прутков и т.д.), износостойких изделий типа сопел для струйных аппаратов, работающих при высоких температурах (до 1000 °С).

Технология производства карбидохромовых сплавов аналогична технологии получения карбидтитановых сплавов и заключается в прессовании смеси порошков и спекании при температуре от 1400 до 1600 °С в зависимости от величины соотношения карбида титана и связки, а также химического состава связки. Сплав подвергается термической обработке по режиму, соответствующему химическому составу связки.

Возможен и другой вариант, когда сформированная из порошка карбида титана заготовка спекается в вакууме или атмосфере водорода при температуре около 2000 °С пропитывается расплавленной сталью или жаропрочным сплавом, а затем изделие подвергается термической обработке.

Нами разработана новая технология получения карбидостали методом пропитки карбидного каркаса, которая обеспечивает сравнительно невысокую стоимость карбидостали и позволяет легко организовать производство конструктивных деталей из этого материала.

Для получения карбидостали в качестве износостойкого материала был выбран сравнительно дешевый и не дефицитный в настоящее время карбид титана, а в качестве связки карбидного каркаса - стали и сплавы аустенитного класса на основе никеля. Выбор таких связующих материалов обусловлен тем, что они хорошо смачивают зерна карбида титана и это обеспечивает высокую степень сцепления карбидной фазы с металлической матрицей в готовом сплаве.

Хорошо известно, что абразивный износ карбидостали определяется не только тугоплавкой износостойкой карбидной фазой, но и свойствами металлической связки, так как только после ее разрушения начинают выкрашиваться карбидные зерна. В связи с тем, что аустенит обладает высокой вязкостью, применение аустенитных сталей и сплавов в качестве связки увеличивает износостойкость композиционного материала на основе карбида титана.

Карбидостали, содержащие от 40 до 60 об. % карбида титана и от 60 до 40 об. % металлической связки, получали методом пропитки карбидного каркаса

са расплавленными отходами сталей и сплавов необходимого состава. Разработанная технология позволяла свободно отделять остатки металла после пропитки карбидного каркаса, что и давало возможность применять для пропитки дешевые стальные отходы. Кроме того, применение разработанной технологии значительно упрощает изготовление прессформ, поскольку размеры карбидных каркасов в процессе спекания и пропитки практически не изменяются.

Исследовались также распределение и размеры карбидных зерен и металлической связки в зависимости от времени контакта карбидной фазы с металлическим расплавом в период пропитки. Исследование микрошлифов, вырезанных из прессовки карбида титана с пористостью 0,44 - 1,8 % после пропитки нержавеющей сталью на глубину 14 мм, показали, что по мере увеличения глубины пропитки образца количество металлической связки уменьшается, а содержание карбидной фазы увеличивается (таблица 5.9).

Таблица 5.9 - Количественный анализ структурных составляющих карбидостали TiC - сталь

Расстояние от зоны контакта TiC-сталь, мм	Средний размер карбидных зерен, мкм	Содержание, об., %		Средний размер стальной прослойки, мкм	Пористость, %	Твердость, HRA
		TiC	металлической связки			
4	2,89	52,30	47,70	2,80	-	-
12	3,05	61,87	38,12	1,90	1,2	83,00±0,38
14	2,40	71,25	28,75	1,50	-	-

Если в верхних зонах образца содержание карбидной фазы от 51 до 52 об. %, а металлической связки от 49 до 48 об. %, то в самой нижней пропитанной сталью, зоне образца содержание карбидной фазы 71,2 об. %, а металлической связки - 28,8 об. %. Чем дальше расположена зона образца от границы первоначального контакта карбидной прессовки со сталью, тем больше в ней карбидных зерен, тем они мельче и, следовательно, тем меньше связки. Таким образом, с увеличением глубины пропитки твердость и износостойкость получаемого сплава возрастает.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что карбид титана в период пропитки достаточно быстро растворяется в стальном расплаве. По мере пропитки расплав все больше и больше насыщается карбидами титана, которые выделяются из стали после ее кристаллизации.

По мере движения расплава по капиллярам прессовки, он переносит часть карбидных зерен из верхних зон в нижние. Увеличение объемного содержания карбидной фазы к низу образца закономерно приводит к увеличению твердости этих зон. Из этого следует, что при получении изделий пропитку необходимо

организовать так, чтобы поверхность, работающая на износ, пропитывалась в последнюю очередь. Свойства карбидостали приведены в таблице 5.10.

Таблица 5.10 - Свойства карбидостали

Поверхность прессы после пропитки	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Средний размер карбидных зерен, мкм	Твердость, HRA	Износ, кг/м · 10 <sup>3</sup>
Верхняя	5,9	3,74	80,57 ± 0,73	0,040 ± 0,008
Нижняя	5,8	2,40 - 3,00	83,00 ± 0,38	0,026 ± 0,003

Изделия из карбидостали, полученной методом пропитки, можно подвергать закалке с последующим отжигом. Твердость сплава после термообработки возрастает на 5 - 10 %.

Наукоёмкое опытное производство при вузовско-академической лаборатории Курганского машиностроительного института, поставляет сравнительно дешёвые конструкционные и инструментальные изделия из карбидостали, полученной методом пропитки с использованием металлических отходов. Поставляемые нами втулка для правильно-отрезных станков И-6022А, предназначенных для правки и резки арматурной проволоки, режущие пластины фрез, применяемых для обработки древесины и другие изделия показали износостойкость сравнимую с твёрдыми сплавами, изготавливаемыми традиционными методами.

### 5.3 Порошковые быстрорежущие стали

Быстрорежущие стали являются основным материалом режущего инструмента современного машиностроения. Инструментом из этой стали удаляется 75 % общей массы металла, снимаемого с заготовок при обработке резанием.

Быстрорежущие стали должны обладать высокой горячей твердостью и красностойкостью.

Быстрорежущая сталь, являясь сложным высоколегированным сплавом, в литом состоянии обладает рядом недостатков, выражающихся в ликвации легирующих элементов, карбидной неоднородности. Методы порошковой металлургии позволяют избежать это и, кроме того, обеспечивают снижение потерь материала, уменьшение энергозатрат, возможность утилизации отходов (стружки и шламов легированных сталей), изменения состава.

При получении инструмента из порошковой быстрорежущей стали появляется возможность регулировать дисперсность структурных составляющих. Кроме того, в структуре готовых изделий при этом отсутствуют такие пороки, как ликвация по легирующим компонентам и карбидам.

К настоящему времени имеется несколько технологических схем изготовления быстрорежущей стали методом порошковой металлургии:

1) распыление инертным газом, гидростатическое прессование при комнатной температуре, при температуре 1150 °С под давлением аргона 100 МПа; полу-

ченные таким способом заготовки диаметром 450 мм и высотой 1600 мм массой до 2 т подвергают горячей ковке;

2) распыление инертным газом, прессование, спекание, горячее выдавливание (экструзия) при температуре около 1000 °С или горячая ковка;

3) распыление инертным газом, прессование или прокатка, спекание;

4) размол стружки или очистка шлама быстрорежущей стали и один из предыдущих вариантов технологии.

В таблице 5.11 приведены составы и свойства ряда порошковых быстрорежущих сталей.

Таблица 5.11 – Свойства быстрорежущих порошковых сталей

Марка стали	Технология изготовления	Температура закалки, °С	Балл зерна	HRC <sub>3</sub> после отпуска	$\sigma_{изг.}$ , МПа	$a_n$ , кДж/м <sup>2</sup>	Красностойкость
РОМ6Ф1	Высокотемпературное экструдирование	1150	11-12	63,0	3000	370	57
РОМ10Ф3			12		2550	420	57
РОМ10Ф3К8			12		2600	410	58
10P6M5K5	ГИП + ковка	1200	12	–	4000	275	–
	Горячая экструзия	–	11	–	3510	170	–

Технология ГИП в настоящее время реализована в промышленных масштабах во многих странах, однако сложность аппаратного оформления сказывается на экономичности. По данным английской фирмы "Davy McKee", стоимость прутков, изготовленных по этой технологии на 10-50 % выше стоимости прутков, полученных традиционным методом, и окупаются они только за счет лучшей работоспособности и производства заготовок большого сечения. Более экономичным считается второй вариант в случае горячего выдавливания, поскольку горячая ковка требует более сложной инструментальной оснастки.

Однако, и первый и второй варианты обеспечивают получение преимущественно заготовок быстрорежущей стали в виде прутка, т.е. практически не реализует преимущество порошковой металлургии как без- или малоотходной технологии. В этой связи наиболее целесообразен третий вариант, который особые требования предъявляет к спеканию как к операции, обеспечивающей высокую плотность и мелкозернистую структуру.

Были изучены особенности термической обработки спеченных быстрорежущих сталей P6M5, полученных экструзией. Компактирование исходных материалов – стружки фракции 0,16 - 0,315 мм, измельченной стружки ниже фракции 0,40 мм) и распыленного порошка фракции 0,8 мм – проводили по технологии ГИП: экструдированные беспористые образцы подвергали изотермическому отжигу по режимам для стали P6M5 (25 – 30 HRC). Структурный анализ показал, что распределение и дисперсность карбидной фазы ярче выра-

жены у спеченных сталей, особенно полученных из распыленного порошка, чем у стандартной.

Для закалки образцы диаметром 20 и высотой 10 мм нагревали до 500 - 550 °С на воздухе в течение 10 мин (I подогрев), затем до 840 – 860 °С в соляной ванне БМФ-3 (97 % BaCl<sub>2</sub> + 3 % MgF<sub>2</sub>) в течение 5 мин (II подогрев). Продолжительность окончательного нагрева в соляной ванне (95 % BaCl<sub>2</sub> + 5 % MgF<sub>2</sub>) рассчитывали по оптимальной выдержке (10 - 12 с/мм). Охлаждение в масле; температурный интервал закалки – 1140-1240 °С через каждые 20 °С; контрольные параметры – вторичная твердость и размер зерна аустенита (таблица 5.12)

Таблица 5.12 – Механические свойства термообработанных стандартной и спеченных быстрорежущих сталей

Сталь	Температура закалки, °С	Размер зерна, балл	Отпуск	Твердость после отпуски, HRC	Предел прочности на изгиб $\sigma_{и}$ , МПа	Ударная вязкость $a_{н}$ , МПа	Теплостойкость, HRC, (620 °С, 4 ч)
Р6М5 из проката (стандартная) Р Р6М5-С	1210-1220	10-11	560 °С 3 раза по 1 ч	63,5-64,5	330-340	270-280	59,0-59,5
	1190-1195	11-10	555-560 °С 3 раза по 1 ч	65,0-65,5	350-360	270-280	59,5-60,0
Р6М5-ИП	1185-1190	11-10	То же	64,0-64,5	250-260	180-200	59,5-60,0
Р6М5-РП	1180-1185	11-10	-«-	63,5-64,5	380-400	310-320	59,0-59,5

## 5.4 Сверхтвердые материалы

К этой категории инструментальных материалов относят алмазы (преимущественно искусственные) и плотные модификации нитрида бора.

Алмаз обладает самыми высокими твердостью, модулем упругости и теплопроводностью.

Однако нитрид бора более термически устойчив и более химически инертен. Температура графитизации алмаза составляет около 900 °С. Кубический нитрид бора начинает переходить в графитоподобную модификацию при гораздо более высоких температурах (1200-1500 °С).

Искусственные алмазы и плотные модификации нитрида бора получают в условиях высоких давлений и температур – в статических условиях с применением катализаторов и в динамических условиях с использованием взрыва.

В качестве катализаторов при синтезе алмаза используют сплавы металлов группы железа (например, Ni-Mn, Ni-Cr), для нитрида бора применяют щелочноземельные металлы, в частности магний.



Для многофазных поликристаллических сверхтвердых материалов наиболее характерным является, например, славутич – композиционный материал на основе алмаза и твердого сплава типа ВК6.

В этом материале алмазные зерна диаметром 0,5 мм при объемной концентрации 25 % расположены в твердосплавной матрице (размер карбидных зерен 0,5-1 мкм). Как показали результаты опытов, прочность на сжатие и трещиностойкость с повышением концентрации алмазов уменьшается по линейному закону.

Высокие показатели прочности, твердости, трещиностойкости и износостойкости обусловили эффективное использование славутича (естественные алмазы) и твесала (искусственные алмазы) для изготовления бурового инструмента, работающего при значительных динамических нагрузках в условиях абразивного и гидроабразивного износа.

Свойства некоторых сверхтвердых материалов на основе нитрида бора приведены в таблице 5.13.

Таблица 5.13 – Некоторые сверхтвердые материалы на основе алмаза и плотных модификаций нитрида бора

Разновидности	Основные изделия
основа – алмаз	
Дисмит ( $\sigma_{сж} = 4-6$ ГПа) СВ, СВАБ ( $\sigma_{сж} = 5$ ГПа)	Резцы, фильеры, выглаживатели Буровые коронки, долота, правящие карандаши и др.
Баллас, карбонадо Мегадаймонд, карбонит, Компакс	Резцы, фильеры, волокни Разнообразный режущий, буровой и мерительный инструмент
Полиблок	То же
Славутич, твесал	Буровые долота, коронки, правящий и мерительный инструмент
основа – кубический нитрид бора	
Эльбор-Р Исмит Композит Киборит	Лезвийный инструмент
основа – вюрцитоподобный нитрид бора	
Гексанит-Р	То же

Для материалов типа гексанита путем комбинации мелкозернистых фракций обеих модификаций нитрида бора (сфалерито- и вюрцитоподобной) с размером зерен 0,1-0,5 мкм удастся получить высокую трещиностойкость, сравнимую с этим показателем для твердых сплавов.

Прочность и твердость поликристаллических алмазных материалов выше в 1,5-3 раза.

#### 5.4.1 Маркировка алмазных шлифпорошков

Алмазные шлифпорошки в зависимости от вида сырья, из которых они изготовлены, в соответствии с ГОСТ 9206-80 следует обозначать буквенными индексами: А – из природных алмазов; АС – из синтетических алмазов; АР – из синтетических поликристаллических алмазов.

К буквенному обозначению шлифпорошков из синтетических алмазов добавляют буквенный индекс, обозначающий тип поликристаллического алмаза: В – типа "баллас"; К – типа "карбонадо"; С – типа "спеки". К буквенному обозначению шлифпорошков добавляют индекс, который выражает: в шлифпорошках из природных алмазов – содержание зерен изометрической формы, выраженное десятками процентов; в шлифпорошках из синтетических алмазов – среднее арифметическое значение показателей прочности на сжатие всех зернистостей определенной марки, выраженное в ньютонах; в шлифпорошках из синтетических поликристаллических алмазов – сотую часть среднего арифметического значения показателей прочности на сжатие всех зернистостей марки, выраженную в ньютонах.

Допускается добавлять к обозначению марки дополнительный индекс, характеризующий дополнительные свойства этой марки (например, Т – термостойкая, Д – динамически устойчивая, О – овализованная, Н – немагнитная).

Алмазные микропорошки и субмикропорошки в зависимости от вида сырья следует обозначать буквенными индексами:

АМ – из природных алмазов;

АСМ – из синтетических алмазов;

А при повышенной абразивной способности индекс М должен быть заменен на индекс Н: АН; АСН.

Пример условного обозначения шлифпорошка из синтетических алмазов марки АС6 зернистостью 160/125:

Шлифпорошок АС6 160/125 ГОСТ9206-80.

То же, микропорошка из природных алмазов марки АМ зернистостью 40/28:

Микропорошок АМ 40/28 ГОСТ9206-80.

То же субмикропорошка из природных алмазов марки АМ5 зернистостью 0,5/0,1:

Субмикропорошок АМ5 0,5/0,1 ГОСТ9206-80.

#### 5.4.2 Обработка порошковых сталей

Проведены экспериментальные исследования режущих свойств твердосплавных многогранных неперетачиваемых пластин (МНП) с применением ионно-плазменного покрытия и без покрытия. Целью исследования являлось установление зависимости износа режущих кромок и динамики процесса резания МНП.

Анализ литературных данных показывает, что процессу обработки изделий из металлопорошка уделяется определенное внимание. Однако недостаточ-

но изучены вопросы динамики процесса резания, износа режущих кромок при резании инструментами из твердых сплавов, в том числе и безвольфрамовых с применением ионно-плазменных покрытий.

В связи с этим к.т.н., доц. А.П. Шевелем и С.И. Богодуховым проводились эксперименты по обработке изделий (втулки размером  $D = 60$  мм,  $d = 35$  мм,  $L = 80$  мм), изготовленных из порошковой стали СП150Д2,5К04 и СП150Д2,5. Резание деталей осуществлялось на токарно-винторезном станке. Режимы резания принимались в широком диапазоне: скорость 50; 75; 95 м/мин; подача 0,07; 0,15; 0,3 мм/об.; толщина срезаемого слоя 0,5; 1,0; 1,5 мм.

Составляющие силы резания:  $P_z$  – касательная;  $P_y$  – радиальная и  $P_x$  – осевая фиксировались с помощью универсального динамометра УДМ-600. Одновременно с этим через каждые 15 мин работы МНП производилось измерение износа режущих кромок по задней и передней поверхностям. Значение последнего (износа) фиксировалось с помощью инструментального микроскопа с точностью измерения 0,005 мм. Результаты опытов подвергались математической обработке.

В ходе экспериментальной работы при принятом периоде стойкости МНП, равном 60 мин, установлено:

1) влияние скорости резания на динамику процесса резания при постоянных  $S = 0,15$  мм/об и  $t = 1,0$  мм (таблица 5.14);

Таблица 5.14 – Влияние скорости резания  $v$  на силу резания  $P_z$

$v$ , м/мин	Сила резания $P_z$ , Н, при обработке материалов					
	СП150Д2,5К0,4			СП150Д2,5		
	ВК8	Т15К6	КНТ-16	ВК8	КНТ-16	Т15К6
50	930/850	790/700	680/650	1100/940	1080/840	850/800
75	850/790	780/660	720/610	950/880	1070/880	800/760
95	760/705	750/670	700/580	900/830	870/820	870/710

\* В числителе – МНП без покрытия, в знаменателе – МНП с покрытием

2) влияние подачи  $S$  при постоянных величинах  $V = 75$  м/мин и  $t = 1,0$  мм (таблица 5.15);

Таблица 5.15 – Влияние подачи  $S$  на силу резания  $P_z$

$S$ , мм/об.	Сила резания $P_z$ , Н, при обработке материалов					
	СП150Д2,5К0,4			СП150Д2,5		
	ВК8	Т15К6	КНТ-16	ВК8	Т15К6	КНТ-16
0,07	770/700	690/590	670/560	820/800	720/650	840/720
0,10	780/720	700/600	600/560	830/810	720/660	850/730
0,15	850/790	780/660	620/610	950/880	800/760	1000/880

\* В числителе – для МНП без покрытия, в знаменателе – для МНП с покрытием

3) влияние толщины срезаемого слоя при постоянных величинах  $V = 75$  м/мин и  $S = 0,15$  мм/об (таблица 5.16).

Таблица 5.16 – Влияние толщины срезаемого слоя  $t$  на силу резания  $P_z$

$t$ , мм	Сила резания $P_z$ , Н, при обработке материалов					
	СП150Д2,5К0,4			СП150Д2,5		
	ВК8	Т15К6	КНТ16	ВК8	Т15К6	КНТ-16
0,5	600/520	550/400	460/320	690/620	550/480	740/600
1,0	720/650	660/520	580/460	820/740	610/860	860/730
1,5	850/790	780/660	720/610	950/880	800/760	1000/880

\*В числителе – для МНП без покрытия; в знаменателе – для МНП с покрытием

Средние статистические данные величины износа режущих кромок по задней поверхности приведены в таблицах 5.17-5.20. В таблицах 5.17-5.19 показано влияние режимов резания на износ МНП при работе их в течение 60 мин.

Таблица 5.17 – Влияние скорости резания  $v$  на износ МНП при  $t = 1,0$  мм;  $S = 0,15$  мм/об

$v$ , м/мин	Износ режущих кромок $h_z$ , мм, при обработке материалов							
	СП150Д2,5				СП150Д2,5К0,4			
	ВК8	Т15К6	Т15К6 с напылением	КНТ-16	ВК8	Т15К6	Т15К6 с напылением	КНТ-16
50	0,31	0,42	0,37	0,59	0,25	0,48	0,32	0,7
75	0,22	0,29	0,28	0,47	0,2	0,28	0,27	0,65
95	0,38	0,49	0,45	0,65	0,3	0,55	0,43	0,88

Таблица 5.18 – Влияние толщины срезаемого слоя  $t$  на износ МНП при  $v = 75$  м/мин;  $S = 0,15$  мм/об.

$t$ , мм	Износ режущих кромок $h_z$ , мм, при обработке материалов							
	СП150Д2,5				СП 150Д2,5К0,4			
	ВК8	Т15К6	Т15К6 с напылением	КНТ16	ВК8	Т15К6	Т15К6 с напылением	КНТ-16
0.5	0,22	0,27	0,24	0,45	0,18	0,28	0,20	0,32
1,0	0,25	0,29	0,28	0,47	0,2	0,28	0,27	0,65
1,5	0,40	0,51	0,45	0,75	0,48	0,67	0,65	0,88

Таблица 5.19 – Влияние подачи  $S$  на износ  $h_3$  МНП при  $v = 75$  м/мин;  
 $t = 1,0$  мм

$S$ , мм/об.	Износ режущих кромок $h_3$ , мм, при обработке материалов							
	СП150Д2,5				СП150Д2,5К0,4			
	ВК8	Т15К6	Т15К6 с напы- лением	КНТ-16	ВК8	Т15К6	Т15К6 с напы- лением	КНТ-16
0,07	0,35	0,45	0,41	0,62	0,30	0,48	0,40	0,73
0,15	0,22	0,25	0,28	0,47	0,2	0,28	0,27	0,65
0,30	0,32	0,47	0,45	0,74	0,33	0,5	0,48	0,95

Таблица 5.20 – Влияние времени работы МНП на их износ  $h_3$  при  
 $v = 75$  м/мин;  $S = 0,1$  мм/об;  $t = 1,0$  мм

$T$ , мин	Износ режущих кромок $h_3$ , мм, при обработке материалов							
	СП150Д2,5				СП150Д2,5К0,4			
	ВК8	Т15К6	Т15К6 с на- пылением	КНТ-16	ВК8	Т15К6	Т15К6 с на- пылением	КНТ-16
30	0,03	0,06	0,05	0,14	0,05	0,09	0,07	0,22
45	0,08	0,3	0,1	0,22	0,11	0,15	0,13	0,36
60	0,2	0,28	0,27	0,65	0,23	0,29	0,28	0,57

Из таблиц 5.14-5.20 следует, что во всех случаях испытаний наименьшие износ и силы резания получены при использовании МНП с покрытием. Это связано с тем, что при одинаковом периоде стойкости износ был в 1,3-2,1 раза меньше, чем при использовании МНП без покрытий. При обработке втулок СП150Д2,5К0,4 практически во всех случаях имеет место снижение сил. Видно также, что с повышением скорости резания (см. таблицу 5.15) величина  $P_z$  во всех случаях заметно снижается при использовании МНП с покрытиями. При обработке инструментами без покрытий не установлено влияние увеличения скорости резания на снижение силы резания.

Из таблицы 5.16 видно, что на величину силы резания  $P_z$  оказывает влияние движение подачи и скорость резания, причем скорость резания в большей степени. Установлено, также, что использование МНП с покрытиями оказывает меньшее влияние на повышение сил резания.

Из таблицы 5.18 следует, что повышение толщины срезаемого слоя оказывает значительное влияние на рост силы  $P_z$ . Так, меньшие значения последней получены: при обработке втулок из стали СП150Д2,5К0,4 твердосплавными пластинами КНТ-16 с покрытиями; при резании втулок из стали СП150Д2,5 – твердосплавными пластинами Т15К6 с покрытиями.

При обработке деталей, изготовленных из порошковой стали СП150Д2,5К0,4, рекомендуется применять режущие инструменты из сплавов КНТ-16 или Т15К6 с применением напыления нитридами титана.

При обработке деталей из порошковой стали СП150Д2,5 целесообразно использовать напыленные МНП из сплавов Т15К6 и ВК8.

Оптимальные режимы резания следующие: скорость 75 м/мин, подача 0,15 мм/об, толщина срезаемого слоя 1,0 мм при периоде стойкости 45 мин.

## **6 Материалы со специальными свойствами**

Это весьма многочисленная группа материалов, предназначенных для изготовления контактов, электродов и катодных элементов, резисторов, сверхпроводников, полупроводников и диэлектриков, магнитомягких и магнитотвердых изделий (в том числе ферриты, магнитодиэлектрики), фильтры и пористые изделия, тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы) атомных реакторов и изделия со специальными ядерными характеристиками, тяжелые сплавы, биоматериалы и др. Хотя по объему производства методами порошковой металлургии материалы этой группы, за исключением ферритов, уступают инструментальным, конструкционным и триботехническим, их роль в современном производстве велика. Энергетика, электротехника, радиоэлектроника, приборостроение, вычислительная техника, транспорт, биотехнология, атомная техника – вот далеко не полный перечень отраслей, технический уровень которых в существенной степени определяется параметрами упомянутых материалов со специальными физическими свойствами.

### **6.1 Материалы со специальными электрическими свойствами**

Производство тугоплавких металлов и сплавов – одно из старейших направлений порошковой металлургии, развитие которого определялось запросами электротехнической промышленности. Нити и спирали ламп накаливания, катоды прямого канала, сетки и другая арматура электронных ламп, нагреватели и экраны высокотемпературных печей, термопары, элементы конденсаторов – вот некоторые из примеров использования вольфрама, молибдена, тантала, ниобия и их сплавов, благодаря уникальным электрическим и теплофизическим свойствам в электротехнике и электронике. Вольфрам занимает особое место как материал, обладающий самой высокой температурой плавления, низким давлением паров и соответственно низкой скоростью испарения.

Цикл изготовления вольфрама осуществляется в основном по классической порошковой технологии: получение порошка методом восстановления - прессование – спекание.

Особенностью получения вольфрама электротехнического назначения является введение различных присадок (силиката калия, оксидов тория, алюминия, иттрия), которые вводятся из растворов солей, осаждаемых на поверхности оксидных порошков вольфрама до восстановления, и которые предназначены

для предотвращения роста зерна при длительной высокотемпературной эксплуатации.

Торированный вольфрам имеет марку ВТ, вольфрам с присадкой других оксидов – марки ВА, ВИ, ВЛ; содержание присадок может колебаться от 0,1 до 5,5 % (ВТ-50).

#### *Электроконтактные материалы.*

Важную роль в узлах коммутации электрического тока высоко- и низковольтного назначения (реле, выключатели, пускатели, контакторы и т.п.) играют контактные материалы. К ним предъявляются разнообразные требования: малое удельное контактное сопротивление, незначительная эрозия (т.е. способность противостоять переносу в условиях дугового разряда и свариваемости при замыкании и размыкании), механическая прочность и химическая инертность, высокая теплопроводность и т.д. Практически ни один из однокомпонентных материалов удовлетворить всем требованиям не может и разумное техническое решение было найдено при использовании псевдосплавов, состоящих, с одной стороны, из тугоплавкого, трудноиспаряемого компонента (W, Mo, WC и др.) и содержащих, с другой стороны, высокоэлектропроводные металлы (серебро, медь).

Технология изготовления большинства контактных материалов на основе вольфрама ( молибдена) и серебра (меди) заключается в пропитке пористых тугоплавких металлов легкоплавким компонентом. Никель добавляется для активации спекания тугоплавких металлов ( $T = 1200-1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и улучшения смачиваемости; пропитку проводят при температуре примерно  $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Контакты W(Mo) – Ag(Cu) используют для коммутации токов высокого напряжения. Для низковольтных аппаратов используют контактные материалы на основе серебра с различными добавками (CdO, C, WC, SnO<sub>2</sub>). Роль добавок сводится к снижению свариваемости, повышению износостойкости. Давление прессования составляет от 400 до 500 МПа, спекание проводят в вакууме при  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Если контакты работают в скользящем режиме, то для снижения коэффициента трения в шихту добавляют графит.

Современные электроконтактные материалы являются преимущественно композиционными. К ним относятся псевдосплавы с дисперсным упрочнением, а также материалы, в матричную среду которых внедрены волокна, нитевидные кристаллы или армирующие пространственные решетки из волокон или кристаллов.

По составу разрывные контакты могут быть:

- 1) металлическими однокомпонентными (Ag, W, Mo, Au, Pt и др.);
- 2) металлическими двухкомпонентными (Ag-Ni, Ag-Mo, Ag-W, Cu-W, Cu-Mo, Au-W, Au-Mo, Fe-Cu и др.);
- 3) металлическими трех- и более компонентными (Ag-Ni-Cd, Ag-Ni-Cu, W-Cu-N, W-Ag-Ni, Fe-Cu-Bi, Ag-Pd-Au, Ag-Ni-Cd-Fe);
- 4) металлографитовыми (Ag-C, Cu-C);
- 5) металлооксидными (Ag-CdO, Ag-CuO, Ag-ZnO, Ag-ZrO<sub>2</sub>, Ag-Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Ag-HfO<sub>2</sub>, AgCr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ag-CdO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ag-Ni-CdO, Ag-Cu-CdO и др.);

б) металлокарбидными, металлоборидными или металлонитридными (Ag-WC, Cu-WC, Cu-Ni-WC, Me-TiC, TiB<sub>2</sub>, TiN или Me-ZrB<sub>2</sub>, ZrN и др.).

В таблице 6.1 приведены составы и свойства некоторых порошковых контактных материалов.

В таблице 6.2 приведены области применения и основные свойства изготавливаемых из них электрических контактов.

Таблица 6.1 – Состав и свойства некоторых порошковых контактных материалов

Марка материала	Содержание, мас. %	$\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	R, 10 <sup>8</sup> Ом·м
На основе вольфрама и серебра			
КМК – А60	W-50; Ag-48; Ni-2	13,5	4,1
КМК – А61	W-70; Ag-27; Ni-3	15,5	4,5
На основе вольфрама и меди			
КМК – Б20	W-50; Cu-48; Ni-2	12,0	7,0
КМК – Б21	W-70; Cu-27; Ni-3	14,0	8,0
КМК – Б23	W-80; Cu-13; Ni-3	15,0	10,0
На основе молибдена и серебра			
КМК–АМо–50	Mo-50; Ag-50	10,2	3,85
КМК–АМо–80	Mo-80; Ag-20	10,2	5,70
На основе меди			
КМК–БМо50	Cu-50; Mo-50	9,5	2,85
КМК–БМо80	Cu-20; Mo-80	10,1	4,70
КМК–ЖМ30	Cu-30; Fe-70	7,8	4,50
ММК	Cu-99; Cd-1	8,7	2,30
На основе серебра и оксидов металлов			
КМК – А00	Ag-99,9	10,1	1,9
КМК – А10	Ag-85; Cd0-15	9,7	3,0
КМК – А10М	Ag-85; Cd0-15	9,7	2,8
КМК – А20М	Ag-90; Cd0-10	9,6	2,4
На основе серебра (меди) - графита			
КМК – А40	Ag-95; C-5	8,3-8,7	3,0
КМК – А32	Ag-95; C-5	8,5-8,9	3,5
КМК – А32М	Ag-95; C-5	8,5-8,9	4,0
КМК – Б10	Cu-95; C-5	6,7-7,3	4,0
На основе серебра и никеля			
КМК – А30М	Ag-70; Ni-30	9,7	3,0
КМК – А31М	Ag-60; Ni-40	9,5	3,5
СрН-70 прокат	Ag-70; Ni-30	9,8	2,5
На основе серебра и палладия			
ПдСр-70	Ag-70; Pb-30	10-11	14-16
ПдСрН-70-5	Ag-70; Pb-25; Ni-5	10-11	14-16



Таблица 6.2 – Области применения контактов из псевдосплавов в электрокоммутационных аппаратах

Электрокоммутационные аппараты, их номинальные характеристики	Основные электроконтактные свойства	Марки материалов
1	2	3
Высоковольтные выключатели, дугогасительные контакты $U \geq 1000 \text{ В}$ ; $I \geq 1000 \text{ А}$	Высокая дугостойкость, износоустойчивость при механических воздействиях, отсутствие склонности к свариванию, низкая прочность сварившихся мостиков, высокая теплопроводность	КМК-А61; КМК-Б21; КМК-Б23; КМК-Мо80; КМК-БМо80
Главные контакты	Низкое переходное сопротивление, высокая электро- и теплопроводность, Высокая износоустойчивость при механических воздействиях, хорошая прирабатываемость, низкая склонность к схватыванию контактов	КМК-А60; КМК-Б20; КМК-АМо50; КМК-БМо50
Высоковольтные вакуумные выключатели $U \geq 20\text{-}35 \text{ кВ}$ ; $I$ до 2000 А	Низкая склонность к схватыванию, низкое переходное сопротивление и низкая газонасыщенность, высокая электроэрозионная стойкость, тепло- и электропроводность, низкая упругость паров	КМК-БЖМ; КМК-Б23
Переключатели ступеней обмоток мощных трансформаторов $U \geq 1000 \text{ В}$ ; $I \geq 1000 \text{ А}$	Высокая электроэрозионная стойкость, износоустойчивость против механического воздействия, тепло- и электропроводность, низкая склонность к схватыванию	КМК-Б20; КМК-Б21

Продолжение таблицы 6.2

1	2	3
Разъединители, отделители	Высокие электро- и теплопроводность, низкое переходное сопротивление, малая склонность к свариванию	КМК-А60; КМК-А30М; КМК-Б20
Нерасходуемые электроды для контактной сварки стали и цветных металлов, электроискровой обработки	Высокие электро- и теплопроводность, высокотемпературные твердость и прочность на сжатие и крипоустойчивость, низкая склонность к свариванию, высокая термостойкость, окалиностойкость	КМК-Б20; КМК-Б21; КМК-Б23
Низковольтные тяжело- и средненагруженные аппараты: рубильники, переключатели, пакетные выключатели, автоматические выключатели, пускатели, контакторы, контролеры $U \geq 1000$ В; $I \geq 3000$ А	Высокие электро- и теплопроводность, низкое переходное сопротивление, высокие электроэрозионная и коррозионная стойкость, низкая стойкость к свариванию, хорошая прирабатываемость и износоустойчивость против механических воздействий	КМК-А60; КМК-А30М; КМК-А31М; КМК-А20М; КМК-А10М; КМК-А32; КМК-БМo50; КМК-АМo50;
Низковольтные средне- и слабонагруженные аппараты (контролеры, контакторы, пускатели, реле различного типа) $U \geq 1000$ В; $I \geq 1000$ А	Низкое и стабильное переходное сопротивление, высокая коррозионная и электроэрозионная стойкость, тепло- и электропроводность, хорошая прирабатываемость, высокая износоустойчивость против механических воздействий	КМК-А30М; КМК-А10М; КМК-А20М; КМК-А32; КМК-Б20; КМК-АМo50
Низковольтные слабонагруженные аппараты: датчики, реле, электроизмерительные приборы $U \geq 10^{-6} \cdot 360$ В; $I \geq 10^{-6} \cdot 10$ А		ПдСр70; ПдСрН70; КМК-А40; КМК-А32М

## 6.2 Магнитные материалы

Этот класс материалов условно принято подразделять на магнитомягкие, магнитотвердые и магнитодиэлектрики. Одна из определяющих характеристик – коэрцитивная сила  $H_c$ . Для магнитомягких материалов  $H_c < 4$  кА/м для магнитотвердых  $H_c > 4$  кА/м. Важным параметром является также намагниченность  $I_m$ , высокое значение которой необходимо для материалов, работающих в сильных полях.

Основными магнитомягкими материалами являются чистое железо, железо с добавками кремния, никеля, алюминия, кобальта. Для улучшения свойств порошковых магнитомягких материалов к железному порошку добавляют кремний в количестве 4-6 % (учитывая его угар при спекании), бор, алюминий и фосфор.

Область применения магнитомягких материалов весьма разнообразна, это – магнитопроводы различных приборов, сердечники маломощных трансформаторов, телефонные мембраны и т.п. Свойства этих материалов представлены в таблице 6.3.

Таблица 6.3 – Свойства магнитомягких материалов на основе железного порошка

Материал (состав. %)	плотность, $\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	сопротивление, R, мкОм·см	Магнитные свойства статических полей		
			$B_s$ , Тл	$H_c$ , А/м	$W_{max}$ , мГн/м
99Fe*	7,20-7,50	10,0	1,20-1,40	56,0-96,0	2,50-6,25
98Fe, 1P*	7,00-7,10	41,0	1,30-1,40	64,0-96,0	3,80-6,25
97Fe, 2Si*	7,00	44,6	1,00	120,0	1,90
96Fe, 4Si	6,90	70,5	1,00	128,0	2,10
95,5Fe, 4,5Si **	7,20-7,40	70,0	1,20-1,35	32,0-72,0	5,00-7,50
94Fe, 6Si	6,28	146,9	0,90	72,0	4,40
88Fe, 12Al**	6,30-6,50	90-100	1,25-1,35	24,0-48,0	6,25-10,0
50Fe, 50Ni***	8,12	40,0	1,52-1,58	3,6-3,4	54,0-64,0
14Fe, 72Ni, 14Cu	8,35	29,0	0,62-0,63	4,0	44,0-52,5
22Fe, 78Ni	7,70	-	0,80-1,0	1,6-6,4	62,5-81,0
84-86Fe, 9-10Si, 5-6Al	-	-	-	3,2-4,8	8,20
* C < 0,07 %;					
** C < 0,0313 %;					
*** C < 0,05 %.					

Магнитотвердые материалы (обладают высокой остаточной магнитной индукцией ( $B_r$ ), коэрцитивной силой ( $H_c$ ) и максимальной магнитной энергией ( $W_{max}$ )).

Комплекс свойств, характерных для магнитотвердых материалов, определяются гетерогенной структурой, достигаемой наличием в порошковой шихте нерастворимых при спекании компонентов или термической обработкой спеченной заготовки, обуславливающей выделение дисперсных фаз.

Магнитотвердые материалы применяют для изготовления постоянных магнитов, работающих в электрических машинах и аппаратах, в электро- и радиоприборах.

Среди магнитотвердых материалов широкое распространение получили порошковые сплавы систем Fe-Ni-Al (альни), Fe-Ni-Al-Co (альнико – при содержании кобальта 3-15 % и магнико при содержании 30-40 %, Fe-Cr-Co, Mn-Al, Pt-Co, Pt-Pd-Co, Co5-P3M).

В таблице 6.4 приведены составы и магнитные свойства некоторых порошковых магнитотвердых материалов.

Таблица 6.4 – Состав и свойства некоторых порошковых магнитов

Материал	Массовая доля. %	Магнитные свойства		
		$B_r$ , Тл	$H_c$ , кА/м	$W_{\text{реж.}}$ , кДж/м <sup>3</sup>
ММК-1	Fe-основа; Al-12; Ni-23	0,60	24	3,0
ММК-3	Fe-основа; Al-13; Ni-24; Co-3	0,52	44	4,0
ММК-6	Fe-основа; Al-9; Ni-19; Co-15;	0,65	44	5,0
ММК-10	Cu-4; Nb-0,3			
	Fe-основа; Al-7.5; Ni-14; Co-34;	0,80	100	15
КС-37	Pt-76.6; Co-23.2	0,7	320	32
КСП-37	Co-основа; Sm-36.0-38.5	0,77	540	55

Ферриты – это некомпенсированные антиферромагнетики (ферромагнетики), представляющие собой магнитные полупроводники ионного строения на основе оксидов железа ( $Fe_2O_3$ ) и других металлов (NiO, MgO, MnO, ZnO, CdO, CuO, BaO и т.п.). Они могут быть как магнитомягкими, так и магнитотвердыми.

Существует 6 групп ферритов:

- 1) магнитомягкие марганеццинковые типа  $(MnO)_x \cdot (ZnO)_y \cdot Fe_2O_3$ ;
- 2) магнитомягкие, кроме марганеццинковых, например типа  $(NiO)_x \cdot (ZnO)_y \cdot Fe_2O_3$  и другие;
- 3) с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ) типа  $(MnO)_x \cdot (MgO)_y \cdot Fe_2O_3$ ;
- 4) сверхвысокочастотные (СВЧ);
- 5) магнестрикционные (разновидность материалов 1 и 2 групп);
- 6) магнитотвердые типа  $BaO \cdot 6Fe_2O_3$ .

Ферриты обладают высоким электрическим сопротивлением, исключаящим возникновение потерь на вихревые токи при использовании в полях высокой частоты.

Наиболее широко распространены марганеццинковые (МН), никельцинковые (НН) и литиевые ферриты. Из них изготавливают сердечники катушек индуктивности, дросселей, трансформаторов и т.п. устройств, работающих на радиочастотах.

Ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса широко используются в логических и запоминающих устройствах ЭВМ.

В таблице 6.5 приведены свойства некоторых магнитотвердых ферритов.

Таблица 6.5 – Магнитные свойства магнитотвердых ферритов

Марка	$B_r$ , ТЛ	$H_{CI}$ кА/м	$H_{CB}$	$W_{s \max.}$ , кДж/м <sup>3</sup>
6БИ240(1БИ)	0,19	240	125	3
16БА190 (2БА)	0,30	190	185	8
21СА320 (2,6СА)	0,34	320	240	10,5
10КА165 (1,5КА)	0,24	165	143	5

Магнито-диэлектрики представляют собой смесь ферромагнитных магнитно-мягких и магнитно-твердых материалов с диэлектриком, в качестве которого используют жидкое стекло, бакелит, шеллак, полистирол, а так же эпоксидные, полиэфирные и другие смолы. Структура таких материалов состоит из ферромагнитных частиц, покрытых диэлектриком.

Магнито-диэлектрики характеризуются постоянством магнитной 121 проницаемости, большим удельным электросопротивлением, низкими потерями на вихревые токи и на гистерезис. Применяются они в радиотехнике и электронике для изготовления сердечников катушек индуктивности и высокочастотных трансформаторов, деталей радиоаппаратуры и т.д.

### 6.3 Фильтры и пористые изделия

Эти порошковые материалы находят применение в различных областях техники. Фильтры для очистки жидкостей и газов, пористые изделия, предназначенные для равномерного распределения жидких и газообразных сред, демпфирования механических и звуковых колебаний, теплоизоляция – все это может быть реализовано с помощью методов порошковой металлургии и широко применяться в машиностроении, химической, металлургической и авиационной промышленности и в новых областях техники.

Фильтры и пористые изделия изготавливают из порошков железа, легированных сталей, меди, бронзы, титана, никеля, тугоплавких металлов, сплавов и соединений, причем используют как сферические, порошки и волокна, так и обычные несферические порошки. В технологии формования и спекания используют самые разнообразные методы – обычное прессование и спекание, гидростатическое прессование, прокатку, мундштучное прессование и др.

Для волокнистых фильтровых материалов характерны весьма высокие показатели прочности и проницаемости. Так, для волокон из нержавеющей стали с  $d = 50$  мкм наблюдается следующая зависимость:

Пористость, % .....	10	20	30
$\sigma$ , МПа .....	343-706	275-490	216-265
Размер пор (максимальный / средний), мкм ... ..	8/5	17/10	30/17

К эксплуатационным свойствам пористых изделий относятся проницаемость, тонкость очистки, стабильность. Проницаемость зависит от пористости, размера, формы и распределения пор, условий испытаний.

### 6.3.1 Фильтрующие элементы на основе железа

Пористые фильтрующие элементы успешно эксплуатируются в двигателях ЯАЗ-204 и др.

Из порошка железа или малоуглеродистой стали, предварительно хромированного в течение 5 ч получен пористый металл для фильтрующих элементов, работающих в жидких средах. Хромирование порошков существенно повышает коррозионную стойкость и прочность фильтрующих элементов. Для получения пористости от 50 до 60 %, и улучшения формуемости порошков в шихту добавляют от 5 до 7 % парафина. Спекание проводят по следующему режиму: медленный нагрев до  $T = 400$  °С в течение 4-6 ч для удаления парафина, затем нагрев до 1200 °С и выдержка при этой температуре в течение 2 ч.

Характеристики пористого железа в зависимости от давления прессования и размера фракций порошка приведены в таблице 6.6.

Таблица 6.6 – Характеристики пористых фильтрующих элементов из железа

Размер фракций, мкм	Давление прессования, МПа	Пористость, %	$\sigma_{сж}$ , МПа	$\sigma_{изг}$ , МПа при $T$ , °С	
				20	400
-300...+200	200	36,2	478	128	61
-150...+125	50	51,0	61,6	34,6	8,02
-150...+125	25	56,6	21	13,2	-

Для сравнения в таблице 6.7 приведены характеристики отечественных фильтров, изготовленных из порошка нержавеющей стали 12Х18Н10.

Таблица 6.7 – Характеристики фильтрующих элементов из нержавеющей стали 12X18H10

Размер частиц порошка, мкм	Размер фильтрующего элемента, мм	Пористость, %	Производительность по воздуху, м <sup>3</sup> /мин	Размер пор, мкм		Разрушающее давление, МПа
				макс.	сред.	
-1000...+800	50x4	36	0,13	190	127	210
	40x34x50	44	0,87	265	198	180
-100...+63	50x3	30	0,008	26	19	410
	40x34x50	34	0,052	36	25	440

*Пористые проницаемые материалы из коррозионностойкой стали*

Исходный материал – порошок коррозионностойкой стали X18H9 (ПРХ18H9).

Способ изготовления – прессование порошка при давлении 500 МПа, спекание заготовок в атмосфере водорода при температуре 1300 °С.

Свойства порошковых материалов из коррозионностойкой стали представлены в таблице 6.8.

Таблица 6.8 - Свойства пористых фильтрующих изделий из порошка коррозионностойкой стали

Марка изделия	Средний размер пор, мкм	Тонкость фильтрации, мкм	Минимальная пропускная способность, м/с		Внутреннее разрушающее давление, (не менее), МПа	Допустимое усилие при осевом сжатии, Н
			по воздуху	по жидкости		
06.4	40	25 - 16	$2,67 \cdot 10^{-3}$	$0,40 \cdot 10^{-3}$	1,5	2452
10.4	60	32 - 25	$4,16 \cdot 10^{-3}$	$0,66 \cdot 10^{-3}$	1,5	2452
20.4	90	36 - 32	$5,30 \cdot 10^{-3}$	$1,50 \cdot 10^{-3}$	1,0	1472
30.4	100	40 - 36	$8,30 \cdot 10^{-3}$	$1,83 \cdot 10^{-3}$	1,0	1472
40.4	120	63 - 50	$13,3 \cdot 10^{-3}$	$2,00 \cdot 10^{-3}$	1,0	1472
60.4	180	80 - 63	$6,00 \cdot 10^{-3}$	$2,50 \cdot 10^{-3}$	0,7	1177
80.4	230	100 - 80	$7,00 \cdot 10^{-3}$	$2,50 \cdot 10^{-3}$	0,7	1177

Масса фильтрующих элементов от 0,2 до 0,7 кг. Габариты фильтрующих элементов типа втулки: диаметр – от 12 до 102 мм, длина – до 800 мм.

Габариты и области применения фильтрующих элементов представлены в таблице 6.9.

Таблица 6.9 – Характеристика никелевых пористых фильтрующих изделий

Тип фильтрующего элемента	Габариты, мм		Область применения
	диаметр	длина	
Втулка	12 – 102	до 800	Фильтрация жидкостей и газов от механических примесей (в том числе и дизельного топлива)
Диск	10 – 90	-	Подавление шума в пневматических устройствах Защита от пламени и удара в газовых средах.

Производство - ОАО «КИМПОР» Краснопахорский завод композиционных изделий из металлических порошков.

Изготовление фильтрующих элементов – прокатка порошков в пористую ленту (в непрерывном режиме) с последующим спеканием и свойства приведены в таблице 6.10.

Таблица 6.10 – Характеристика пористых никелевых лент

Параметр	Тип ленты				
	1	2	3	4	5
Толщина, мкм	40 – 80	50 – 60	85 – 100	110 – 140	200 – 400
Ширина, не более, мм	100	100	100	300	200
Пористость, %	5 – 15	20 – 30	30 – 36	33 – 40	40 – 50
Предел прочности при растяжении, МПа	90	65	65	50	50

### 6.3.2 Фильтрующие элементы из пористого вольфрама

Вольфрамовый порошок марок ГВЗК, ПВ-0 и ПВ-1 получают водородным восстановлением оксидов вольфрама. Химический состав марок вольфрамовых порошков приведен в таблице 6.11.

Таблица 6.11 – Химический состав порошков вольфрама

Марка	Массовая доля примеси, %, не более								
	Fe	Al	P	S	Ni	Si	Ca	Mo	O и влаги
ПВЗК	0,018	0,003	0,005	0,004	0,008	0,003	0,005	0,19	0,18
ПВ-0	0,02	0,01	0,005	0,004	0,008	0,005	0,05	0,3	0,25
ПВ-1	0,02	0,01	0,005	0,01	0,008	0,01	0,01	0,3	0,25



Порошок не должен содержать посторонних включений и крупных конгломератов, размер частиц от 1 мкм до 3 мкм.

Дисперсность порошка, определяемая по поглощению паров метанола, составляет, мг/г:

- 0,02-0,07 – для изготовления твердых сплавов;

- 0,04-0,07 – для изготовления изделий различного назначения. Назначение порошка и его дисперсность оговариваются в наряде-заказе.

Насыпная плотность порошка составляет 2,0 – 5,5 г/см<sup>3</sup>.

Порошок упаковывают в банки из белой жести или (по согласованию с потребителем) в запаянные двойные полиэтиленовые мешки; масса порошка в банке или мешке не должна превышать 25 кг.

Порошок хранят в упаковке в сухом отапливаемом помещении в условиях исключающих механическое повреждение тары и попадание на вольфрам влаги и активных химических веществ. Гарантийный срок хранения 6 месяцев с момента приема ОТК завода.

Вольфрамовый порошок по токсичности относится к 4 классу опасности по ГОСТ 12.1.005-88. Пыль его вызывает раздражение глаз, кожи, верхних и глубоких дыхательных путей, бронхиальную астму, нарушение со стороны желудочно-кишечного тракта.

Вольфрамовый порошок пожаро-взрывобезопасен, не образует токсических соединений в воздушной среде и сточных водах.

Производитель порошка: ОАО «Победит» (Республика Северная Осетия – Алания).

В системе W–O достоверно установлено существование четырех оксидов вольфрама: WO<sub>3</sub> (α-оксид с областью гомогенности WO<sub>3</sub>–WO<sub>2,9</sub>) – желтого цвета (с уменьшением содержания кислорода цвет WO<sub>3</sub> изменяется от желтого к голубому; поэтому оксид WO<sub>2,96</sub> называют «голубой оксид».); WO<sub>2,9</sub> или W<sub>20</sub>O<sub>58</sub> < p – оксид с областью гомогенности WO<sub>2,9</sub>–WO<sub>2,83</sub>) – синего цвета; WO<sub>2,9</sub>, или W<sub>18</sub>O<sub>49</sub> (γ-оксид с областью гомогенности WO<sub>27,2</sub>–WO<sub>2,66</sub>) – фиолетового цвета; WO<sub>2</sub> (δ – оксид с областью гомогенности WO<sub>2,03</sub> – WO<sub>2</sub>) – темно-коричневого цвета.

Рекомендуется использовать изделия из пористого вольфрама для фильтрации расплавленных металлов, агрессивных газов и жидкостей при повышенных температурах, а также в качестве конструктивного материала в охлаждающих устройствах. Характеристики фильтрующих элементов приведены в таблицах 6.12, 6.13.

Таблица 6.12 – Характеристики фильтрующих элементов из пористого вольфрама

Температура спекания, °С	Содерж. Ni, %	Пористость, %	Производительность по воздуху, л/мин	Размер пор, мкм		Разрушающее давление, МПа
				сред.	макс.	
1500	0,2	36,9	0,093	128	154	30
	0,5	36,7	0,088	127	150	26
1700	0,2	36,7	0,105	142	186	35
	0,5	36,6	0,101	149	199	66

Таблица 6.13 - Характеристика никелевых пористых фильтрующих изделий (ОСТ 26-2088-81, ТУ 26-60-73)

Тип фильтрующего элемента	Габариты, мм		Область применения
	диаметр	длина	
Втулка	12-102	До 800	Фильтрация жидкостей и газов от механических примесей (в том числе и дизельного топлива.) Подавление шума в пневматических устройствах
Диск	10-90	-	Защита от пламени и удара в газовых средах

Производитель - ОАО «КИМПОР» Краснопахорский завод композиционных изделий из металлических порошков

Способ изготовления фильтрующих элементов - прокатка и порист ленту (в непрерывном режиме) с последующим спеканием (таблица 6.14).

Таблица 6.14 - Характеристика пористых никелевых лент производства УЭХК

Параметр	Тип ленты					
	1	2	3	4	5	6
Толщина, мкм	40-80	50-60	85-100	110-140	200-400	250-800
Ширина, не более, мм	100	100	100	300	200	100
Пористость, %	5-15	20-30	30-36	33-40	40-50	68
Предел прочности при растяжении, МПа	90	65	65	50	50	-

Прокатная никелевая лента типа 6 изготавливается нанесением с двух сторон на ленту типа 1 или типа 2 дополнительных пористых никелевых слоев.

#### 6.4 Свойства спеченных изделий из порошков титана

Полученные из нелегированных порошков титана спеченные изделия имеют механические свойства, сравнимые со свойствами образцов из плавленого технического титана (таблица 6.15).

При легировании титана используют преимущественно следующие легирующие металлы: Al, Mn, V, Sn, Zr, Mo, Cr, Fe, Si (таблица 6.16).

Легирование порошком алюминия повышает прочность изделий из порошков титана при одновременном снижении пластичности. Объясняется это образованием ряда твердых растворов в  $\alpha$ -фазе. Аналогичное изменение свойств отмечено и при легировании молибденом.

Таблица 6.15 – Механические свойства изделий из порошков титана при разной технологии их получения

Технологические схемы	Плотность, г/см <sup>3</sup>	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	Режимы
Холодное прессование-спекание	4,3	410	35,2	56,4	P=600 МПа; t = 1200 °C; $\tau$ =6 ч
Горячая экструзия	4,5	380	41,3	76,2	$\gamma_H=4,1$ г/см <sup>3</sup> ; t=960 °C; $\mu=25$ ; P=350 МПа
Горячая объемная штамповка	4,5	420	38,2	58,5	$\gamma_H=4,2$ г/см <sup>3</sup> ; t=960 °C; P=450 МПа
Изотермические процессы:					
экструзия	4,5	460	32,4	60,2	$\gamma_H=4,1$ г/см <sup>3</sup> ; t=870 °C; $\mu=8$ ; P=180 МПа
отжиг	4,5	430	40,3	75,3	t = 750 °C; $\tau$ =2 ч
штамповка	4,5	450	31,6	58,3	$\gamma_H=4,24$ г/см <sup>3</sup> ; t=870 °C; P=230 МПа
отжиг	4,5	420	38,1	60,1	t=750 °C; $\tau$ =2 ч

Таблица 6.16 – Механические свойства титана при разных способах легирования

Марка сплава	Тип и количество легирующих элементов, % по массе	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	$a_k$ , кДж/м <sup>2</sup>
<b><math>\alpha</math>-сплавы</b>					
BT1	Технически чистый титан	450-600	250	-	700
BT5	5Al	750-950	10	25	300
BT5-1	5Al; 2,5 Sn	800-1000	10	25	400
<b><math>(\alpha+\beta)</math>-сплавы</b>					
OT4	3Al; 1,5Mn	700-900	20	35	450
OT4-2	6Al; 1,5Mn	1000-1200	12-20	30-40	400-700
BT4	4Al; 1,5Mn	850-1050	10	30	350
BT6	6Al; 4V	950-1100	10	30	300-500
BT6C	4,5Al; 3,5V	850-1000	12	25	500-800
BT8	6,5Al; 3,5Mo; 0,25Si	1050	9	30	300
BT9	6,5Al; 3,5Mo; 2Cr; 1Fe	1100	9	25	300
BT14	4Al; 3Mo; 1V	1150-1400	6,8	20	250-300
BT3-1	5,5Al; 2Mo; 2Cr; 1Fe	1000	12	35	300
<b><math>\beta</math>-сплавы</b>					
BT15	2Al; 8Mo; 11Cr	900-1070	10	35	500

Исходя из данных о зависимости механических свойств изделий от типа и количества легирующих элементов, а также их относительной стоимости, рекомендован сплав титана, содержащий 1,6-1,7 % Al, 0,6-0,75 % V и 1,5-1,6 % Mo для изготовления шатунов кривошипного механизма двигателя внутреннего сгорания. Получены высокие механические свойства изделий из этого сплава:  $\sigma_B = 870$  МПа;  $\delta = 10$  %;  $a_K = 980$  кДж/м<sup>2</sup>.

### **6.5 Свойства дисперсноупрочненных сплавов (титана, никеля, кобальта, бериллия)**

Создана новая серия композиционных материалов, например дисперсноупрочненные и легированные материалы на основе железа, нашедшие применение в ряде отраслей промышленности. В качестве легирующих элементов в порошковых сталях наибольшее распространение получили элементы VI группы периодической системы Cr, Mo, W. Все эти элементы образуют с железом твердые растворы - ограниченные (Mo и W) и неограниченные (Cr) и являются  $\alpha$ -стабилизаторами, то есть выклинивают  $\gamma$ -область на диаграмме состояния. Это позволяет распространить закономерности и корреляции, обнаруженные при изучении какой-либо одной системы, на остальные. Особенности поведения фтористого кальция в различных материалах поставили целый ряд вопросов, связанных с формированием структуры композиционных материалов, содержащих при подшишковке фтористый кальций.

Конечной целью исследований являлась разработка технологий изготовления композиционных материалов со сверхпределной растворимостью легирующих элементов в железной матрице.

При рентгеновском исследовании электронной плотности систем Me-Mo-CaF<sub>2</sub> была проведена съемка и математическая обработка следующих композиций:

- 1) железо особо чистое (0,99997);
- 2) молибден чистый (0,9995);
- 3) медь чистая (0,9993);
- 4) Fe +5 вес. % CaF<sub>2</sub>;
- 5) Mo + 5 вес. % CaF<sub>2</sub>;
- 6) Cu+1 вес. %CaF<sub>2</sub>;
- 7) Fe + 25 вес. % Mo;
- 8) (Fe +25 вес. % Mo) + 5 вес. % CaF<sub>2</sub>;
- 9) Cu + 25 вес. % Mo;
- 10) (Cu + 25 вес. % Mo) + 1вес. % CaF<sub>2</sub>.

Все композиции были получены смешиванием исходных компонентов, прессованием при давлении 800 МПа и спекании в атмосфере водорода в течение 2 часов при температуре 1000 °С для композиций на железной основе и 1200 °С для композиций на медной основе.

Установлено, что введение фтористого кальция до его улетучивания приводит к смещению линии твердого раствора в область меньших углов.

Фтористый кальций активирует поток атомов молибдена вглубь железа и атомов железа вглубь молибденового слоя и таким образом становится невозможным образование интерметаллида молибдена или других элементов из-за невысокой стабильности зарождающейся фазы.

Ни фтор, ни кальций не образуют с указанными элементами в композиции твердых растворов, а только провоцируют создание сверхпредельных твердых растворов металлов.

#### *Титан.*

Порошок получают из губчатого титана механохимическим, термохимическим и плазмохимическими методами. В зависимости от химического состава, крупности, твердости по Бринеллю (НВ) порошок изготавливают 14 марок (таблица 6.17): ПТХ – порошок титановый химический; первая цифра отражает тип порошка по крупности, вторая по величине НВ.

Содержание влаги в порошках марок ПТХ–6–1, ПТХ–6–2, ПТХ–7–1 ПТХ–7–2 находятся в пределах 20–30 %. Удельная поверхность порошков ПТХ – 6 и ПТХ – 7 не менее 0,2 м<sup>2</sup>

Порошок горюч; температура самовоспламенения 500 °С.

Порошок используют для производства изделий методом порошковой металлургии.

Таблица 6.17 – Гранулометрический состав и содержание примесей в некоторых химических порошках титана.

Марка	Фракции, мм	Отклонение от нормы, %, не более		Массовая доля примесей, %			
		крупнее	мельче	Fe	Cl	N	H
ПТХ–1–1	–3,0 + 1,0	10	10	0,3	0,06	0,05	0,1
ПТХ–1–2	–3,0 + 1,0	10	15	0,8	0,07	0,08	0,2
ПТХ–2–1	–1,0 + 0,63	10	10	0,3	0,06	0,05	0,1
ПТХ–2–2	–1,0 + 0,63	10	15	0,8	0,08	0,08	0,2
ПТХ–3–1	–1,0 + 0,18	10	10	0,3	0,07	0,05	0,1
ПТХ–3–2	–1,0 + 0,18	10	15	0,8	0,09	0,08	0,2

При введении оксидов в титан, легированный молибденом, обнаружено некоторое дополнительное упрочнение (таблица 6.18). Таким образом, оксиды могут применяться для частичной замены дорогого молибдена.

Таблица 6.18 – Влияние добавок оксидов на свойства сплавов на основе титана

Сплав	20 °С			400 °С		
	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %
Ti	700	18	30	200	22	45
Ti + 1 % Mo + 0.5 % ZrO <sub>2</sub>	840	12	23	260	20	37
Ti + 1 % Mo + 1 % ZrO <sub>2</sub>	900	12	15	270	18	35
Ti + 4 % Mo + 0,5 % ZrO <sub>2</sub>	870	10	20	320	17	30
Ti + 4 % Mo + 1 % ZrO <sub>2</sub>	1000	10	13	390	13	30
Ti + 5 % Mo + 0,7 % ZrO <sub>2</sub>	1000	5	18	500	8	30
Ti + 2, 5 % Mo + 1 % ZrO <sub>2</sub>	980	5	11	380	16	35

Совершенно очевидно, что даже при условии создания дисперсноупрочненных титановых сплавов они не смогут конкурировать по прочности и жаропрочности с существующими титановыми сплавами, имеющими при температуре 500 °С кратковременную прочность до 900 МПа и 100-ч длительную прочность до 700 МПа.

Это связано с тем, что вследствие низкой жаростойкости титановые сплавы эксплуатируются при температурах не выше 0,4  $T_{пл}$ , т.е. в температурной области, в которой высокий эффект упрочнения достигается классическими методами легирования.

#### *Никель.*

Косвенное подтверждение влияния холодной прокатки и отжига на изменения характеристик прочности листов сплавов ТД-никель и ТД-нихром приведены в таблице 6.19.

Таблица 6.19 – Влияние холодной прокатки и отжига на свойства листов сплавов ТД-никель и ТД-нихром

Сплав	Режим обработки	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %
		20 °С			1200 °С		
		3	4	5	6	7	8
Ni + 2ThO <sub>2</sub>	Исходное состояние	387	492	10,4	730	826	6,2
	Деформация 50 %...	579	605	2,5	563	846	4,9
	Деформация 50 % + отжиг 1200 °С, 10 ч.	339	475	6,8	622	910	4,0
	Деформация 75 %...	608	627	0,6	464	796	5,2
	Деформация 75 % + отжиг 1400 °С, 20 ч.	359	477	6,2	591	809	2,6

Продолжение таблицы 6.19

1	2	3	4	5	6	7	8
	Деформация 90 %...	733	735	0,4	–	–	–
	Деформация 90 % + отжиг 1400 °С, 20 ч.	453	542	1,7	771	900	0,8
Ni + 20Cr + 2ThO <sub>2</sub>	Исходное состояние	668	983	17,6	628	770	1,5
	Деформация 50 %...	830	138	2,6	214	408	5,6
	Деформация 50 % + отжиг 1200 °С, 10 ч.	682	988	22,0	292	360	5,3
	Деформация 75 %...	1325	1462	1,6	290	334	8,6
	Деформация 75 % + отжиг 1200 °С, 10 ч.	875	1021	8,0	293	329	7,2

Характеристики прочности дисперсноупрочненного никеля приведены в таблице 6.20.

В таблице 6.21 приведена температурная зависимость свойств сплава ТД-нихром, содержащего 20 % Cr в твердом растворе на основе никеля и 2 % ThO<sub>2</sub>S. Как видно из приведенных данных, положительное влияние легирования матрицы на прочность сохраняется до 800 °С.

В таблицах 6.22, 6.23, 6.24 приведены наиболее используемые сплавы на основе никеля и титана, самофлюсующиеся сплавы и высокоуглеродистые легированные сплавы.

Таблица 6.20 – Сравнительные характеристики длительной прочности дисперсно-упрочненных и стареющих никелевых сплавов

Марка сплава	Вид полуфабрикатов	900 °С	1000 °С	1100 °С	1200 °С
1	2	3	4	5	6
ТД-никель, ВДУ-1	Прутки	<u>150</u>	<u>125</u>	<u>105</u>	<u>75</u>
		140	120	100	65
ВДУ-2	-“-	<u>105</u>	<u>90</u>	<u>75</u>	<u>55</u>
		95	80	65	40
ЖС-6К	-“-	<u>320</u>	<u>150</u>	<u>50</u>	–
		170	70	20	
ЭП220	-“-	<u>280</u>	<u>105</u>	<u>25</u>	–
		170	50	10	
ТД-никель, ВДУ-1	Листы	<u>115</u>	<u>95</u>	<u>75</u>	<u>50</u>
		105	85	65	40

Продолжение таблицы 6.20

1	2	3	4	5	6
ВДУ-2	-“-	$\frac{95}{85}$	$\frac{75}{65}$	$\frac{55}{45}$	$\frac{35}{25}$
ЭИ868	-“-	$\frac{50}{30}$	$\frac{30}{15}$	$\frac{15}{-}$	-
* В числителе данные для Б100, МПа, в знаменателе для – Б1000, МПа					

Таблица 6.21 – Механические свойства\* сплава ТД-нихром

Температура, °С	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_B$	$\delta$	$\psi$
	МПа		%	
20	$\frac{440-460}{600-650}$	$\frac{800-850}{900-950}$	$\frac{18-19}{22-24}$	$\frac{25}{-}$
	$\frac{400-420}{500-550}$	$\frac{700-750}{850-900}$	$\frac{14-18}{18-20}$	$\frac{20}{-}$
400	$\frac{380-390}{450-500}$	$\frac{650-700}{780-820}$	$\frac{18-19}{16-18}$	$\frac{20}{-}$
	$\frac{250-260}{350-400}$	$\frac{480-500}{450-550}$	$\frac{20-23}{8-12}$	$\frac{23}{-}$
800	$\frac{200-220}{220-240}$	$\frac{240-260}{250-260}$	$\frac{20-22}{4-5}$	$\frac{30}{-}$
	$\frac{110-120}{110-120}$	$\frac{130-140}{120-140}$	$\frac{15-16}{2-3}$	$\frac{25}{-}$
1100	$\frac{85-90}{80-85}$	$\frac{95-105}{90-100}$	$\frac{14-15}{2-3}$	$\frac{25}{-}$
	$\frac{75-80}{50-60}$	$\frac{80-90}{60-70}$	$\frac{10-12}{2-3}$	$\frac{15}{-}$
* В числителе данные для прутков, в знаменателе – для листов				



Таблица 6.22 – Сплавы на основе никеля и титана

Марка	Химический состав, %	Температура плавления, °С	Твердость, HRC	Свойства покрытий
ПН70Ю30	Ni – основа; Al - 30,5	1630	40	Высокая жаростойкость и теплостойкость, износостойкость в парах трения с чугуном
ПН85Ю15	Ni – основа; Al - 13,5	1380	30-35	То же
ПН55Т45	Ni – основа; Ti - 45	1310	55-60	Высокая износостойкость, устойчивость к коррозии
ПТ86Н12	Ti – основа; Ni - 11	1000	-	Устойчивость к химической коррозии, жаростойкость
ПТ65Ю35	Ti – основа; Al - 37	1450	-	То же
ПН75Ю23В	Ni – основа; Al – 23; Cr-3	1600	-	Высокая стойкость к действию щелочей, карбонильной коррозии, газообразивному износу при повышенных температурах
ПХ20Н80	Ni – основа; Cr - 20	1450	35-40	То же
ПХ20Н70Ю10	Ni – основа; Cr – 17, Al - 9,5	1450	35-40	“
ПХ16Н77Ю6	Ni основа; Cr – 17, Al - 6	1450	35-40	“
ПР – НЮ5	Ni – основа; Al - 5	1450	-	Подслой для износостойких покрытий
<p>Примечания</p> <p>1 Область применения сплавов: защитные слои на деталях машин и оборудования металлургического, энергетического, химического, нефтедобывающих производств, ДВС и др.</p> <p>2 Способы нанесения покрытий: плазменное и детонационное напыление.</p>				

Таблица 6.23 – Самофлюсующиеся сплавы

Марка	Химический состав, %	Температура плавления, °С	Твердость. HRC	Свойства покрытий
ПР-Н80Х13С2Р	Ni-основа; С-0,3; Cr-13; Si-2,4; В-1,5	1070	29-34	Высокая износостойкость, высокая коррозионная устойчивость и жаростойкость, хорошая прочность сцепления со сталями. Твердость и износостойкость сплавов возрастает, а сопротивление удару падает по мере увеличения в них содержания углерода, бора и кремния
ПР-Н77Х15С3Р2	Ni-основа; С-0,5; Cr-15; Si-3,2; В-2	1050	37-42	
ПР-Н73Х16С3Р3	Ni-основа; С-0,7; Cr-16; Si-3,2; В-2,7	1050	47-52	
ПР-Н70Х17С4Р4	Ni-основа; С-1; Cr-17; Si-4,1; В-3,6	990	55-59	
ПР-Н67Х18С5Р4	Ni-основа; С-1,2; Cr-17,5; Si-4,5; В-4,3	1000	60-62	
ПР-Н65Х25С3Р3	Ni-основа; С-1,2; Cr-25; Si-2,7; В-2,5	1050	45-51	
ПР-Н68Х21С5Р	Ni-основа; С-0,4; Cr-21; Si-4,5; В-1,1	1070	44-50	
ПГ-СР2	Ni-основа; С-0,3; Cr-13,5; Si-2,5; В-1,8	1050	40-45	
ПГ-СР3	Ni-основа; С-0,5; Cr-15; Si-3; В-2,4	1050	50-55	
ПГ-СР4	Ni-основа; С-0,8; Cr-16,5; Si-3,7; В-3,3	990	58-62	
ПГ-10Н-01	Ni-основа; С-0,6; Cr-20; Si-4,5; В-3,4	–	55-620	То же
ПГ-12Н-01	Ni-основа; С-0,6; Cr-14; Si-3,2; В-2,5	–	45-50	“
ПР-НХ7С4Р3	Ni-основа; С-0,4; Cr-6,8; Si-4,1; В-3	980	50-52	Хорошая жидкотекучесть
ПР-НД42СР	Cu-основа; Sn-8,2; Si-1; В-0,8; Ni-5	1065	200 НВ	Хорошая адгезия с чугуном
ПР-ОНСР	Cu-основа; Sn-8,2; P-0,4; Si-14,5; В-2,5; Ni-14,5; Cr-2,5; Si-2,5	700	140 НВ	То же
ПР-ОФНХСР	Cu-основа; Sn-8,2; P-0,4; Si-14,5; В-2,5; Ni-14,5; Cr-2,5; Si-2,5	630	220 НВ	Прочные и износостойкие слои на меди и стали
ПР-Х4Г2Р4С2Ф	Fe-основа; Cr-3,7; Mn-2,2; В-3,8; Si-2,5; V-0,8	1200	58-60	Высокая износостойкость
ПР-ЖНДСР	Fe-Ni-Cu-Si-B	1025	240 НВ	Хорошая адгезия с чугуном
Примечания				
1 Область применения: роторы и втулки насосов, шнеки и корпуса экструдеров пластмасс, кулачковые распредвалы, шейки валов, седла клапанов, калибры и штампы, детали запорной арматуры, лопатки воздуходувок и газовых турбин, опорные цапфы и диски, детали станков и др.				
2 Способы нанесения: газопламенным напылением, плазменным напылением и наплавкой.				
3 Наряду с указанными в таблице марками порошков, АП ЛПС может производить и другие порошковые материалы по рецептуре потребителя, такие, как: ПГ- ЮН-01, ПГ-1 2Н-01, ПГ-1 2Н-02, ПГ-10К-01, ПГ-19М-01.				

Таблица 6.24 – Высокоуглеродистые легированные сплавы

Марка	Химический состав, %	Температура плавления, °С	Твердость, HRC	Свойства покрытий
ПГ - С27	Fe-основа; C-3,9; Cr-26; Si-1,5; Ni-1,7; W-0,3; Mn-1,1	1280-1320	59	Высокая износостойкость при абразивном износе, эффект самозатачивания при обработке почвы
ПГ-С1	Fe-основа; C-2,9; Cr-29; Si-3,5; Mn-4,2; Ni-4	1280-1320	51	
ПГ - УС25	Fe-основа; C-4,9; Cr-38; Si-2,1; Mn-2,5; Ni-1,4	1280-1320	55	
ПГ – ФБХ6-2	Fe-основа; C-4,5; Cr-34; Si-1,7; Mn-2,7; В-1,6	1280-1320	52	
ПР- Х18ФНМ	Fe - основа	-	44	Высокие износо-, коррозионная стойкость, хорошие сварочные свойства
ПР-ЧН15Д7	Fe-основа; C-2,6; Cr-1,7; Si-2,2; Mn-1; Ni-15; Cu-6,5	-	-	Хорошая износостойкость при повышенных температурах
ПГ-Л101	Fe- основа; C-5,9; Cr-55; Si-9; Mn-3; Ni-5	-	-	Наполнители лент и проволоки для покрытий, стойких к абразивному износу
ПГ-Л102	Fe-основа; C-5,9; Cr-47; Si-9; Mn-3; В-2,4	-	-	
ПР-ХЗОСРНД	Fe- основа; C4,9; Cr-30; Si-3,2; Mn; Ni -1.4; В-2	1240-1260	59	Износостойкость в сочетании с жаростойкостью
ПР – ХЗОГСР	Fe - основа	1200-1240	58	
ПР-ФМИ	Fe- основа; C-3,5; Si-2,5; Mn-12; В-3	1200	55	Высокая износостойкость
Примечания				
1 Область применения: наплавочные сплавы для массового упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин, деталей экструдеров, арматуры систем гидропривода и др.				
2 Наносятся индукционной и плазменной наплавкой.				

### Кобальт.

Кобальтовый порошок электролитический получают электролизом водных растворов. Химический состав марок порошков представлен в таблице 6.25.

Размер частиц порошка должен быть менее 71 мкм; допускается содержание фракции +71 мкм не более 4 % от массы партии. Массовая доля фракции – 45 мкм должна составлять не менее 30 %.

Таблица 6.25 – Химический состав порошков кобальта

Марка	Со, не менее	Содержание примеси %, не более*					
		Fe	Si	Ni	C	Cu	Потеря массы при прокаливании в водороде
ПК-1у	99,25	0,2	0,025	0,4	0,02	0,04	0,1
ПК-1	99,2	0,2	0,03	0,4	0,02	0,05	0,1
ПК-2	98,2	0,5	0,05	1,0	0,05	0,10	0,1

\* Массовая доля влаги в порошке не должна превышать 0,15 %

Кобальтовый порошок упаковывают в герметичные металлические банки или в полиэтиленовые бутылки вместимостью не более 10 л.

Кобальтовый порошок при нормальных условиях негорюч (температура воспламенения 370 °С), пожаро- и взрывобезопасен, токсичен.

Порошок кобальта используют для производства изделий методами порошковой металлургии и магнитов.

Производитель порошка: РАО «Норильскникель»

Ниже 477 °С кобальт имеет ГПУ решетку, благодаря чему дисперсноупрочненные кобальтовые сплавы при комнатной температуре имеют более высокую прочность, чем аналогичные по составу никелевые сплавы, однако невысокую пластичность. Небольшие модифицирующие добавки циркония обеспечивают повышение пластичности с одновременным ростом прочности. При температурах выше 477 °С, при которых кобальт имеет ГЦК решетку, кобальтовые дисперсноупрочненные сплавы не имеют заметных преимуществ по прочности по сравнению с аналогичными никелевыми сплавами.

В таблице 6.26 приведены механические свойства прутков нелегированных дисперсноупрочненных кобальтовых сплавов. Длительная 100-ч прочность для сплава Со + 2 % ThO<sub>2</sub> + 0,2 % Zr достигает при 1095 °С 100-110 МПа.

В таблице 6.27 приведены значения пределов прочности наиболее перспективных легированных сплавов.

Таблица 6.26 – Свойства нелегированных дисперсноупрочненных кобальтовых сплавов

Сплав	25 °С		760 °С		1090 °С	
	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %
Co + 2 % ThO <sub>2</sub>	960	8	170	16	85	9
Co + 2 % ThO <sub>2</sub> + 0,2 % Zr	1020	13	250	24	140	13

Таблица 6.27 – Предел прочности легированных дисперсноупрочненных кобальтовых сплавов

Сплав	$\sigma_B$ , МПа, при температуре, °С	
	760	1090
Co + 20 % Ni + 18 % Cr + 4 % ThO <sub>2</sub>	–	191
Co + 20 % Ni + 22 % Cr + 4 % ThO <sub>2</sub>	465	163
Co + 20 % Ni + 30 % Cr + 4 % ThO <sub>2</sub>	585	138
Co + 15 % Ni + 10 % Mo + 4 % ThO <sub>2</sub>	580	154
Co + 15 % Ni + 15 % Mo + 4 % ThO <sub>2</sub>	731	128
Co + 15 % Ni + 15 % W + 4 % ThO <sub>2</sub>	520	151
Co + 10 % Ni + 20 % Cr + 10 % W + 4 % ThO <sub>2</sub>	698	137
Co + 15 % Ni + 20 % Cr + 5 % MO + 4 % ThO <sub>2</sub>	581	109

*Бериллий.*

Металлокерамический бериллий является дисперсноупрочненным, так как сорта бериллиевых порошков содержат 0,7-1,5 % BeO.

Влияние содержания оксидной фазы в порошках на свойства спеченных заготовок приведено в таблице 6.28.

Таблица 6.28 – Механические свойства спеченных заготовок из сплавов Be-BeO

Состав	Температура, °С	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_B$	$\delta$ , %
		МПа		
Be + 0,8 % BeO	25	195	275	2
	200	165	230	2
	400	145	245	14
	600	115	200	15
Be + 1,8 % BeO	25	240	310	2
	200	215	290	2,5
	400	175	240	4
	600	140	185	6,5
Be + 3,0 % BeO	25	245	325	1
	200	225	310	1,5
	400	210	325	7
	600	175	285	14,5

## 7 Газотермические порошковые покрытия

### 7.1 Общая характеристика метода

Применение износостойких, коррозионностойких, жаростойких и других видов покрытий дает возможность повысить качество, надежность и долговечность деталей машин, оборудования и сооружений. Большое распространение получили покрытия, полученные из металлических порошков. Нанесение покрытий порошковыми частицами ведут с помощью газотермического напыления.

Сущность процесса состоит в напылении предварительно нагретого до необходимой температуры металла, на специально подготовленную поверхность детали высокоскоростной газовой струей. Мелкие частицы расплавленного металла достигают поверхности детали в пластическом состоянии, имея большую скорость полета. При ударе о поверхность детали частицы деформируются и, внедряясь в ее поры и неровности, образуют покрытие.

Высокая эффективность газотермического нанесения порошковых покрытий определяется следующими особенностями:

- 1) возможностью нанесения покрытий из различных материалов – чистых металлов, сплавов, оксидов, органических веществ в различных сочетаниях;
- 2) возможностью получения покрытий на различных материалах – на металлах, пластмассе, керамике, стеклах и других;
- 3) высокой производительностью газотермических способов нанесения покрытий;
- 4) небольшой потребностью в материалах для покрытий, так как их толщина, в большинстве случаев, не превышает 500 мкм;
- 5) отсутствием деформации и понижения прочности изделия, на которое наносится покрытие, так как напыление не вызывает его существенного нагрева.

Газотермические покрытия имеют слоистую структуру, образуемую в результате последовательной укладки множества деформирующихся частиц при напылении, частицы исходного материала подвергаются различным физико-химическим превращениям, поэтому свойства покрытий отличаются от свойств напыляемых материалов: в покрытии увеличивается содержание кислорода и азота, изменяется фазовый состав, в нем образуются поры, пластичность и прочность напыленного материала ниже, чем у исходного.

Существенным недостатком газотермических покрытий является сравнительно невысокая прочность сцепления его с поверхностью детали, на границах между частицами и слоями покрытия, нанесенными за один проход. Свойства покрытий зависят от технологических параметров процесса напыления, что позволяет регулировать эти свойства в широких пределах.

В зависимости от вида тепловой энергии, используемой в аппаратах для напыления, различают следующие способы напыления: газопламенное, электродуговое, плазменное и детонационное.

Для дуговой наплавки используют источники питания с жесткой и падающей внешними характеристиками. Питание дуги может осуществляться от источников переменного и постоянного тока. Источниками переменного тока при дуговой наплавке являются сварочные трансформаторы постоянного тока - сварочные генераторы, преобразователи, а также сварочные выпрямители. Более распространена наплавка на постоянном токе.

В таблице 7.1 приведены технические характеристики некоторых источников питания, применяемых при дуговой наплавке.

Для полуавтоматической наплавки в среде углекислого газа широко используются полуавтоматы (таблица 7.2).

Таблица 7.1 - Технические характеристики некоторых сварочных преобразователей

Преобразователь	Внешняя характеристика	Мощность, кВт	Напряжение холостого хода, В	Пределы регулирования тока, А	Применение
ПС-300М	Падающая	14	50-76	80-380	Ручная наплавка
ПС-500		28	62-80	120-600	
ПСО-300		14	47-73	75-320	
ПД-305У2		14	85	110-350	
ПД-501		30	90	125-500	
ПД-502У2		30	80	75-500	Ручная и автоматическая наплавка
ПСГ-500	30	80	60-500		
ПС-1000	Жесткая	114	50-90	300-1000	Полуавтоматическая наплавка в защитных газах

Таблица 7.2 – Технические характеристики полуавтоматов для наплавки порошковой проволокой

Полуавтомат	Ток, А	Диаметр электродной проволоки, мм	Скорость подачи проволоки, м/ч	Масса механизма подачи проволоки, кг
А-765	450	1,6-2,0	58-580	52
ПШ-54	500	1,6-2,0	80-600	23
А-1197П	500	1,6-2,0	90-720	35

## 7.2 Газопламенное напыление

Наиболее широкое применение в промышленности находит газопламенное напыление порошковыми сплавами. При газопламенном напылении покрытий необходимый запас тепловой и кинетической энергии сообщается частицам

порошка в процессе взаимодействия их с пламенем смеси "горючий газ – кислород". Пламя образуется в результате сгорания горючей смеси, вытекающей с большой скоростью из сопловых отверстий горелки. Порошок подают вдоль оси факела пламени, внутрь его. В качестве горючих газов применяют ацетилен, метан, пропан, бутан и др. Температура при использовании в качестве горючего газа ацетилена достигает 3200 °С, пропанбутановой смеси – 2700 °С. Скорость газового потока составляет 150-160 м/с. Попадая в струю, частицы порошка расплавляются или становятся высокопластичными и приобретают скорость 20-80 м/с. При ударе о поверхность детали частицы деформируются и накладываясь друг на друга, образуют покрытие.

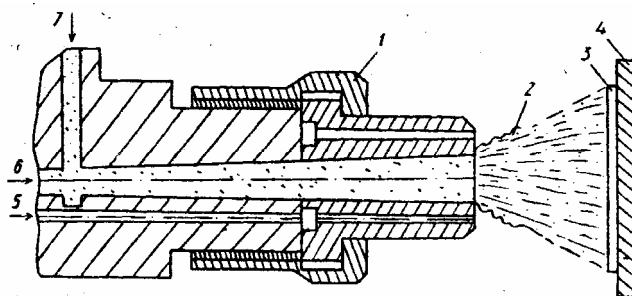
К основным достоинствам способа относятся:

- 1) возможность получения покрытий из большинства материалов, плавящихся при температуре до 2800 °С;
- 2) толщина покрытия может быть обеспечена в пределах от 0,005 до 10 мм;
- 3) высокая производительность процесса (до 10 кг порошка в час);
- 4) относительно низкий уровень шума и световых излучений, позволяющие работать без дополнительных средств защиты;
- 5) легкость и простота обслуживания, невысокая стоимость и мобильность оборудования.

Газопламенное напыление покрытий выполняют с помощью специальных установок и горелок. Наибольшее применение находят установки и горелки инжекторного типа. У инжекторной газопламенной установки порошок через клапан, размещенный в корпусе, под влиянием всасывающего воздействия кислорода и горючего газа, протекающего по каналу, попадает в сопло, а затем – в ядро пламени (рисунок 7.1).

Наиболее широкое применение находят горелки для нанесения покрытий типа ГН-1, ГН-2, ГН-3, промышленные установки УГПТ, УПТР-83, аппараты "Ремдеталь" фирмы "Кастолин".

Для напыления покрытий различного назначения используют порошки чистых металлов и порошки сплавов. Наиболее широкое применение при восстановлении деталей машин и нанесении износостойких покрытий нашли порошки самофлюсующихся никелевых сплавов (таблица 7.3).



1 – сопло; 2 – факел; 3 – покрытие; 4 – изделие; 5 – кислород и горючий газ; 6 – транспортирующий газ; 7 – напыляемый порошок

Рисунок 7.1 – Схема газопламенного напыления



Таблица 7.3 – Самофлюсующиеся порошки на никелевой основе

Марка	Содержание элементов, %					Твердость, HRC
	B	C	Si	Cr	Fe	
ПР-Н80Х13С2Р	1,2-1,8	0,2-0,4	2-2,8	12-14	5	25-35
ПН-ХН80С2Р2	1,5-2,1	0,2-0,5	2-3	12-15	≤ 5	≥ 35
ПГ-12Н-01	1,75-2,5	0,3-0,6	1,25-3,25	8-14	1,25-3,25	35-40
ПР-Н77Х15С3Р3	1,8-2,3	0,35-0,6	2,8-3,5	14-16	≤ 5	35-45
ПГ-СР3	2,0-2,8	0,4-0,7	2,5-3,5	13,5-16,4	≤ 5	≥ 45
ПГ-12Н-02	2,0-4,0	0,4-0,8	3,0-5,0	10-16	3,0-5,0	45-50
СНГН-50	2,7-3,2	0,5-0,7	3,0-3,7	13-15	3 ≤ Mn ≤ 1	47-53
СНГН-55	3,2-4,0	0,7-1,0	3,8-4,5	14-17	≤ 3	53-58
ПГ-СР4	2,8-3,8	0,6-1,0	3,0-4,5	15-18	≤ 5	55
ПГ-12Н-03	2,5-4,5	0,5-1,0	3,5-5,5	12-18	3,5-5,5	55-62
ПГ-10Н-01	2,8-3,4	0,6-1,0	4,0-4,5	14-20	4-4,5	56-62
СНГН-60	4,0-4,7	0,9-1,1	4,0-5,0	16-19	≤ 4,5	58-62

В зависимости от требуемых свойств и материала детали применяют следующие методы газопламенного нанесения покрытий:

1) газопламенное напыление порошка без последующего оплавления. Применяется для нанесения покрытий толщиной до 2 мм без деформации и изменения структуры основного металла. Покрытие имеет пористую структуру, невысокую прочность сцепления с напыляемой поверхностью и в процессе эксплуатации не должно подвергаться ударным и знакопеременным нагрузкам;

2) газопламенное напыление с одновременным оплавлением (газопорошковая наплавка). Применяется для нанесения покрытий толщиной 3-5 мм, имеющих беспористую структуру, высокую прочность сцепления с напыляемой поверхностью. Способ применяется для нанесения покрытий на детали машин, работающих при знакопеременных и ударных нагрузках. При напылении происходит изменение структуры основного металла;

3) газопламенное напыление с последующим оплавлением. Применяется для нанесения покрытий толщиной до 2,5 мм устойчивых к знакопеременным и ударным нагрузкам, имеющих высокую прочность сцепления с напыляемой поверхностью. Структура основного металла при нанесении покрытия изменяется.

Технологический процесс газопламенного напыления, в основном, состоит из операций подготовки поверхности детали и нагрева ее до 200-250 °С напыления слоев с оплавлением или без оплавления, механической обработки напыленного покрытия.

### 7.3 Плазменное напыление

Процесс плазменного напыления применяется для нанесения на поверхность деталей специальных покрытий, обеспечивающих повышение таких ха-

рактических, как износостойкость, коррозионностойкость, теплостойкость и других.

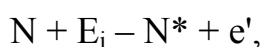
Плазменный способ нанесения покрытий заключается в создании на поверхности детали слоя из частиц порошка, обладающих определенным запасом тепловой и кинетической энергии, полученной в результате взаимодействия со струей плазмы.

При нагреве многоатомного газа до температуры выше 1000 °С происходит процесс разрушения (диссоциации) молекулярных связей и газ переходит в атомарное состояние. Например, для азота этот процесс можно записать в виде уравнения:



где  $E_d$  – энергия диссоциации, эВ.

Затем от атома отделяются электроны и происходит процесс ионизации газа:



где  $E_i$  – энергия ионизации, эВ.

Частично или полностью ионизированный газ, состоящий из положительно и отрицательно заряженных частиц, суммарный заряд которых равен нулю называется плазмой.

Плазма подчиняется большинству газовых законов. Однако она отличается от газа электропроводностью и взаимодействиями с магнитными полями.

Для получения плазменной струи используют электрическую дугу постоянного тока, представляющую собой устойчивый электрический разряд в ионизированном газовом пространстве. Температура плазмы дугового разряда составляет примерно 4000 °С. С целью повышения температуры плазмы электрическая дуга окружается оболочкой из газа под высоким давлением. Эта текучая оболочка охлаждает газ в наружных слоях плазмы, снижая тем самым ионизацию и, следовательно, проводимость газа во внешней области плазмы. Ток дугового разряда стремится сконцентрироваться в более горячей центральной части. Это увеличение плотности тока приводит к росту температуры и проводимости. Таким образом, температура плазмы повышается до 10000-50000 °С.

Плазма служит источником энергии не только для нагрева, плавления и распыления наносимого материала – она сообщает ему еще и определенный запас кинетической энергии в виде скорости движения напыляемых частиц. Скорость истечения плазменной струи достигает 1000-1500 м/с, частицы напыляемого материала разгоняются до 50-200 м/с.

Характеристики плазменной струи в значительной мере определяются выбором плазмообразующего газа. В технологии нанесения покрытий наиболее распространенными плазмообразующими газами являются аргон, азот, водород, гелий. Двухатомные газы имеют более высокое теплосодержание, чем одноатомные, так как значительное количество энергии дополнительно приобретает ими за счет диссоциации молекул на атомы. С целью повышения стойкости плазменного оборудования и улучшения характеристик покрытий для образования плазмы часто используют смеси газов, например, аргона с азотом, водорода с аргоном и другие.

Устройство для получения плазменной струи называют плазмотроном. Плазмотрон является основным элементом плазменного оборудования. Наиболее широко применяются в промышленности дуговые плазмотроны прямого или косвенного действия. В плазмотроне прямого действия электрическая дуга возникает между электродом и обрабатываемым изделием, в плазмотроне косвенного действия – между электродом и соплом.

При плазменном напылении покрытий из порошков применяют плазмотроны косвенного действия.

В верхней части плазмотрона (рисунок 7.2) расположен электрод из вольфрама, в нижней части – медный электрод-сопло. Вольфрамовый электрод является катодом, медный электрод-сопло – анодом. Электроды интенсивно охлаждаются водой, между электродами возбуждается электрическая дуга. Плазмообразующий газ подается в дуговое пространство, ионизируется и образующаяся плазменная дуга выдувается из сопла. Порошок подается в плазменную струю на выходном срезе сопла с помощью транспортирующего газа.

Установка для плазменного напыления состоит из плазмотрона, источника питания постоянного тока, пульта управления, системы газоснабжения и водяного охлаждения, оборудования для зажигания дуги, порошкового питателя, системы автоматической блокировки.

В промышленности используется ряд установок плазменного напыления, среди которых наиболее широкое применение получили универсальные плазменные установки: УПУ-3Д, Киев-7, УМП-6 и другие.

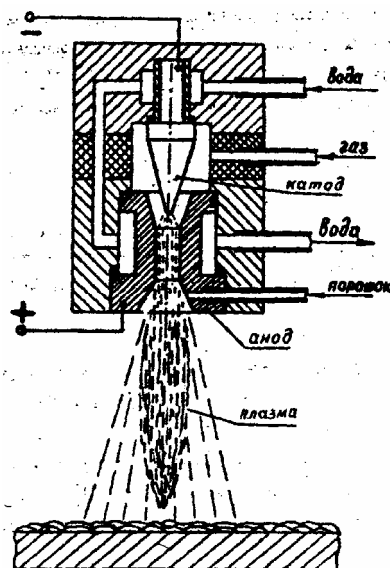


Рисунок 7.2 – Схема плазмотрона

К основным достоинствам плазменного напыления относятся:

1) возможность получения покрытий из таких материалов как металлы, сплавы, оксиды, карбиды, нитриды, бориды, пластмассы и их различные комбинации; большим разнообразием отличаются материалы основы, на которые

могут быть нанесены покрытия – металлы, керамика, графит, пластмассы и другие;

2) возможность управления процессом нанесения покрытия: энергетические характеристики плазмы можно изменять в зависимости от требований технологии в процессе получения покрытия;

3) в процессе напыления покрываемая поверхность нагревается до сравнительно небольших температур, что позволяет сохранять особенности структуры и свойства материала основы;

4) в процессе напыления используются, как правило, газы, не содержащие кислорода, что уменьшает окисление напыляемого материала основы.

Недостатками плазменного способа нанесения покрытий являются:

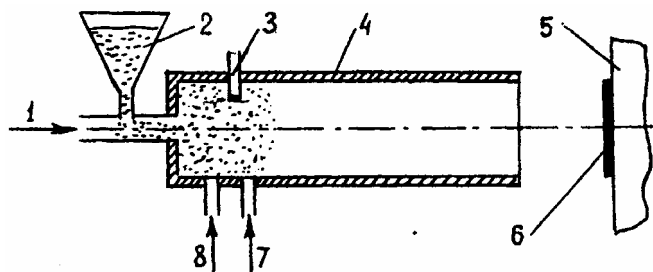
1) высокий уровень шума (110-130 дБ) и излучения;

2) относительно высокая стоимость оборудования и его стационарность;

3) недостаточно высокая прочность сцепления покрытия с основой (10-50 МПа), требующая дополнительной обработки покрытия.

#### 7.4 Детонационное напыление

При детонационном напылении для нагрева и ускорения напыляемых частиц используют энергию взрыва смеси ацетилена и кислорода. Установка для напыления (рисунок 7.3) имеет ствол, во взрывную камеру которого подается смесь ацетилена с кислородом.



- 1 – подача газа транспортирующего порошок; 2 – бункер с порошком; 3 – свеча зажигания; 4 – ствол; 5 – изделие; 6 – покрытие; 7 – подача горючей смеси; 8 – подача флегматизирующего газа (азота)

Рисунок 7.3 – Схема детонационного напыления

С помощью струи азота в камеру подается напыляемый порошок с размером частиц 50-100 мкм. Затем газовая смесь поджигается электрической искрой. Взрывная волна сообщает частичкам порошка высокую скорость полета, которая достигает 800 м/с, а температура их нагрева достигает 4000 °С. Горючей смесью камера заполняется после предварительной продувки флегматизирующим газом (азотом), который удаляет горячие продукты сгорания и исключает самовоспламенение этой смеси при контакте с ними.

Детонационное напыление является циклическим процессом, который повторяется с частотой 3-4 раза в секунду. За один цикл на поверхность детали наносится слой металла толщиной до 6 мкм.

Кроме ацетилена для образования горючей смеси используют пропанбутановую смесь, водород, продукты пиролиза бензина, керосина.

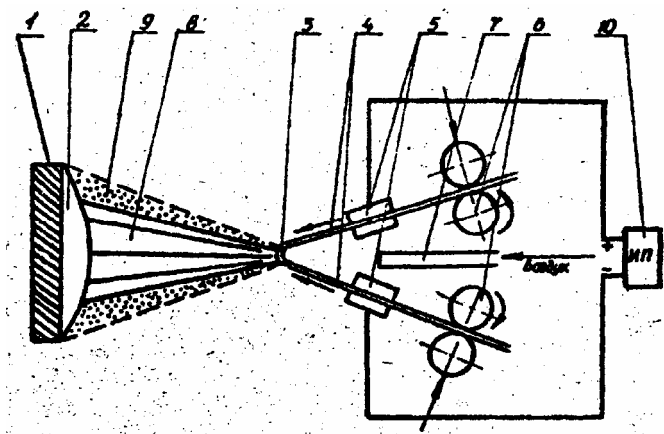
К достоинствам способа следует отнести:

- 1) достаточно высокую производительность (до 10 кг/ч); – высокую прочность сцепления с поверхностью и его низкую пористость;
- 2) умеренный нагрев изделия при напылении (не более 200 °С);
- 3) невысокую чувствительность к состоянию исходной поверхности напыления.

Недостатки метода заключаются в следующем: высокий уровень шума (140 дБ и более) и, следовательно, необходимость выполнения операций в специальной звукоизолирующей камере; достаточно высокая стоимость оборудования.

### 7.5 Электродуговое напыление

При электродуговом напылении расплавление металла осуществляется электрической дугой, горящей между двумя проволоками, а распыление - струей сжатого воздуха (рисунок 7.4).



- 1 – подложка; 2 – напыленный слой;  
3 – электрическая дуга; 4 – напыляемый материал (проволока);  
5 – токопровод; 6 – подающие ролики; 7 – подача сжатого воздуха;  
8 – центральная часть струи; 9 – наружная часть струи;  
10 – источник питания дуги

Рисунок 7.4 – Схема электродугового напыления

Напыляемый материал подается в зону распыления в виде проволоки. Металлические порошки в данном способе не применяются.

Основным преимуществом дугового напыления является высокая производительность процесса (до 14 кг/ч). Недостатками электродугового напыления

являются повышенное окисление металла, значительное выгорание легирующих элементов и повышенная пористость покрытия.

## 7.6 Порошки для газотермических покрытий

Основным видом материалов, используемым для получения покрытий газотермическими способами, являются порошки.

Требования к порошкам для газотермического напыления складываются на основе двух положений: форма и размер частиц должны обеспечивать стабильную и регулируемую подачу частиц в высокотемпературную газовую струю, а также формирование покрытия с заданными эксплуатационными свойствами. Важной суммирующей характеристикой порошков, определяющей возможность их подачи к горелке или плазматрону, является текучесть. Для обеспечения равномерной подачи порошка желательно использовать частицы сферической формы с размером не менее 10 мкм. Химический состав частиц порошка должен обеспечивать получение покрытия с требуемыми характеристиками.

В практике напыления применяют порошки металлов, сплавов, оксидов, бескислородных соединений, композиционные порошки, а также механические смеси указанных материалов.

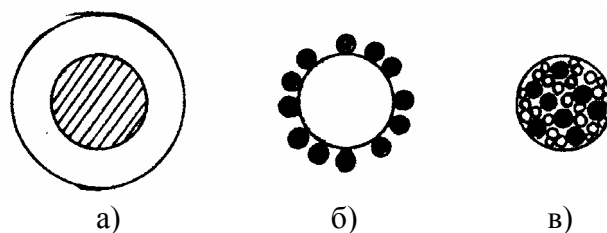
Порошки металлов применяют для газотермического напыления в основном износостойких и коррозионностойких покрытий, например, из алюминия, титана, хрома, молибдена. Другой областью назначения газотермических покрытий из порошков металлов является формирование электропроводящих слоев (покрытия из алюминия, меди, никеля, цинка, тантала).

Наиболее широкое применение для создания износостойких, коррозионностойких, жаропрочных, жаростойких покрытий получили порошки различных сплавов. От общего количества применяемых для напыления материалов половину составляют порошки сплавов на основе железа и никеля.

Порошковые сплавы на основе никеля обладают рядом ценных свойств: низкой температурой плавления (950-1050 °С), твердостью HRC 37-61 в зависимости от содержания бора, жидкотекучестью, высокой износостойкостью и свойствами самофлюсования. Самофлюсование заключается в восстановлении оксидов в процессе образования покрытий благодаря наличию в составе сплава бора и кремния, которые активно отнимают кислород от оксидов. Основным недостатком никелевых сплавов является их высокая стоимость.

Сплавы на основе железа с высоким содержанием углерода имеют высокую твердость HRC, 57-64, высокую износостойкость, недефицитны, но более тугоплавки (температура плавления 1250-1300 °С) и не обладают свойствами самофлюсования.

В последнее время все большее применение находят композиционные порошки. К композиционным относят порошок сложного состава, каждая отдельная частица которого состоит из макрообъемов нескольких компонентов, отличающихся по химическому составу. По строению композиционные порошки делят на плакированные и конгломерированные (рисунок 7.5).



а – плакированная; б, в – конгломератные

Рисунок 7.5 – Строение частиц композиционных порошков

Плакированная частица представляет собой частицу одного из материалов, на поверхности которой расположены один или несколько слоев других материалов. Конгломератная частица сформирована из множества исходных частиц нескольких материалов.

По характеру поведения при напылении композиционные порошки делятся на реагирующие при нагреве и термонеутральные. Напыление термореагирующими порошками совмещено с синтезом новых веществ и состав покрытия отличается от исходного состава частиц. Во втором случае изменения состава в процессе напыления не происходит.

Применение композиционных порошков в технологии газотермического напыления преследует следующие цели:

- 1) использование экзотермического эффекта взаимодействия компонентов (Ni - Al, Ni - Ti и др.);
- 2) равномерное распределение компонентов в объеме покрытия, например типа керметов (Ni - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>);
- 3) защита материала ядра частиц от окисления или разложения;
- 4) формование покрытия с участием материала, самостоятельно не образующего покрытия при газотермическом напылении (например, Ni - графит);
- 5) улучшение условий формирования покрытий за счет увеличения средней плотности частиц, введения компонентов с высокой энтальпией.

Газотермические покрытия с достаточно высокой прочностью сцепления с подложкой позволяют получать экзотермические порошки. Каждая частица такого порошка состоит из двух компонентов с четко выраженной межфазной границей. Эти компоненты могут при определенных условиях образовывать новую фазу. При этом высокий тепловой эффект реакции при образовании новой фазы обеспечивает локальное повышение температуры в зоне соединения частиц порошка с поверхностью твердой подложки. Широкое применение имеют алюминиево-никелевые экзотермические порошки, представляющие собой сферические частицы алюминия, покрытого никелем, или, наоборот, частицы никеля, покрытые алюминием.

## 7.7 Композиционные материалы

Композиционный материал (КМ) – конструкционный (металлический или неметаллический) материал, в котором имеются усиливающие его элементы в виде нитей, волокон или хлопьев более прочного материала. Примеры композиционных материалов: пластик, армированный борными, углеродными, стеклянными волокнами, жгутами или тканями на их основе; алюминий, армированный нитями стали, бериллия. Комбинируя объемное содержание компонентов, можно получать композиционные материалы с требуемыми значениями прочности, жаропрочности, модуля упругости, абразивной стойкости, а также создавать композиции с необходимыми магнитными, диэлектрическими, радиопоглощающими и другими специальными свойствами (рисунок 7.6).

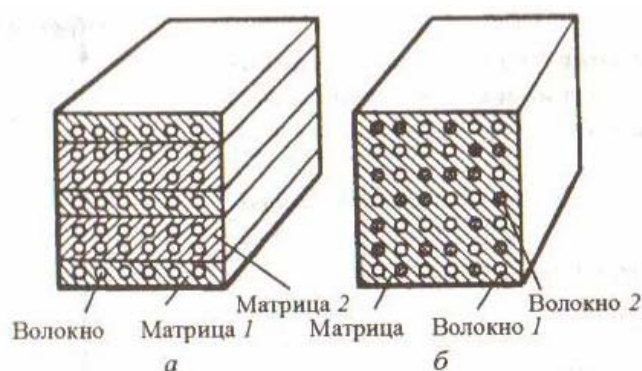


Рисунок 7.6 – Схемы полиматричного (а) и полиармированного (б) КМ

Производство и потребление полимерных композитных материалов на основе термо- и реактопластов стали развиваться высокими темпами с начала 60-х годов.

Например, в США потребление наполненных и армированных термопластов в 1966 г. Составило 6,8 тыс. т, в 1972 г. – 45,9 тыс. т, в 1975 г. – 54 тыс. т, в 1985 г. – 220 тыс. т, а в 1995 г. достигло 700 тыс. т. В странах Западной Европы в 1975 г. было произведено 45 тыс. т, в 1985 г. – 182 тыс. т, в 1995 г. – 380 тыс. т. термопластичных композитных материалов. В 2007 г. более 500 тыс. т.

В 1985 г. структура производства наполненных и армированных термопластов в США складывалась следующим образом: на основе полипропилена выпускалось 60 тыс. т композиционных материалов (2,6 % от общего объема производства полипропилена), на основе полиамидов – 61 тыс. т (40 %), на основе полиэфиров – 47 тыс. т (70 %), полистирола – 21 тыс. т (4 %), поликарбоната – 21 тыс. т (13 %). На долю других термопластов (полиэтилена, поливинилхлорида, полиацеталей, полифениленоксида, полисульфона и др.) приходилось 14 тыс. т.



### 7.7.1 Способы производства металлокомпозитов

В классификации Е.И. Астрова насчитывается 10 способов производства: создание накладных покрытий с помощью склеивания, припаивания по периметру, механического прикрепления (заклепочных, болтовых соединений и др.); электрохимическое нанесение металлов путем электролиза, термодиффузионные методы; создание покрытия погружением изделия в расплавленные металлы или соли; наплавка и металлизация распылением, металлокерамические методы спекания и прессования или прокатки порошков соединяемых металлов; конденсированные методы, осуществляемые испарением металлов в вакууме и осаждением их на плакируемой поверхности или обработкой металлов в средах, содержащих газообразные карбонилы или хлориды металлов; химическое покрытие металлов в растворах соединений, содержащих плакирующий металл; литье, в том числе на центробежных машинах и установках непрерывной разливки; термомеханическое плакирование совместной холодной или горячей прокаткой; пайка–сварка (электрошлаковая, точечная, ультразвуковая, электронно–лучевая); комбинированные гальванометрические методы.

### 7.7.2 Полимерные композиционные материалы

Применение полимерного материала в различных отраслях промышленности и его рациональный марочный ассортимент и техникоэкономическая эффективность определяются его эксплуатационными свойствами. Из всех многочисленных показателей, принятых в настоящее время для оценки качества материалов, основными являются прочность и теплостойкость, поскольку даже при наличии самых уникальных свойств материал без соответствующей прочности не может быть использован для изготовления изделия, а без необходимой теплостойкости не обеспечивает надежность и работоспособность конструкции в заданных условиях эксплуатации.

Анализ свойств современных промышленных полимерных материалов по этим показателям (разрушающее напряжение при растяжении при растяжении и твердость по Вика) показал, что все материалы могут быть условно разделены на три группы.

Первая группа – материалы общетехнического назначения на основе полиэтилена высокой и низкой плотности, полистирола, полипропилена, полиакрилатов, полиуретанов, поливинилхлорида, эфиров целлюлозы, ненасыщенных полиэфиров, пентапласта и аминопластов с разрушающим напряжением до  $(60\pm 10)$  МПа и теплостойкостью по Вика до  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Опыт эксплуатации изделий из этих материалов показывает, что они выдерживают постоянные внешние нагрузки до  $(10\text{--}12)$  МПа и обеспечивают надежную работу в конструкциях до  $(80\pm 20)\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Вторая группа – материалы инженерно–технического назначения на основе полиамидов, фенопластов, эпоксидных смол, поликарбоната, модифицированного полифениленоксида, полиацеталей, полиалкилентрефталатов, полисульфона и фторолонов с разрушающим напряжением до  $(120\pm 10)$  МПа и теп-

лостойкостью по Вика до 210 °С. Изделия из этих материалов могут работать под постоянной нагрузкой до 20 МПа и при температурах до (140±20) °С.

Третья группа – терmostойкие и высокопрочные на основе полиамидов, полиакрилатов, диаллилфталатов и полифениленсульфидов с разрушающим напряжением до (145±10) МПа и терmostойкостью по Вика до 280 °С. Из этих материалов могут изготавливаться изделия, удовлетворительно работающие при постоянных нагрузках до 40 МПа и температурах до (200±20) °С.

Перечень полимеров, наполнение и модификация которых дают наибольший эффект, может быть определен на основе изучения характера изменения свойств в пределах марочного ассортимента КМ в различных группах (таблица 7.4).

Таблица 7.4 – Типичные свойства стеклонаполненных композитов на основе термопластов

Полимер	Модуль упругости, ГПа		A**	Терmostойкость, °С при нагрузке 1,8 МПа			Прочность, МПа		
	0% СВ*	30% СВ		0% СВ	30% СВ	предельная	0% СВ	30% СВ	предельная
Полиамид 6	2,8	7,5	10,5	77	210	220	90	240	480
Полиамид 6,6	2,9	8,0	11	65	250	160	110	260	490
Полиамид 6,10	1,7	8,5	25	65	190	215	60	130	420
Полибутилентерефталат	2,3	7,2	12	55	210	225	84	180	520
Полиэтилентерефталат	3,5	10	10	85	240	255	130	200	580
Полиацетали	2,6	7,7	10	110	160	175	90	180	550
Полифениленсульфид	4,2	16	15	137	260	270	140	260	580
Полипропилен	1,4	5,8	20	63	155	170	35	85	370
Поликарбонат	2,4	8,4	14,5	140	149	150	95	200	500
Полисульфон	2,7	8,4	12	172	183	190	84	170	510
Полифениленок	2,5	8,1	15	130	155	160	95	160	460

СВ\* – содержание стекловолокна по масс. %.

A\*\* – коэффициент усиления из уравнения  $\frac{E_k}{E_n} = 1 + A\phi$  где  $E_k$  и  $E_n$  – модули упругости композиции и полимерной матрицы;  $\phi$  – объемная доля наполнителя.

### 7.7.3 Композитные материалы, упрочненные частицами

Высокой коэффициент стеснения пластической, деформации матрицы, вызванный твердым упрочняющим компонентом, используется для того, чтобы предотвратить течение в матрицы. В основном прочность композитного материала увеличивается линейно по мере снижения объемной доли матрицы. Однако текучесть и пластическое течение могут иметь место, а удлинение при разрушении иногда достигает 30 %. Это значение намного превосходит возможное удлинение волокнистых композитных материалов, нагруженных в на-

правлении хрупкой упрочняющей фазы. Такое различие обусловлено тем, что для удлинения КМ, упрочненных волокнами или пластинами, необходима деформация самой упрочняющей составляющей.

Упрочнение трехмерными частицами может привести к получению материалов с изотропными свойствами, так как частицы равномерно и симметрично распределены по трем ортогональным плоскостям. Однако такой материал не является гомогенным, и свойства его чувствительны не только к свойствам компонентов, но и к свойствам поверхностей разделов и геометрии распределения. Прочность КМ, упрочненных частицами, обычно зависит от диаметра частиц, расстояния между ними и объемной доли упрочняющей фазы. Свойствами матрицы, включая коэффициент деформационного упрочнения, который повышает эффективность стеснения пластической деформации упрочнителем, также важны.

#### 7.7.4 Композитные материалы, армированные волокнами

Наибольшее распространение получило изготовление волокнистых композитных материалов, армированных высокопрочной проволокой (таблица 7.5).

Таблица 7.5 – Свойства волокон, проволоки и нитевидных кристаллов для армирования композиционных материалов

Материал	Температура расплавления, °С	Плотность, г/м <sup>3</sup>	Модуль упругости, ·10 <sup>-3</sup> МПа	Предел прочности, ·10 <sup>-3</sup> МПа	Удельная прочность, км	Удельная жесткость, ·10 <sup>-3</sup> МПа
Волокно:						
борное	2040	2,63	380-420	2,5-3,5	95-133	14,4-15,9
углеродное	3000	1,7	196-296	1,96-2,96	117-176	11,7-17,4
оксид алюминия	2054	3,96	500	2,1-2,6	52-65	12,6
Проволока:						
бериллиевая	1284	1,8	290	1,0-1,3	55-65	15,76
вольфрамовая	3400	19,3	400	4,2	21	2,07
стальная	1300	7,8	200	3,6-4,0	45-51	2,56
Нитевидные кристаллы:						
нитрид алюминия	2400	3,3	380	15	455	11,5
карбид кремния	2650	3,21	580	37	1150	18
нитрид кремния	1900	3,18	495	15	472	15,6

Для более эффективного использования волокна необходимо, чтобы его модуль упругости был много больше модуля упругости матрицы. Объемная доля волокна должна быть также максимальной, чтобы сделать долю нагрузки, воспринимаемой волокнами, как можно больше. Максимальная доля цилиндрических волокон может составлять до 91 %, но уже при 80 % свойства композиции ухудшаются, так как матрица уже не в состоянии смочить и пропитать пучки волокон, а это ухудшает сцепление волокон с матрицей и приводит к образованию пустот в композиции.

#### 7.7.5 Слоистые металлические композиты

Особая роль среди новых материалов со специальными свойствами принадлежит слоистым металлическим композициям. Такие материалы могут быть изготовлены соединением разнородных металлов в монолитную композицию, сохраняющую надежную связь составляющих при дальнейшей технологической обработке и в условиях эксплуатации. Слоистая металлическая композиция, или слоистый металл, – это материал, состоящий из двух или более слоев двух или более разнородных металлов, обладающий новыми качествами, отличными от качеств исходных металлов. Основную часть этих материалов представляют биметаллы – композиции, состоящие из слоев двух металлов.

Прочность слоистых конструкционных материалов ограничена до некоторой степени более низкой прочностью упрочняющих слоев (фольг) по сравнению с волокнами. К тому же низкая величина деформации при разрушении хрупкой упрочняющей фазы ограничивает удлинение и пластичность композитного материала во всех направлениях в плоскости армирования. Однако прочность и модуль упругости армирующей фазы реализуются по всем направлениям плоскости, что дает значительные преимущества по сравнению с однонаправленным армированием волокнами.

#### 7.8 Гранулированный материал

Гранулы изготавливают из Al, Ti, Ni процесс имеет безотходную технологию и может вытеснить технологию обычных диффузионных полуфабрикатов. У гранулированного материала высокая пластичность, вязкость, равномерная изотропная структура, бездефектная структура.

Гранулирование-процесс распыления расплава с последующим быстрым охлаждением, в результате чего получают микрослитки размерами от 0,01 мм до 1 мм. В зависимости от размеров гранул и их скорости охлаждения получают дендритные ячейки, скорость которых на 2-3 порядка выше, чем при обычной кристаллизации. В результате в гранулах реализуются особые свойства: гранулы имеют насыщенность - легирующих элементов больше, чем можно получить по равновесной диаграмме, в грануле получается пересыщенный твердый раствор.

В системе с Al, в которой введены Ti, Mn, Cr, Z можно получить промежуточные фазы, которые кристаллизуются по метастабильным линиям диа-

граммы. При резком переохлаждении интервал кристаллизации сильно сужается. При равновесной кристаллизации величина переохлаждения достаточна, чтобы переохлажденный сплав ниже температуры солидуса.

В сплавах с Zr, Cr возможно образование неравновесных метастабильных структур, которые повышают жаропрочность,  $T_{\text{пл}}$  сплава и повышают характеристики пластичности.

При распылении грубые частицы интерметаллидов войдут в твердый раствор и образуют дисперсионные фазы. Последующее - брикетирование дает возможность данному сплаву прессовать и подвергать любым видам ОМД. При технологичности операции неизбежен распад пересыщенного твердого раствора с образованием алюминидов.

Обозначение материалов АСП (алюминиевый спеченный материал), САП (спеченный алюминиевый материал), САС (спеченный алюминиевый сплав). Для конечных свойств важен результат распада пересыщенного твердого раствора.

Zr, Cr - при распаде пересыщенного твердого раствора происходит выделение дисперсионных вторичных фаз  $10^{-2}$  мкм.

Менее устойчивы включения Cr в твердом растворе Al, самые неустойчивые включения Mn.

Пористость, присущая всем другим материалам, в гранулированных материалах отсутствует, однако, если при гранулировании в середине нулы возникает дырка, пора, ее тут же заполняет  $H_2$ , что усложняет диффузию.

Недостаток Al-х сплавов для гранулирования - его окисная пленка, которая затрудняет диффузию и не дает возможность широкого применения гранулированных алюминиевых сплавов. Для распыления алюминиевых сплавов нужны безокислительные устройства.

## 7.9 Наноматериалы и нанотехнологии

Стало очевидным, что наступивший 21 век будет периодом развития практических нанотехнологий во многих направлениях человеческой деятельности. Впервые слово “нанотехника” было введено в научный оборот в 1974 году японским физиком Норпо Танигучи, который предложил называть так объекты размером менее одного микрометра.

Приставка “нано” означает одну миллиардную часть. Под термином “наноматериалы” и “нанотехнологии” понимают материалы и нанотехнологии, создание и реализация которых регулируется в нанометровом масштабе, т.е. в диапазоне размеров атомов и молекул. Соединяя определенным образом отдельные атомы и молекулы, стало возможным получать набор искусственно синтезированных веществ, например кристаллов, полимеров, белковых молекул. Такие структуры, построенные из атомно-молекулярных элементов, характеризуются новыми физическими, химическими и биологическими свойствами и связанными с ними явлениями.

Интерес к нанодисперсным материалам связан с тем, что они находят все более широкое применение в качестве исходного сырья при производстве ке-

рамических и композиционных материалов, сверхпроводников, солнечных батарей, фильтров, геттеров, присадок к смазочным материалам, красящих и магнитных пигментов, компонентов низкотемпературных высокопрочных припоев и др.

Основные достижения и, особенно, перспективы использования НП, связаны с отработкой технологии получения порошков с "особыми" свойствами, например, такими как:

- очень низкие температуры спекания  $< 100$  °С;
- высокая химическая активность;
- наличие избыточной (запасенной) энергии.

Изменение фундаментальных свойств традиционных материалов в нанодисперсном состоянии (понижаются: температура начала плавления, теплота испарения, энергия ионизации, работа выхода электронов и др.) открывает широчайшие возможности в области создания новейших материалов и технологий, принципиально новых приборов и устройств.

Отличие наноматериалов от традиционных материалов связано, прежде всего, с различными размерными эффектами, возникающими на наночастицах или на других наноструктурах. При описании этих эффектов используются принципы квантовой механики вместо положений классической ньютоновской механики и такие понятия, как квантовые точки (атомные кластеры), одномерные структуры (цепочки атомов), двумерные структуры (тонкие пленки), трехмерные объемные сверхрешетки.

С уменьшением частички вещества доля атомов, находящихся в тонком поверхностном слое растет. При этом очень важен тот факт, что свойства поверхностных атомов отличаются от свойств атомов, находящихся в объеме вещества, так как поверхностные атомы связаны с окружающими их атомами иначе, чем объемные. Энергетические характеристики поверхности выше, чем энергетические характеристики в объеме материала. Поверхностный слой может рассматриваться как новое состояние вещества. В связи с этим наночастицами считают такие, у которых доля поверхностных атомов превышает 10 % от их общего количества.

Создание наноматериалов, структурированных на атомно-молекулярном уровне, непрерывно связано с применением адекватных (атомного разрешения) диагностических средств. Бурное развитие нанотехнологий началось с создания сканирующих зондовых микроскопов, в основе действия которых лежит туннельный эффект. Вследствие того, что электрону присущи не только корпускулярные, но и волновые свойства, он, встретив на своем пути преграду, не отражается, а проходит сквозь нее, как через туннель, подобно тому, как рентгеновские волны проходят сквозь материальные объекты. Таким образом, над поверхностью любого проводника или полупроводника наблюдается некоторое количество свободных электронов не за счет термоэлектронной эмиссии, а благодаря туннельному эффекту. Если к двум проводникам, расположенным на расстоянии 0,5 нм друг от друга, приложить разность потенциалов, то между ними возникнет электрический ток, обусловленный туннельным эффектом. Если этот опыт повторить с очень тонкой иглой, то, проводя ею над изучаемым

объектом (сканируя поверхность), можно получить информацию о строении объекта на атомном уровне. На этом принципе и работают различные типы сканирующих зондовых микроскопов, к которым относятся:

- сканирующий туннельный микроскоп, в котором между острием иглы и образцом приложено малое напряжение и регистрируется туннельный ток в зазоре, зависящий от атомной структуры на поверхности образца;

- атомно-силовой микроскоп, в котором регистрируется изменение силы притяжения иглы к поверхности в процессе ее сканирования. Игла закреплена на консольной балочке, изгибающейся под действием ван-дер-ваальсовых сил между кончиком иглы и исследуемой поверхностью;

- ближнепольный оптический микроскоп, в котором зондом является алмазная игла.

Наноструктура поверхностной пленки напыленного карбонитрида титана на сплав ВК8 приведена на рисунке 7.7.

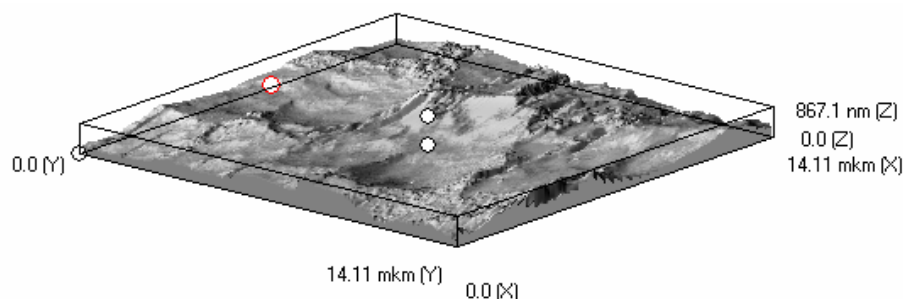


Рисунок 7.7 – Наноструктуры поверхностной пленки напыленного карбонитрида титана

В ходе сканирования регистрируется сила межатомного взаимодействия между исследуемой поверхностью и поверхностью иглы. Величина отклонения упругого элемента, на котором закреплена игла, несет информацию о рельефе поверхности.

Сканирующие зондовые микроскопы применяются для изучения топологии (геометрического строения) исследуемых объектов, а также и других характеристик: магнитных и электрических свойств, твердости, однородности состава. Сканирующие зондовые микроскопы позволяют не только исследовать нанообъекты, но и манипулировать ими. С их помощью можно захватывать и переносить атомы в новую позицию, производить атомарную сборку нанообъектов.

Нанотехнологии бурно внедряются во многие сферы человеческой деятельности путем создания принципиально новых материалов и изделий, например, таких, как:

- наноструктурированные материалы и покрытия с уникальным сочетанием свойств в машиностроении;
- биосовместимые материалы в медицине;
- износостойкие и антифрикционные покрытия, краски с наночастицами, самоочищающиеся фильтры и стекла в автомобилестроении;

– ультратонкие слои и пленки в электронике, в микроэлектромеханических системах.

В химической промышленности применяются блок-сополимерные материалы, состоящие из наноблоков и сочетающие пластичность каучука и прочность полистирола. Наноструктурные катализаторы применяются при производстве бензина. Широкое применение получили струйные принтеры, чернила с частицами красителя нанометрового размера улучшают четкость и контрастность изображения. Нанотехнологии приведут к появлению новых по качеству строительных материалов, будут способствовать повышению производительности и миниатюризации компьютеров, сделают более легким, скоростным и безопасным автомобильный транспорт.

Наноструктурированные конструкционные материалы могут иметь свойства, значительно отличающиеся от свойств их аналогов, имеющих обычное строение. Например, их прочность на растяжение выше в 1,5-2 раза, а микротвердость в 2-7 раз. У керамических наноматериалов установлена повышенная пластичность, несвойственная подобным материалам с обычным строением. Достигнутая таким образом пластичность позволит использовать их при прокатке и экструзии.

Коэффициент трения скольжения наноконструированного износостойкого покрытия на основе карбида титана и алмазоподобного углерода, нанесенного реактивным магнетронным распылением титановой и графитовой мишеней составляет 0,07, то есть примерно на порядок меньше, чем у материалов с крупнозернистой структурой.

Наноматериалы классифицируют по химическому составу, форме кристаллов и расположению границ разделов.

По форме кристаллитов наноматериалы делятся на слоистые, волокнистые и равноосные.

По химсоставу кристаллитов можно выделить четыре группы наноматериалов;

– с одинаковым химическим составом кристаллитов и границ раздела (чистые металлы с нанокристаллической структурой, слоистые поликристаллические полимеры и др.);

– с различным химическим составом кристаллитов (например, многослойные структуры);

– с различным химическим составом кристаллитов и границ раздела;

– материалы, в которых наноразмерные компоненты структуры (слои, волокна, кристаллиты) диспергированы в матрице сплава другого химического состава (например, дисперсно-упрочненные материалы).

Для изготовления наноматериалов применяют методы порошковой металлургии, электрохимические методы, нанесение атомов (молекул) на подложку вакуумным напылением, методы самосборки.

Для получения наноматериалов методами порошковой металлургии используют порошки с размером частиц менее 100 нм, крупнозернистые порошки с нанокристаллической структурой, полученные методом механического легирования, аморфные порошки. Для формования нанопорошков широко приме-



няют статическое, динамическое и вибрационное уплотнение, прокатку. Перспективными способами получения наноматериалов являются спекание нанопорошков под давлением, горячее изостатическое прессование, высокотемпературная газовая экструзия. Наноструктурные материалы можно получать из аморфных сплавов путем низкотемпературного отжига.

Одним из нанотехнологических способов создания материалов, структурированных на уровне атомов и молекул, является самосборка. Принцип самосборки состоит в том, что атомы и молекулы стремятся перейти на самый нижний из доступных для них уровней энергии. Если этого можно достигнуть путем соединения или переориентации молекул и атомов, то эти процессы происходят самопроизвольно. Самосборка может применяться при создании больших наноструктурных массивов, таких как компьютерные запоминающие устройства, логические схемы. Самособирающиеся структуры можно использовать для решения таких прикладных задач, как защита поверхностей от коррозии или придание поверхности определенных свойств. Уже есть примеры, когда в результате самосборки получают работоспособное микроскопическое устройство. Например, создана наноструктура, представляющая собой литиево-ионную батарею, которая собирается из наноматериала, являющегося электродом.

Протяженные структуры, состоящие из свернутых гексагональных сеток с атомами углерода в узлах, получили название нанотрубок.

Нанотрубки – протяженные структуры цилиндрической формы, состоящие из свернутых гексагональных сеток с атомами углерода в узлах. Диаметр нанотрубок составляет от одного до нескольких десятков нанометров, длина до нескольких сантиметров. Считается, что первооткрывателем нанотрубок является японский ученый Суоми Ииджима, хотя, как сообщает Nature, еще в 1952 советские ученые Л.Радушкевич и В.Лукиянович наблюдали волокна с диаметром порядка 100 нм, полученные при термическом разложении оксида углерода на железном катализаторе. Нанотрубки могут быть однослойными или многослойными, а также прямыми, зубчатыми, зигзагообразными и спиральными.

Нанотрубки получают методом термического распыления графитовых электродов в плазме дугового разряда. При горении плазмы происходит интенсивное термическое испарение анода, при этом на торцевой поверхности катода образуется осадок, в котором формируются нанотрубки углерода длиной порядка 40 нм. Нанотрубки имеют уникальные свойства. Лабораторные исследования показали, что их предел прочности при растяжении может в 60 раз превышать значения для сталей. К тому же они достаточно легкие и гибкие. Нанотрубки могут действовать как сверхпроводники, либо как полупроводники в зависимости от точных пропорций трубки и того, какие материалы, кроме углерода, введены в матрицу трубки. Нанотрубки уже используются для производства транзисторов, свойства которых лучше обычных кремниевых устройств.

Графен – двумерный кристаллический углеродный наноматериал, который можно представить себе как пластину, состоящую из атомов углерода. Данный материал обладает уникальными токопроводящими свойствами, которые позволяют ему служить как очень хорошим проводником, так и полупроводником. Кроме того, графен чрезвычайно прочен и выдерживает огромные

нагрузки, как на разрыв, так и на прогиб. В настоящее время графен получают путем отшелушивания чешуек от частиц графита, однако существуют разработки, позволяющие получать данный материал в промышленных масштабах. Данный материал впервые получен и открыт группой российских ученых из Манчестерского университета.

Среди всех методов получения нанопорошков метод осаждения из коллоидных растворов обладает наиболее высокой селективностью и позволяет получать стабилизированные нанокластеры с очень узким распределением по размерам, что весьма важно для использования наночастиц в качестве катализаторов или в устройствах микроэлектроники.

В данной работе использовали золь – гель метод синтеза нанопорошков  $Y_{0,7}Ca_{0,3}FeO_3$ . Порошки синтезировали методом соосаждения в кипящей воде, используя в качестве реагентов разбавленные водные растворы хлоридов иттрия, кальция и железа (III) (все «х.ч»). Растворы (с массовым отношением  $Y:Ca:Fe = 7:3:10$ ) смешивали непосредственно перед осаждением. В качестве осадителя применяли водные растворы аммиака и карбоната натрия (все «ч.д.а»).

Конечный продукт (порошок) получали путём термообработки обезвоженного осадка на воздухе при температурах от 650 °С до 750 °С.

С помощью просвечивающей электронной микроскопии (ЭМВ – 100БР) обнаружено, что порошки однородные и размер их кристаллитов при температуре 750 °С составляет порядка 50 нм.

Таким образом, соосаждение катионов  $Y^{3+}$ ,  $Fe^{3+}$  и  $Ca^{2+}$  гидроксидом аммония, карбонатом натрия приводит к получению нанопорошков  $Y_{0,7}Ca_{0,3}FeO_3$  с варьируемым диаметром частиц  $D \leq 50$  нм при 750 °С.

Информация, представленная в данном разделе, дает только общее представление о нанотехнологиях и наноматериалах, развитие которых обещает человечеству невероятные, фантастические возможности. 21 век, возможно, станет веком наноматериалов и нанотехнологий по аналогии с каменным или бронзовым, названными так в честь материалов, которые человек когда-то научился использовать.

## Список использованных источников

- 1 Андриевский, Р.А. Порошковое материаловедение / Р.А. Андриевский. - М.: Металлургия. 1991. - 207 с.
- 2 Порошковые легированные стали / В.Н. Анциферов, В.Б. Акименко, Л.М. Гревнов - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Металлургия. 1991. - 318 с.
- 3 Металлургические композиты. Введение в феноменологическую теорию / Г.А. Бабушкин, В.Я. Буланов, И.А. Синицкий. - Свердловск: АНЦ АН СССР. 1987. - 312 с.
- 4 Либенсон, Г.А. Процессы порошковой металлургии: в 2-х т. / Г.А. Либенсон, Лопатин В.Ю., Комарницкий Г.В. - М.: МИСИС, 2001. – Т.1. – 368 с.- Т.2. - 320 с.
- 5 Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения: справочник/ И.М. Федорченко и [др]. - Киев: Наук. думка, 1985. 624 с.
- 6 Ермаков, С.С. Порошковые стали и изделия / С.С. Ермаков, Н.В. Вязников. - 4-е изд. перераб. и доп. - Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1990. - 319 с.
- 7 Порошковая металлургия. Спеченные и композиционные материалы / под ред. В. Шатта. - М.: Металлургия. 1983. - 520 с.
- 8 Айзенкольб, Ф. Успехи порошковой металлургии / Ф. Айзенкольб. - М.: Металлургия, 1989. - 570 с.
- 9 Атлас структур порошковых материалов на основе железа / Т.А. Пумпянская, В.Я. Буланов, В.Г. Зырянков.- М.: Наука, 1986. -216 с.
- 10 Композиционные спеченные антифрикционные материалы / И.М. Федорченко, Л.И. Пугина. - Киев: Наук, думка, 1980. - 404 с.
- 11 Порошковая металлургия и напыленные покрытия: учебник для вузов / В.Н. Анциферов [и др.]. - М.: Металлургия, 1987. - 792 с.
- 12 Автомобильные материалы: справочник. / Г.В. Мотовилин, М.А. Масино, О.М. Суворов, - 3-е изд. - М.: Транспорт, 1989. - 464 с.
- 13 Термохимическая обработка порошковых сталей. / В.Н. Анциферов, В.Я. Буланов, С.И. Богодухов, Л.М. Гревнов. - Екатеринбург: УрО РАН, 1997. - 482 с.
- 14 Металлические порошки и порошковые материалы: справочник / под ред. Ю.В. Левинского. – М.: Экомет, 2005. – 520 с.
- 15 Курс материаловедения в вопросах и ответах: учебное пособие / С.И. Богодухов, В.Ф. Гребенюк, А.В. Синюхин. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 2005. – 288 с.
- 16 Технологические процессы в машиностроении: учебник для вузов / С. И. Богодухов [и др.]. – М.: Машиностроение, 2008. – 640 с.
- 17 Порошковая металлургия: науч.-технич. журн. / учредители ФГОУ ВПО ГТУ “Моск. ин-т стали и спл.” ЗАО “Калвис”, 2008. – М.: изд-во “Калвис” - № 1. – ISSN 1997-308X.

18 Порошковая металлургия: науч.-технич. журн. / учредители ФГОУ ВПО ГТУ “Моск. ин-т стали и спл.” ЗАО “Калвис”, 2008. – М.: изд-во “Калвис” - № 10. – ISSN 1997-308X.

19 Порошковая металлургия: науч.-технич. журн. / учредители ФГОУ ВПО ГТУ “Моск. ин-т стали и спл.” ЗАО “Калвис”, 2007. – М.: изд-во “Калвис” - № 5. – ISSN 1997-308X.

20 Технология и свойства спеченных твердых сплавов и изделий из них: учебное пособие для ВУЗов / В.С.Панов, А.М.Чувиллин, В.А.Фальковский – 2-е изд. доп. и переработ. – М.: МИСиС, 2004. – 464 с.

21 Порошковые материалы: учебное пособие / С.И.Богодухов, В.А.Бондаренко, А.Д.Проскурин, А.В.Синюхин. – Оренбург: ОГУ, 1999. – 148 с.