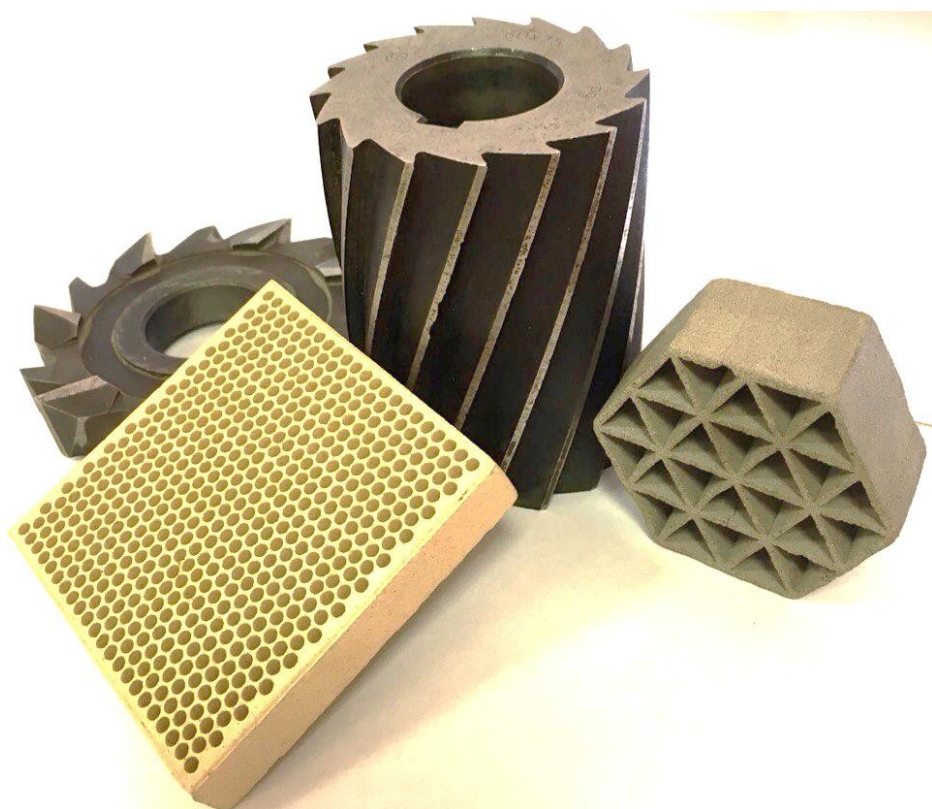


А.В. Гропянов, Н.Н. Ситов, М.Н. Жукова

Порошковые материалы

Учебное пособие



**Санкт-Петербург
2017**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ДИЗАЙНА»

ВЫСШАЯ ШКОЛА ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГЕТИКИ

А.В. Гропянов, Н.Н. Ситов, М.Н. Жукова

ПОРОШКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Учебное пособие

Санкт-Петербург

2017

УДК 621.762(075)
ББК 34.39я7
Г 878

Гропянов А.В., Ситов Н.Н., Жукова М.Н.

Порошковые материалы: учебное пособие / ВШТЭ СПбГУПТД. - СПб., 2017. - 74 с.

В учебном пособии изложены основные вопросы, связанные с производством порошковых материалов и изделий. Рассмотрены методы получения и свойства металлических порошков, процессы формирования и спекания заготовок, области применения и свойства порошковых изделий. Учебное пособие предназначено для студентов направления 15.04.02 "Технологические машины и оборудование".

Рецензенты: зам.директора института безотрывных форм обучения
ВШТЭ СПбГУПТД, канд. техн. наук, доцент В.О.Варганов;
канд. физ.-мат. наук кафедры строительной физики и химии
СПбГАСУ, доцент Ю.А. Машков

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом ВШТЭ
СПбГУПТД в качестве учебного пособия.

Редактор и корректор Н.П. Новикова
Техн. редактор Л.Я. Титова
Компьютерный набор и верстка М.С. Локтевой

Темплан 2017 г., поз. 1

Подп. к печати 08.06.2017. Формат 60х84/16. Бумага тип. № 1.

Печать офсетная. Объем 4,75 печ. л.; 4,75 уч. - изд. л.

Тираж 20 экз. Изд. № 1. Цена "С". Заказ №

Ризограф Высшей школы технологии и энергетики
СПбГУПТД, 198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4.

© Высшая школа технологии
и энергетики СПбГУПТД, 2017
© Гропянов А.В., Ситов Н.Н.,
Жукова М.Н., 2017

ВВЕДЕНИЕ

Кроме традиционных способов формообразования, основанных на плавлении металла, последующем литье или деформировании слитков, в середине XIX в. возник принципиально новый способ изготовления деталей из порошков. Метод получения различных материалов и готовых изделий из металлических порошков путем их прессования и спекания называется порошковой металлургией.

Однако прообразом порошковой металлургии можно считать кричный способ производства стали, при котором из-за недостаточности температуры в горне для расплавления больших объемов металла крупные изделия получали путем сваривания при ковке отдельных криц.

Начало современной порошковой металлургии относится к 1826 г., когда русские инженеры П. Г. Соболевский и В. В. Любарский разработали технологию изготовления изделий и монет из порошка тугоплавкой платины путем прессования в холодном состоянии и спекания. «Русский способ» нашел широкое распространение в Европе, но, когда научились плавить тугоплавкие металлы, временно прекратил свое существование. В конце XIX в. он снова возродился при изготовлении нитей накаливания из самого тугоплавкого металла — вольфрама. В дальнейшем порошковая металлургия развивается интенсивно: в 1926 г. — спеченные твердые сплавы; в 1930 г. — начало производства пористых подшипников. Особенно интенсивное развитие порошковая металлургия получила в послевоенные годы. Отметим существенные преимущества порошковой металлургии:

1. Возможность получения изделий и материалов с такими физическими, химическими, механическими и технологическими свойствами, которые невозможно достигнуть традиционными методами, т. е. путем литья, последующейковки, штамповки или механической обработки (например, получение псевдосплавов, изделий определенной пористости, твердых сплавов, фрикционных материалов, изделий повышенной износостойкости).

2. Возможность получения материалов высокой чистоты и любого заданного химического состава.

3. Возможность использования отходов металлургического и машиностроительного производства в виде окалина и стружки.

4. Возможность снизить расход дорогостоящих металлов.

5. Изготовление изделий методом порошковой металлургии менее трудоемко, чем путем литья и механической обработки.

Именно этими главными преимуществами определяются перспективы развития и совершенствования методов порошковой металлургии.

Имеются и временные трудности, сдерживающие производство спеченных материалов: высокая стоимость порошков и пресс-форм. В связи

с этим метод порошковой металлургии рентабелен лишь при массовом производстве.

1. МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ПОРОШКИ И ИХ СВОЙСТВА

Свойства спеченных изделий и технологический процесс их изготовления во многом зависят от комплекса свойств исходных порошков, которые принято делить на три основные группы: химические, физические, технологические.

1.1. Химические свойства

К химическим свойствам относятся химический состав, пирофорность и токсичность.

Химический состав — это содержание основного (основных) металла в порошке, а также различных примесей, механических загрязнений и газов. Чистота порошка считается удовлетворительной, когда содержание основного металла составляет 98...99 % (за исключением специфических случаев). Примеси обычно представляют собой твердые растворы или химические соединения входящих в сплав металлов. К механическим загрязнениям относятся продукты износа дробильных и размалывающих агрегатов. Присутствие в порошках трудновосстанавливаемых оксидов (Cr, Mn, Ti, Si, Al и др.) нежелательно, так как затрудняет прессование и спекание. Оксиды, легко восстанавливаемые водородом (Fe, Cu, Ni, W), способствуют хорошей спекаемости. Газы в металлических порошках повышают их хрупкость и, следовательно, ухудшают прессуемость.

Таким образом, химический состав порошка оказывает влияние не только на свойства готового изделия, но и на технологию его изготовления (прессование, спекание).

Особенностью химического состава является его непостоянство, так как при хранении в порошковой массе обычно происходит окисление. Не случайно для железного порошка техническими условиями предусматривается железо общее $Fe_{\text{общ}}$ и железо металлическое $Fe_{\text{мет}}$: разница между этими показателями характеризует количество железа в оксидах.

Пирофорность — это способность порошков самовозгораться на воздухе. Она зависит прежде всего от химической природы металла. Порошки большинства металлов не представляют опасности самовозгорания. Поэтому назовем лишь те, которые обладают наибольшей пирофорностью, — это тонкие (мелкие) порошки железа, кобальта, никеля, хрома, марганца, титана, ванадия, циркония, урана, карбидов металлов. Следует подчеркнуть, что способны к самовозгоранию только тонкие порошки. Например, порошок железа с насыпной плотностью больше 1 г/см³ практически не обладает пирофорностью, а с насыпной плотностью

менее 0,5 г/см³ легко самовозгорается. Пирофорность зависит от состояния поверхности порошков. Оксидные пленки ее снижают. Некоторое влияние оказывает и форма частиц. Порошки с большей удельной поверхностью (например, дендритной формы) обладают большей склонностью к самовозгоранию, чем, например, порошки сферической формы, у которых удельная поверхность меньше.

Токсичность. В компактном состоянии большинство металлов безвредны, но в виде порошка почти все они в той или иной мере ядовиты (токсичны). Отравляющее действие порошок оказывает, попадая в легкие или кровь человека. Наибольшую опасность представляют самые тонкие порошки.

1.2. Физические свойства

К физическим свойствам относятся форма частиц, размер, гранулометрический состав, удельная поверхность частиц, плотность, микротвердость.

Формы частиц (рис. 1) зависит от метода получения порошков и оказывает существенное влияние на их технологические свойства: насыпную плотность, текучесть, прессуемость, а также на прочность, плотность и однородность прессовок. Так, порошки с частицами дендритной формы обладают наименьшей насыпной плотностью, худшей текучестью, но лучше всего прессуются и дают наибольшую плотность прессовок. Порошки с лепестковой формой частиц также обладают небольшой насыпной плотностью, но очень плохо прессуются.

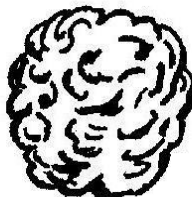
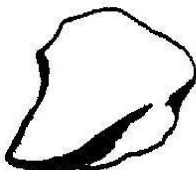
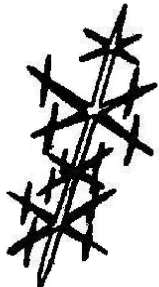
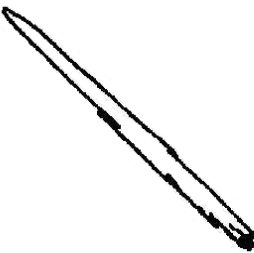
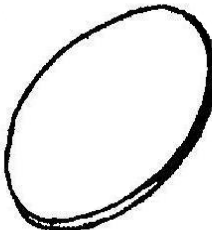
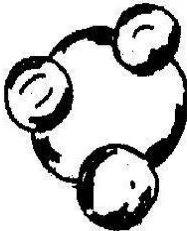
			
Сферическая	Каплеобразная	Губчатая	Осколочная
			
Дендритная	Волокнистая	Лепестковая	Сложная

Рис. 1. Формы частиц

Размер частиц и гранулометрический состав порошка. В реальных условиях имеют дело с шихтой (порошковой смесью), состоящей из частиц различного размера, ибо все существующие методы получения порошков позволяют получать металлические порошки, размеры частиц которых колеблются в довольно широких пределах. Вместе с тем, для получения прессовки с постоянными размерами и свойствами требуется, чтобы исходные порошки обладали определенной зернистостью. Существует пять категорий зернистости порошков (табл. 1). Каждая из указанных категорий может быть дифференцирована по крупности на фракции. Смешивая порошки различных фракций в определенных пропорциях, добиваются равномерности свойств готовых изделий. Относительное содержание фракций частиц различной крупности называется гранулометрическим составом порошка.

Таблица 1.
Категории зернистости порошков

Категория зернистости порошка	Размер частиц, мкм
Грубая	150...500
Средняя	40...150
Тонкая	10...40
Весьма тонкая	0,5...10
Ультратонкая	менее 0,5

Для определения гранулометрического состава используют ситовой и микроскопический анализы, а также седиментацию. Ситовой анализ применяется только для разделения на фракции порошков грубой и средней категорий, так как минимальный размер отверстий в сетках составляет 40 мкм.

Микроскопический метод используют для определения зернистости тонких и весьма тонких порошков. Оптический микроскоп позволяет измерять частицы размером 0,3 ... 100 мкм. Определение размеров частиц ультратонкой категории производят на электронном микроскопе. Точность в обоих случаях зависит от количества измерений и от качества приготовленного препарата.

Седиментационный анализ применяют главным образом для определения гранулометрического состава тонких порошков.

Удельная поверхность частиц — суммарная поверхность всех частиц в единице массы или объема порошка — зависит от формы и размеров частиц и является характеристикой развитости поверхности порошка.

Знание этого свойства важно для разработки технологии прессования и особенно спекания, так как увеличение удельной поверхности частиц означает увеличение количества контактов между частицами в единице объема. Величина удельной поверхности колеблется от долей квадратного метра до десятков квадратных метров на 1 г порошка. Определение удельной поверхности производят одним из следующих методов: адсорбции красителей или газов, определения скорости растворения, измерения газопроницаемости.

Плотность. При подсчете плотности порошка, исходя из удельной плотности металла, и сопоставление полученной величины с фактической обнаруживается существенная разница, которая объясняется наличием в порошках оксидов и внутренних пор. Определение плотности порошков производится пикнометрическим методом.

Микротвердость. При получении порошков наклеп и окисление могут изменить структуру металла порошка, понизить способность его к деформированию. Показателем способности металлических порошков к деформированию может быть их пластичность, о которой судят по твердости. Так как частицы порошка имеют очень маленькие размеры, их микро-твердость изучают на приборах ПМТ-3 или ПМТ-5.

1.3. Технологические свойства

К технологическим свойствам относятся: насыпная плотность, текучесть, объем и плотность утряски, прессуемость.

Насыпная плотность $\gamma_{\text{нас}}$ [г/см³] — это плотность единицы объема свободно насыпанного порошка. Она определяется удельной плотностью порошка металла и фактическим заполнением единицы объема (рис. 2). Количество пустот зависит от формы и размера частиц порошка и от того, насколько «вольготно» они располагаются друг относительно друга. Чем крупнее частицы и плотнее они расположены, чем более правильной формой они обладают, тем больше насыпная плотность. Частицы порошка никогда не бывают одинаковых размеров, поэтому более мелкие, располагаясь между крупными, способствуют увеличению насыпной плотности.

Для чего же нужно знать насыпную плотность? Во-первых, для того, чтобы иметь возможность рассчитать засыпную камеру пресс-формы. Во-вторых, с ней связана прессуемость порошка: чем больше насыпная плотность, тем больше плотность брикета при прессовании. Итак, насыпная плотность — одна из важнейших технологических характеристик порошков. Поэтому метод ее определения стандартизован.

Текучесть. Характеризует скорость прохождения порошка через отверстие определенного диаметра. Текучесть важно знать потому, что от нее зависят быстрота и равномерность заполнения пресс-формы,

однородность по плотности прессовок и производительность процесса при автоматическом прессовании.

Текучесть зависит от многих факторов и связана с трением и зацеплением частиц друг с другом. Текучесть порошков уменьшается при снижении удельной плотности материала порошка и размеров частиц; при усложнении формы частиц или повышении шероховатости их поверхности; при наличии влаги, адсорбированной на поверхности частиц.

Отмеченное может служить ключом к выбору способов повышения текучности. Одним из них является удаление влаги путем отжига в защитной атмосфере, другим — агломерация частиц, третьим — обкатка порошков, в результате которой сглаживается их поверхность.

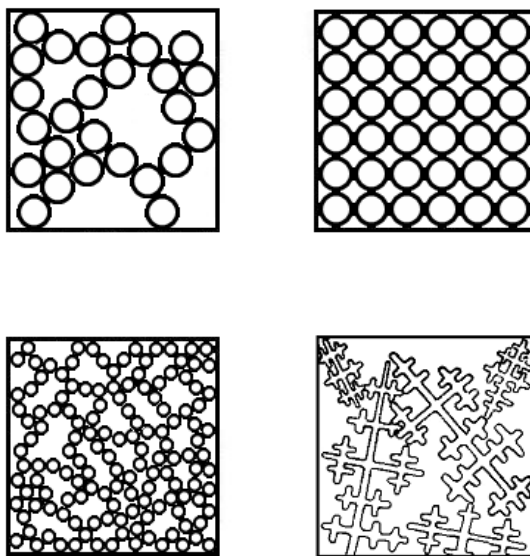


Рис. 2. Схемы расположения частиц порошка в единице объема

Объем и плотность утряски. Эти характеристики показывают способность порошка к уплотнению при утряске.

Объем утряски $V_{\text{утр}}$ определяется путем утряски навески порошка P в мерном сосуде до постоянного объема V :

$$V_{\text{утр}} = V/P, \text{ см}^3/\text{г}.$$

Плотностью утряски называют величину, обратную объему утряски:

$$\gamma_{\text{утр}} = 1/V_{\text{утр}}, \text{ г/см}^3.$$

Знание объема и плотности утряски полезно при проектировании пресс-форм.

Прессуемость — комплексная характеристика, включающая два понятия: уплотняемость (способность порошка к обжатию в процессе

прессования) и формуемость (способность к сохранению формы после прессования).

Уплотняемость зависит от пластичности частиц порошка, формуемость - от их формы и состояния поверхности. Наилучшей формуемостью обладают порошки дендритной формы.

2. СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ

Все способы получения порошков условно можно разделить на две группы: механические и физико-химические.

2.1. Механические способы получения порошков

Эти способы характеризуются тем, что измельчение металла (материала) осуществляется без изменения химического состава, в результате воздействия внешних сил. Механические способы, в свою очередь, делятся на две группы: измельчение в твердом состоянии и получение порошков из расплава металла.

Измельчение в твердом состоянии производится обычно в шаровых, вихревых, вибромельницах и мельницах планетарно-центробежного размола.

В указанных мельницах, кроме вихревых, измельчение исходных материалов (стружка, опилки, грубые порошки) осуществляется путем дробления и истирания во вращающихся или вибрирующих барабанах между размалывающими телами (обычно стальные или твердосплавные шары). Следствием этого является загрязненность получаемых порошков продуктами истирания размалывающих тел и футеровки барабана.

Отмеченного недостатка лишены вихревые мельницы, в которых измельчение исходных материалов происходит в рабочей камере в мощном вихревом потоке, создаваемом вращающимися в противоположные стороны пропеллерами. Размер частиц при шаровом размоле колеблется в пределах 40 ... 300 мкм; при вихревом — 50 ... 200 мкм; в вибромельницах и планетарно-центробежных мельницах получают порошки размером до 60 мкм.

Общим недостатком способов измельчения в твердом состоянии является их низкая производительность.

Получение порошков из расплава металла. Простейшим из этих способов является способ грануляции, при котором тонкая струя расплавленного металла после дробления о ленту транспортера охлаждается в воде (рис. 3). Порошки, получаемые таким образом, имеют сферическую или каплеобразную форму. Способ грануляции позволяет получать крупные частицы размером 500 ... 1000 мкм, поступающие, как правило, на дальнейшее измельчение.

Другой способ — распыление — отличается от рассмотренного выше значительно большей производительностью и возможностью получать порошки размером 50 ... 250 мкм, которые непосредственно могут быть использованы в производстве.

Преимущества метода распыления: 1) стоимость порошка незначительно превышает стоимость литого металла; 2) порошки обладают хорошей спекаемостью и могут быть применены для изделий высокой плотности; 3) возможность получения комплексно-легированных порошков.

Недостатки метода распыления: 1) низкая чистота порошка вследствие окисленности поверхности частиц; 2) возможность распыления только металлов и сплавов, обладающих сравнительно низкой температурой плавления (ограничивается стойкостью огнеупорных материалов плавильных устройств).

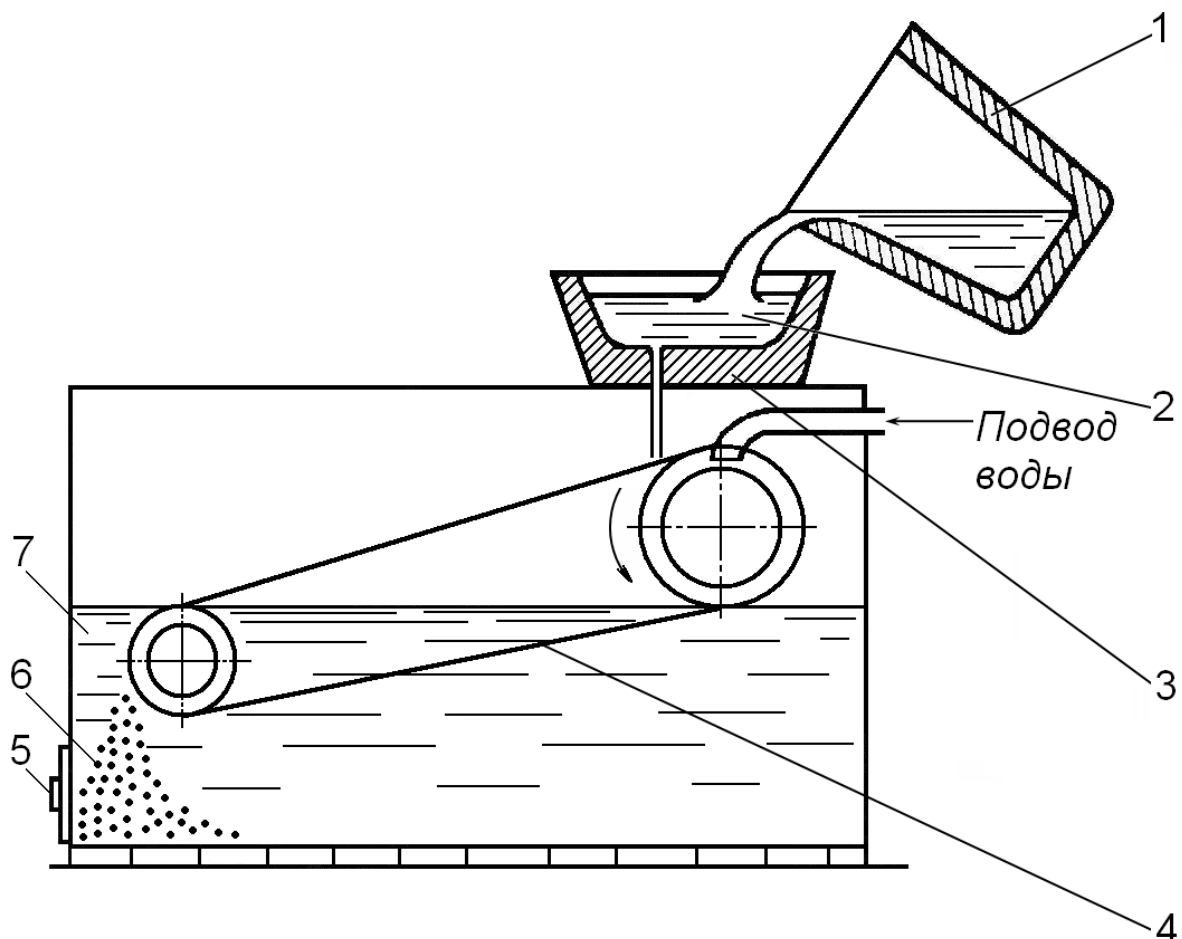


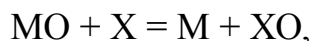
Рис. 3. Схема грануляции:

1—ковш; 2 — расплавленный металл; 3 — промежуточный ковш;
4 — лента; 5 — разгрузочный люк; 6 — порошок; 7 — вода

2.2. Физико-химические способы получения порошков

К физико-химическим способам относятся методы восстановления, электролитический, карбонильный, а также специальные способы получения многокомпонентных порошковых сплавов.

Метод восстановления. Способ восстановления из оксидов является наиболее распространенным и высокопроизводительным. Реакция восстановления в общем виде



где М — металл; Х — вещество, используемое в качестве восстановителя.

Сырьем могут служить руды или окалина от прокатки металлов.

Методом восстановления получают порошки железа, вольфрама, циркония, молибдена, меди, никеля и других металлов. Восстановление металлов из оксидов производится твердыми восстановителями (углеродом, металлами) и газообразными (водородом, оксидом углерода и различными газами, содержащими СО и Н₂).

Восстановление одних металлов при помощи других, имеющих большее сродство к кислороду, называется металлотермией. Наиболее распространенными металлами-восстановителями являются натрий, алюминий, магний, кальций.

Частицы восстановленных порошков характеризуются сильно развитой губчатой поверхностью, имеют форму многогранников, хорошо прессуются. Размеры частиц прямо пропорциональны температуре процесса и колеблются в широких пределах от долей микрона до 150 мкм.

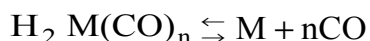
Электролитический метод состоит в осаждении на катоде порошков металлов и осуществляется либо из водных растворов солей (получение порошков олова, серебра, меди, железа), либо из расплавленных сред (получение порошков тантала, ниобия, циркония, ванадия, вольфрама и др.).

Электролитический метод обладает рядом существенных достоинств: 1) возможность получения порошков высокой чистоты; 2) хорошая прессуемость порошков, обладающих дендритной формой; 3) порошки не требуют дополнительного измельчения, так как размер частиц регулируется плотностью тока; 4) относительно низкая температура процесса.

Основной недостаток электролитического метода — высокая стоимость порошков вследствие низкой производительности процесса и больших затрат электроэнергии.

Электролитический метод применяется для производства порошков меди, серебра, тантала и других металлов.

Карбонильный метод. Карбонильным методом получают порошки железа, кобальта, никеля, хрома, молибдена, вольфрама, тантала. Исходным сырьем служат карбонилы, которые подвергаются разложению по реакции



Например, при получении карбонильного железа приготавливают железный штейн, который дробят до крупности зерен 2 ... 5 мм. Воздействуя на него окисью углерода при температуре 200 ... 220 °С под давлением около 20 МПа в течение 4 ... 5 суток, в пентакарбонил железа переводят около 70 % штейна $[\text{Fe} + 5\text{CO} = \text{Fe}(\text{CO})_5]$. Это прозрачная желтоватая жидкость, которую путем фильтрации очищают от примесей, а затем направляют в реактор разложения, где при температуре 250 ... 300 °С и атмосферном давлении карбонил распадается на окись углерода и тонкий железный порошок. Размер частиц порошка 1 ... 8 мкм. Частицы имеют сферическую форму или представляют собой конгломерат из нескольких сросшихся между собой порошинок (см. рис. 1).

Для удаления примесей углерода, азота и кислорода (их может содержаться до 3 %) карбонильные порошки железа подвергают отжигу в атмосфере водорода (иногда в вакууме) при температуре 300 ... 400 °С. При этом суммарное содержание примесей снижается до нескольких сотых долей процента.

2.3. Получение многокомпонентных порошковых сплавов

В ряде случаев возникает необходимость приготавливать шихту из порошков различных металлов. Для этого измельчают в порошок литой сплав нужного состава (что не всегда возможно) или используют способы, предложенные в последние годы.

1. Метод совместного осаждения металлических порошков при электролизе. В качестве анодов при этом используют литые сплавы определенного химического состава или составные аноды из металлов, входящих в состав сплава. Таким путем получают комплексные порошки Fe—Ni; Fe—Mn; Fe—Mo; Fe—Ni—Mo и др.

2. Метод совместного осаждения при разложении карбониллов. При этом термическому разложению подвергают смесь карбониллов соответствующих металлов. Иногда в колонну совместно с парами карбонила вводят порошки другого металла. В этом случае карбонил разлагается на поверхности частиц этого порошка, образуя с ним сплав. Таким путем получают порошки Fe—Ni с содержанием никеля от 10 до 80 % и Fe—Ni—Mo с содержанием молибдена до 1,5 % при различном содержании никеля.

3. Метод термического разложения. Исходным материалом служат термически малоустойчивые металлоорганические соединения. Метод применяется в тех случаях, когда неизвестны карбонилы данного металла.

4. Метод межкристаллитной коррозии. Применяется в основном для получения порошков из нержавеющей сталей.

5. Метод диффузионного насыщения. Осуществляется металлизацией порошка или насыщением высокопористой губки.

3. ФОРМОВАНИЕ И СПЕКАНИЕ ЗАГОТОВОК ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ

3.1. Формование

Формование складывается из подготовки порошков к прессованию, процесса прессования, выпрессовки заготовок, контроля качества прессовок.

Подготовка порошков к прессованию состоит из очистки, термической или механической обработки, отсева на фракции по величине частиц, смешивания, иногда грануляции.

Очистка порошков необходима вследствие загрязнения их оксидами, продуктами износа материала мельниц и дробящих тел. Очистка осуществляется химическими, гидромеханическими или магнитными методами.

Термическая обработка — отжиг — производится для снятия наклепа (понижения твердости), рафинирования химического состава в результате удаления углерода и других примесей, уменьшения окисленности. Результатом отжига нередко бывает укрупнение частиц.

Если необходимо снять наклеп, то отжиг производится при температуре $\sim 0,4$ от абсолютной температуры плавления металла порошка, т. е. выше температуры рекристаллизации.

Обязательным при отжиге является применение защитной или восстановительной атмосферы.

Механическая обработка применяется в том случае, когда требуется дополнительно измельчить порошок. Для этого обычно используют шаровые или молотковые мельницы.

Рассев порошков (классификация) производится для получения порошков с частицами определенного размера (фракций), которые поступают на следующую операцию — смешивание. После отсева отбирают только нужные для данного технологического процесса фракции. Классификация порошков с крупностью выше 40 ... 50 мкм производится с помощью сит, а более тонких — методом воздушной сепарации.

Смешивание. Главной задачей смешивания является получение однородной по химическому составу шихты. Однородность шихты зависит от способа смешивания, продолжительности, гранулометрического состава и плотности порошков. Различают сухое (механическое) и мокрое (химическое) смешивание.

Сухое смешивание производят в шаровых мельницах, конусных или вибрационных смесителях, мокрое — в спирте, бензине или дистиллированной воде. Мокрое смешивание обладает рядом преимуществ

перед сухим: получается более однородная смесь; происходит более интенсивное перемешивание; отсутствует распыление мелких частиц по всему объему смесителя и запыление воздуха в цехе.

В ряде случаев при смешивании для улучшения текучести порошков производят их *грануляцию* (укрупнение). Для облегчения прессования труднопрессуемых порошков при смешивании (или грануляции) вводят специальные склеивающие или пластифицирующие вещества. Кроме того, в шихту могут вводиться добавки для улучшения процессов спекания или обеспечения определенной пористости изделий.

Контроль качества смешивания производится путем изучения технологических свойств шихты и физико-механических свойств спеченных тел или химическим анализом проб.

Дозировка шихты осуществляется весовым или объемным способами. При автоматическом прессовании применяют объемную дозировку, которая уступает по точности весовой, однако при использовании шихты с постоянной насыпной плотностью дает хорошие результаты. Весовая дозировка применяется при мелкосерийном производстве, когда изделия должны быть точными по массе или когда в состав шихты входят драгоценные металлы (золото, платина, серебро и др.).

3.2. Процессы, происходящие при прессовании

Назначение прессования — формование из порошковой шихты полуфабрикатов определенной формы, размеров и прочности.

Простейшая конструкция пресс-формы (рис. 4) состоит из матрицы,

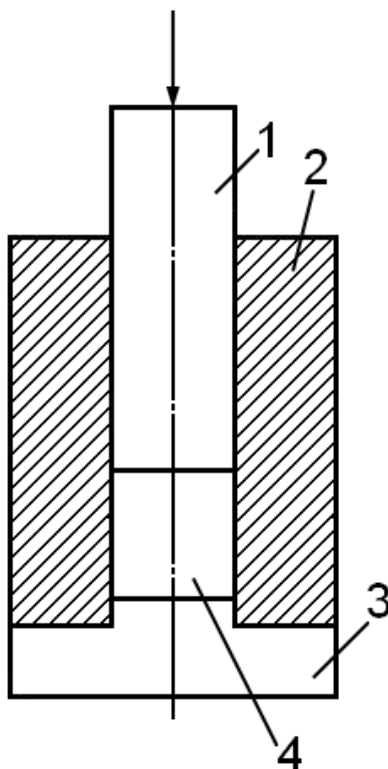


Рис. 4. Простейшая конструкция пресс-формы: 1—верхний пуансон; 2 — матрица; 3 — нижний пуансон; 4 — порошок

верхнего и нижнего пуансонов, между которыми засыпается прессуемый порошок. Усилие прессования прикладывается к верхнему пуансону. В этом случае мы имеем дело с так называемым односторонним прессованием.

Прессование порошкового тела (объема порошка) отличается от прессования компактного (литого) металла существенным уменьшением первоначального объема и повышением плотности.

Изменение объема порошкового тела при прессовании происходит в результате процессов уплотнения — консолидации под консолидацией понимается рост контактного сечения).

Плотность прессовок зависит от давления прессования, влияние которого можно условно разделить на три этапа (рис. 5). Засыпанный в пресс-форму порошок до приложения усилия обладает плотностью, соответствующей насыпной плотности.

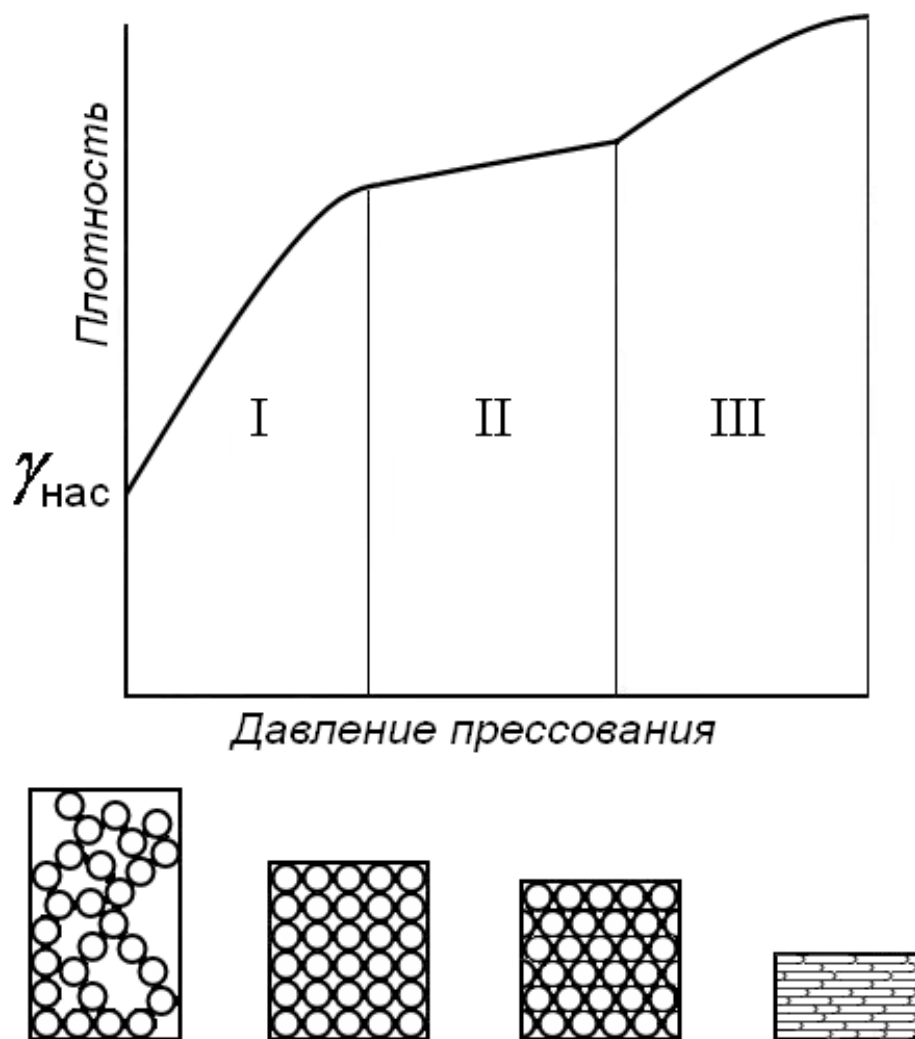


Рис. 5. Зависимость плотности прессовок от давления прессования

На первом этапе даже самое небольшое повышение давления вызывает значительное увеличение плотности прессовки за счет уменьшения пустот и более плотного расположения частиц. В целом первый этап характеризуется «свободным» перемещением частиц.

На втором этапе плотно упакованные частицы оказывают определенное сопротивление сжатию. По мере повышения давления происходит сглаживание поверхности частиц за счет трения друг о друга, сдирание оксидных пленок, рост контактного сечения. Появляются силы межатомного взаимодействия, и, как следствие, сопротивление порошкообразного тела внешнему давлению увеличивается, повышение плотности прессовок затормаживается.

На третьем этапе давление прессования превышает сопротивление частиц упругой деформации. Начинается и протекает процесс их пластического деформирования. Металл течет, заполняя пустоты, объем прессовки уменьшается. При прессовании хрупких материалов пластической деформации не происходит. Третий этап характеризуется их хрупким разрушением, дроблением выступов на поверхности частиц и так же, как и для пластичных металлов, уплотнением и уменьшением объема прессовки.

График, приведенный на рис. 5, представляет теоретическое описание процессов. В действительности имеет место наложение указанных стадий уплотнения. Так, деформация отдельных частиц начинается уже при невысоких нагрузках.

Этому во многом способствует вторая особенность прессования порошковых тел, состоящая в неравномерном распределении плотности прессовок по сечению.

Рассмотрим результаты эксперимента. В полость пресс-формы были засыпаны пять одинаковых навесок порошка, которые разделялись прокладками из алюминиевой фольги (рис. 6а).

После прессования полученный брикет извлекли и разрезали вдоль по оси. По высоте образцов можно судить об их плотности (рис. 6б). Хорошо видно, что верхний слой, прилегающий к пуансону, обладает большей плотностью, чем нижележащие. Плотность прессовок по диаметру также неоднородна. В верхних слоях, соприкасающихся с торцом пуансона, плотность значительно возрастает от центра к периферии, а в нижней части, наоборот, плотность по диаметру увеличивается от краев прессовки к центру.

В связи с тем, что неравномерность плотности брикета может оказать существенное влияние на распределение плотности в спеченном изделии и, как следствие, на изменение его механических или физических свойств, на искажение формы и размеров, рассмотрим причины,

обуславливающие неравномерное распределение плотности по сечению прессовки.

Во время прессования порошков тело оказывается всесторонне сжатым. Сверху на него давит пуансон, снизу и с боков действует реакция пресс-формы. Поведение порошка с известным приближением можно сравнить с поведением жидкости. Однако, в отличие от жидкости, частицы порошка передают производимое на них давление неравномерно. В результате давление на стенки пресс-формы значительно меньше, чем в направлении прессования. Это объясняется затруднительностью перемещения частиц из-за трения между собой и заклинивания.

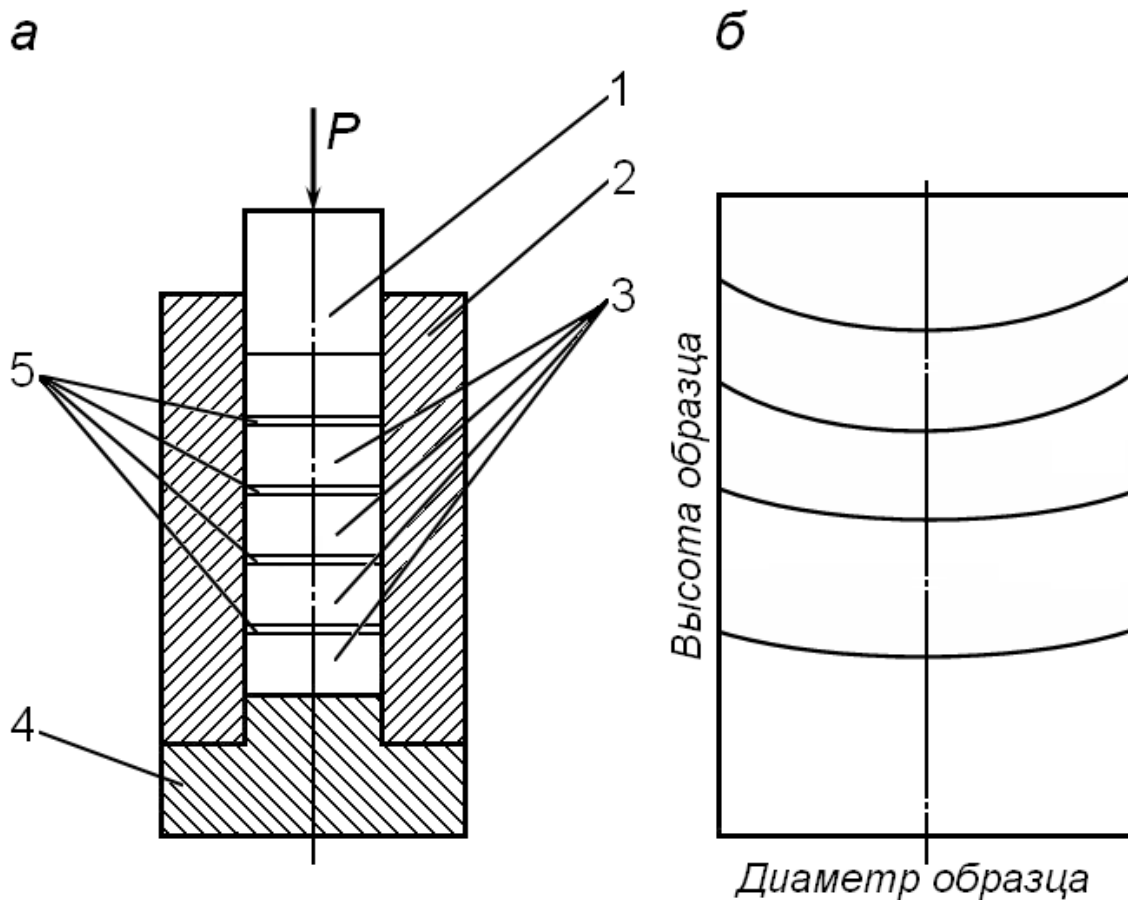


Рис. 6. Схема распределения плотности по сечению брикета, спрессованного способом одностороннего прессования:

а — до прессования: 1 — верхний пуансон;
2 — матрица; 3 — порошок; 4 — нижний пуансон; 5 — прокладка из фольги;
б — спрессованный образец

Боковое давление составляет 25 ... 40 % от давления прессования и может быть определено из соотношении

$$P_r = \xi p, \quad (3.1)$$

где P_r — удельное боковое давление; p — удельное давление прессования; ξ — коэффициент бокового давления.

Коэффициент бокового давления зависит от физических характеристик порошка: пластичности, дисперсности и формы частиц. Боковое давление изменяется по высоте прессуемого брикета. Оно снижается в связи с уменьшением осевого давления по мере удаления от пуансона.

При рассмотрении процесса прессования следует учитывать также влияние на плотность прессовок трения порошка о стенки пресс-формы. Чтобы определить потери давления прессования на трение о стенки пресс-формы, выведем соотношение между боковым давлением и общим вертикальным давлением. Допустим, что прессовка высотой h с относительной плотностью θ (относительная плотность — это отношение фактической плотности прессовки к плотности компактного материала) находится в цилиндрической пресс-форме диаметром D при удельном давлении прессования p . Тогда общее давление, оказываемое на прессовку, будет равно

$$P = \frac{\pi D^2}{4} p. \quad (3.2)$$

Так как давление на 1 см² боковой поверхности $P_r = \xi p$, а величина боковой поверхности равна $\pi D h$, то суммарное давление на нее составит

$$P_r = \xi \pi D h p_r = \xi \pi D h_k p. \quad (3.3)$$

где h_k — приведенная высота прессовки (высота при $\theta = 100\%$).

Следовательно, суммарное боковое давление зависит только от величины вертикального удельного давления, а все остальные величины постоянны для данной навески порошка.

Потеря давления на трение порошка о стенки пресс-формы определяется по уравнению

$$\Delta P = f P_r, \quad (3.4)$$

где f — коэффициент трения порошка о стенки пресс-формы, или, используя уравнение (3.3),

$$\Delta P = f \xi \pi D h_k p. \quad (3.5)$$

Доля давления, которая тратится на трение о стенки пресс-формы, определяется отношением ΔP к общему вертикальному давлению:

$$\Delta P / P = \frac{\Delta P}{\frac{\pi D^2}{4} p} = \frac{f \xi \pi D h_k p}{\frac{\pi D^2}{4} p} = f \xi \frac{4 h_k}{D}. \quad (3.6)$$

Таким образом, переменными являются только размеры брикета. Доля затрат давления на трение прямо пропорциональна приведенной высоте брикета и обратно пропорциональна его диаметру. Для данной навески прессуемого порошка и размеров пресс-формы доля вертикального давления, теряемого на трение, есть величина постоянная, пропорциональная приложенному давлению. Потери давления на преодоление сил трения между частицами порошка и стенками пресс-формы (внешнее трение) могут составлять 60 ... 90 % от усилия прессования. Потери усилия прессования на преодоление внешнего трения зависят от коэффициента трения в паре материал пресс-формы — материал прессуемого брикета, высоты прессуемого брикета, диаметра пресс-формы, наличия смазки. Коэффициент внешнего трения существенно уменьшается с увеличением давления прессования. Наличие внешнего трения, с которым связана равномерность плотности прессовки по высоте, заставляет ограничивать последнюю.

При прессовании важную роль играет и трение между частицами порошка (внутреннее трение), которое уменьшает усилия прессования по оси прессовки. Из-за внутреннего трения невозможно течение порошка под прямым углом к направлению прессования, следствием чего является потеря плотности в соответствующих зонах. Поэтому нельзя прессовать изделия, профиль которых меняется в направлении прессования.

Процесс прессования не заканчивается одним лишь деформированием порошкового тела. Нужно провести еще выпрессовку изделия. На первый взгляд, для этого достаточно приложить усилие, позволяющее преодолеть лишь силы трения прессовки о стенки пресс-формы. В действительности, этого усилия оказалось бы недостаточно. Выше уже отмечалось, что при прессовании порошкового тела энергия давления расходуется как на преодоление внешнего и внутреннего трения, так и на пластическую и упругую деформацию. Пластическая деформация приводит к уплотнению прессовки, а упругая, накапливаясь, уравнивает внешнее давление прессования.

После снятия внешнего давления упругие силы, освобождаясь, стремятся увеличить объем спрессованного изделия. Это возможно лишь путем увеличения высоты прессовки, увеличению ее по диаметру препятствуют стенки пресс-формы. Упругие силы, складываясь с усилием трения, затрудняют извлечение изделия. Усилия выталкивания в зависимости от природы и свойств порошковой шихты составляют 0,1 ... 0,35 от давления прессования.

Увеличение размеров спрессованного изделия под действием внутренних напряжений называется упругим последствием. Таким образом, усилие, с которым производится выпрессовка изделия, связано с

преодолением сил, обусловленных упругим последствием, и сил трения прессовки о стенки пресс-формы.

Увеличение размеров наблюдается и после выпрессовки. Поэтому упругое последствие рассматривают как комплекс явлений увеличения размеров прессовки сразу после снятия давления прессования и после выпрессовки.

Очень часто упругое последствие сопровождается появлением в изделиях расслоев и трещин, поэтому важно знать, какие факторы влияют на его величину. Упругое последствие зависит от характеристик прессуемого порошка (дисперсности, формы, состояния поверхности частиц, содержания оксидов, твердости материала частиц), давления прессования, смазки, упругих свойств матрицы и пресс-формы. Факторы, увеличивающие прочность прессовок (большая удельная поверхность частиц, малая насыпная плотность, минимальное содержание примесей, наличие смазки), уменьшают, а противоположные (например, высокая твердость материала частиц порошка) увеличивают упругое последствие.

Относительное изменение линейных размеров прессовки вследствие упругого последствия может быть найдено из выражения

$$\delta_l = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100 = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100(\%), \quad (3.7)$$

где δ_l — величина упругого последствия; Δl — абсолютное расширение прессовки по длине или диаметру; l_0 — длина (диаметр) прессовки, находящейся в пресс-форме под действием давления прессования; l_1 — длина (диаметр) прессовки, извлеченной из пресс-формы.

Аналогичным образом можно найти и объемную величину упругого воздействия:

$$\delta_v = \frac{\Delta V}{V_c} \cdot 100 = \frac{V_1 - V_0}{V_0} \cdot 100(\%). \quad (3.8)$$

Эффект упругого последствия по высоте прессовки больше, чем в поперечном направлении и составляет 5 ... 6 % (против 3 %). Это связано с большей величиной осевого усилия по сравнению с боковым давлением.

Выше уже отмечалось, что потеря давления прессования по высоте и диаметру прессовки обусловлена внутренним и внешним трением. Поскольку потери давления прессования не только сами по себе велики, но и оказывают влияние на равномерность распределения плотности прессовок, возникает вопрос, нельзя ли как-то их сократить. Оказывается, можно, если в состав порошковой шихты ввести смазку. Все смазки делят на инертные и активные.

Инертные смазки позволяют снижать трение между частицами и стенками матрицы пресс-формы, не оказывая воздействия на свойства материала порошка.

Активные смазки оказывают еще дополнительное влияние на деформационную прочность частиц порошка, способствуя таким образом облегчению взаимного перемещения частиц при прессовании, лучшей их уплотняемости и, как следствие, достижению более высокой прочности при более низких усилиях прессования. Положительное действие активных смазок объясняется тем, что они абсорбируясь поверхностью частиц, проникают в поры, субмикроскопические трещины и другие дефекты, облегчая таким образом деформирование поверхностных слоев порошка. Примером активной смазки является олеиновая кислота. Применение смазок, особенно активных, существенно снижает прочность прессовок. Поэтому введение их целесообразно для пластичных материалов, прессовки, из порошков которых обладают достаточной прочностью. Для прессования хрупких и твердых материалов применяют клеящие и пластифицирующие добавки— камфору, парафин, каучук, которые облегчают скольжение и склеивание частиц порошка.

Прочность прессовок определяется двумя основными факторами: механическим зацеплением частиц и действием межатомных сил сцепления.

Известно, что для литых металлов прочность обычно увеличивается с увеличением твердости, однако для порошковых прессовок наблюдается обратная зависимость. Прочность прессовок тем больше, чем мягче материал порошка. Это объясняется более быстрым заполнением контактных микронеровностей у пластичных материалов, вследствие чего в непосредственный контакт вступает большее число атомов совмещенных поверхностей. На прочность прессовок оказывает влияние и упругое последствие. Особенно заметно это влияние у твердых материалов, так как в результате упругого последствия контактная поверхность сильно уменьшается, и прочность прессовки, в основном, определяется силами механического зацепления. Механическое зацепление проявляется в более полной мере в случае шероховатой поверхности частиц и, как отмечалось выше, пропорционально пластичности металла.

3.3. Основные схемы прессования порошковых изделий

Закономерности прессования мы рассмотрели на примере одностороннего прессования, при котором давление на порошковую шихту производится только с одной стороны, что не позволяет добиться равномерной плотности по всему сечению прессовки. Существенное влияние на распределение плотности оказывает отношение высоты прессуемого изделия к площади поперечного сечения. Чем больше это отношение, тем менее однородной плотностью обладает прессовка. Более

равномерного распределения плотности позволяет достигнуть двустороннее прессование (рис. 7), однако и в этом случае в середине прессовки образуется зона пониженной плотности.

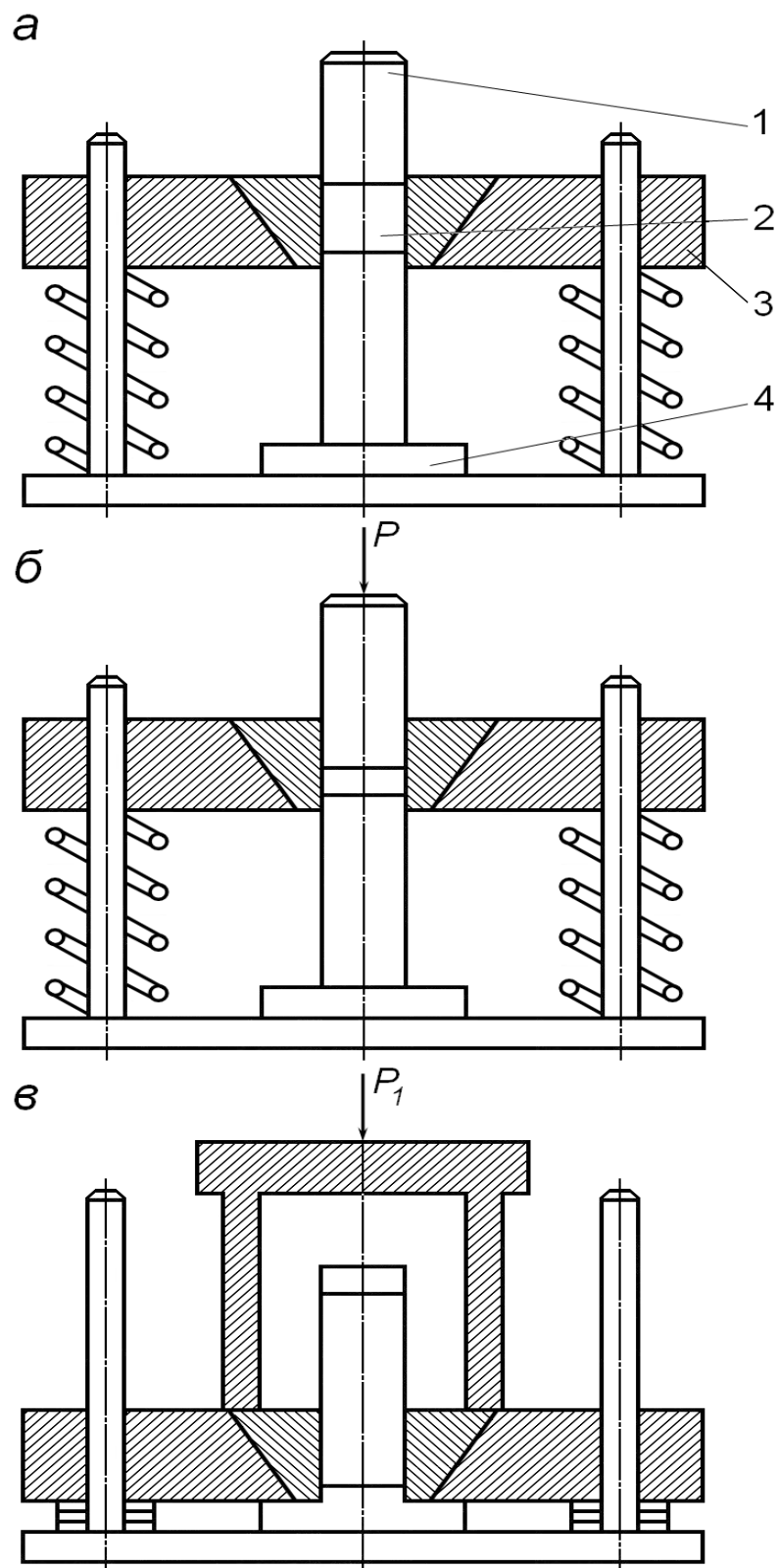


Рис. 7. Схема двустороннего прессования:

а — засыпка порошка и установка пуансона: 1 — верхний пуансон; 2 — порошковая шихта; 3 — матрица; 4 — нижний пуансон; б — прессование порошка; в — выталкивание прессовки; P — давление прессования; P_1 — давление выпрессовки

Заготовки с равномерной плотностью можно получать, применяя гидростатическое прессование (рис. 8а), при котором порошковая шихта, засыпанная в эластичные (например, резиновые) оболочки, подвергается всестороннему обжатию жидкостью (водой, маслом, глицерином) при давлении выше 100 ... 200 МПа. Разновидностью этого метода является взрывное прессование (рис. 8б). Первоначально методом гидростатического прессования получали заготовки только простой формы, но в настоящее время, благодаря применению специальной технологической оснастки, изготавливают и сложные изделия массой до 2000 кг.

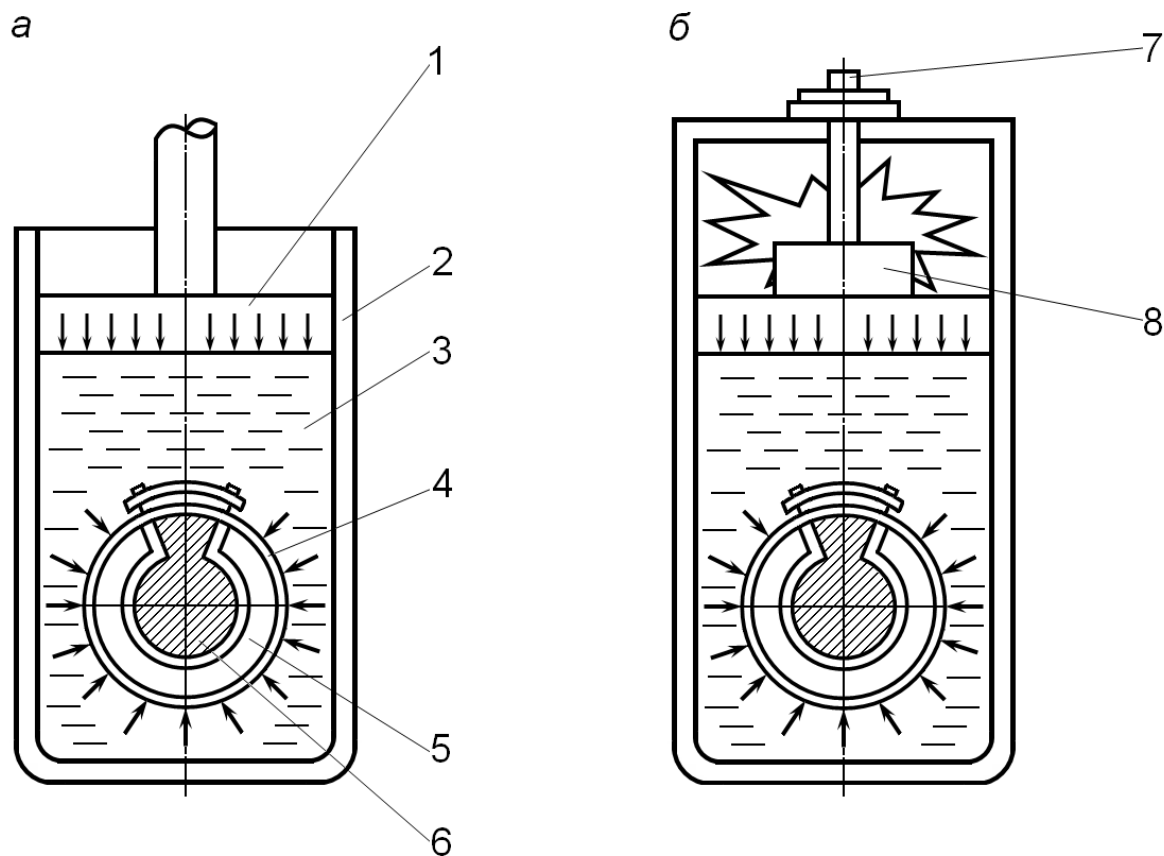


Рис. 8. Схемы гидростатического (а) и взрывного (б) прессования: 1 — пуансон; 2 — пресс-камера; 3 — рабочая жидкость; 4 — резиновая оболочка; 5 — формуемая деталь; 6 — стальной сердечник; 7 — запал; 8 — заряд взрывчатого вещества

Важное преимущество гидростатического прессования — отсутствие расслоев. Вместе с тем, имеется и существенный недостаток — трудно

выдержать размеры прессовки, близкие к заданным, вследствие чего, как правило, приходится применять механическую обработку.

Рассмотрим методы мундштучного прессования и прокатки, при которых непрерывная подача порошков обеспечивает высокую производительность.

При мундштучном прессовании (экструзии) изделие получается путем продавливания порошковой массы, содержащей около 10 % пластификатора (парафин, крахмал, бакелит), через специальное отверстие — мундштук (рис. 9).

Мундштучным прессованием получают изделия постоянного сечения (квадрат, круг, овал, трубы, уголки и любые сложные профили). Важным достоинством метода является возможность получения изделий большой длины с равномерной плотностью даже из плохо прессующихся материалов (тугоплавкие металлы, интерметаллические соединения, твердые сплавы, материалы на основе оксидов).

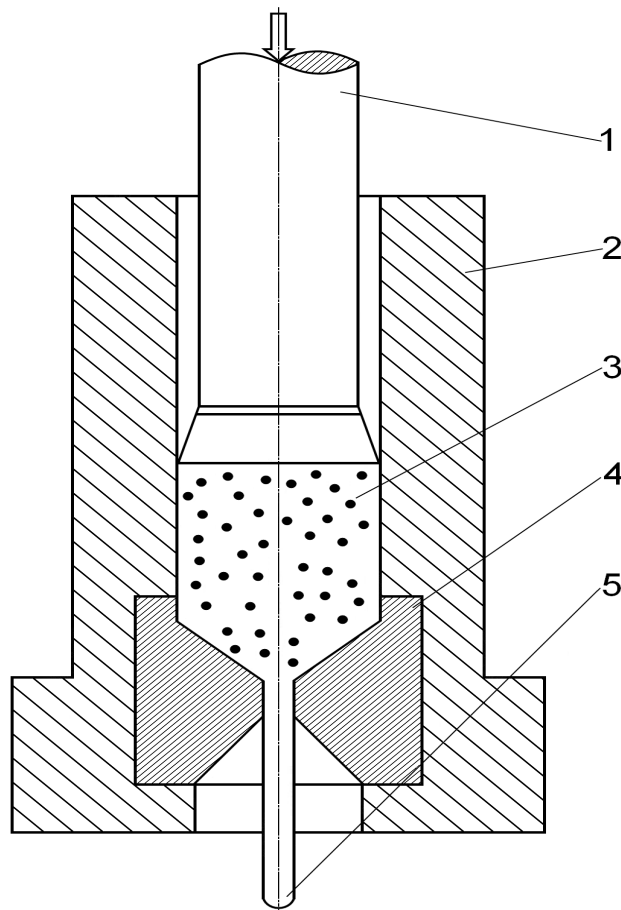


Рис. 9. Схема мундштучного прессования:

*1 — пуансон; 2 — стальной стакан; 3 — порошковая шихта;
4 — конус (мундштук); 5 — спрессованная заготовка*

Прокатка порошков — это процесс получения порошковых изделий в виде листов, ленты, проволоки, электродов, фильтров.

На рис. (10а) показана схема прокатки в вертикальном направлении, при которой создаются максимально благоприятные условия вовлечения порошка в очаг деформации. Однако при выходе из валков происходит перегиб полученной ленты на 90° , что недопустимо при прокатке хрупких и высокопористых материалов. В указанных случаях применяют прокатку порошков с наклонной (10б) и горизонтальной (10в) подачей порошка.

Прокатка обладает рядом преимуществ перед рассмотренными ранее методами прессования:

- 1) возможность получения изделий большой длины с равномерной плотностью;
- 2) возможность получения изделий с большой площадью;
- 3) возможность получения ряда свойств, которые не достигаются прокаткой компактного металла (например, любая заданная пористость).

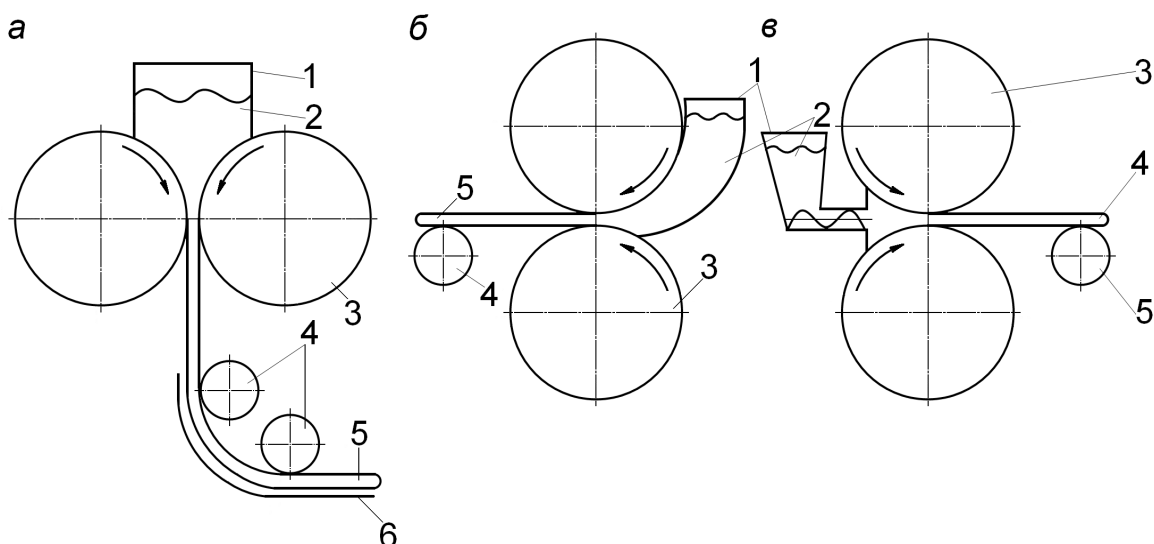


Рис. 10. Схема прокатки металлических порошков в ленту:

а — прокатка с вертикальной подачей порошка: 1 — бункер; 2 — порошок (шихта); 3 — валок; 4 — лента; 5 — ролик;

б — направляющая;

в — прокатка с наклонной подачей; г — прокатка с горизонтальной подачей:

Прокатку порошков производят как в холодном, так и горячем состоянии. После прокатки непременно следует операция спекания. Для повышения плотности и улучшения механических свойств спеченную ленту подвергают многократной холодной прокатке с промежуточными отжигами. После 3 — 4 прокаток механические свойства ленты повышаются в несколько раз, а плотность достигает 100 %. Горячая прокатка позволяет

получать материал с повышенными механическими свойствами при меньшем, чем при холодной прокатке, количестве обжати. Однако она требует более сложного оборудования, так как процесс ведут в контролируемой атмосфере для защиты порошка от окисления при высоких температурах.

Существует еще ряд способов получения изделий из металлических порошков: ковка и горячая прокатка порошков в оболочках, динамическое и вибрационное формование, шликерное литье.

3.4. Характерные пороки прессованных заготовок и их причины

При прессовании могут встретиться следующие основные виды брака: 1) поперечные и диагональные трещины (наиболее опасный и часто встречающийся вид брака); 2) брак по размерам; 3) недопрессовка.

Образование трещин объясняется высокими давлениями прессования, неравномерностью распределения в прессовке примесей, неравномерным сбросом давления и слишком медленной выпрессовкой, наличием в прессуемом изделии тонких стенок или резких переходов. Брак по размерам объясняется неточностью дозировки, нарушением режима прессования, неправильными размерами или конструкцией пресс-формы.

3.5. Спекание прессовок

Спекание прессовок заключается в нагреве их до определенной температуры и выдержке. Если прессовку не подвергнуть спеканию, она может вскоре осыпаться или разрушиться при самом незначительном усилии. Следовательно, спекание — это операция, позволяющая сообщить прессовке механические свойства готовой детали. Не только механические, но и физические, так как в процессе спекания в порошковом теле протекают существенные изменения. Так, контакт между частицами из оксидного превращается в металлический, происходит объединение частиц, изменение размеров и формы пор, уменьшение общей пористости, усадка. Все процессы формируют свойства готового изделия.

В зависимости от агрегатного состояния металла порошка различают два вида спекания: в твердом состоянии, когда температура процесса недостаточна для расплавления легкоплавкого металла, и спекание с участием жидкой фазы, когда происходит частичное расплавление одного из компонентов шихты или образовавшейся при спекании эвтектики.

Спекание в твердом состоянии. Это наиболее часто встречающийся способ спекания. Рассмотрим последовательность процессов спекания в твердом состоянии.

В процессе нагревания прессовок до температуры спекания первоначально в них происходит выгорание смазки или склеивающих

добавок. Частицы, составляющие порошковое тело (порошинки), при этом получают возможность занимать места, освободившиеся после выгорания смазки. Они начинают скользить друг относительно друга, стремясь к более плотному расположению.

Повышение температуры вызывает увеличение амплитуды колебания атомов в кристаллической решетке металла. Однако при одной и той же температуре не все атомы частицы порошка обладают одинаковой подвижностью. Наиболее подвижны атомы, расположенные на поверхности частиц, и особенно на их выступах. Именно поэтому атомы с выступов частиц, покинув свои места, стремятся занять более устойчивые положения во впадинах. Перенос этих атомов осуществляется через газовую фазу. Таким путем происходит растворение выступов и залечивание впадин. В результате частицы приобретают все более гладкую поверхность, а это способствует дальнейшему их движению, что заметно исследователю в виде усадки.

Частицы порошка стремятся занять такое положение друг относительно друга, которое бы отвечало минимальной свободной энергии. Именно свободная энергия, пропорциональная суммарной поверхности порошинок, стремится сжать прессовку, чтобы уменьшить ее свободную поверхность. Так объясняют самопроизвольную усадку в начале спекания.

Наконец, скольжение порошинок друг относительно друга заканчивается. Предшествующий этап сглаживания частиц подготовил почву для образования плотных контактов. Кроме того, были сняты внутренние напряжения.

Следующий этап — создание контактных мостиков и розеток, при котором образуется сравнительно жесткий порошковый скелет.

Рассмотрим три основных случая образования контактов между частицами:

- 1) вещества частиц однородные;
- 2) вещества частиц взаимно нерастворимы;
- 3) вещества частиц неограниченно растворимы друг в друге.

Образование контакта между однородными частицами. Первые контакты, образовавшиеся во время прессования, бывают в основном контактами через оксиды. Лишь в немногих точках происходит соприкосновение металлов. В процессе спекания пленки оксидов начинают восстанавливаться. В их объеме формируется структура, богатая множеством вакансий, ранее занятых атомами кислорода. Поэтому атомы металла в дефектной структуре обладают повышенной диффузионной подвижностью и, быстро перемещаясь, накапливаются вблизи тех немногих частиц, в которых с самого начала контакт был металлическим. Таким путем расширяется область металлического контакта. Одновременно происходит разрушение оксидных контактов. Область металлического контакта превращается в так называемый «мостик», соединяющий порошинки.

Механизм образования контактов через «мостики» осуществляется практически всегда, когда спеканию подвергаются окисленные порошки.

Рассмотрим, как происходит образование контакта, если поверхность порошка не окислена совсем или окислена очень мало. В этом случае площадь металлического контакта может быть значительной.

В зоне контакта не может быть точного соответствия между решетками кристаллов, так как частицы ориентированы произвольно. Даже если соприкосновение происходило бы по идентичным и идентично ориентированным поверхностям, соответствия не было бы из-за неизбежного взаимного смещения на доли межатомного расстояния. Вместе с тем, в процессе спекания частицы стремятся срастись. Но для этого необходимо, чтобы появились связи в месте контакта между ближайшими атомами-соседями, принадлежащими двум различным частицам. Атомы начинают подстраиваться друг к другу, происходит их смещение на расстояния, не превышающие межатомные. Но даже такое незначительное перемещение вызывает напряжения в кристаллической решетке. Эти напряжения способствуют возникновению дислокаций в кристаллической решетке частицы порошка. Характер расположения дислокаций в зоне контакта зависит от типа кристаллической решетки металла и обнаруживается в виде розетки спекания (рис. 11).

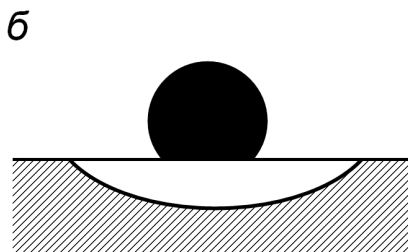
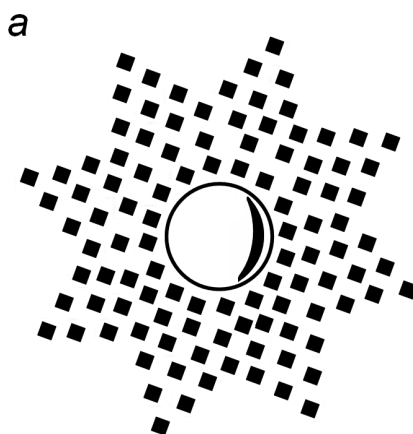


Рис. 11. Дислокационная розетка спекания (случай припекания сферической частицы к плоской поверхности): а — выход дислокаций на поверхность; б — зона, богатая дислокациями (светлое поле под частицей)

Чем больше величина напряжений в месте контакта и чем больше его площадь, тем длиннее лучи розетки спекания. Известно, что в дефектных, искаженных структурах диффузионные процессы происходят легче и быстрее, чем в бездефектных. Поэтому в дефектные области устремляются атомы спекаемых частиц, что способствует увеличению контактов и в конечном итоге — слиянию частиц воедино.

Образование контакта между взаимно нерастворимыми веществами. Как и в предыдущем случае, в месте контакта будут происходить процессы, которые приводят к наиболее скоро достижимому и наибольшему по величине понижению свободной энергии системы.

Так как вещества взаимно нерастворимы друг в друге, то при контакте порошковых частиц направленного движения атомов не происходит. Следовательно, понижение свободной энергии может произойти только за счет уменьшения поверхностной энергии системы. Если частицы одного вещества сливаются воедино, то в случае различных взаимно нерастворимых веществ этого произойти не может.

Рассмотрим конкретные случаи развития контакта между веществами А и В в зависимости от того, как соотносятся поверхностная энергия α_{AB} на границе А—В и энергии α_A и α_B на поверхности частиц А и В.

Если $\alpha_{AB} > \alpha_A + \alpha_B$, то при соприкосновении частиц площадь контакта увеличиваться не будет, так как увеличение поверхностного контакта ведет к увеличению поверхностной энергии системы.

Если $\alpha_{AB} < \alpha_A + \alpha_B$, то увеличение площади контакта приведет к понижению поверхностной энергии системы, однако успех развития контакта зависит от конкретного соотношения поверхностных энергий α_A и α_B .

Если $\alpha_{AB} < \alpha_A - \alpha_B$, то возникает наиболее благоприятная ситуация для развития контакта. В этом случае веществу крупинки В просто выгодно «намазываться» на поверхность крупинки А. Чтобы произошло «намазывание», при котором вместо поверхности типа А появились две поверхности — типа А В и типа В, необходимо чтобы $\alpha_{AB} + \alpha_B$ было меньшим, чем α_A , а это означает выполнение написанного выше неравенства. В результате образуется двухслойная сфера, состоящая из ядра вещества А и покрытия вещества В.

После этого осуществляется контакт укрупненных частичек, поверхности которых представляют вещество В. Спекание этих частичек происходит по принципу образования контакта между однородными веществами.

Образование контакта между неограниченно растворимыми веществами. В месте контакта возникают диффузионные потоки атомов спекаемых веществ А и В, отличающиеся скоростью диффузии. В связи с

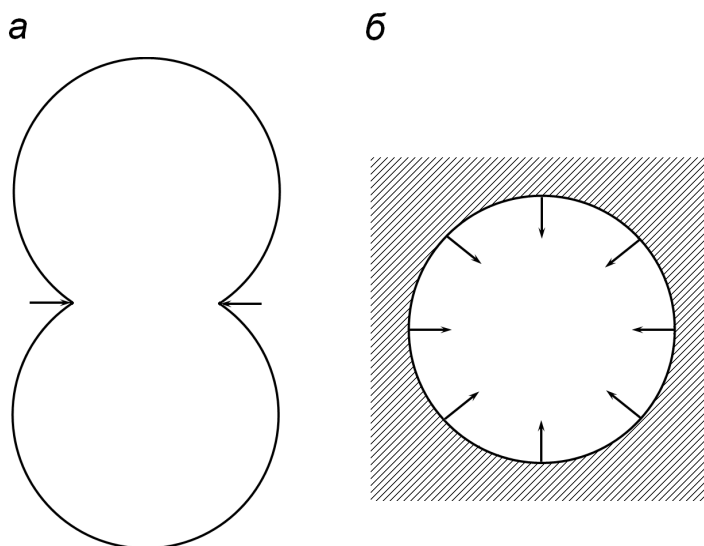
этим из решетки одной частицы (например, частицы А) уйдет атомов больше, чем в нее придет. Следствием будет появление вакансий, которые, объединившись, образуют поры в крупинке А. Кроме непосредственной диффузии атомов через контакт, происходит еще и перенос через газовую фазу атомов, которые, оседая на контактируемой частице, затем диффузионно проникают в ее объем.

Все описанные механизмы приводят к разбуханию одной частицы за счет другой.

Уплотнение за счет диффузионной ползучести. Первые два этапа спекания обеспечили определенную степень уплотнения. Возникли и развились прочные контакты, созданся жесткий скелет прессовки. Однако процесс спекания не завершен. Продолжается поверхностная миграция атомов, сфероидизация пор. На первый взгляд кажется, что наступило равновесие. В действительности это далеко не так. Практика свидетельствует о том, что в этих условиях происходит усадка прессовок.

Какие же силы обуславливают усадку на этом новом этапе? В пористом теле, состоящем из множества спрессованных порошинок, есть два типа поверхностей: 1) так называемые свободные поверхности пор; 2) несвободные, или контактные, поверхности, вдоль которых соприкасаются частицы.

Поверхности первого типа в процессе спекания стремятся к сокращению. Этому способствуют силы избыточного капиллярного давления, которые возникают на вогнутых и выпуклых поверхностях (рис. 12) и вызывают диффузионную ползучесть. Диффузионная ползучесть состоит в направленном перемещении вакансий от поверхности, где приложено давление, к свободной поверхности (внешние границы прессовки, границы блоков и зерен). Такое направленное движение вакансий обуславливает затекание пор и усадку прессовки.



*Рис. 12. Действие капиллярных сил при спекании:
а — стык частиц; б — изолированная пора*

Поверхности второго рода могут оказать определенное влияние на диффузионную ползучесть в связи с изложенными выше процессами появления и развития розеток спекания.

Ползучесть не может развиваться с постоянной скоростью. Скорость ползучести вследствие снижения числа несовершенств кристаллической решетки уменьшается. В соответствии с этим снижается и скорость процесса усадки.

Ход уплотнения на трех рассмотренных этапах спекания изображен в виде графика рис. 13.

Степень уплотнения, представляющая отношение объема прессовки в любое время $\tau(V)$ к первоначальному объему (V_0), изменяется по ступенчатому закону. В первое время (отрезок а) уплотнение идет при повышении температуры за счет выгорания смазки; затем (отрезок б) за счет сглаживания выступов и, наконец, (отрезок с) за счет диффузионной ползучести.

Влияние рекристаллизации на спекание. На диффузионные процессы накладывается процесс рекристаллизации, оказывая существенное влияние на механизм спекания. С повышением температуры спекания внутри каждой металлической частицы порошка начинается собирательная рекристаллизация, заключающаяся в передвижении границ зерен из одной частицы в другую одновременно с ростом контакта между частицами. Таким образом, происходит укрупнение зерен (частиц).

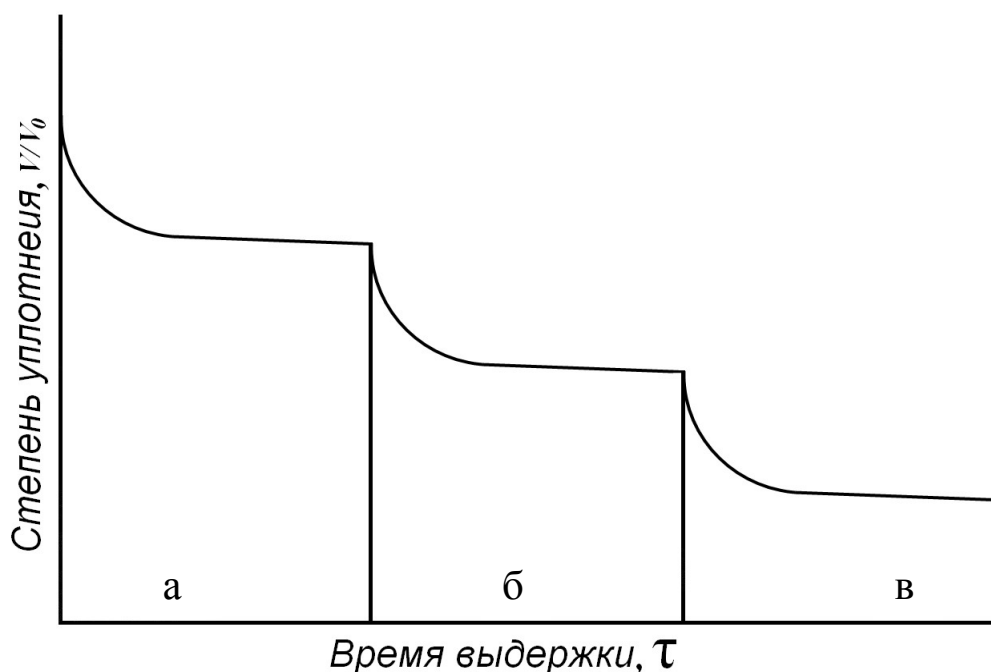


Рис. 13. Усадка при спекании со ступенчатым

подъемом температуры:

а — выгорание смазки; б — уплотнение за счет сглаживания поверхности; в — уплотнение за счет диффузионной ползучести

Процессу собирательной рекристаллизации препятствуют поры, газовые и окисные пленки на поверхности частиц. Все это способствует получению мелкозернистой структуры в спеченных изделиях. На процесс собирательной рекристаллизации оказывает влияние размер частиц порошка. Наблюдается следующая закономерность: чем крупнее частицы порошка, тем крупнее поры и тем слабее проявляется собирательная рекристаллизация. Например, при спекании брикетов из мелкого железного порошка контуры частиц исчезают при температуре 800 °С, а в брикетах из крупных железных порошков контуры отдельных частиц сохраняются даже при температуре 1200 °С.

Начальный этап рекристаллизации наблюдается при температуре (0,4 ... 0,5) $T_{пл}$ и развивается благодаря поверхностной диффузии, а интенсивное развитие этого процесса начинается при температуре выше (0,7 ... 0,8) $T_{пл}$.

В отличие от компактных металлов, в порошковых материалах очень трудно установить температуру начала и конца роста зерен. Это связано с тем, что при прессовании, независимо от давления, значительного измельчения частиц порошка не происходит, в особенности для порошков пластичных металлов. Кроме того, различные частицы порошка деформируются неодинаково и получают разную степень наклепа и, следовательно, разную температуру рекристаллизации.

Спекание с участием жидкой фазы. Спекание с участием жидкой фазы в практике порошковой металлургии встречается довольно часто. В данном случае имеют дело с фактом частичного (не более 50 %) расплавления одного из компонентов. Полного расплавления легкоплавкого компонента не допускают, чтобы прессовка не потеряла свою форму.

Известны две причины образования жидкой фазы: 1) появление жидкости в зоне контакта двух металлов, образующих друг с другом эвтектику; 2) расплавление металла вследствие достижения температуры его плавления.

В обоих случаях жидкость будет растекаться по поверхности частиц порошка, образуя жидкую пленку. Под влиянием усилий, обусловленных наличием жидкой пленки, частицы порошка в прессовке, стремясь максимально уплотниться, будут скользить друг относительно друга. Это осуществляется быстрее и проще, чем при спекании в твердом состоянии, так как жидкая фаза, обладая малой вязкостью, играет роль невыгорающей смазки, облегчающей скольжение. Процесс может происходить при любой минимальной температуре, достаточной для того, чтобы прослойка не закристаллизовалась.

Перегруппировка порошинок ведет к уменьшению пористости. Заметная усадка происходит до тех пор, пока частицы могут «скользить» сравнительно свободно. Но вот, наконец, уплотнение затруднено, и в действие вступает второй этап, который обусловлен тем, что различные участки жидкой прослойки, окутывающей частицы порошка, испытывают действие различных сжимающих усилий. Наибольшее усилие сдвливания она испытывает вблизи контакта частиц, где происходит торможение скольжений. Вдали от контакта пленка не испытывает существенных сдвливающих усилий. Там, где пленка сдвлена, вещество порошинок лучше растворяется в веществе жидкой прослойки, чем в тех ее участках, где она не испытывает сжимающих усилий. Следовательно, в сжатых местах вещество порошинок будет растворяться и диффузионно перемещаться вдоль жидкой пленки туда, где сжимающих усилий нет. Это повлечет к изменению формы порошинок, которая позволит облегчить процесс скольжения и, в конечном итоге, усадку. Диффузия в жидкости осуществляется несравнимо быстрее, чем в кристаллическом веществе, и, значит, необходимое для продолжения усадки изменение формы будет происходить достаточно интенсивно.

Итак, жидкая прослойка в процессе спекания играет две роли: среды, которая облегчает необходимость преобразования формы порошинок, и смазки, облегчающей взаимное скольжение частиц.

Механизм спекания с участием жидкой фазы в определенной мере зависит от растворимости жидкой фазы в твердой. В случае, если при температуре спекания обеспечивается полное растворение жидкой фазы в твердой, происходит образование более тугоплавкого, чем жидкая фаза, твердого раствора. При этом жидкая фаза сравнительно быстро исчезает и дальнейшее спекание протекает в твердой фазе.

Примером спекания с исчезновением жидкой фазы может служить спекание магнитно-твердых материалов из смеси порошков железа, никеля и алюминия, при котором легкоплавкий алюминий, взаимодействуя с никелем и железом, образует с ними твердые растворы. Жидкий алюминий исчезает при этом полностью.

Если при температуре спекания обеспечивается лишь частичное растворение жидкой фазы, то последняя сохраняется до конца спекания. Это обстоятельство позволяет получать изделия с наименьшей пористостью.

Если компоненты взаимно нерастворимы, образования твердых растворов не происходит; наблюдается лишь затекание жидкости в поры между частицами порошка. Жидкая фаза в этом случае играет только роль смазки, не способствуя растворению порошинок. Усадка по указанной причине минимальная.

Горячее прессование. Иногда для получения изделий с минимальным количеством пор производят прессование материала (шихты) нагретого до $(0,5 \dots 0,8) T_{пл}$ (рис. 14). Горячее прессование чаще применяют для получения изделий из хрупких металлов и соединений типа карбидов, боридов, силицидов.

Как правило, горячепрессованные изделия обладают более высокими механическими свойствами (пределом прочности, относительным удлинением, поверхностной твердостью), лучшей электропроводностью и более точными размерами.

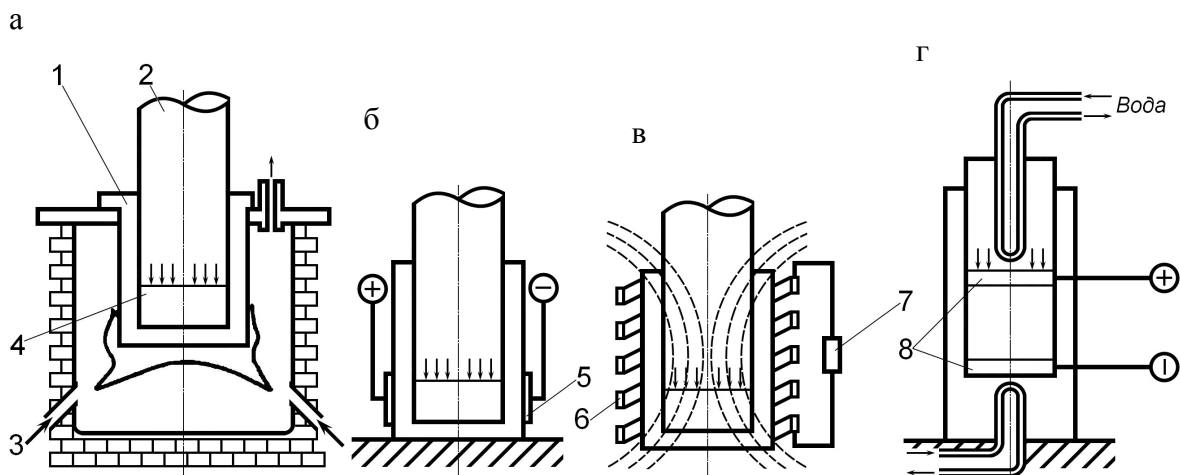


Рис. 14. Основные методы горячего прессования:

а — с пламенным нагревом пресс-формы; б — с электронагревом пресс-формы; в — с высокочастотным нагревом пресс-формы;

г — с электронагревом детали:

1 — матрица; 2 — пуансон; 3 — топливный газ; 4 — формуемая деталь; 5 — нагревательный элемент; 6 — индуктор; 7 — высокочастотный генератор; 8 — электроды

3.6. Практика спекания

Спекание прессовок проводят в печах самой различной конструкции: колокольных, муфельных, конвейерных, вакуумных, печах-ваннах с расплавом солей или металлов. Обязательным условием при спекании является предохранение прессовок от окисления, а также восстановление оксидных пленок, имеющих на поверхности частиц.

В первых трех случаях применяют специальные защитные атмосферы (водород, диссоциированный аммиак, инертные газы — аргон, гелий, азот) или защитные засыпки (например, кварцевый песок, окись алюминия, графитовая крупка, асбестовая мелочь). Чаще всего засыпки применяют

комбинированные, например, окись алюминия с добавкой графитовой крупки, окись алюминия или магния с добавкой хрома, кремния, феррохрома или ферросилиция. Защитные пленки способствуют также более равномерному прогреву спекаемых изделий и предотвращению припекания их друг к другу.

Спекание в расплавленных средах может быть рекомендовано только для беспористых изделий. В этом случае происходит быстрый прогрев, и, как следствие, ускорение процесса спекания. При спекании высокопористых изделий их заключают в графитовые или керамические оболочки.

Очень хорошие результаты дает спекание в вакууме, но оно менее производительно, чем в печах с защитной атмосферой, и требует более сложного оборудования.

3.7. Характерные пороки при спекании

Основные виды брака, обнаруживаемые при спекании: скрытый расслой, коробление и искажение формы, пережог, недопекание, окисление, корочка.

Скрытый расслой — это дефект, образующийся в виде мелких трещин при неправильном режиме прессования. В процессе спекания происходит увеличение размеров этих трещин, и они становятся различимыми невооруженным глазом.

Коробление и искажение формы — чаще всего наблюдается у тонких изделий, шихтой для которых служили тонкие порошки, дающие значительную усадку. Короблению способствует плохое смешивание компонентов шихты, неравномерная плотность прессовок и быстрый подъем температуры при спекании. Этот вид брака может быть исправлен холодной или горячей обработкой давлением.

Пережог — неисправимый брак. Является следствием значительного превышения температуры при спекании. Выражается в растрескивании или оплавлении поверхности изделий.

Недопекание — пониженная прочность и плотность. Можно исправить повторным спеканием.

Окисление — вид брака, связанный с подсосом воздуха при спекании. Если компоненты шихты не образуют трудновосстанавливаемых оксидов, окисление может быть устранено повторным нагревом в восстановительной атмосфере.

Корочка — представляет собой отслоения поверхности. Объясняется разложением органических связок, вводимых в шихту для улучшения прессуемости порошков. Брак неисправимый.

4. СВОЙСТВА СПЕЧЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ И МЕТОДЫ ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Спеченные изделия отличаются от компактных прежде всего наличием пор. Именно пористость в сочетании с особенностями контакта металлических частиц между собой определяет те специфические свойства спеченных изделий, которые будут рассмотрены ниже.

Все свойства спеченных изделий делят на физические, химические, механические.

4.1. Физические свойства

К физическим свойствам относятся плотность, электропроводность, теплопроводность, магнитные свойства.

Плотность (удельная плотность) спеченных изделий простой формы определяют геометрическим измерением объема и взвешиванием. Определение плотности изделий сложной формы производят путем гидростатического взвешивания.

Электропроводность и теплопроводность. Эти характеристики наиболее полно характеризуют электрические и тепловые свойства. Наблюдается прямая пропорциональная зависимость теплопроводности и электропроводности от плотности. Вместе с тем, на электрические свойства оказывает влияние и величина частиц исходного порошка.

На тепловые и электрические свойства спеченных материалов оказывает влияние также температура испытания. С повышением ее происходит снижение теплопроводности и электропроводности.

Магнитные свойства спеченных изделий в значительной мере зависят от пористости. С повышением пористости наблюдается их резкое понижение. При одинаковой пористости основное влияние на магнитные свойства оказывает форма пор. Чем ближе она к сферической, тем выше максимальная магнитная проницаемость.

На магнитные свойства оказывают также влияние наклеп, среда спекания, но, прежде всего, химический состав изделий.

4.2. Химические свойства и защита от коррозии

Сильно развитая поверхность спеченных изделий, обусловленная наличием открытых пор, благоприятствует развитию процесса коррозии.

Химические свойства определяются прежде всего химическим составом спеченных изделий, определение которого производится обычными методами. Изделия из титана, бронзы, нержавеющей стали и других коррозионно-стойких сплавов по своей сопротивляемости коррозии значительно превосходят изделия, изготовленные из железного порошка. Поэтому повышение устойчивости против коррозии изделий из железного порошка является важной задачей, которую решают несколькими методами: 1) повышением плотности и уменьшением пористости изделий; 2) электролитическим покрытием или диффузионным насыщением поверхности коррозионно-стойкими металлами; 3) оксидированием или фосфатированием; 4) пропиткой изделий маслами или пластмассами; 5) окраской поверхности или покрытием эмалями.

При выборе метода повышения коррозионной устойчивости руководствуются свойствами готовых изделий. Так, если необходима определенная пористость, то первый из перечисленных выше способов не может быть рекомендован.

4.3. Механические свойства

В зависимости от назначения, спеченные материалы (как и компактные) могут подвергаться испытанию на растяжение, изгиб, сжатие, твердость и другие механические свойства. Испытания могут производиться при комнатной, повышенных и минусовых температурах. Вместе с тем, имеются некоторые особенности как в самом характере механических свойств, так и в методике их определения.

Механические свойства спеченных материалов главным образом зависят от пористости, величины контактной поверхности и характера контакта между частицами. Следовательно, механические свойства зависят не столько от химического состава, сколько от гранулометрического состава и формы частиц исходного порошка, технологии прессования, спекания, термической обработки. При прочих равных условиях прочностные и пластические характеристики растут с уменьшением пористости.

Для испытания спеченных материалов обычно применяют те же машины и приборы, что и для испытания компактных материалов; существуют и специально разработанные устройства. Образцы изготавливают путем прессования и спекания. Заключительными операциями для получения точных размеров являются калибровка и доводка. Конструкции образцов из спеченных материалов отличаются отсутствием резких переходов по сечению. Нередко применяются образцы, похожие на используемые для испытаний компактных металлов и

сплавов. Так, ударную вязкость определяют на образцах типа Менаже, но без надреза, ибо роль надрезов играют поры.

Особенностью испытания твердости спеченных материалов на приборах Бринеля и Роквелла является применение малых нагрузок. Например, определение твердости твердых сплавов производится на приборе Роквелла с помощью алмазного конуса при нагрузке не 150 кгс, а 60 кгс (шкала А).

4.4. Особенности металлографических исследований

Комплекс механических и физико-химических свойств спеченных материалов зависит во многом от их строения, которое является функцией не только химического состава исходных порошков, но и удельного давления при прессовании, режима спекания и последующей термической обработки.

Для налаживания производственного процесса и его контроля чаще всего пользуются визуальным (или с помощью небольшого увеличения) наблюдением изломов, т. е. макроанализом. При этом по излому определяют размер зерна, раковины, расслоения, судят о равномерности спекания и однородности строения изделий по сечению, о наличии оплавления, окисления и обезуглероживания.

Однако в определенных условиях макроанализ не позволяет получить исчерпывающих ответов. Тогда прибегают к более тонкому методу — изучению микроструктуры. Микроструктура спеченных материалов и изделий, как и микроструктура литых металлов и сплавов, может быть либо однородной, либо представлять собой смесь двух или более фаз. Особенностью микроструктуры может быть наличие спеченных металлических частиц с неметаллическими. Как правило, в структуре наблюдаются поры.

Изучение микроструктуры спеченных материалов осуществляется с помощью световых или электронных микроскопов. Приготовление шлифов для этой цели производят методами, известными из металлографии. Несколько отличается приготовление шлифов из твердых сплавов. Отличие состоит в том, что шлифовка производится на чугунном диске, на который наносят смоченный в керосине порошок карбида бора (т. е. без использования наждачной бумаги). Полировка шлифов из твердых сплавов принципиально не отличается от общепринятой, осуществляется на сукне или фетре алмазной пудрой, разведенной трансформаторным маслом.

Травление микрошлифов для выявления микроструктуры производится обычно теми же реактивами, которые применяются в металлографии литых металлов и сплавов.

Рассмотрим конкретные случаи, когда микроанализ является единственным способом контроля качества спеченных изделий. Свойства изделий нередко зависят от величины, формы и характера расположения

пор, что можно определить только металлографическим путем. Так, мелкие замкнутые округлой формы поры способствуют обеспечению хороших механических свойств. Однако не всегда стремятся получать в спеченных изделиях мелкие поры. Магнитные свойства, например, повышаются в том случае, когда при определенной общей пористости материала количество пор снижается. Таким образом, в данном случае стремятся к получению не мелких, а крупных пор.

В ряде случаев, например, когда имеют дело с изготовлением пористых самосмазывающихся подшипников, стремятся получать не замкнутые, как в предыдущих примерах, а сообщающиеся между собой поры, через которые могла бы проходить смазка. Сообщающимися порами должны обладать также металлические фильтры и «потеющие» материалы.

При производстве высокоуглеродистых спеченных материалов необходимо знать, в каком состоянии в них находится углерод: в твердом растворе, в виде графита или отдельных карбидных фаз, ибо от этого зависят свойства готовых изделий. Например, для антифрикционных материалов недопустимо присутствие углерода в виде карбидов, что привело бы к повышению коэффициента трения. В структуре твердых сплавов, наоборот, не допускается наличие графита.

При металлографическом анализе устанавливаются размер зерна, присутствие различных фаз, характер распределения отдельных структурных составляющих, наличие неметаллических частиц.

Путем металлографического анализа определяется величина контактных поверхностей между частицами порошков, и по этому признаку устанавливается и контролируется режим спекания некоторых видов порошковых материалов.

4.5. Технологические пробы и испытания порошковых материалов

Контроль качества производится путем непосредственного выборочного испытания готовых изделий или специальных образцов и может включать: визуальный осмотр поверхности изделий с целью обнаружения трещин, расслоев, сколов, осыпания граней, несоответствия размеров; определение качества по звуку при ударах деталей друг о друга; механические испытания; специальные виды контроля в зависимости от назначения и свойств изделий. Например, антифрикционные детали проверяют на микроструктуру, плотность и масловпитываемость, фильтры — на проницаемость, магниты — на магнитные свойства.

Пористость. Общая пористость Π спеченных изделий складывается из открытой Π_1 и закрытой Π_2 пористости

$$\Pi = \Pi_1 + \Pi_2. \quad (4.1)$$

Открытая пористость — это объем пор, сообщающихся с поверхностью изделия, а закрытая представляет объем изолированных пор, не имеющих выхода к поверхности (рис. 15).

В свою очередь открытая пористость складывается из сквозных Π_3 и тупиковых Π_4 пор

$$\Pi_1 = \Pi_3 + \Pi_4. \quad (4.2)$$

Таким образом, общая пористость определяется суммой сквозных, тупиковых и закрытых пор (см. рис. 15)

$$\Pi = \Pi_2 + \Pi_3 + \Pi_4. \quad (4.3)$$

Определение пористости имеет большое практическое значение при изготовлении антифрикционных и «потеющих» изделий, а также фильтров. Причем, если для антифрикционных изделий важно знать величину открытой пористости, так как именно эти поры удерживают смазку, то для «потеющих» и фильтров важны только сквозные поры. Во всех случаях закрытые поры нежелательны, так как они не принимают участия ни в фильтрации, ни в удержании смазки, ни в пропускании хладагента, а способствуют лишь ослаблению прочности изделий.

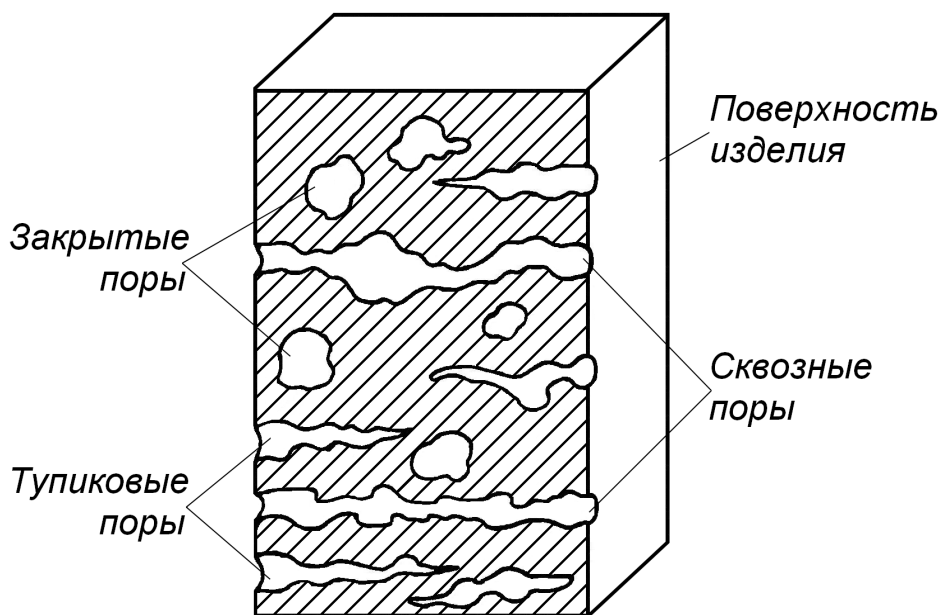


Рис. 15. Сквозные, тупиковые и закрытые поры

При определении пористости изделий первоначально в вакууме удаляют газы, взвешивают на воздухе, а затем их пропитывают жидкостью, после чего производят определение общей, открытой и закрытой пористости.

Общая пористость Π определяется как разность плотности компактного γ_k и пористого γ_n тел, отнесенная к плотности компактного тела:

$$\Pi = \frac{\gamma_k - \gamma_n}{\gamma_k} 100 (\%). \quad (4.4)$$

Выражение (4.4) можно записать так

$$\Pi = \left[1 - \frac{\gamma_n}{\gamma_k} \right] \cdot 100 (\%). \quad (4.5)$$

Если масса образца на воздухе P_1 , а в жидкости P_2 , то разность $P_1 - P_2$ равна массе вытесненной образцом жидкости. Следовательно, объем образца можно вычислить по формуле

$$V = \frac{P_1 - P_2}{\gamma_{ж}}, \quad (4.6)$$

где $\gamma_{ж}$ — плотность жидкости.

Однако таким образом можно определить только объем компактных тел. Для пористых материалов следует обеспечить мероприятия, предотвращающие попадание жидкости в поры. С этой целью образцы пропитывают парафином и снова взвешивают на воздухе P_2 и в жидкости P_3 . Тогда по аналогии с (4.6)

$$V = \frac{P_2 - P_3}{\gamma_{ж}}. \quad (4.7)$$

Плотность пористого образца γ_n определяется по формуле

$$\gamma_n = \frac{P_1}{V} = \frac{P_1 \gamma_{ж}}{P_2 - P_3}. \quad (4.8)$$

Подставив полученное выражение в (4.5), определяем общую пористость

$$\Pi = \left[1 - \frac{P_1 \gamma_{ж}}{(P_2 - P_3) \gamma_k} \right] \cdot 100 (\%). \quad (4.9)$$

Открытая пористость Π_1 определяется как отношение суммарного объема сквозных и тупиковых пор V_1 к общему объему образца V :

$$\Pi_1 = \frac{V_1}{V} \cdot 100 (\%). \quad (4.10)$$

Зная массу образца на воздухе до пропитки P_1 и после пропитки парафином P_2 , а также плотность парафина $\gamma_{\text{пж}}$, можно определить суммарный объем сквозных и тупиковых пор V_1

$$V_1 = \frac{P_2 - P_1}{\gamma_{\text{пж}}}. \quad (4.11)$$

Подставив значения V и V_1 из уравнений (4.7) и (4.11) в уравнение (4.10), получим

$$\Pi_1 = \frac{(P_2 - P_1) \gamma_{\text{ж}}}{(P_2 - P_3) \gamma_{\text{пж}}} \cdot 100 \%. \quad (4.12)$$

Закрытая пористость Π_2 определяется как разность общей и наружной пористости:

$$\Pi_2 = \Pi - \Pi_1.$$

Итак, открытая пористость Π_1 определяется по формуле (4.12). А как определить соотношение сквозных и тупиковых пор? Прямых измерений, оказывается, сделать нельзя. О количестве сквозных пор судят по проницаемости. Проницаемость определяется расходом жидкости или газа ($\text{см}^3/\text{мин}$) через 1 см^2 фильтрующей перегородки толщиной 3 мм при равномерном давлении $1 \cdot 10^{-5}$ Па. Проницаемость возрастает при увеличении пористости, а при одинаковой общей пористости прямо пропорциональна отношению числа сквозных пор к суммарному количеству тупиковых и закрытых пор.

При определении проницаемости пористых тел принимается, что проникновение жидкости или газа происходит в них ламинарно и подчиняется закону Дарси. Согласно этому закону, объем жидкости V , протекающий через пористый образец, определяется по формуле

$$V = \frac{\alpha B}{\eta \cdot l} \frac{P_2^2 - P_1^2}{2P_1} \tau, \quad (4.13)$$

где B — сечение образца; l — толщина образца; η — вязкость жидкости; α — коэффициент проницаемости; P_1 и P_2 — давление жидкости, соответственно, на входе и выходе; τ — время течения жидкости.

В случае, если $P_2 \rightarrow P_1$, а $\tau = 1$, то

$$\alpha = V \cdot \eta \cdot l / (B \Delta P) . \quad (4.14)$$

Таким образом, коэффициент проницаемости зависит от вязкости газа или жидкости и размеров пористого тела.

В некоторых случаях удобнее пользоваться не коэффициентом проницаемости, а коэффициентом фильтрации $\mathcal{E}$, который не зависит от вязкости протекающей среды ($\mathcal{E} = \alpha / \eta$) и характеризует только свойства фильтра.

Масловпитываемость. Контроль масловпитываемости осуществляется на 2 ... 5 втулках (изделиях) от партии.

Различают массовую $M_{\text{масс}}$ и объемную $M_{\text{об}}$ масловпитываемость. Обе характеристики определяют по увеличению массы изделия после пропитки по формулам

$$M_{\text{масс}} = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \cdot 100 (\%) , \quad (4.15)$$

где m_1 — масса изделия до пропитки; m_2 — масса изделия после пропитки маслом;

$$M_{\text{об}} = M_{\text{масс}} / \gamma_{\text{м}} , \quad (4.16)$$

где $\gamma_{\text{м}}$ — плотность масла.

Коэффициент заполнения пор маслом определяют по формуле

$$k = \frac{(m_2 - m_1) \cdot 10^4}{\gamma_{\text{м}} V \Pi} , \% , \quad (4.17)$$

где $m_2 - m_1$ — масса масла в изделии, г; V — объем изделия, см³; Π — общая пористость изделия, %.

Коэффициент заполнения пор маслом должен быть не ниже 75 % для втулок с пористостью 20 % и не ниже 95 % для втулок с пористостью 25 %.

Вывод уравнения (4.17)

$$k = V_{\text{м}} / V_{\text{п}} , \quad (4.18)$$

где $V_{\text{м}}$ — объем масла в изделии,

$$V_{\text{м}} = \frac{m_2 - m_1}{\gamma_{\text{м}}} .$$

$V_{\text{п}}$ — объем пор;

Подставив значения V_m и V_n в уравнение (4.18) и умножив на 10^4 , получим (4.17).

5. ВИДЫ, ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ И СВОЙСТВА СПЕЧЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Спеченные материалы можно условно разделить на пористые, электротехнические, конструкционные, высокотемпературные.

5.1. Пористые материалы

Пористые материалы включают антифрикционные материалы, фильтры, фрикционные материалы.

Антифрикционные материалы. Область применения пористых подшипников – машиностроение, приборостроение, автотракторостроение, сельскохозяйственное машиностроение, угольная, пищевая, фармацевтическая промышленность.

Преимущества пористых подшипников по сравнению с литыми:

- 1) лучшая прирабатываемость;
- 2) самосмазываемость (позволяет отказаться в ряде случаев от подвода масла извне, что очень важно, например, для труднодоступных узлов машин, в случае, когда возможен брак продукции вследствие попадания в нее смазки от масленок);
- 3) меньшая дефицитность материалов для изготовления металлокерамических подшипников (экономия цветных металлов);
- 4) меньшие затраты труда по сравнению с изготовлением изделий из литых материалов;
- 5) высокая эксплуатационная стойкость, превышающая в ряде случаев стойкость подшипников скольжения с вкладышами и втулками из бронзы, баббита, чугуна.

В настоящее время наибольшее применение нашли пористые железные, железографитовые (1...3 % Гр, 97...99 % Fe), бронзографитовые (88...89 % Cu, 9...10 % Sn, 2...4 % Гр) подшипники, а также подшипники на основе алюминия (10 % Cu, 3 % Гр, остальное Al). Свойства подшипников (твердость, прочность, пористость) зависят от условий прессования и спекания (табл. 2).

Разновидностью антифрикционных материалов являются многослойные материалы, основным из которых считается трехслойный материал, состоящий из стальной ленты с медно-никелевым и баббитовым слоями. Этот материал пришел на смену баббитовым вкладышам в

автомобилестроении, так как у баббитовых вкладышей при заливке коренных и шатунных подшипников современных двигателей наблюдалось выкрашивание, объясняющееся появлением усталостных трещин. Трехслойные материалы не обладают отмеченным недостатком, наоборот, обладают повышенными антифрикционными свойствами благодаря содержащемуся в порах маслу (или добавкам графита, действующим аналогичным образом).

Изготовление пористых антифрикционных изделий. Среди пористых антифрикционных материалов главенствующую роль играют железографитовые втулки и подшипники. Технологический процесс их изготовления состоит из следующих операций: смешивания исходных порошков, прессования, спекания, пропитки маслом, калибровки, контроля качества.

В качестве сырья используют железные порошки, как правило, полученные методом восстановления, графит, иногда добавляют электролитическую медь. Введение небольшого количества порошка электролитической меди ($\sim 0,2$ %) благоприятно воздействует на формирование пор, способствует повышению прочности и твердости на 30 ... 60 % за счет образования твердых растворов и цементирования зерен спеченной железной основы, улучшает прирабатываемость подшипников.

Таблица 2

Характеристики механических и эксплуатационных свойств антифрикционных материалов

Материал	Пористость, %	Плотность, т/м ³	Твердость, НВ	Предел прочности на растяжение, МПа	Средняя предельная нагрузка, МПа
Пористое железо	20	6,20	58	140	660
Железографит с 3% графита	23	6,00	40...60	120...190	1100
Бронза ОЦС 6-6-3	—	8,82	60	150	450
Баббит Б-83	—	7,40	30	90	1000

Железный порошок предварительно подвергают восстановительному отжигу для снижения содержания в нем кислорода, присутствие которого особенно вредно при изготовлении высоких и тонкостенных подшипниковых втулок. Графитовый порошок для удаления влаги и летучих

соединений иногда подвергают прокаливанию при температуре 850 ... 1000 °С в защитной атмосфере в течение 1 ... 2 ч.

Железный и графитовый порошки (а в случае добавок меди — и медный) просеивают через сита № 025—018 и в нужных пропорциях засыпают в смеситель.

Качество перемешивания можно повысить, добавив в шихту 2 % (по массе) бензина или машинного масла. Масло не только улучшает перемешивание, снижает потери порошка за счет уменьшения распыления, но позволяет примерно в два раза снизить давление прессования. И все же при автоматическом прессовании с объемной дозировкой от применения масла приходится отказываться, так как существенно ухудшается текучесть. В этих случаях вместо масла в шихту добавляют 0,5 ... 1 % порошкообразного стеарата цинка.

Прессование втулок с определенной пористостью осуществляется в стальных пресс-формах на гидравлических или механических прессах по одной из схем: 1) прессование по удельному давлению; 2) прессование с ограничителем высоты.

В первом случае дозировка производится весовым способом. Применение постоянного давления 300 ... 800 МПа и, как следствие, получение постоянной плотности для одинаковых навесок порошка обеспечивают постоянство высоты изделий.

Во втором случае дозировка осуществляется объемным способом. Давление не измеряется, а постоянство плотности обеспечивается постоянством высоты детали при одинаковых порциях порошка.

Пористость подшипников колеблется в пределах 25 ... 30 %. Прессовки подвергаются контролю на отсутствие трещин, осыпания граней, а также по массе и размерам. Колебания по массе не должны изменять пористость более чем на 1 %. Размеры прессовок должны отличаться от чертежных на величину усадки при спекании и припуска на калибровку.

Спекание пористых железографитовых втулок может производиться в печах любого типа, однако следует иметь в виду, что благодаря большой пористости они могут окисляться не только с поверхности, но и в объеме. Поэтому при спекании обязательно применяют защитные атмосферы или углеродосодержащие засыпки.

Спекание осуществляется при температуре 1050 ... 1150 °С. При более высоких температурах, особенно при повышенном содержании в шихте графита, может произойти науглероживание (т. е. появление структурно-свободного цементита) и оплавление.

Контроль качества спеченных железографитовых и железомедьграфитовых изделий производится по микроструктуре, плотности, твердости и масловпитываемости.

Равномерность распределения и величину пор контролируют на нетравленном шлифе. Микроструктура железографитовых изделий должна

представлять перлитную основу с включениями графита, пор и феррита. Железомедьграфитовые изделия в структуре имеют еще и медь. Содержание структурно-свободного феррита во избежание снижения износоустойчивости не должно превышать 10 ... 15 %. В ряде случаев для повышения эксплуатационных свойств пористых изделий после спекания производится сульфидирование или оксидирование.

Заключительными операциями технологического процесса являются пропитка втулок маслом и калибровка.

Пропитка маслом осуществляется в масляной ванне при температуре 110 ... 120 °С (2 ч) с последующим охлаждением в холодном масле либо в вакууме. Второй способ позволяет не только увеличить содержание масла в изделиях на 25 ... 27 % по сравнению с обычным методом, но и сократить продолжительность операции в 8 ... 10 раз.

Калибровка обеспечивает получение деталей высокой точности размеров (7 квалитет) и шероховатости поверхности (Ra не более 1,25), способствует улучшению физико-механических свойств вследствие упрочнения материала.

Металлокерамические фильтры. Фильтры необходимы в медицине, в установках для очистки воды, улавливания пыли, при очистке топлива, в измерительной технике, для тонкой очистки жидкометаллических и газообразных теплоносителей, масел гидросистем высокого давления, для ионизации металлических паров в ионных ракетных двигателях. Это далеко не полный перечень областей применения фильтров.

Все применяемые в различных отраслях промышленности фильтрующие приспособления — гравийные, щелевые фильтры, циклоны, электрофильтры, фильтры из керамики и тканей — сложны в изготовлении и эксплуатации, но не обеспечивают достаточно хорошей фильтрации. В отличие от названных, металлокерамические фильтры обладают высокой проницаемостью и высокой степенью очистки. Они прочны, пластичны, устойчивы против резкого повышения температуры. Металлокерамические фильтры лучше задерживают мелкие твердые частицы, чем фильтровальная ткань, исключается засорение отфильтрованной жидкости или газа материалом фильтра. Важным достоинством металлокерамических фильтров является также возможность их регенерации, т. е. обработки определенным образом (продувки, промывки, вибрирования и т. п.) с целью очистки и восстановления прежних свойств, и, как следствие, самый продолжительный срок службы.

Пористые металлокерамические фильтры изготавливают преимущественно из порошков коррозионно-стойких материалов, главным образом бронзы (92 % Cu, 8 % Sn), нержавеющей стали, а также никеля, серебра, латуни и др. В последнее время увеличивается выпуск пористых фильтров на основе жаропрочных никелевых сплавов, а также титана, вольфрама, молибдена и тугоплавких соединений.

Эффективность фильтрации, которая определяется совокупностью двух противоположных свойств — проницаемостью и степенью очистки, выше у фильтров, изготовленных из порошков сферической формы. Поэтому для изготовления фильтров используют либо готовые порошки с формой частиц, близкой к сферической (полученные карбонильным методом или методом распыления), либо производят сфероидизацию порошков, например, путем их оплавления в специальных засыпках. Существенное значение придается получению гладкой поверхности частиц. Порошки с шероховатой поверхностью (например, полученные методом центробежного распыления) подвергают кратковременному размолу в вихревых мельницах, во время которого происходит их окатывание.

Металлические фильтры, как правило, изготавливаются по одному из двух основных методов: 1) прессование или прокатка металлических порошков с последующим спеканием; 2) спекание свободно насыпанного порошка (без прессования).

При изготовлении фильтров по первому методу для обеспечения необходимой пористости и предотвращения закрытия пор в шихту вводят наполнитель. Прессование осуществляется при умеренных давлениях, составляющих 50 ... 200 МПа. Более высокое давление прессования приводит к уменьшению пористости.

Пористость не должна снижаться и при спекании. Поэтому спекание целесообразно проводить в две стадии. На первой — низкотемпературной — происходит разложение и улетучивание наполнителя, создаются небольшие и еще непрочные контакты между частицами. Вторая — высокотемпературная стадия — обеспечивает более интенсивный процесс спекания и создание прочных контактов.

Таким путем обычно изготавливают фильтры с тонкими порами, характеризующиеся умеренной проницаемостью, например, для улавливания твердых частиц размером менее 5 ... 6 мкм при очистке дизельного топлива.

Второй метод применяется, когда к степени очистки не предъявляется высоких требований, но необходима большая пропускная способность, фильтры изготавливают из сравнительно крупных частиц размером 0,2 ... 0,8 мкм. Порошок засыпается в формы, а для лучшего заполнения пустот подвергается утряске. Заключительной операцией является спекание.

Пористые фильтры изготавливают в виде чашечек, цилиндров, втулок, труб, пустотелых конусов, свеч, дисков, плит; они могут иметь самые различные размеры от дисков диаметром 1,5 мм до труб диаметром 300 мм и плит размером 450×1200 мм.

Пористые материалы специального назначения. К таким материалам относятся «потеющие», битуминированное пористое железо, пористые снарядные пояски, пористые электроды.

«Потеющие» — это высокопористые материалы (пористость свыше 50 %), которые, главным образом, используют в авиации для борьбы с обледенением крыльев самолетов. Специальные детали, изготовленные из порошков меди и никеля (в ряде случаев с добавлением олова), устанавливаются в местах наиболее интенсивного обледенения самолета. По системе трубопроводов к этим деталям подается незамерзающая жидкость (антифриз), которая заполняет поры. Под действием воздушного потока она испаряется (выпотевает) и таким образом препятствует осаждению льда на кромке крыла самолета.

Второе назначение «потеющих» материалов — охлаждение нагреваемых во время работы деталей машин и агрегатов. Принцип охлаждения состоит в том, что с помощью пористого материала к нагретой детали подводится газ или жидкость, которые, улетучиваясь, производят охлаждение близлежащего пространства. Этот метод используется для охлаждения различных деталей газовых турбин, реактивных двигателей, двигателей внутреннего сгорания и другого специального оборудования. Известны примеры изготовления пористых турбинных лопаток из порошков нержавеющей аустенитных сталей, охлаждаемых сжатым воздухом, что позволяет снизить их температуру до 600 °С. Снижение же рабочей температуры металла позволяет повысить предел его длительной прочности, увеличить срок службы и надежность ответственного узла или машины.

Битуминированное пористое железо (зинтерит) применяют для зачеканки стыков трубопроводов. Зинтерит получают из грубых железных порошков без предварительного прессования спеканием при 1200 ... 1350 °С с последующей пропиткой битумами для повышения коррозионной устойчивости. Обычно битуминированное железо изготавливают в виде ленты.

Во время Великой Отечественной войны была решена проблема замены ведущих снарядных поясков из дефицитной литой или штампованной меди более дешевыми из пористого порошкового железа. Достоинством металлокерамических железных поясков является то, что они в порах удерживают смазку. Указанное обстоятельство в сочетании с хорошей деформируемостью пористого железа и сравнительно невысокой твердостью способствует меньшему износу нарезки ствола и увеличению срока службы орудий.

В железоникелевых аккумуляторах, изготовленных обычным способом, активная железная масса заключается в ламели из перфорированной жести, что существенно усложняет технологический процесс их производства. Более простыми в изготовлении и обладающими меньшими размерами являются спеченные электроды. Кроме простоты изготовления, порошковые электроды обладают более развитой поверхностью, что обеспечивает устойчивое снижение величины перенапряжения во время работы аккумулятора. Порошковые

аккумуляторные пластины (электроды) изготавливают напрессовкой активной никелевой массы на железную сетку. В настоящее время ведутся работы по освоению более производительного метода изготовления электродов — метода прокатки.

Фрикционные материалы. Повышение производительности станков, машин и агрегатов неразрывно связано с увеличением скоростей и нагрузок на отдельные их узлы и детали. Поэтому и тормозные устройства должны испытывать все возрастающие нагрузки. Основным показателем пригодности материала для работы в тормозных устройствах является коэффициент трения.

В промышленности в качестве фрикционных применяются как металлические, так и неметаллические материалы.

Среди металлических наибольшее применение нашли чугун, сталь, бронза. Однако для тяжелых условий работы, характеризующихся разогревом трущейся пары до 1000 ... 1200 °С, они не пригодны вследствие схватывания, сваривания и заедания. Под схватыванием понимают образование связей между трущимися парами, в результате чего может произойти наволакивание материала одного элемента фрикционной пары на другой, приваривание частиц и образование грубых задиров, что приводит к заеданию узла, значительному износу поверхности трущихся пар.

Неметаллические фрикционные материалы, имеют, как правило, асбестовую основу, пропитанную маслом, битумом, бакелитом или каучуком. Эти материалы также имеют существенный недостаток, который в основном связан с малой теплопроводностью асбеста. Материалы на асбестовой основе по указанной причине быстро нагреваются; при температуре более 330 °С начинается обугливание органических веществ, входящих в состав фрикционного материала, испарение влаги. Все это снижает коэффициент трения, способствует ускоренному износу, продукты горения создают задымленность.

Указанное выше свидетельствует о том, что нужны другие материалы, которые сочетали бы в себе преимущества металлических и неметаллических материалов.

Такие материалы, обладающие высоким и стабильным коэффициентом трения, высокой прирабатываемостью и теплопроводностью, у которых практически отсутствует заедание и свариваемость при высоких температурах, позволил создать метод порошковой металлургии.

Вещества, входящие в состав фрикционных спеченных материалов, условно можно разделить на три категории: а) металлы, составляющие основу; б) вещества, способствующие повышению коэффициента трения; в) вещества, играющие роль смазки и уменьшающие склонность к задиру и налипанию.

В качестве основы обычно применяют медь, бронзу или железо. Металлическая основа наряду с высокими прочностными свойствами

обеспечивает фрикционному материалу и высокую теплопроводность. Медь или бронза применяются для создания фрикционных материалов, работающих в условиях обильной смазки и разогрева не выше 400 °С. Железную основу сообщают материалам, предназначенным для более тяжелых условий работы, которые прежде всего характеризуются сухим трением и кратковременным разогревом трущихся частей до 1100 ... 1200 °С.

Для повышения коэффициента трения вводятся различные абразивные вещества, такие, как асбест, кварцевый песок, оксиды хрома и железа, нитрид бора, карбиды титана, кремния, вольфрама. При определении допустимого количества этих веществ учитывают, что с повышением их содержания усиливается износ сопряженной пары.

Наибольшее применение получил асбест, который обычно вводится в шихту в виде порошка. Содержание его колеблется от 2 до 10 %. Особенно усиливается действие асбеста, когда вместе с ним добавляется кварцевый песок (окись кремния). Окись кремния, кроме повышения коэффициента трения, способствует стабилизации фрикционных свойств при высоких температурах, повышает износостойкость, сопротивление заеданию. Кварцевый песок вводится в таком же количестве, как и асбест.

К веществам, играющим роль смазки и предохраняющим фрикционные материалы от разрушения, относят свинец, висмут, графит, сульфиды молибдена, железа, меди, серноокисные соли бария и железа.

Графит присутствует во всех фрикционных порошковых материалах. Оптимальное его содержание в изделиях на железной основе — 7 ... 9 %. Благоприятное влияние графита наблюдается лишь в том случае, если при спекании обеспечивается взаимодействие его с металлом матрицы. Например, при спекании материалов на железной основе стремятся к образованию перлитной структуры, которая обеспечивает наилучшую износоустойчивость, тогда как присутствие мягкого структурно-свободного феррита обуславливает схватывание и налипание его на контртело.

Свинец, висмут и олово служат для поглощения тепла при резком возрастании температуры. Отличаясь легкоплавкостью, они образуют жидкую пленку на трущихся поверхностях, предотвращая таким образом схватывание и заедание, улучшая прирабатываемость.

Серноокисный барий (барит) образует на поверхности противозадирную пленку, предотвращающую схватывание, способствует повышению коэффициента трения. Оптимальное содержание $BaSO_4$ в фрикционных материалах составляет 6 ... 8 %.

Технология изготовления фрикционных материалов включает основные этапы производства порошковых изделий: приготовление и смешивание порошковой шихты, прессование и спекание. Однако вследствие того, что неметаллические составляющие не растворяются в металлической основе и поэтому существенно снижают прочностные

свойства фрикционных изделий, их обычно выпускают в виде биметаллических элементов, состоящих из фрикционного слоя на стальной основе.

Для соединения фрикционного слоя со стальной основой применяют обычно один из следующих методов: напрессовку фрикционного слоя на стальную основу; прессование фрикционного слоя с последующим соединением с основой путем спекания под давлением; одновременное прессование фрикционного слоя и основы, состоящей из металлических порошков.

Выбор метода определяется размерами изделий. Для малогабаритных изделий, когда упругое последствие невелико, фрикционный слой напрессовывают на стальную основу. Сила сцепления увеличивается, если стальная основа имеет грубообработанную поверхность. В случае изготовления крупногабаритных изделий, упругое последствие играет более значительную роль, вызывая сдвиг фрикционного слоя по стальной основе. Поэтому в рассматриваемом случае целесообразно произвести отдельно прессование фрикционного слоя и соединение его с основой путем спекания под давлением. Для обеспечения надлежащей прочности соединения стальную основу подвергают либо восстановительному отжигу при 900 ... 1000 °С, во время которого удаляются поверхностные оксиды, либо травлению с последующим никелированием. Иногда с этой целью на стальную основу наносится промежуточный слой из железного порошка толщиной 0,1 ... 0,2 мм.

Из материалов на медной основе изготавливают элементы (диски, сегменты) для электромагнитных муфт сцепления, работающих в условиях сухого трения, но не испытывающих слишком больших нагрузок. Из этих же материалов изготавливают диски сцепления и тормозные ленты автомобилей, предназначенные для работы со смазкой. Наибольшее применение находит фрикционный материал марки МП-11, в состав которого входит 11 % железа, 10 % олова, 9 % асбеста, 8 % пульвербакелита, 5 % свинца, 4 % графита. Коэффициент трения при работе в условиях сухого трения (без смазки) составляет 0,3, а в условиях жидкостного трения 0,10 ... 0,13.

Материалы ФАБ-1 и ФАБ-Д изготавливают на основе алюминиевой бронзы. Они обладают хорошими фрикционными свойствами и выгодно отличаются от аналогичных материалов на основе оловянной бронзы тем, что они в 1,5 ... 2 раза дешевле.

Среди материалов на железной основе, отличающихся от рассмотренных выше более высоким коэффициентом трения, меньшим износом в условиях тяжелого нагружения при высоких скоростях и меньшей стоимостью, наибольшее применение получил ФМК-11 (14 ... 16 % меди; 6,5 ... 8 % графита; 4 ... 6 % барита; 2 ... 3,5 % асбеста; 2 ... 3,5 % оксида кремния). Этот материал даже при температуре 1000 ... 1100 °С обладает

коэффициентом трения 0,25, хорошо и быстро прирабатывается, находит применение для изготовления фрикционных элементов муфт для сухого сцепления и трения, тормозных накладок тракторов, автомобилей, дорожных машин, самолетов, экскаваторов.

5.2. Электротехнические материалы

Электротехнические материалы включают в себя контактные и магнитные (магнитно-мягкие, магнитно-твердые, магнитодиэлектрики) материалы.

Контактные материалы являются важнейшими из электротехнических материалов. Они должны обладать комплексом свойств: высокими электро- и теплопроводностью, высокой электроэрозионной устойчивостью, достаточной прочностью, незначительной склонностью к свариваемости и прилипанию, высокой тугоплавкостью и хорошей прирабатываемостью. Для удовлетворения этих требований контактные материалы изготавливаются в виде псевдосплавов высокоэлектропроводных металлов (серебро, медь) с металлами, обладающими высокой прочностью (вольфрам, молибден).

Методом порошковой металлургии изготавливают разрывные контакты, контактные кольца, щетки электромашин из медно-графитовых материалов. Применение в последних 2 ... 5 % графита позволяет уменьшить налипание и приваривание изделий во время работы, снизить коэффициент трения. Состав, свойства и применение металлокерамических контактов представлены в табл. 3.

Изготовление металлокерамических контактов осуществляется тремя основными методами: 1) прессованием заготовок с последующим их спеканием и допрессовкой; 2) прессованием и спеканием заготовок в виде брусков с последующей прокаткой в прутки, из которых изготавливают контакты (резанием или штамповкой); 3) прессованием пористой заготовки из тугоплавкого металла с последующей ее пропиткой более легкоплавким компонентом.

Наибольшее распространение в России получил метод, по которому все порошкообразные компоненты смешиваются в требуемых пропорциях, после чего производится прессование шихты в стальных пресс-формах при давлении 30 ... 50 МПа (серебряно-вольфрамовые и медно-вольфрамовые контакты при давлении более 1500 МПа). Спекание прессовок производится в защитной атмосфере. Температура спекания выбирается в зависимости от состава материала. Например, контакты Ag—Ni и Ag—CuO спекают при 900 ... 950 °C, Ag—Ni — при 1000 °C, Cu—W — при 1100 °C. Длительность спекания составляет обычно 3 ... 4 часа. В заключение для повышения плотности заготовки подвергаются повторному прессованию (допрессовке) и отжигу.

Второй метод состоит в том, что сначала изготавливают брикеты, которые затем подвергают прокатке для получения пруткового материала. При этом получают волокнистую структуру, позволяющую существенно улучшить контактные свойства. При последующей штамповке обеспечивается ориентация волокон таким образом, чтобы они были направлены перпендикулярно к рабочей поверхности контактов.

Третий метод заключается в том, что из порошка тугоплавкого металла (вольфрама, молибдена) прессуют пористую заготовку, а затем пропитывают ее относительно легкоплавким компонентом, обычно медью или серебром. Таким образом изготавливают контакты типа W—Ag, Mo—Ag, W—Cu. Пропитку медью производят при 1200 °С, а серебром — при

Таблица 3

Свойства, состав и области применения металлокерамических контактов

Тип контакта	Химический состав, %	Удельное электро-сопротивление, Ом·мм ² /м (не более)	Твердость по Бринеллю, НВ (не менее)	Плотность кг/м ³ ·10 ⁻³ (не менее)	Области применения
CB50	50Ag	0,027	100	13,1	Высоковольтные выключатели, магнитные пускатели, стартеры двигателей внутреннего сгорания, электронные и тепловые реле
	4,5W 2,5Ni	0,035	140	14,5	
CB70	30Ag 66,5W 3,5Ni				
CG3	97Ag 3C	0,024	27	8,7	Воздушные выключатели, реле сигнализации железных дорог, аппараты управления лифтом, переключатели радиоприемников
CG5	95Ag 5C	0,030	22	7,9	
CH29Г3	68Ag 29Ni 3C	0,030	45	8,7	
CH30	70Ag 30Ni	0,025	55	9,5	Контакты, магнитные пускатели, реле особо тяжелого режима, реле цепей сигнализации и автоматики, вибропреобразователи, высоковольтные выключатели небольшой мощности
CH40	60Ag 40Ni	0,032	60	9,3	
CK22H1	76,5Ag 22Cd 0,5Fe	0,060	60	9,5	Регуляторы напряжения, воздушные выключатели легкого и тяжелого

СМО60	40Ag 60Mo	0,027	120	10,0	режимов, контакторы, выключатели бытовых приборов, реле вибропреобразователей
СОК15	85Ag 15CdO	0,030	50	9,2	Стартеры двигателей внутреннего сгорания,
СОМ10	90Ag 10CuO	0,025	50	9,2	магнитные преобразователи, реле среднего и тяжелого режимов
МВ50	50Cu 47,5W 2,5Ni	0,040	140	12,0	Металлургические контакторы аппаратов стыковой сварки, мощные
МВ70	30Cu 67W 3Ni	0,050	180	14,0	масляные и воздушные выключатели
МГ3	97Cu 3C	0,035	24	6,8	Селективные автоматы, ручные выключатели
МГ5	95Cu 5C	0,047	15	6,0	

1100 °С. Пропитка может осуществляться погружением в ванну с расплавом металла и в электрических печах с применением защитной атмосферы. Во втором случае пропитка осуществляется путем расплавления кусочков меди, серебра или их сплавов (определенной формы и массы), устанавливаемых на пористых заготовках из тугоплавких металлов. Легкоплавкий металл плавится и впитывается в поры. Метод пропитки имеет существенные преимущества при изготовлении сложных по форме контактов.

В последние годы получили широкое распространение контакты, отличающиеся мелкодисперсной структурой (размер частиц не превышает 1 мкм, тогда как обычно размер частиц составляет 200 ... 300 мкм), которая позволяет в несколько раз увеличить износостойкость. Промышленностью в настоящее время выпускаются контакты с мелкодисперсной структурой систем серебро — никель, серебро — окись меди, серебро — никель — графит, серебро — графит, серебро — вольфрам.

Принципиальная схема производства таких контактов аналогична рассмотренным выше, однако имеются некоторые особенности:

- 1) для гарантирования хорошего качества структуры смешивание производят не механическим, а химическим способом (мокрое смешивание);
- 2) применяют более низкие температуры спекания (примерно на 100 °С ниже), так как порошки обладают большой удельной поверхностью;
- 3) для повышения текучести и стабилизации насыпной плотности порошки подвергаются грануляции до размера гранул порядка 200 ... 300 мкм.

Магнитные материалы. К ним относятся магнитно-мягкие, магнитно-твердые и магнитодиэлектрики.

Магнитно-мягкие материалы характеризуются высокой начальной и максимальной проницаемостью μ , малой коэрцитивной силой ($H_c < 2\mathcal{E}$) и малыми потерями на перемагничивание.

Применение порошковых магнитно-мягких материалов желательно потому, что магнитные свойства и их равномерность существенно зависят от точности состава, а метод порошковой металлургии это обеспечивает в большей мере, чем метод плавления и литья. Однако есть и недостатки — магнитные свойства сильно зависят от дефектов кристаллического строения и от однородности материала, высокая стоимость исходных порошков.

Металлокерамическим путем изготавливают магнитопроводы, сердечники и роторы электромашин, полюсные наконечники постоянных магнитов, детали реле, электромагнитных измерительных приборов.

В качестве магнитно-мягких металлокерамических материалов применяются чистое железо, сплавы железа с никелем типа пермаллой, железа с кремнием и алюминием типа альсифера.

Материалы на железной основе отличаются низким электросопротивлением, большими потерями на гистерезис и вихревые токи. Поэтому они применяются только для установок и приборов, работающих на постоянном токе.

Электросопротивление можно повысить введением кремния. В устройствах переменного тока иногда применяются железокремнистые материалы, содержащие ~ 4 % Si, однако они уступают электротехническим сталям. Дальнейшее повышение электросопротивления и магнитных свойств достигается введением в железокремнистые сплавы алюминия и бора. Такие материалы применяют для работы в переменных магнитных полях.

Изделия с максимальной магнитной проницаемостью изготавливают из сплавов типа пермаллой, порошки для которых получают карбонильным или электролитическим методом. Для дальнейшего повышения магнитных свойств в эти сплавы добавляют молибден и медь. Например, сплав, состоящий из 77 % Ni, 4 % Mo, 5 % Cu, 14 % Fe, позволяет получать начальную магнитную проницаемость не ниже 25 000 Гс/Э, тогда как μ_0 для нелегированного пермаллой составляет 10 000 Гс/Э.

Изготовление магнитно-мягких материалов из железных и железоникелевых порошков производится по обычной технологии с применением прокатки или прессования. В случае, когда порошки плохо прессуются, применяют пластифицирующие добавки. Так, в железоалюминиевые порошки вводят до 1 % пластмассы (дурофен). Давление прессования составляет 800 МПа. Спекание производят в водороде в две стадии: при 1050 ... 1150 °С — 0,5 ч, при 1150 ... 1200 °С — 24 ч. Пластмасса при этом выгорает. Для повышения плотности изделий обеспечивают их спекание с участием жидкой фазы, для чего добавляют

фосфор, создавая таким образом легкоплавкое соединение. В итоге получаются изделия высокой плотности $\sim 6,5 \text{ г/см}^3$ пористостью 12 ... 13 %.

В последнее время для работы при высоких частотах (порядка 10 кГц) начали применять магнитопроводы и сердечники, которые изготавливают из материалов, имеющих чешуйчато-слоистую структуру, характеризующуюся низкими потерями на вихревые токи. Изготовление чешуек (толщиной около 25 мкм) производят путем холодной прокатки порошков железа и некоторых железных сплавов. После прокатки для повышения магнитных свойств чешуйки подвергают отжигу в атмосфере сухого водорода при температуре 950 ... 1000 °С. В качестве связующего применяют различные вещества, например, тетраэтилсиликат. Для изоляции чешуек друг от друга их подвергают оксидированию, фосфатированию, силицированию или при составлении шихты вводят слюду.

В процессе прессования наиболее важной операцией является заполнение чешуйками пресс-формы, так как расположение чешуек должно производиться с учетом обеспечения минимума размагничивающего фактора. Этого достигают укладкой чешуек в направлении, перпендикулярном к направлению давления прессования. Наиболее эффективной является свободная насыпка чешуйчатого порошка в пресс-форму.

Ферриты. Это класс магнитных материалов, состоящих из оксидов железа и других металлов (например, оксидов бария, марганца, цинка, никеля, кадмия).

Ферриты — ферромагнитные материалы. Исключение составляют лишь ферриты цинка и кадмия. Благодаря тому, что ферриты между собой образуют обширную область твердых растворов, удается получать материалы с очень широким диапазоном свойств от магнитно-твердых до магнитно-мягких. Характерной особенностью ферритов является их высокое электросопротивление в пределах $10 \dots 10^7 \text{ Ом/см}$ (у металлов оно не более 10^{-4} Ом/см). Ферриты обладают большими твердостью и хрупкостью.

Ферриты нашли широкое применение в запоминающих и вычислительных устройствах, системах магнитной записи, в телевизорах и радиоприемниках.

Технологический процесс изготовления ферритов заключается в следующем: составленная шихта подвергается измельчению и смешиванию мокрым способом в шаровых мельницах (10 ... 20 ч), после чего полученный материал помещают в термостат для удаления избытка влаги.

Чтобы достигнуть более полной гомогенизации, улучшить магнитные свойства, уменьшить усадки при окончательном спекании, шихту подвергают брикетированию и обжигу в воздушной среде при температуре 900 ... 1100 °С в течение 4 ... 5 ч.

После обжига брикеты измельчают в порошок в вибромельницах сухим способом. Качество помола и размер частиц ферритов оказывают очень большое влияние на магнитные свойства изделий, которые улучшаются с увеличением степени дисперсности частиц. Однако чрезмерное измельчение приводит к ухудшению прессуемости и к снижению качества готовых изделий. В заключение шихту протирают через сито с отверстием 60 мкм, смачивают пластификатором (10%-й раствор поливинилового спирта) в соотношении шихта : спирт — 10:1 и прессуют при давлении 50 ... 250 МПа.

Процесс спекания для сохранения определенной окисленности компонентов ферритов осуществляют в воздушной среде, иногда в вакууме или инертных газах. Спекание производят при температуре 1100 ... 1400 °С в течение 1 ... 3 ч. В некоторых случаях для обеспечения определенной направленности доменной структуры применяют магнитное поле.

Нередко спеченные изделия подвергают механической обработке (отделке, сверлению и т. п.), пропитке синтетическими смолами, склеиванию или обработке для придания им водонепроницаемости. После каждой операции их проверяют по магнитным и электрическим свойствам, размерам, прочности.

Магнитно-твердые материалы. Это материалы, обладающие большой коэрцитивной силой, высокой остаточной магнитной индукцией и малой магнитной проницаемостью.

Высокое значение коэрцитивной силы может быть получено у материалов с неравновесной гетерогенной структурой, имеющей существенные искажения кристаллической решетки.

Известно два метода получения гетерогенной структуры: 1) термической обработкой (этот способ применим лишь в случае, когда компоненты обладают неограниченной растворимостью при температуре спекания); 2) спеканием порошковых смесей, не образующих твердых растворов.

Метод порошковой металлургии по ряду причин является более перспективным, чем метод литья. Во-первых, магнитная обработка для литых деталей возможна только по первому варианту. Во-вторых, методом литья затруднительно изготовление мелких магнитов массой до 200 г, особенно сложной формы. Выход годной продукции при литье мелких деталей составляет 10 ... 20 %, а методом порошковой металлургии — 95 ... 98 %.

Все магнитно-твердые сплавы можно разделить на следующие группы: 1) недеформируемые, отличающиеся высокой твердостью и хрупкостью и не поддающиеся обработке резанием; 2) деформируемые, обладающие невысокой твердостью, обработка которых может производиться как путем прессования, так и путем прокатки с последующим

спеканием и механической обработкой; 3) магниты из тонких порошков; 4) магниты состава РЗМ — Со; 5) оксидные.

Среди металлокерамических магнитно-твердых сплавов наибольшее значение имеют железоникельалюминиевые недеформируемые сплавы типа Альни, содержащие 5 ... 15 % Al и 15 ... 35 % Ni. Для повышения магнитных свойств в эти сплавы дополнительно вводят кобальт, медь, титан, цирконий, ниобий, бор, фосфор, церий. Особенно благоприятное влияние оказывает легирование кобальтом. Сплавы с содержанием кобальта 3 ... 15 % носят название «Альнико», с более высоким — «Магнико». Основные этапы изготовления этих сплавов — подготовка порошковых материалов, прессование и спекание. После спекания магниты из сплавов Альни подвергают закалке, из сплавов Альнико — закалке и отпуску, а из сплавов Магнико — закалке в магнитном поле и отпуску. Наложение магнитного поля способствует повороту ферромагнитных частиц в определенном кристаллографическом направлении и, как следствие, повышению магнитных свойств.

Деформируемые сплавы типа Кунифе изготавливают двух модификаций: в изотропном и анизотропном состояниях. Наиболее высокие магнитные свойства достигаются в направлении прокатки. Именно это обстоятельство положено в основу получения анизотропных магнитно-твердых материалов, которые получают прокаткой закаленной порошковой заготовки с промежуточным отжигом. Изготовление магнитов производится штамповкой.

Максимальной магнитной энергией обладают кобальто-платиновые сплавы, но по экономическим соображениям из них изготавливают только магниты массой в несколько миллиграммов для особо точных приборов.

Сравнительно недавно началось производство магнитно-твердых материалов из тонких порошков. Разработка таких материалов основана на том, что с уменьшением размеров частиц происходит увеличение коэрцитивной силы. Однако имеется определенная граница, когда на магнитные свойства начинает действовать расстояние между частицами. При определенном удалении частиц обнаруживается размагничивающее действие и связанное с этим уменьшение коэрцитивной силы. Наиболее высокие магнитные свойства получают при использовании тонкодисперсных порошков железа и кобальта с величиной частиц, близкой к критической 0,02 ... 0,03 мкм, и магнитных материалов из висмута марганца.

Тонкодисперсные порошки получают восстановлением муравьинокислых солей железа и кобальта. Приготовленную шихту прессуют и пропитывают бакелитовым лаком. Свойства таких магнитов близки к свойствам магнитов из сплавов Альни и Альнико. Большим достоинством является возможность получения указанных магнитов любой формы с большой точностью, однако они обладают повышенной хрупкостью и

низкой коррозионной стойкостью. Магниты из тонкодисперсных порошков применяются в малогабаритных приборах и устройствах.

Технология изготовления оксидных магнитов изложена выше (см. «ферриты»). Кроме бариевого, применяют стронциевые и кобальтовые ферриты. Недостатком магнитов из бариевого и стронциевого ферритов является высокий температурный коэффициент их магнитных свойств. Свойства кобальтовых ферритов ниже, чем бариевых и стронциевых. Кроме перечисленных в табл. 5.4, имеются сведения о применении в качестве магнитно-твердых материалов сплавов РЗМ (Y, Sm, Nd, Pr) — Co. Их изготавливают расплавлением в дуговой печи с применением защитной атмосферы. Благодаря высокой хрупкости, они хорошо измельчаются в порошок в вибромельницах. Полученные порошки смешиваются с органическим связующим веществом. Прессование производят в магнитном поле. Наилучшие результаты дает метод гидростатического прессования.

Магнитодиэлектрики представляют собой смесь ферромагнитных порошков со связующими — изоляторами. Магнитодиэлектрики характеризуются постоянством магнитной проницаемости, большим удельным электросопротивлением, низкими потерями на вихревые токи и на гистерезис. Используются эти материалы в электро- и радиотехнических устройствах для сердечников катушек индуктивности и высокочастотных трансформаторов, для лент звукозаписи.

Свойства магнитодиэлектриков зависят от свойств исходных материалов. Магнитодиэлектрики могут быть магнитно-мягкими и магнитно-твердыми. В качестве исходных материалов для магнитодиэлектриков используются порошки электролитического или карбонильного железа, легированного или нелегированного пермаллоя, железокремнийалюминиевых, железоникелькобальтовых сплавов, ферритов и других ферромагнетиков. Наиболее распространенными связующими (диэлектриками) являются жидкое стекло, бакелит, шеллак, полистирол, эпоксидные, полиэфирные и другие смолы. Диэлектрик должен хорошо покрывать частицы ферромагнетика и образовывать на них сплошную изолирующую пленку достаточной твердости, прочности и эластичности, чтобы предохранять изделия от разрушения при деформации. В настоящее время имеется ряд специализированных магнитодиэлектриков с проницаемостью в пределах 4 ... 200 Гс/Э, обслуживающих весь диапазон частот, применяемых в технике связи, вплоть до ультразвуковых волн.

5.3. Конструкционные материалы

Первоначально метод порошковой металлургии применялся только для изготовления изделий, которые невозможно получить традиционными методами литья и механической обработки, например, твердые сплавы,

медно-графитовые щетки, пористые материалы. При этом считалось, что методом порошковой металлургии невозможно получить беспористые изделия с механическими свойствами, не уступающими деталям, полученным обычным способом.

Однако совершенствовалась технология порошкового производства. Начали применять многократное прессование, чередующееся со спеканием, методы горячего динамического прессования, освоили термическую и химико-термическую обработку спеченных изделий. Все это позволяет получать металлокерамические изделия, обладающие достаточной прочностью, пластичностью, твердостью с незначительным количеством остаточных пор, т.е. изделия с такими же свойствами, как из литых металлов.

При изготовлении конструкционных деталей металлокерамическим методом обеспечивается не только получение изделий заданной формы и размеров, но и уменьшение расхода основных материалов, сокращение до минимума дополнительной механической обработки, возможность механизации и автоматизации производственных процессов и снижение трудоемкости изготовления. Несмотря на существенные преимущества, вопрос об изготовлении деталей машин и приборов порошковым методом определяется, исходя в основном из экономических соображений, и главную роль здесь играет высокая стоимость пресс-форм. Экономически целесообразно изготавливать конструкционные детали порошковым методом лишь при массовом их производстве, т. е. производстве около 50 000 штук на 1 пресс-форму.

Среди конструкционных материалов, изготавливаемых методом порошковой металлургии, — шестерни, компрессорные лопатки, заглушки, тройники, втулки, храповики, накидные гайки, фланцы и другие детали. Из многочисленных конструкционных деталей остановимся на технологии изготовления шестерен и поршневых колец.

При изготовлении шестерен традиционными методами литья и механической обработки в стружку уходит до 60 % высококачественного металла. Вместе с тем, это трудоемкий процесс, требующий высокой квалификации рабочих. Метод порошковой металлургии позволяет в основном устранить указанные недостатки и даже имеет некоторые дополнительные преимущества, заключающиеся в изготовлении шестерен с определенной пористостью (5 ... 15 %) и пропитывании их маслом, которое со свободным графитом, имеющимся в спеченной шестерне, образует коллоидно-графитовую смазку, удерживаемую в порах силами поверхностного натяжения. Выступающая на рабочей поверхности при эксплуатации смазка обеспечивает самосмазываемость шестерни. Благодаря наличию пор, пропитанных маслом, уменьшается износ и снижается шум шестерен при работе.

Шестерни из железного порошка изготавливают однократным или двукратным прессованием. При однократном прессовании (давление 300 ... 800 МПа) и спекании при температуре 1140 ... 1180 °С (выдержка 1,0...1,5 ч) обеспечивается плотность 6 ... 6,8 г/см³, объем пор 5 ... 15 %, твердость по Виккерсу 60 ... 85, предел прочности при растяжении 150 ... 250 МПа, предел прочности при сжатии 800 ... 900 МПа (содержание общего углерода 0,8 ... 1,4 %, в том числе свободного 0,5 ... 1,0 %).

При двукратном прессовании и спекании плотность повышается до 7,0 ... 7,5 г/см³, твердость до 150 ... 200 HV, предел прочности при растяжении до 400 ... 600 МПа. Для обеспечения большей точности формы и размеров шестерни после спекания подвергаются калибровке и доводке.

Добавка к железному порошку меди и графита способствует повышению прочности спеченных материалов, при плотности 6,6 г/см³ и содержании углерода 0,1 % $\sigma_B = 180$ МПа. Добавлением в шихту 5 % меди добиваются повышения предела прочности до 320 МПа. Повысив содержание связанного углерода до 0,7 %, можно достигнуть наивысшей прочности. Так, материал с содержанием 0,7 % углерода и 5 % меди имеет предел прочности при растяжении 530 МПа.

Поршневые кольца обычно изготавливают из высококачественного серого чугуна. При производстве поршневых колец большое внимание уделяется увеличению срока их службы, а вместе с тем и долговечности двигателя. С этой целью применяют различные технологические методы: пористое хромирование, легирование чугуна, азотирование, изготовление поршневых колец из высококачественного чугуна со сферической формой графита или из литой графитизированной стали.

Особые требования предъявляются к микроструктуре, которая должна представлять мелкопластинчатый или сорбитообразный перлит, содержание феррита допускается не более 5 %, не должно быть структурно свободного цементита. Такая микроструктура обеспечивает достаточную упругость кольца, высокие антифрикционные свойства и сопротивление износу при работе в паре со стенками цилиндра. Изготовление поршневых колец из чугуна с последующей механической обработкой требует более десятка машинных операций, во время которых в стружку теряется до 90 % металла.

Существует ряд вариантов изготовления поршневых колец металлокерамическим путем. Основные преимущества их перед обычными способами изготовления следующие: 1) резко сокращается потеря металла и трудозатраты; 2) меньшая остаточная деформация; 3) меньшее отношение

модуля упругости к пределу прочности, следствием чего является большая долговечность и лучшая приспособляемость к деформациям цилиндра. Для повышения износостойкости металлокерамических колец их иногда изготавливают двухслойными (внутренний слой — из железного восстановленного порошка с добавлением 1,1 % графита и 1,5 % меди; во внешнем слое содержание графита увеличивают до 3,5 % и вводят до 6 % хрома).

Рассмотрим один из наиболее часто применяемых вариантов изготовления поршневых колец. Прессованию подвергается тщательно перемешанная шихта. Прессуют заготовки при давлении 600 ... 700 МПа пористостью 15 ... 20 %. Спекание колец производят при температуре 1110 ... 1150 °С в течение 1,0 ... 1,5 ч. После спекания вырезают замок, а затем осуществляют допрессовку при давлении 600 ... 900 МПа, пористость при этом снижается до 12 ... 15 %. Для образования замка величиной 13 ... 20 мм производится термофиксация кольца путем нагрева на специальной звездочке (рис. 16) при температуре 600 °С (2 ... 3 ч).

Последней операцией является шлифование торцевой поверхности, которое обеспечивает необходимую шероховатость. Готовые кольца пропитывают маслом при температуре 120 ... 130 °С в течение 2 ... 3 ч.

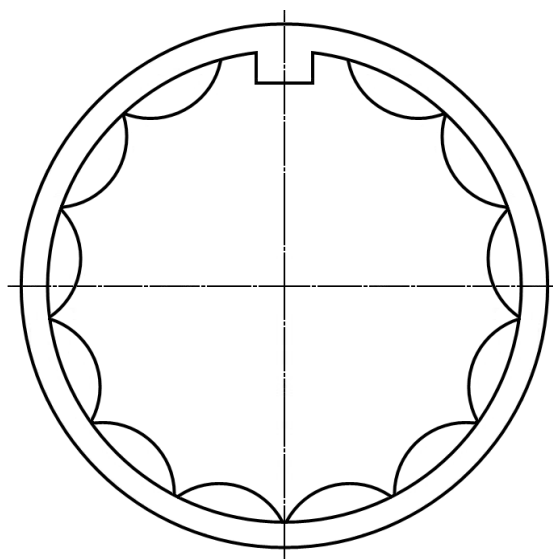


Рис.16.Схема термофиксирования поршневого кольца на звездочке

5.4. Высокотемпературные материалы

К ним относятся: тугоплавкие металлы и материалы на их основе; дисперсно-упрочненные материалы; материалы, армированные волокнами; твердые соединения; керметы.

Тугоплавкие металлы и материалы на их основе. Тугоплавкими принято считать металлы, температура плавления которых выше, чем у железа. Наибольшее применение в качестве высокотемпературных материалов нашли вольфрам, молибден, тантал, ниобий, титан. Несмотря на высокую температуру плавления этих металлов, процесс их разупрочнения интенсивно протекает уже при нагреве до температур $(0,3 \dots 0,4) T_{\text{пл}}$. Кроме того, недостаточно высока их окислительная стойкость. Путем введения легирующих элементов достигают повышения температуры разупрочнения тугоплавких металлов, однако даже комплексное легирование дает сравнительно небольшой эффект, который ощутим только до $(0,5 \dots 0,6) T_{\text{пл}}$.

Легирующими добавками для вольфрама могут быть тантал, рений, торий (около 1 %), для молибдена — цирконий, тантал, титан, бор, РМЗ (до 0,2 ... 0,5 %).

Характерными для производства вольфрама, молибдена, тантала, ниобия являются прессование порошковой шихты определенной насыпной плотности в стальных разъемных пресс-формах, или гидростатическое прессование. Спекание производится в две стадии: первая — низкотемпературная, вторая — высокотемпературная (осуществляется в сварочных аппаратах). Спекание приводит к снижению пористости, которая, например, у вольфрама снижается с 30 ... 40 % до 10 ... 15 %. Окончательная операция — ковка — позволяет получать практически беспористый материал.

Более экономичный порошковый способ получения титана осуществляется по двум основным вариантам:

1) прессование небольших заготовок в стальных пресс-формах; крупных — гидростатическим способом, спекание в вакууме (10^{-4} мм рт. ст.) при 1000 ... 1300 °С; окончательная операция для получения беспористого металла — ковка;

2) горячее прессование. Может осуществляться либо в вакууме (10^{-3} мм рт. ст.) при 850 ... 1000 °С и графитовых пресс-формах (для предупреждения загрязнения металла кислородом, азотом и другими газами), либо производится при повышенных температурах методом экструзии.

Получение циркония аналогично рассмотренным выше способам получения спеченного титана.

Вольфрам, тантал, ниобий, молибден применяются в атомной энергетике, радиотехнике, вольфрам и молибден — в производстве нитей накаливания. Молибден используется для изготовления нагревательных

элементов электрических печей. Титан и его сплавы, благодаря высокой удельной прочности и коррозионной стойкости, находят широкое применение для деталей ракет, самолетов, в судостроении, для деталей химического машиностроения. Цирконий и его сплавы применяются в атомной энергетике, электронике и пиротехнике.

Дисперсно-упрочненные материалы. Авиационная и космическая техника требуют материалов, обладающих повышенной прочностью при высоких температурах. Значительного повышения жаропрочности достигают введением в тугоплавкие и другие металлы мелкодисперсных частиц тугоплавких кислородных соединений Al_2O_3 , SiO_2 , ThO_2 , HfO_2 , YO_2 , Cr_2O_3 , TiO_2 . Иногда в качестве упрочняющих фаз дополнительно к окислам в небольших количествах вводят карбиды, бориды, нитриды, интерметаллические соединения и различные тугоплавкие металлы. Огромное количество дисперсных частиц, специально введенных в основной металл, оказывает препятствие движению дислокаций, что затрудняет процесс деформирования, а следовательно, повышает прочность. Оптимальная дислокационная структура матриц формируется при строгом соблюдении дисперсности частиц (10 ... 60 нм), расстояние между ними 0,5 ... 0,8 мкм, а также в результате применения термомеханических режимов обработки — холодной деформации и высокотемпературного отжига.

Технология получения изделий из дисперсно-упрочненных материалов обычно состоит из подготовки исходных порошков (главным образом, путем совместного химического осаждения основы и упрочнителя из водных растворов солей), формирования заготовок и обработки их давлением — экструзией, волочением, прокаткой.

Остановимся на нескольких примерах. Дисперсное упрочнение молибдена окисью циркония и нитридом циркония позволяет повысить прочность молибдена в интервале температур 20 ... 1700 °С примерно в 2,5 раза. Дисперсное упрочнение титана оксидами циркония и алюминия ведет к повышению длительной прочности.

Большое распространение имеют дисперсно-упрочненные спеченные алюминиевые псевдосплавы (САП), в состав которых входит до 15 ... 17 % (по объему) Al_2O_3 . При нагреве САП, содержащих 10 ... 13 % Al_2O_3 , прочность не снижается до 550 °С. Увеличение содержания в САП Al_2O_3 от 0,5 до 17 % способствует повышению прочности при 18 ... 20 °С и длительной прочности при нагреве до 450 ... 500 °С, которая при испытании до 100000 ч практически не изменяется. Статическая и динамическая прочность САП при 400 °С в шесть раз выше, чем у стареющих алюминиевых сплавов. Эффект упрочнения алюминиевых сплавов за счет старения наблюдается только до тех пор, пока выделяющаяся фаза когерентно связана с матрицей. Даже незначительное повышение температуры способствует обособлению и коагуляции этой фазы

и, как следствие, понижению прочностных свойств. Создание порошкового алюминиевого сплава позволяет повысить прочность по сравнению с алюминием, но в меньшей степени, чем это имеет место в состаренных дуралюминах. Таким образом, при комнатной температуре САП занимает промежуточное положение между чистым алюминием и состаренным дуралюмином.

Алюминиевые порошки всегда покрыты слоем оксидов той или иной толщины, которую можно регулировать. Важнейшей особенностью оксидов алюминия является их хрупкость. Поэтому в процессе прессования оксиды крошатся, в результате чего в массе спрессованного порошка оказывается огромное количество мелких крупинок оксидов, практически равномерно распределенных в объеме. Другая особенность состоит в том, что в процессе высокотемпературного спекания решетка крупинок оксидов очень хорошо пристраивается к решетке чистого алюминия. При этом одна решетка становится как бы продолжением другой. Устанавливается кристаллогеометрическое соответствие. Все это обеспечивает прочный заслон на пути движения дислокаций. Частицы оксидов алюминия в алюминии не растворяются и не разлагаются с выделением кислорода. Именно поэтому прессовки из окисленного алюминиевого порошка сохраняют способность сопротивляться деформированию до высоких температур и таким образом оказываются жаропрочными.

Материалы, армированные волокнами. Упрочнение порошковых материалов волокнами более эффективно, чем дисперсными частицами. Армирующие элементы (волокна) несут основную нагрузку, а матрица передает напряжение волокнам. В качестве армирующих материалов используют волокна, проволоку или усы (монокристаллы) из железа, стали, вольфрама, никеля, молибдена, титана и других металлов, графита, оксидов алюминия, бериллия, кремния, карбидов, боридов и других тугоплавких материалов.

Методы получения армирующих материалов делят на механические и физико-химические. Наиболее распространенными и широко применяющимися в промышленности являются механические методы, которые осуществляются: а) изготовлением тонкой проволоки путем волочения; б) изготовлением «шерсти» при шавлении, шевинговании и других видах обработки на станках, дающих непрерывные пряжи; в) получением волокон из расплава: выдавливанием через отверстие заданного диаметра; формированием волокна эжекцией струи металла, увлекаемой мощным потоком газа, формированием волокон на быстровращающемся диске; г) получением нитей диаметром менее 1 мм из тугоплавких металлов вольфрама, молибдена, титана, а также бора, кремния, оксидов, карбидов и других металлоподобных соединений путем продавливания смеси порошков со связующими материалами через тонкие отверстия.

Физико-химические методы позволяют получать наиболее прочное волокно, но в настоящее время это еще только лабораторные разработки. Производят выращивание усов в твердой фазе, восстановлением различного рода соединений металлов (галогенидов, сульфидов, оксидов), получают нитевидные кристаллы из пересыщенной газовой фазы.

Волокна, полученные любым из указанных способов, вводят в порошковую матрицу, производят перемешивание шихты и прессование. Прессование можно осуществлять любым способом, но предпочтительнее методы экструзии и прокатки, так как это позволяет получать изделия с направленной структурой волокон, что в ряде случаев очень важно. Спекание проводят при $(0,7 \dots 0,8) T_{\text{пл}}$ матрицы обычно в атмосфере водорода, в вакууме или в инертных газах.

Твердые соединения. Это группа материалов, образованных тугоплавкими переходными металлами с металлоидами (карбиды, нитриды, бориды, гидриды, силициды). Они характеризуются очень высокой твердостью, которая по шкале Мооса оценивается промежуточным значением между твердостью корунда и алмаза, т. е. между 9 и 10. Важным достоинством твердых соединений является высокая температура плавления, сравнимая с температурой плавления вольфрама. В ряде случаев она даже превосходит температуру плавления вольфрама. Так, NbC плавится при 3500°C , TaC — при 3880°C , HfC — при 3890°C .

Твердые соединения обладают высокой химической стойкостью.

Из группы карбидов наиболее важными являются карбиды вольфрама, титана, тантала, ванадия, ниобия, молибдена, которые служат основой для современных твердых сплавов.

Из группы боридов особое значение имеют бориды титана и циркония, применяемые для различных износостойчивых, коррозионно-стойких и жаропрочных деталей.

Из силицидов применяют дисилициды молибдена, вольфрама и титана, обладающие высокой окислостойкостью в воздушной среде в интервале температур $1300 \dots 1700^\circ\text{C}$. Из них изготавливают нагреватели электрических печей, работающие в воздушной среде.

Из гидридов применяют гидриды титана и циркония, которые используют в качестве геттеров (газопоглотителей) для пайки неметаллических материалов с металлами.

Нитриды нашли широкое применение в технике высоких температур, газотурбостроении, энергетике, космической технике.

Твердые тугоплавкие соединения плохо прессуются. Поэтому их подвергают либо горячему прессованию при температуре $(0,8 \dots 0,9) T_{\text{пл}}$ тугоплавкого соединения, либо спеканию с применением активирующих добавок. Последний способ позволяет применять прогрессивные методы формования — шликерное литье, прокатку, экструзию.

Твердые соединения широко применяются в качестве основы различных тугоплавких, жаропрочных и жаростойких материалов.

Керметы. Это гетерогенная композиция металлов или сплавов с одной или несколькими керамическими фазами с относительно малой взаимной растворимостью фаз. Керамической составляющей являются оксиды Al_2O_3 , Cr_2O_3 , SiO_2 , ZrO_2 . Для улучшения связывания металлической составляющей с керамической добавляют металлоиды: карбиды (SiC , Cr_3C_2 , TiC), бориды (Cr_3B_2 , TiB_2 , ZrB_2), силициды (MoSi) и нитриды (TiN). Для изготовления керметов используют порошки хрома, никеля, алюминия, железа, кобальта, титана, циркония и сплавов на их основе. Содержание керамической фазы в керметах колеблется от 15 до 85 % (по объему).

Изделия из керметов получают путем прессования порошковых заготовок с последующим их спеканием в восстановительной или нейтральной атмосфере.

В керметах сочетаются свойства керамических веществ (высокая твердость и сопротивление износу, тугоплавкость, жаропрочность) и металлов (теплопроводность, пластичность). Из керметов изготавливают детали турбин, авиационных двигателей, фрикционных элементов, инструмента и других деталей, испытывающих повышенные нагрузки при работе в агрессивных средах и при высоких температурах.

Твердые сплавы характеризуются высокой износостойкостью и твердостью, сохраняющейся даже в условиях нагрева до высоких (900 ... 1200 °C) температур. Твердые сплавы — это спеченные порошковые композиции, основой которых служат карбиды тугоплавких металлов (W, Ta, Ti, V, Nb), а связующим — металл с более низкой температурой плавления (обычно кобальт, значительно реже — никель). По сравнению с литыми твердыми сплавами металлокерамические твердые сплавы отличаются более высокой прочностью и вязкостью.

Твердые сплавы имеют три основные области применения: в качестве наплавов для оснащения режущего и бурового инструмента; как конструкционные материалы для износостойких деталей машин и приборов (например, наплавки на валки для точной прокатки, волокни, матрицы, узлы трения); в качестве жаропрочных и жаростойких сплавов.

Применение твердых сплавов имеет огромное народно-хозяйственное значение. Так, при обработке резанием во много раз можно повысить скорость точения, увеличить подачу и, как следствие, существенно повысить производительность. Объясняется это тем, что режущая способность материалов пропорциональна их твердости и износостойкости. С повышением температуры режущей кромки твердость инструмента снижается (рис. 17).

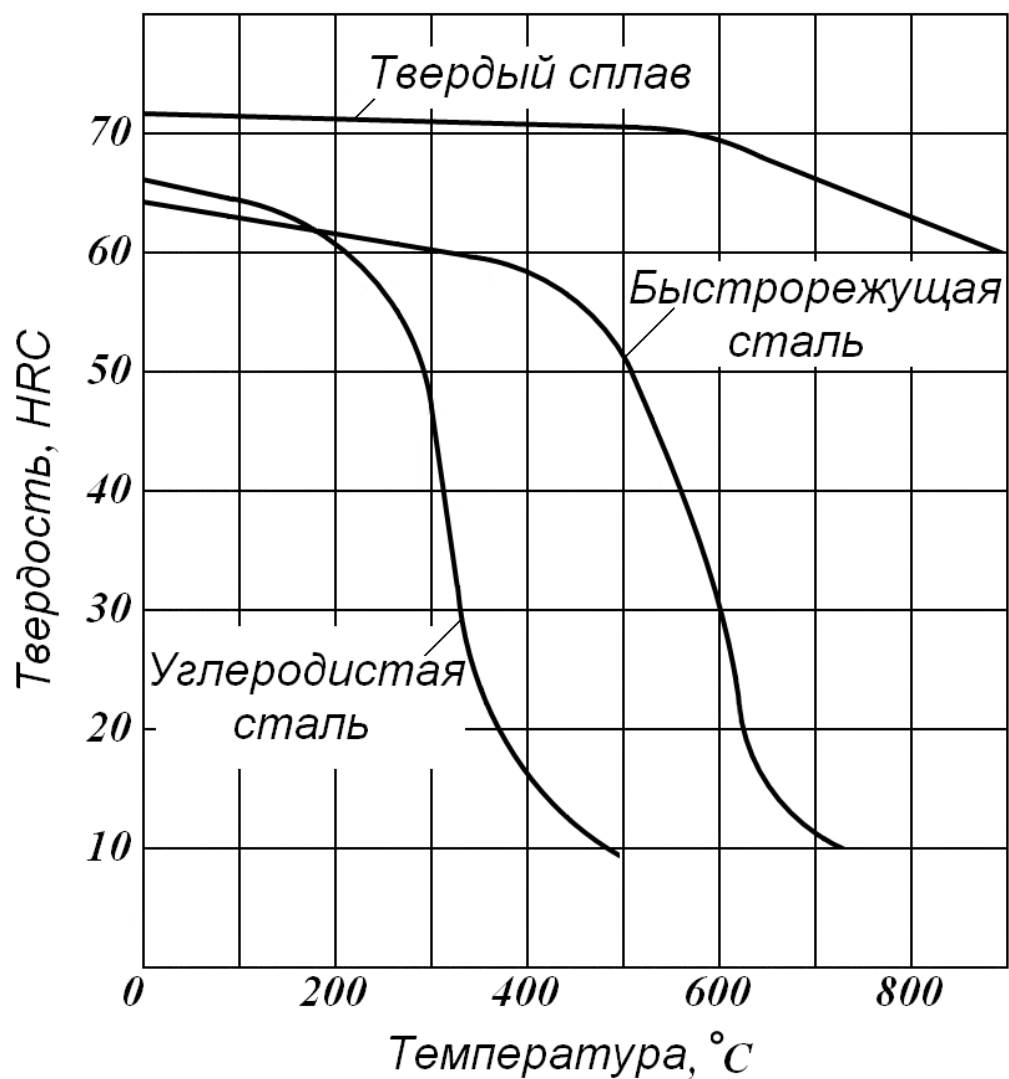


Рис. 17. Твердость различных конструкционных материалов в нагретом состоянии

Таблица 4

Химический состав и физико-механические свойства твердых сплавов

Группа	Марка	Химический состав, %				Физико-механические свойства		
		WC	TiC	TaC	Co	$\sigma_{изг}$, МПа	плотность, $кг/м^3 \cdot 10^3$	твердость по Роквеллу (шкала А)
Вольфрамова	ВК2	98	—	—	2	1100	15,0-15,4	90,0

я (ВК)	ВК3	97	—	—	3	1000	15,0-15,3	89,0
	ВК3М	97	—	—	3	1100	15,0-15,3	91,0
	ВК4	96	—	—	4	1350	14,9-15,1	98,5
	ВК4В	96	—	—	4	1400	14,9-15,1	88,0
	ВК6	94	—	—	6	1450	14,6-15,0	88,5
	ВК6М	94	—	—	6	1400	14,8-15,1	90,0
	ВК6В	94	—	—	6	1350	14,6-15,0	87,5
	ВК8	92	—	—	8	1600	14,4-14,8	87,5
	ВК8В	92	—	—	8	1700	14,4-14,8	87,5
	ВК10	90	—	—	10	1600	14,2-14,6	87,0
	ВК15	85	—	—	15	1800	13,9-14,1	86,0
	ВК20	80	—	—	20	1900	13,4-13,7	84,5
	ВК25	75	—	—	25	2000	12,9-13,2	83,0
Титановольфрамовая (ТК)	T30K4	66	30	—	4	900	9,5-9,8	92,0
	T15K6	79	15	—	6	1150	11,0-11,7	90,0
	T14K8	78	14	—	8	1250	11,2-12,0	89,5
	T5K10	84	6	—	10	1350	12,3-13,2	88,5
	T5K12В	83	5	—	12	1600	12,8-13,3	87,0
Титанотанталовольфрамовая (ТТК)	ТТ7К12	81	4	3	12	1600	13,0-13,3	87,0
	ТТ10КВ	82	3	7	8	1400	13,5-13,8	89,0

Примечание. В — марка крупнозернистых твердых сплавов; М — марка мелкозернистых твердых сплавов.

Режущий инструмент, изготовленный из углеродистой инструментальной стали, может надежно работать при разогреве кромки до 200 ... 300°C. Выше указанных температур твердость резко падает. Такие инструменты позволяют обрабатывать чугун, сталь и бронзу со скоростью несколько метров в минуту. Быстрорежущая сталь выдерживает без существенного понижения твердости разогрев до 500 ... 600 °С. Соответственно, скорость резания составляет 30 ... 40 м/мин. Инструментом, изготовленным металлокерамическим путем, можно обрабатывать сталь и чугун со скоростью до 500 м/мин, а мягкие материалы — до 2000 м/мин.

По составу твердые сплавы делят на три группы: вольфрамовую, титановольфрамовую, титанотанталовольфрамовую (табл. 4).

Сплавы вольфрамовой группы ВК2 ... ВК8 используют, главным образом, для обработки резанием чугуна, ВК10, ВК15 — для бурения, ВК20, ВК25 — для изготовления штампов. Содержание кобальта в сплавах группы ВК — от 2 до 25 %. С увеличением содержания кобальта повышается прочность, но снижается твердость и износостойкость. Сплавы этой группы не применяют для резания вязких материалов, образующих длинную стружку, так как последняя налипает на режущий инструмент.

Введение титана способствует уменьшению свариваемости стружки с резцом. Поэтому сплавы титановольфрамовой группы с успехом применяют для обработки резанием стали и других вязких материалов.

Титанотанталовольфрамовые сплавы, наиболее распространенным из которых является сплав ТТ7К12, обладают большей стойкостью против окисления и предназначены для исключительно тяжелых условий обработки специальных сталей и сплавов. Благоприятное влияние тантала объясняется изменением параметра кристаллической решетки карбида. Растворяясь в кобальте, тантал повышает температуру его разупрочнения.

Микроструктура сплавов вольфрамовой группы (рис. 18а) состоит из зерен карбида вольфрама WC , между которыми имеется прослойка твердого раствора WC в кобальте; толщина прослойки увеличивается с повышением содержания кобальта. При недостатке кобальта частицы карбидов могут соприкасаться друг с другом, способствуя охрупчиванию изделия. Размер карбидных зерен в сплавах группы ВК колеблется от 1 ... 5 до 20 мкм (реже до 250 мкм). По форме карбидные зерна бывают прямоугольными, трапециевидными или комбинированными из этих видов. При повышении содержания кобальта наблюдается срастывание карбидных частиц и увеличение их размеров.

Микроструктура сплавов титановольфрамовой группы (рис. 18б) состоит из трех фаз: карбида вольфрама WC — мелких светлых зерен хорошо выраженной угловатой формы; твердого раствора $Ti - WC$ — округлых светлых зерен; твердого раствора на основе кобальта — черных (вытравленных) прослоек между карбидными зернами.

Сплавы группы ТТК имеют аналогичную структуру.

Существенное влияние на механические свойства твердых сплавов оказывает величина зерна, обусловленная размерами частиц карбидной фазы. При одном и том же составе сплавы с мелкозернистой структурой обладают более высокой прочностью, твердостью и износоустойчивостью и лишь незначительно уступают в вязкости. Для сплавов, обладающих крупнозернистой структурой, в конце марочного обозначения добавляется буква «В» (вязкий), а для сплавов с мелкозернистой структурой — буква «М» (мелкозернистый). Сплавы с крупнозернистой структурой, например, ВК6В, применяются для резания мягких, хорошо обрабатываемых материалов, а сплавы с мелкозернистой структурой, обладающие более высокой твердостью, например, ВК6М, — для обработки отбеленного чугуна и других твердых материалов. Технологическая схема производства твердых сплавов включает получение порошков вольфрама и кобальта, приготовление карбидов, смешивание, прессование и спекание.

Порошок вольфрама получают путем восстановления триоксида вольфрама водородом. Процесс обычно ведут в трубчатых или муфельных печах в две стадии: $WO_3 \rightarrow WO_2$ при температуре 600 ... 800 °С, $WO_2 \rightarrow W$

при температуре 800 ... 900 °С. Нередко производят восстановление триоксида вольфрама сажей (углеродом). В этом случае процесс ведут в графитотрубчатых печах при температуре 1700 ... 1800 °С.

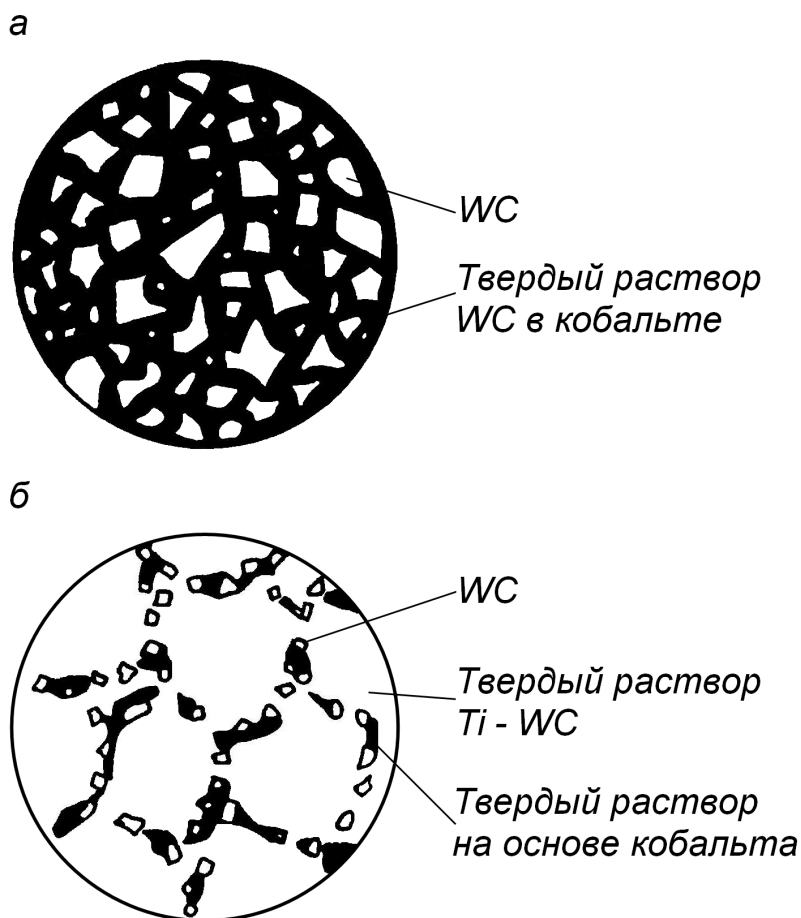


Рис. 18. Схема микроструктуры твердых сплавов:
а — вольфрамовая группа; б — титановольфрамовая и титанотанталовольфрамовая группы

Порошки кобальта получают карбонильным методом, обеспечивающим высокую степень чистоты. Кроме степени чистоты, к порошкам предъявляются определенные требования по насыпной плотности, которая для вольфрама должна быть в пределах 1,5 ... 5, а для кобальта 0,6 ... 0,8 г/см³.

Для получения карбида вольфрама порошок вольфрама смешивают с сажей и нагревают в атмосфере водорода или CO + N₂ при температуре 1350 ... 1600 °С.

Сложный карбид TiC — WC получают прокаливанием в водороде смеси диоксида титана, карбида вольфрама и сажи при температуре 2000 ... 2200 °С. Шихту составляют из расчета получения твердого раствора WC в

TiC, содержащего 30 % (по массе) TiC, что отвечает насыщенному твердому раствору при температуре спекания 1500 ... 1600 °C.

Сам процесс приготовления смеси — сложная операция. Существует много способов приготовления смесей. Наибольшее распространение нашел способ смешивания карбидов с порошком кобальта. Приготовление шихты производят путем длительного (от 24 до 120 ч) размол в шаровых мельницах в жидкой среде. После размол смесь процеживают через сито 325 меш и сушат в дистилляторах или вакуумных сушильных шкафах.

Прессование производится при давлении 50 ... 200 МПа. Применение более высокого давления вызывает расслоения, трещины и разрушение прессовок. Заготовки имеют пористость 30 ... 40 %. Особенностью прессования твердых сплавов является невозможность уплотнения шихты без пластификатора. В качестве пластификаторов применяют каучук, глицерин или графит. Прессовки подвергают сушке при температуре 150 ... 200 °C для удаления пластифицирующих добавок.

Спекание осуществляется в два этапа. На первом (предварительном — при 900 ... 1100 °C) начинается процесс спекания, происходит восстановление оксидных пленок, наблюдается значительная усадка. Продолжительность предварительного спекания 2 ... 4 ч. Полученные заготовки имеют прочность, достаточную, чтобы их при необходимости можно было подвергнуть механической обработке. Окончательное спекание производится с участием жидкой фазы при температуре 1400 ... 1500 °C в течение 3 ... 5 ч. Охлаждение от температуры спекания до 600 ... 700 °C осуществляют медленно.

При охлаждении от 1500 °C до 1280 °C, т. е. до момента затвердевания эвтектики, происходит выделение из жидкого расплава карбидов вольфрама в виде мелкодисперсных кристаллов, которые частично распределяются во всем объеме сплава, а частично осаждаются на поверхности нерастворившихся карбидных частиц, размеры которых при этом увеличиваются.

После спекания изделия очищают в гидropескоструйных аппаратах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Солнцев Ю. П., Пряхин Е. И. Материаловедение: учебник для вузов. — М.: Химиздат, 2007.

Теплухин Г.Н., Гропянов А.В. Материаловедение и термическая обработка: учебное пособие / ВШТЭ СПбГУПТД. - СПб., 2017.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. Металлические порошки и их свойства	4
1.1. Химические свойства.....	4
1.2. Физические свойства	5
1.3. Технологические свойства	7
2. Способы получения металлических порошков	9

2.1. Механические способы получения порошков.....	9
2.2. Физико-химические способы получения порошков.....	10
2.3. Получение многокомпонентных порошковых сплавов .	12
3. Формование и спекание заготовок из металлических порошков	13
3.1. Формование	13
3.2. Процессы, происходящие при прессовании	14
3.3. Основные схемы прессования порошковых изделий..	21
3.4. Характерные пороки прессованных заготовок и их причины.....	26
3.5. Спекание прессовок	26
3.6. Практика спекания.....	34
3.7. Характерные пороки при спекании	35
4. Свойства спеченных изделий и методы их определения	36
4.1. Физические свойства	36
4.2. Химические свойства и защита от коррозии	36
4.3. Механические свойства	37
4.4. Особенности металлографических исследований.....	38
4.5. Технологические пробы и испытания порошковых материалов.....	39
5. Виды, области применения и свойства спеченных материалов и изделий.....	44
5.1. Пористые материалы	44
5.2. Электротехнические материалы	52
5.3. Конструкционные материалы	60
5.4. Высокотемпературные материалы	63
Библиографический список.....	73