



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ  
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Технология машиностроения»

**Учебное пособие**  
по дисциплине  
«Технология машиностроения»

**«Технология и особенности  
изготовления деталей  
методом порошковой  
металлургии»**

Авторы  
Егоров М.С., Вернигоров Ю.М.,  
Егорова Р.В.

Ростов-на-Дону, 2017

## Аннотация

Учебное пособие предназначено для студентов всех форм обучения направлений 15.03.05 - Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств.

## Авторы



профессор, д.т.н,  
профессор кафедры Физика  
Верников Ю.М.



к.т.н, доцент кафедры  
Технология машиностроения  
Егоров М.С.



к.т.н., ст. преподаватель  
кафедры ТС и ИТ Егорова  
Р.В.



## Оглавление

Введение .....	4
1. Общие сведения о порошковой металлургии .....	4
2. Понятие пористости. методы определения пористости.....	6
3. Характеристики исходных материалов .....	8
4. Технологические операции порошковой металлургии .....	22
5. Порошковые и композиционные материалы .....	31
6. Обработка порошковых материалов .....	42
7. Технологические требования, предъявляемые к конструкциям порошковых деталей.....	45
Список литературы.....	63

## Введение

Порошковая металлургия является бурно развивающейся отраслью промышленности. О перспективах развития порошковой металлургии свидетельствует рост производства металлических порошков. Ежегодный прирост производства составляет 6-7 %. Лидером производства остается шведская фирма «Хеганес» (около 630 тыс. т), Россией произведено около 5 тыс. т — заводы в Красном Сулине (ЗАО «Стакс») и Череповце («Северсталь»), потреблено около 7 тыс. т и наблюдается заметное оживление в потреблении железных порошков. Все ярче проявляется тенденция создания и поставок потребителям сложнелегированных, комплексно легированных композиционных порошков и готовых к переработке смесей (премиксов) с определенным содержанием разнообразных легирующих элементов (Si, Ni, Cr, Mo, P, S, Mn, C) и пластификаторов, что значительно облегчает подготовку и производство функциональных порошковых изделий массового потребления.

Технологу-машиностроителю придется в своей практической деятельности столкнуться с технологией обработки порошковых деталей или с их использованием в различных конструкциях. Данное учебное пособие поможет будущим специалистам получить необходимые сведения о порошковой металлургии, её технологиях и порошковых материалах.

### 1. Общие сведения о порошковой металлургии

Порошковая металлургия (ПМ) - область науки и техники, охватывающая производство металлических порошков, изделий из них или их смесей с неметаллическими порошками. Особенностью ПМ, по сравнению, с другими способами обработки материалов является совмещение в одном технологическом цикле процессов формообразования детали или заготовки и формирования порошкового материала. Технология получения порошковых деталей состоит из следующих основных операций: приготовление шихты, представляющей собой смесь порошков разнородных материалов заданного химического состава, формование заготовки, спекание, горячее доуплотнение, окончательная обработка.

Определенная парадоксальность ПМ заключается в том, что в качестве исходного материала используется металлический порошок, получаемый в ряде случаев диспергированием монолитного материала, который трансформируется в консолидированное твердое тело. Жизнеспособность технологического процесса «монолит - порошок - пористое порошковое тело» объяс-

## Технология машиностроения

няется преимуществами ПМ перед другими технологическими процессами.

К достоинствам ПМ можно отнести следующие признаки:

- изготовление материалов и изделий, получение которых невозможно другими технологическими процессами, например пористые и композиционные материалы;
- изготовление материалов и изделий с более высокими технико-экономическими показателями;
- высокая производительность, возможность механизации и автоматизации технологических операций;
- высокий коэффициент использования материала. Большинство технологических процессов ПМ обеспечивает получение порошковых деталей с точностью, соответствующей девятому качеству, то есть точностью, достигаемой после черновых и чистовых переходов при обработке резанием.

В настоящее время можно отметить ряд недостатков

ПМ:

- более высокая стоимость металлических порошков по сравнению с горячекатаными заготовками аналогичного химического состава;
- необходимость проведения операций, связанных с нагревом порошковых заготовок в защитной атмосфере из-за необходимости предотвращения их окисления;
- более сложная конструкция и как следствие - более высокая стоимость прессового оборудования по сравнению с кузнечно-прессовым оборудованием, применяемым дляковки и штамповки монолитных материалов;
- экономическая нецелесообразность использования методов ПМ в условиях единичного, мелкосерийного и серийного типов производства вследствие высокой стоимости технологической оснастки.

Несмотря на перечисленные недостатки, ПМ широко используется в отраслях промышленности, выпуск изделий которых носит крупносерийный и массовый характер, например сельхозмашиностроение, автостроение, оружейная и инструментальная промышленность и др.

Недостатки ПМ и некоторые ее достоинства нельзя рассматривать как постоянно действующие факторы: в значительной степени они зависят от состояния и развития как самой

## Технология машиностроения

ПМ, так и других отраслей промышленности. По мере развития техники ПМ может вытесняться из одних областей и, наоборот, завоевывать другие. Развитие дугового, электронно-лучевого, плазменного плавления и электроимпульсного нагрева позволили получать недостижимые прежде температуры, вследствие чего удельный вес ПМ в производстве несколько снизился. Вместе с тем прогресс техники высоких температур ликвидировал такие недостатки ПМ, как, например, трудность приготовления порошков чистых металлов и сплавов: метод распыления дает возможность с достаточной полнотой и эффективностью удалить в шлак примеси и загрязнения, содержащиеся в металле до расплавления. Благодаря созданию методов всестороннего обжигания порошков при высоких температурах в основном преодолены и трудности изготовления беспористых заготовок крупных размеров.

В то же время ряд основных достоинств ПМ - постоянно действующий фактор, который, вероятно, сохранит свое значение и при дальнейшем развитии техники.

### 2. Понятие пористости. методы определения пористости

Пористость является основной характеристикой порошкового материала или изделия, существенно влияющей на технологический процесс и на свойства продукции.

Пористостью ( $\Pi$ ) называется отношение объема пор  $V_{\text{п}}$  к объему детали  $V_{\text{д}}$ , выраженному в процентах:

$$\Pi = \frac{V_{\text{п}} \cdot 100}{V_{\text{д}}}$$

Используя соотношение между плотностью, массой и объемом, можно записать следующее:

$$V_{\text{п}} = V_{\text{д}} - V_{\text{м}} = \frac{m_{\text{д}}}{\rho_{\text{д}}} - \frac{m_{\text{м}}}{\rho_{\text{м}}}$$

где  $V_{\text{д}}, m_{\text{д}}, \rho_{\text{д}}$  – объем, масса и плотность материала детали;  
 $V_{\text{м}}, m_{\text{м}}, \rho_{\text{м}}$  – объем, масса и плотность материала металла.

Выразив соответствующие объёмы как отношение массы к плотности и подставив их в формулу (2.1), получим выражение (2.3) для вычисления пористости:

$$\Pi = \left(1 - \frac{\rho_{\text{д}}}{\rho_{\text{м}}}\right) \cdot 100$$

Таким образом, для определения пористости необходимо

## Технология машиностроения

знать плотности материала порошка  $\rho_m$  и детали  $\rho_d$ . Первое значение находим в справочниках по материалам, а плотность детали определяется экспериментально. Наиболее распространенный метод определения плотности пористого тела является метод гидростатического взвешивания. Сущность этого метода заключается во взвешивании порошкового тела в воде (рис.2.1). По результатам взвешивания можно вычислить объём детали, а зная её массу - плотность материала детали. Для того чтобы исключить затекание воды в поры, что изменяет выталкивающую силу, а следовательно, и результаты расчета, деталь перед взвешиванием в воде покрывают парафином. Перечислим последовательность операций при гидростатическом взвешивании:

- взвешивание детали на воздухе;
- покрытие детали парафином;
- взвешивание детали с парафином на воздухе;
- взвешивание детали, покрытой парафином в воде.

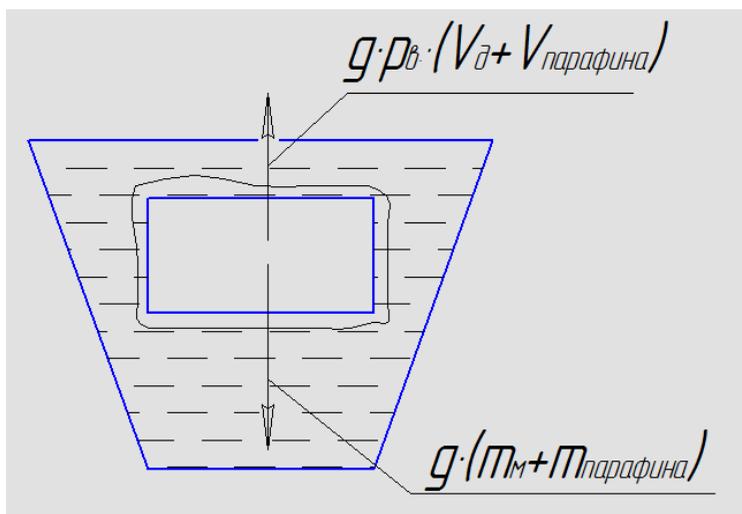


Рис. 2.1. Пример гидростатического взвешивания

Обозначим результат последнего взвешивания как  $B$ . Тогда можно записать:

$$B = g \cdot (m_m + m_{\text{пар}}) - g \cdot \rho_v \cdot (V_d + V_{\text{пар}})$$

где  $m_{\text{пар}}$ ,  $V_{\text{пар}}$  – масса и объём парафина;  $\rho_v$  – плотность воды.

Из этого выражения находим объём детали и по выражению (2.2) вычисляем пористость детали.

В пористом теле различают закрытые и открытые поры. Открытые поры связаны с атмосферой, закрытые поры – замкнутые объёмы внутри тела. Если возникает задача разделить пористость на открытую и закрытую, то определяют объём закрытых пор. Для этого пористое тело взвешивают в жидкости, которая имеет низкую вязкость и смачивает материал порошка. Например, для железного порошка применяется четыреххлористый углерод (CCl<sub>4</sub>). Обеспечивая заполнение открытых пор жидкостью, исключают их объём в создании выталкивающей силы, которая зависит в этом случае от объема металла и закрытых пор. Объем закрытых пор  $V_{з.п.}$  вычисляют по формуле:

$$V_{з.п.} = \frac{(B_{ж} + g \cdot \rho_{ж} \cdot V_{н} - g \cdot m_{н})}{g \cdot \rho_{ж}}$$

$\rho_{ж}$  – плотность жидкости.

### 3. Характеристики исходных материалов

В ПМ используются основные и вспомогательные исходные материалы. К основным материалам относятся порошки, предназначенные для формирования будущего порошкового материала. Если необходимо получить порошковый сплав, то одним из способов достижения этой цели является приготовление шихты. Шихтой называется смесь порошков чистых компонентов. Вспомогательные материалы предназначены для обеспечения регламентированного протекания операций технологического процесса. Они также добавляются в шихту. К вспомогательным материалам относятся смазывающие, склеивающие материалы, повышающие уплотняемость шихты или технологическую прочность пористой заготовки. Следует отметить, что один и тот же материал, в зависимости от поставленной задачи, может быть основным или вспомогательным. Например, при формировании порошковой стали к железному порошку добавляется порошок графита, который рассматривается как основной материал. В некоторых технологических процессах порошковым графитом покрываются рабочие поверхности пуансонов для предотвращения припекания на них порошка шихты. В этом случае порошок графита является вспомогательным материалом.

#### 3.1. Способы получения металлических порошков

В настоящее время используют большое количество методов производства металлических порошков, что позволяет варьировать их свойства, определять качество и экономические показатели. Условно различают два способа изготовления металлических порошков: физико-механический и химико-

металлургический. При физико-механическом способе изготовления порошков превращение исходного материала в порошок происходит путём механического измельчения в твердом или жидком состоянии без изменения химического состава исходного материала. К физико-механическим способам относят дробление и размол, распыление, грануляцию и обработку резанием измельчаемого материала.

При химико-металлургическом способе изменяется химический состав или агрегатное состояние исходного материала. Основными методами при химико-металлургическом производстве порошков являются: восстановление окислов, электролиз металлов, термическая диссоциация карбонильных соединений.

### **Физико-механические методы получения порошков**

В основе этих методов лежит измельчение твердых материалов - уменьшение начальных размеров частиц путем разрушения их под действием внешних усилий. Различают измельчение дроблением, размолотом или истиранием. Наиболее целесообразно применять механическое измельчение хрупких металлов и их сплавов таких, как кремний, сурьма, хром, марганец, ферросплавы, сплавы алюминия с магнием. Размол вязких пластичных металлов (медь, алюминий и др.) затруднен. В случае таких металлов наиболее целесообразно использование в качестве сырья отходов, образующихся при обработке металлов (стружка, обрезка и др.).

При измельчении комбинируются различные виды воздействия на материал: статическое - сжатие, динамическое - удар, срез - истирание. Первые два вида имеют место при получении крупных частиц, второй и третий - при тонком измельчении.

Для грубого размельчения используют щековые, валковые и конусные дробилки и бегуны; при этом получают частицы размером 1–10 мм, которые являются исходным материалом для тонкого измельчения, обеспечивающего производство требуемых металлических порошков. Исходным материалом для тонкого измельчения может быть и стружка, получаемая при точении, сверлении, фрезеровании и других операциях обработки резанием. Окончательный размол полученного материала проводится в шаровых вращающихся, вибрационных или планетарных центробежных, вихревых и молотковых мельницах. Шаровая мельница (рис. 3.1) используется для получения относительно мелких порошков.

## Технология машиностроения

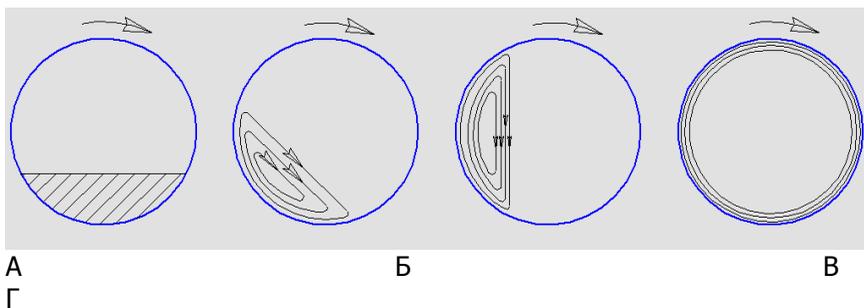


Рис. 3.1. Схемы движения шаров в мельнице: А – режим скольжения;

Б – режим перекатывания; В – режим свободного скольжения;

Г – режим критической скорости

В мельницу загружают размольные тела (стальные или твердосплавные шары) и измельчаемый материал. При вращении барабана шары поднимаются вследствие трения на некоторую высоту, и поэтому возможно несколько режимов измельчения: скольжение, перекатывание, свободное падение, движение шаров при критической скорости вращения барабана.

В случае скольжении шаров по внутренней поверхности вращающегося барабана материал истирается между стенкой барабана и внешней поверхностью массы шаров, ведущей себя как единое целое. При увеличении частоты вращения шары поднимаются и скатываются по наклонной поверхности, и измельчение происходит между поверхностями трущихся шаров. Рабочая поверхность истирания в этом случае во много раз больше, и поэтому происходит более интенсивное истирание материала, чем в первом случае. При большей частоте вращения шары поднимаются до наибольшей высоты и, падая вниз, производят дробящее действие, дополняемое истиранием материала между перекатывающимися шарами. Это наиболее интенсивный размол. При дальнейшем увеличении частоты вращения шары вращаются вместе с барабаном мельницы, а измельчение при этом практически прекращается.

Интенсивность измельчения определяется свойствами материала, соотношением рабочих размеров – диаметра и длины барабана, соотношением между массой и размерами размольных тел и измельчаемого материала. При  $D/L=3...5$  ( $D$  – диаметр,  $L$  – длина барабана) преобладает дробящее действие, при  $D/L < 3$  – истирающее действие; для измельчения пластичных металлов это соотношение должно быть меньше трех. Масса размольных тел

## Технология машиностроения

считается оптимальной при 1,7 – 2 кг размольных тел на 1 л объема барабана. Соотношение между массой размольных тел и измельчаемого материала составляет 2,5 – 3. Для интенсивного измельчения это соотношение увеличивают. Диаметр размольных шаров не должен превышать  $1/20$  диаметра мельницы. Для увеличения интенсивности измельчения процесс проводят в жидкой среде, препятствующей распылению материала и слипанию частичек. Количество жидкости составляет 0,4 л на 1 кг размалываемого материала. Длительность измельчения: от нескольких часов до нескольких суток. В производстве используют несколько типов шаровых мельниц. В различных типах шаровых мельниц соотношение средних размеров частиц порошка до и после измельчения, называемое степенью измельчения, составляет 50 – 100.

При более высокой частоте воздействия внешних сил на частицы материала применяют вибрационные мельницы (рис. 3.2). В таких мельницах воздействие на материал заключается в создании сжимающих и срезающих усилий переменной величины, что создает усталостное разрушение порошковых частиц. В показанной на рис. 3.2 мельнице дисбалансный вал– вибратор 2, вращающийся с частотой 1000 – 3000 об/мин при амплитуде 2– 4 мм вызывает круговые движения корпуса 1 мельницы с размольными телами и измельчаемым материалом. В этом случае измельчение протекает интенсивнее, чем в шаровых мельницах.

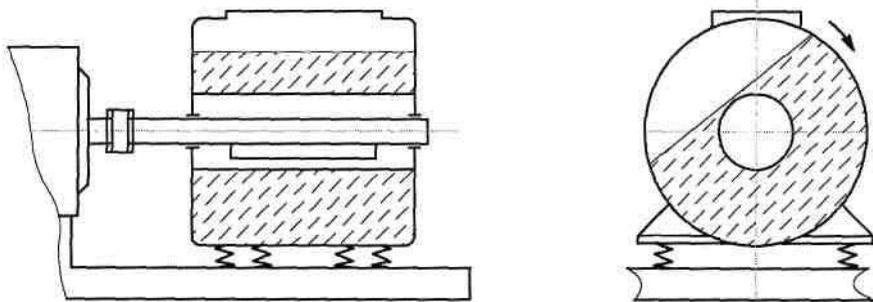


Рис. 3.2. Схема вибрационной мельницы: 1 - корпус-барабан; 2 - вибратор вращения; 3 - спиральные пружины; 4 - электродвигатель; 5 - упругая соединительная муфта

Тонкое измельчение трудноразмалываемых материалов часто выполняют на планетарных центробежных мельницах с шарами, используемыми для размола. По сравнению с шаровыми мельницами в планетарных центробежных мельницах разمول происходит в сотни раз интен-

## Технология машиностроения

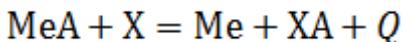
сколько раз менее производительен, так как эта мельница периодического действия с ограниченной загрузкой измельчаемого материала.

Для размола пластичных материалов используют процесс измельчения, при котором разрушающие удары наносят сами частицы измельчаемого материала. Для этого используют вихревые мельницы.

Распыление и грануляция жидких металлов является наиболее простым и дешевым способом изготовления порошков металлов с температурой плавления до 1600°C: алюминия, железа, стали, меди, цинка, свинца, никеля и других металлов и сплавов. Сущность измельчения расплава состоит в дроблении струи расплава либо газом или жидкостью, либо механическим распылением, либо сливанием струи расплава в жидкую среду (например, воду). Для распыления металл плавят в электропечах. В зависимости от свойств расплава и требований к качеству порошка распыление осуществляют воздухом, азотом, аргоном, гелием, а для защиты от окисления - инертным газом. Распыление воздухом – самый экономичный способ изготовления порошков. Основные параметры процесса распыления: давление и температура газового потока, температура расплава.

При различных условиях распыления получают частички порошка каплеобразной, шарообразной и других форм. Размеры частиц получают от одного до сотых долей миллиметра.

**Химико-металлургический метод.** Восстановление металлов из окислов и солей. Простейшая реакция восстановления может быть представлена так:



где Me – любой металл, А – неметаллическая составляющая (кислород, хлор, фтор, солевой остаток и др.) восстанавливаемого химического соединения металла, X – восстановитель, Q – тепловой эффект реакции.

Восстановителем может быть то вещество, которое при выбранной температуре процесса имеет большее химическое сродство к неметаллической составляющей восстанавливаемого соединения, чем получаемый металл. В качестве восстановителей используют – водород, окись углерода, диссоциированный аммиак, конвертированный природный газ, эндотермический и природные газы, кокс и древесный уголь, металлы (кальций, магний, алюминий, натрий, кадмий и др.). Прочность химической связи соединения MeA и образующегося соединения восстановителя XA позволяет оценить возможность протекания реакции восстановления. Количественной мерой ("мерой химического срод-

ства") является величина свободной энергии, высвобождающейся при образовании соответствующего химического соединения. Чем больше выделяется энергии, тем прочнее химическое соединение. Иными словами реакция восстановления возможна в том случае, когда при соединении восстановителя ХА выделяется энергии больше, чем при образовании соединения металла МеА по реакции  $Me+A=MeA$ . В реакции восстановления всегда должна выделяться тепловая энергия.

**Электролиз.** Этот способ наиболее экономичен при производстве химически чистых порошков меди. Физическая сущность электролиза (рис.3.3) состоит в том, что при прохождении электрического тока водный раствор или расплав соли металла, выполняя роль электролита, разлагается, металл осаждается на катоде, где его ионы разряжаются  $Me+ne=Me$ .

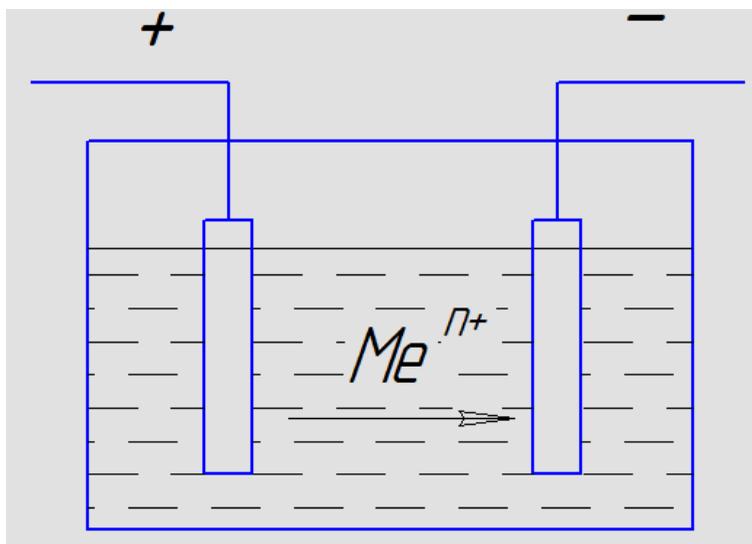


Рис. 3.3. Схема процесса электролиза

Сам процесс электрохимического превращения происходит на границе электрод (анод или катод) – раствор. Источником ионов выделяемого металла служит, как правило, анод, состоящий из этого металла, и электролит, содержащий его растворимое соединение. Такие металлы как никель, кобальт, цинк выделяются из любых растворов в виде однородных плотных зернистых осадков. Серебро и кадмий осаждаются из простых растворов в форме разветвленных кристаллитов, а из растворов цианистых солей – в виде плотных осадков. Размеры частиц осаждаемого порошка зависят от плотности тока, наличия коллоидов и

## Технология машиностроения

поверхностно активных веществ. Очень большое влияние на характер осадков оказывает чистота электролита, материал электрода и характер его обработки.

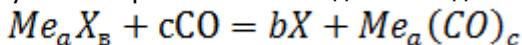
Производительность электролиза оценивается на основании закона Фарадея по электрохимическому эквиваленту:

$$q = c \cdot J \cdot T$$

где  $q$  – количество выделившегося на электроде порошка, г;  $J$  – сила тока, А;  $T$  – время, ч;  $c$  – электрохимический эквивалент.

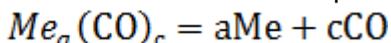
**Карбонильный процесс.** Карбонилы – это соединения металлов с окисью углерода  $Me_a(CO)_c$ , обладающие невысокой температурой образования и разложения. Процесс получения порошков по этому методу состоит из двух главных этапов:

- получение карбонила из исходного соединения:



- 

бразование металлического порошка:



Основным требованием к таким соединениям является их легколетучесть и небольшие температуры образования и термического разложения (кипения или возгонки). На первой операции – синтез карбонила – отделение карбонила от ненужного вещества  $X$  достигается благодаря летучести карбонила. На втором этапе происходит диссоциация (разложение) карбонила путём его нагрева. При этом возникающий газ  $CO$  может быть использован для образования новых порций карбониллов. Для синтеза карбониллов используют металлсодержащее сырьё: стружку, обрезки, металлическую губку и т.п. Карбонильные порошки содержат примеси углерода, азота, кислорода (1 – 3%). Очистку порошка производят путем нагрева в сухом водороде или в вакууме до температуры 400 – 600°C. Этим методом получают порошки железа, никеля, кобальта, хрома, молибдена, вольфрама.

### 3.2. Свойства порошков

Для рационального приготовления шихты необходимо учитывать свойства порошков. Различают химические, физические и технологические свойства.

К химическим свойствам относятся химический состав, токсичность и пирофорность.

Химический состав характеризует содержание компонентов и примесей и определяет склонность порошка взаимодействовать

## Технология машиностроения

вать с другими веществами. Химический состав порошков зависит от химического состава сырья, предназначенного для получения порошка, а также от технологии процесса и определяется такими же методиками, как и химический состав компактных материалов. В качестве примера приведем химический состав некоторых марок нелегированного железного порошка отечественного и импортного производства (табл. 3.1, 3.2).

Таблица 3.1 Химический состав железных порошков

Марка порошка	Массовое содержание компонентов, %						
	Mn	Si	C	O	N	S.	P
ПЖВ 2.160.26	0,36	0,13	0,07	0,34	0,002	0,011	0,01
ПЖВ 3.160.26	0,13	0,13	0,03	0,42	0,008	0,02	0,011
ПЖР 3.200.28	0,066	0,015	0,008	0,39	0,002	0,011	0,011
ASC 100.29	0,06	0,007	0,016	0,11	0,008	0,01	0,004

Таблица 3.2 Химический состав железных порошков фирмы «Höganäs»

Марка порошка	Массовое содержание компонентов, %					
	Mo	Ni	C	O	H	Cu
Astaloy 85 Mo	0,85	-	0,02	0,09	-	-
Distaloy HP-1	1,5	4	0,01	-	0,1	2
ABC100.30	-	-	0,003	0,06	-	-

NC100.24	-	-	0,02	-	0,14	-
----------	---	---	------	---	------	---

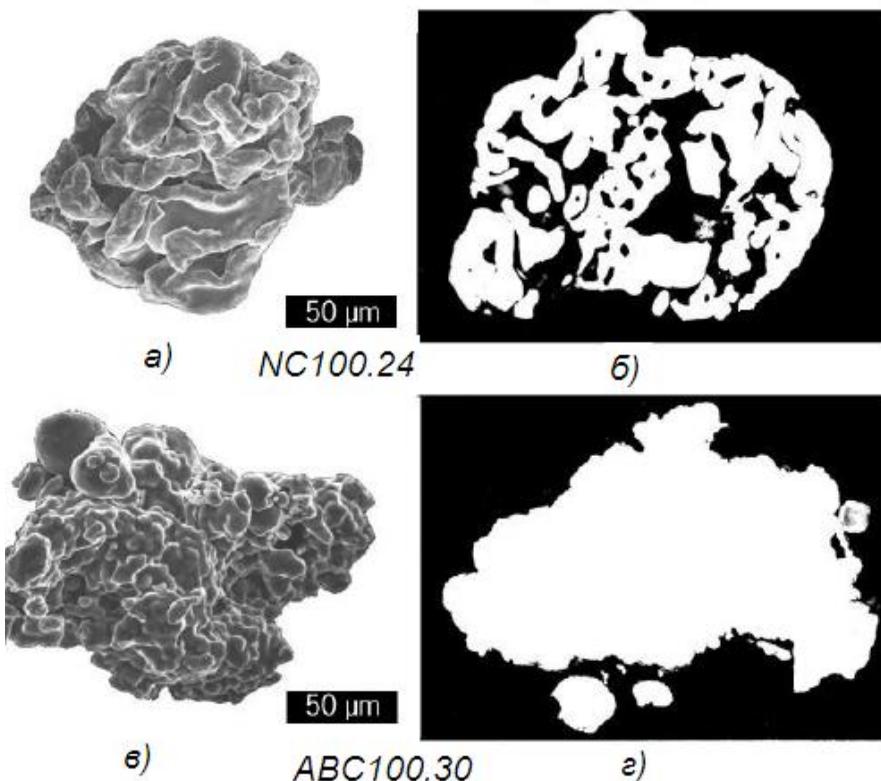


Рис. 3.4 Внешние формы (а,в) и внутреннее строение (б, г) частиц губчатого железного порошка NC100.24 (а,б) и водно-распыленного железного порошка ABC100.30 (в,г)

Порошок Astaloy 85 Mo, легированный 0,85% молибдена. Данный порошок обладает высокой сжимаемостью и однородной микроструктурой после спекания. Эти свойства делают его отличным материалом для изготовления деталей, требующих высокую твердость в сочетании с хорошей жесткостью.

Порошок Distaloy HP-1 основан на порошке марки Astaloy Mo, который дополнительно содержит 4% мелкодисперсного порошка никеля и 2% медного порошка.

## Технология машиностроения

Порошок NC100.24 является одним из наиболее широко используемых сортов в производстве спеченных деталей. В связи с неровной поверхностью и губчатой структуры частиц, он имеет высокую прочность, а в связи с низким содержанием кислорода и углерода – высокую степень прессуемости.

Порошок ABC100.30 характеризуется высокой сжимаемостью. Это особенно хорошо подходит для производства деталей с высокой плотностью. Плотность до  $7,4 \text{ г/см}^3$  достигается в ходе одной операции прессования.

В металлических порошках содержится значительное количество газов, что увеличивает хрупкость материала частиц и затрудняет их формование. Поэтому целесообразно обрабатывать порошки в вакууме, что обеспечивает интенсивное газовыделение.

*Токсичностью* называется способность материала оказывать вредное влияние на живые организмы. В отличие от компактных материалов порошки всех материалов токсичны. Степень опасности для человека металлической пыли зависит от её химического состава, степени окисленности и размера частиц. Поэтому на шихтоприготовительных участках применяются дополнительные меры по обеспечению охраны труда.

*Пирофорностью* называется способность материала самовоспламеняться на воздухе. В компактном состоянии лишь немногие металлы могут воспламеняться при относительно невысоких температурах (магний, титан, гафний), тогда как в мелкодисперсном состоянии порошки практически всех металлов пирофорны. Воспламеняемость порошка зависит от того, находится ли он в свободно насыпанном состоянии (аэрогель) или в виде взвеси в окружающей атмосфере (аэрозоль). Для аэрогелей определяют не только температуру самовозгорания, но и температуры самонагрева и тления. Аэрозоли более пирофорны, чем аэрогели. Поэтому в промышленных условиях требуется постоянный контроль за содержанием порошков в воздухе.

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

Металлический порошок представляет собой совокупность частиц размером от долей микрометра до миллиметра. В зависимости от размеров частиц порошки условно подразделяются на следующие группы: нано-(размер частиц  $<0,01 \text{ мкм}$ ), ультра-(размер частиц  $0,01 - 0,1 \text{ мкм}$ ), высокодисперсные (размер частиц  $0,1 - 10 \text{ мкм}$ ), мелкие (размер частиц  $10 - 40 \text{ мкм}$ ), средние (размер частиц  $40 - 250 \text{ мкм}$ ), крупные (размер частиц  $250 - 1000$

## Технология машиностроения

мкм). Частицы размером от 1 до 3 мм называют гранулами.

Совокупность выраженных в процентах количественных содержаний фракций порошка называется гранулометрическим составом. Он характеризует распределение частиц по размерам и определяется чаще всего ситовым анализом. Навеску порошка (обычно 100 или 50 г) просеивают через набор стандартных сит с квадратными отверстиями различной величины. Просеивание продолжают до окончания отсева или в течение времени, указанного в нормативных документах. Долю порошка, оставшегося на сите, называют плюсовой фракцией, а прошедшую через сито – минусовой. Термином «субситовая фракция» обозначают долю порошка, прошедшего через сито с наименьшим отверстием. После отсева каждую фракцию порошка, оставшегося на сите, высыпают и взвешивают. Относительное содержание каждой из фракций выражают в процентах от массы испытываемой пробы. Фракцию, количество которой составляет <0,1%, обозначают как следы. Результаты ситового анализа представляются в виде таблицы. В качестве примера приведем гранулометрический состав железного порошка (табл. 3.3).

Таблица 3.3 Гранулометрический состав железного порошка

Категория	Класс	Выход фракции, % при размере частиц, мм						
		2,5–0,45	0,45–0,25	0,25–0,16	0,16–0,1	0,1–0,071	0,071–0,056	Менее 0,056
II		90–100	0–10					
			10–40	50–80	10–30			
					10–30	20–35	10–30	5–20

Седиментический анализ основан на зависимости скорости осаждения частиц в вязкой среде при ламинарном движении. Обычно гранулометрический состав порошка определяют по скорости накопления осадка порошка, оседающего из суспензии. В течение анализа непрерывно или через определенные промежутки времени взвешивают осадок и получают зависимость массы осадка от продолжительности оседания.

При металлографическом методе применяется оптический микроскоп, оснащенный видеосистемой, связанной с компьюте-

## Технология машиностроения

ром, что позволяет значительно снизить трудоемкость измерения.

Таблица 3.4 Форма частиц порошка, полученного различными методами

Распыление жидкого металла	Восстановление окалины	Измельчение в шаровых мельницах	Измельчение в вихревых мельницах	Электролиз растворов
Сферическая	Губчатая	Осколочная	Тарельчатая	Дендритная

Форма частиц является качественной оценкой порошка и оказывает существенное влияние на его технологические свойства и через них на плотность, прочность и однородность свойств прессовок. Определение формы частиц является одной из самых простых и доступных характеристик металлического порошка и производится при микроскопическом анализе.

При последующей обработке порошка (грануляция, размол, восстановительный отжиг) форма частицы может изменяться.

*Удельная поверхность* представляет собой отношение суммы площадей поверхностей частиц порошка к его массе. Эта характеристика порошка зависит от размера и формы частиц, а также от степени развитости их поверхности. Наиболее часто для определения удельной поверхности используют методы измерения его газопроницаемости и адсорбции газовой средой.

Первый метод основан на оценке фильтрационных процессов при прохождении потока газа через порошок. Скорость фильтрации обратно пропорциональна квадрату удельной поверхности порошка.

В основе адсорбционных методов, которые являются более универсальными, лежит определение количества вещества, адсорбированного на поверхности твердых частиц в виде плотно-го мономолекулярного слоя.

Удельная поверхность колеблется в широком диапазоне ( $10 - 10000 \text{ м}^2/\text{кг}$ ) и зависит от гранулометрического состава и формы частиц порошка.

*Плотность частицы* порошка зависит от природы ее материала, химической частоты, совершенства структуры, равномерности распределения легирующих элементов и фаз.

Обычно плотность частицы несколько отличается от плотности, приводимой в справочниках для соответствующих

## Технология машиностроения

материалов, что объясняется присутствием остаточных оксидов и микропор.

*Микротвердость* характеризует пластические свойства материала частиц порошка, его способность к деформированию и определяется на микротвердомерах (ПМТ-2, ПМТ-3). Также как и у компактных материалов микротвердость порошка зависит от структурного состояния материала, содержания примесей и неметаллических включений.

К технологическим свойствам относятся насыпная и относительная плотность, текучесть, формуемость, уплотняемость и спекаемость.

*Насыпная плотность* определяется как плотность свободно насыпанного порошка. Общеизвестная методика измерения насыпной плотности заключается в заполнении порошком кюветы известного объема  $V_k$  путем просыпания порошка через волюмометр (рис.3.5).-

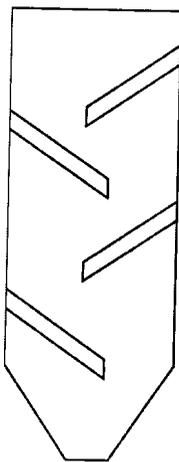


Рис.3.5. Схема волюмометра

Определив массу порошка ( $m$ ), заполнившего кювету, можно рассчитать насыпную плотность  $\rho_{нас}$  :

$$\rho = \frac{m}{V_k}$$

Значение насыпной плотности зависит от формы и гранулометрического состава порошка и влияет на габариты засыпной полости формирующего инструмента.

Величину, обратную насыпной плотности, называют *насыпным объемом*.

В технологии ПМ вводится понятие плотность утряски, связанное с уменьшением объема, занимаемого свободно насы-

## Технология машиностроения

панным порошком, при воздействии не него механических виброколебаний.

*Относительная плотность* представляет собой отношение насыпной плотности порошка к плотности его материала и выражается в %.

*Текучестью* называется способность порошка заполнять полость матрицы. Она оценивается временем истечения определенной массы порошка через калиброванное отверстие в воронке и зависит от материала частицы, а также формы, гранулометрического состава и удельной поверхности частиц.

*Формуемостью* называется способность порошковой пресовки сохранять форму, полученную при прессовании порошка в матрице в заданном интервале значений пористости. Она выражается интервалом значений пористости, при котором обеспечивается сохранение заданной формы. Минимальное значение этого интервала соответствует минимальному давлению прессования, при уменьшении которого частицы порошка не образуют консолидированное тело, то есть пресовка рассыпается после её извлечения из матрицы. Максимальное значение – максимальному давлению прессования. При большем давлении прессования в пресовке появляются расслойные трещины, что является неисправимым браком. Формуемость порошка зависит от формы, размеров и состояния поверхности его частиц.

*Уплотняемостью* порошка называется его способность уменьшать занимаемый объем под воздействием давления. Эта характеристика определяется по плотности пресовок, изготовленных при давлениях прессования 200, 400, 600, 700 и 800 МПа. Данные по уплотняемости представляют в виде таблицы или графика, описывающего зависимость плотности пресовки от давления прессования.

*Спекаемостью* называется способность порошка превращаться в консолидированное тело при спекании. Спекание представляет собой технологическую операцию, заключающуюся в нагреве, выдержке и охлаждении порошка или порошковой пресовки. Спекаемость оценивается по значению свойств, характеризующих степень консолидации порошков, например, по значениям прочности, электропроводности, изменению плотности (усадки).

Достоверность оценки свойств порошков зависит от правильности отбора и подготовки представительной пробы. По стандарту от контролируемой партии порошка отбирают общую пробу – совокупность всех взятых разовых проб (до 30% массы порошка). Для отбора разовых проб применяют щупы различных

типов. Подготовленную представительную пробу делят на две примерно равные части, которые помещают в отдельные упаковки. Одна из этих частей пробы предназначена для проведения испытаний, другая хранится на случай арбитражных анализов при разногласии в оценке качества порошка.

## 4. Технологические операции порошковой металлургии

Выбор технологического процесса ПМ определяется требованиями к готовой детали, заданными на чертеже. Несмотря на большое разнообразие технологических возможностей ПМ её технология строится из операций деформационного и термического воздействий на исходный материал, в ходе которых происходят процессы, обеспечивающие формирование порошкового материала с заданным уровнем функциональных свойств. Рассмотрим сущность этих операций.

### 4.1. Прессование порошка

Сущность процесса прессования заключается в деформировании некоторого объема сыпучего порошкового тела обжатием, при котором происходит уменьшение первоначального объема и формирование заготовки (прессовки) с заданными формой, размерами и свойствами.

Перед прессованием порошок подвергается предварительной обработке: отжигу, классификации, приготовлению смеси, дозированию.

**Отжиг** порошков применяют с целью повышения их пластичности и прессуемости за счет восстановления остаточных окислов и снятия наклепа. Нагрев осуществляют в защитной среде (восстановительной, инертной или вакууме) при температуре  $0,4 - 0,6$  абсолютной температуры плавления металла порошка. Наиболее часто отжигают порошки, полученные механическим измельчением, электролизом и разложением карбониллов.

**Классификация порошков** – процесс разделения порошков по величине частиц. Порошки с различной величиной частиц используют для составления смеси, содержащей требуемый процент каждого размера. Классификацию частиц размером более  $40$  мкм производят в проволочных ситах. Если свободный просев затруднен, то применяют протирочные сита. Более мелкие порошки классифицируют на воздушных сепараторах.

**Приготовление смесей.** В производстве для изготовления изделий используют смеси порошков разных металлов. Смешивание порошков есть одна из важных операций и её задачей

## Технология машиностроения

является обеспечение однородности смеси, существенно влияющей на свойства изделий. Наиболее часто применяют механическое смешивание компонентов в шаровых мельницах и смесителях. Соотношение шихты и шаров по массе 1:1. Смешивание сопровождается измельчением компонентов. Смешивание без измельчения проводят в барабанных, шнековых, лопастных, центробежных, планетарных, конусных смесителях.

Равномерное и быстрое распределение частиц порошков в объеме смеси достигается при близкой по величине плотности смешиваемых компонентов. При большой разнице величины плотностей наступает расслоение компонентов по частям: сначала более легкие с каким-либо более тяжелым, затем – остальные компоненты. Смешивание всегда лучше происходит в жидкой среде, что не всегда экономически целесообразно из-за усложнения технологического процесса.

При приготовлении шихты некоторых металлических порошков высокой прочности (вольфрама, карбидов металлов) для повышения формуемости в смесь добавляют пластификаторы – вещества смачивающие поверхность частиц. Пластификаторы должны удовлетворять требованиям: обладать высокой смачивающей возможностью, выгорать при нагреве без остатка, легко растворяться в органических растворителях. Раствор пластификатора обычно заливают в перемешиваемый порошок, затем смесь сушат для удаления растворителя. Высушенную смесь – просеивают через сито.

**Дозирование** – это процесс отделения определенных объёмов смеси порошка. Различают объемное дозирование и дозирование по массе. Объемное дозирование используют при автоматизированном формовании изделий. Дозирование по массе наиболее точный способ, этот способ обеспечивает одинаковую плотность формования заготовок.

После этих операций проводят прессование порошков, которое сопровождается их уплотнением, взаимным перемещением частиц, их деформированием, развитием межчастичной контактной поверхности и установлением межчастичных связей. В зависимости от интенсивности изменения плотности при увеличении давления прессования различают следующие этапы прессования. На первом этапе наблюдается наиболее интенсивное уплотнение порошкового тела вследствие относительного перемещения частиц и их плотной упаковкой. Эту стадию прессования называют структурной деформацией порошкового тела. При этом пористость прессовки составляет 35 – 40%. Второй этап характеризуется тем, что частицы порошка, упакованные максимально плот-

но, оказывают определенное сопротивление сжатию, давление прессования возрастает, развивается пластическая деформация в контактных зонах. На третьем этапе давление прессования превышает предел упругости материала порошка, и уплотнение происходит в результате пластического течения материала частиц в поры. На практике происходит наложение этих этапов. В результате приложения давления прессования преодолеваются силы межчастичного трения, силы трения частиц порошка о стенки матрицы и сопротивление пластической деформации материала частиц.

Обычно прессование порошковой шихты производят на гидравлических прессах без нагрева, поэтому эту технологическую операцию называют **статическим холодным прессованием (СХП)**.

По мере повышения давления прессования интенсивность уплотнения понижается. На практике при этой операции достигается пористость прессовки не менее 10%. Дальнейшему увеличению плотности препятствуют следующие факторы:

- повышение силы трения частиц порошка о стенки матрицы;
- образование закрытых пор и повышение давления захлопнутого в них воздуха по мере уменьшения их объема;
- снижение пластичности материала частиц в результате наклепа при холодной пластической деформации.

Из-за трения частиц порошка о стенки матрицы возникает неравномерность плотности порошкового материала по высоте прессовки. Наиболее уплотненные слои находятся в верхней части прессовки, наименее уплотненные – в её нижней части. Разноплотность возрастает с повышением высоты прессовки и может привести к нежелательному искажению размеров и формы прессовки при спекании. Для её уменьшения применяют двустороннее прессование. Известны две схемы двустороннего прессования (рис. 4.1).

## Технология машиностроения

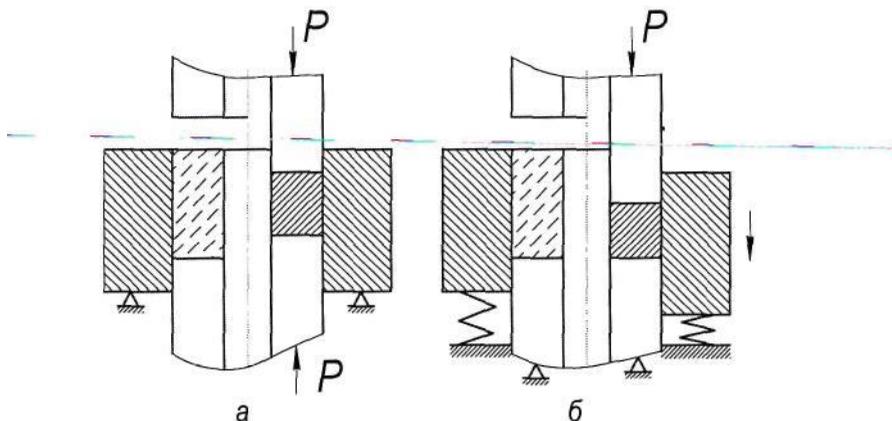


Рис.4.1. Схемы двустороннего прессования: а– с неподвижной матрицей; б– с плавающей матрицей

По первой схеме (рис. 4.1,а) матрица закреплена неподвижно, давление прессования прикладывается к подвижным верхнему и нижнему пуансонам, длина рабочих ходов которых ограничена упорами. При реализации второй схемы (рис. 4.1,б) нижний пуансон неподвижен, а матрица устанавливается на упругую подставку. Давление прессования прикладывается только к верхнему пуансону. В ходе прессования происходит перемещение матрицы вниз за счет силы трения уплотняемого порошка о стенки матрицы. Таким образом, происходит относительное перемещение матрицы и нижнего пуансона.

При прессовании порошковой шихты возникает давление уплотняемого порошка на боковые стенки матрицы, которое называют боковым давлением. В отличие от жидкости, равномерно передающей приложенное к ней давление во всех направлениях, в порошке наблюдается значительная неравномерность его распределения. Степень сжатия порошка во взаимно перпендикулярных сечениях неодинакова, на боковую поверхность матрицы передается значительно меньшее давление, чем в направлении прессования. Эта неравномерность оценивается коэффициентом бокового давления  $\xi$ , представляющего собой отношение бокового давления к давлению прессования. Значение  $\xi$  обычно составляет 0,2 – 0,8 и возрастет с увеличением пластичности материала порошка. Например, для свинца  $\xi=0,7$ , меди  $\xi=0,54$ , железа  $\xi=0,39$ , вольфрама  $\xi=0,2$ .

После снятия давления и извлечения прессовки из полости матрицы происходит увеличение её размеров в результате действия упругих сил, называемое упругим последствием. Ос-

Новая часть упругого расширения прессовки реализуется почти мгновенно в момент выхода из матрицы, остальная часть – в течение нескольких дней. Величина упругого последействия зависит от характеристик исходного порошка, давления прессования, упругих свойств пресс-формы. Эффект упругого последействия по высоте прессовки составляет 5 – 6%, в поперечном направлении – 1 – 3%. Расширение прессовки в результате упругого последействия вызывает растягивающие напряжения на контактных поверхностях, что может привести к разрыву контактов между частицами на большом протяжении, нарушению целостности прессовки, называемому расслоем.

Рассмотрим разновидности формования.

**Изостатическое прессование.** Изостатическое прессование – формирование порошковой шихты в эластичной деформируемой оболочке в условиях всестороннего сжатия (рис. 4.2).

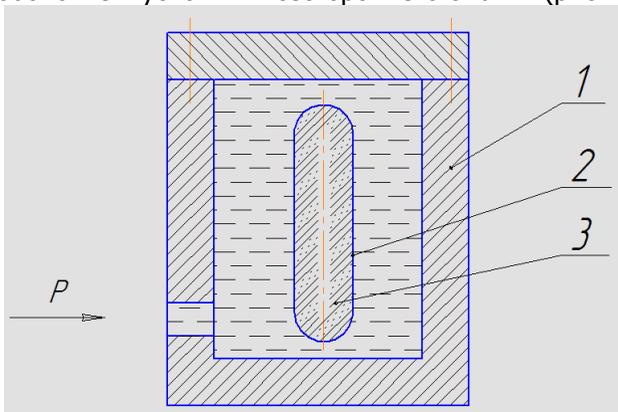


Рис. 4.2. Схема гидростатического прессования

Сущность процесса заключается в том, что порошок 3, заключенный в эластичную резиновую или металлическую оболочку 2, подвергают равномерному и всестороннему обжатию в специальных герметизированных камерах 1. Изостатическое прессование позволяет получать из порошка крупногабаритные заготовки с равномерной во всех направлениях плотностью. Наиболее распространенными видами такого способа формования являются гидростатическое и газостатическое формование. В первом случае сжимающее усилие создает жидкость (масло, вода, глицерин). Порошок засыпается в эластичную, например резиновую оболочку, и помещается в рабочую камеру гидростата. Рабочая жидкость, подаваемая насосом высокого давления, всесторонне и равномерно сжимает порошок, обеспечивая формирование заготовки. При газостатическом прессовании обжатие порошкового тела

## Технология машиностроения

происходит под действием газа (гелия, аргона и др.). Давление рабочей среды выше предельного рабочего давления компрессора создается нагревом газа. На промышленных газостатах при температуре 1350°C создается давление 100 МПа. Так как газ, находящийся в герметически закрытой эластичной оболочке, не имеет выхода в атмосферу, применяют предварительную дегазацию (вакуумирование) уплотняемого порошка. По сравнению с прессованием в пресс-форме в случае изостатического прессования трение частиц о стенки оболочки невелико. Коэффициент бокового давления приближается к единице, так как сжатие в этом случае является всесторонним.

**Прокатка.** Прокатка – формование порошковой шихты между валками прокатного стана. Прокатка характеризуется высокой производительностью и сравнительно низкой энергоемкостью. Прокаткой получают полосы, ленты из многих порошков в широком диапазоне плотностей. Особенно целесообразно применение этой технологической операции для получения тонких заготовок с большой поверхностью, отличающихся изотропностью и равномерной плотностью.

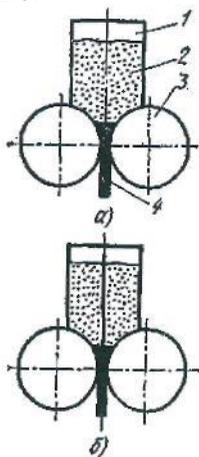


Рис. 4.3. Схема прокатки порошков

Порошок непрерывно поступает из бункера 1 в зазор между валками (рис.4.3, а). При вращении валков 3 происходит обжатие и вытяжка порошка 2 в ленту или полосу 4 определенной толщины. Процесс прокатки может быть совмещен со спеканием и окончательной обработкой получаемых заготовок. В этом случае лента проходит через проходную печь для спекания, а затем поступает на прокатку, обеспечивающую заданную ее толщину.

Прокаткой получают ленты из различных металло-

## Технология машиностроения

керамических материалов (пористых, твердосплавных, фрикционных и др.). За счет применения бункеров с перегородкой (рис.4.3, б) изготавливают ленты из различных материалов (двухслойные).

Прокаткой из металлических порошков изготавливают ленты толщиной 0,02–3,0 мм и шириной до 300 мм. Применение валков определенной формы позволяет получить прутки различного профиля, в том числе и проволоку диаметром от 0,25 мм до нескольких миллиметров.

Прокатку порошка можно рассматривать как непрерывное прессование, в ходе которого различают три основных периода: начальный, установившийся и конечный. В начальный период полоса, выходящая из валков при их повороте на некоторый угол, характеризуется переменной толщиной и плотностью, изменяющимися по длине. При работе стана в зазор между валками поступают частицы порошка, которые при деформации вызывают расклинивающее действие. Валки упруго раздвигаются, и происходит поступление нового количества порошка, что в свою очередь приводит к повышению давления прокатки и упругой деформации стана. В тот момент, когда процесс формования уравновешивается сопротивлением стана, наступает установившийся период прокатки. В этот период выходящая полоса имеет постоянную плотность. В конечном периоде в связи с разгрузкой валков происходит обратное явление

Метод горячей штамповки нагретой пористой заготовки относится к широко распространенным технологическим процессам ПМ. Он включает в себя следующие технологические операции: статическое холодное прессование, спекание, кратковременный нагрев в защитных средах или в вакууме пористых заготовок и их последующую допрессовку динамическими нагрузками в закрытых или открытых штампах. Основной вклад в формование детали и формирование порошкового материала вносит последняя операция. Достоинствами этого метода являются возможность получения практически беспористого порошкового материала, обладающего комплексом высоких физико-механических и эксплуатационных характеристик, высокая производительность, достигаемая за счет применения быстроходных прессов или молотов. Продолжительность горячей допрессовки пористых порошковых формовок определяется долями секунды. Это позволяет избежать существенного повышения температуры пресс-форм, применять для их изготовления стандартные штамповые стали. Получаемые по этой технологии материалы описаны в разделе 5.1, а особенности технологии – в разделе 7.2.

## 4.2. Спекание порошка

Спекание – технологическая операция, заключающаяся в термической обработке спрессованных заготовок с целью придания им требуемых физико-механических свойств. Плотность, прочность и другие физико-механические свойства спеченных изделий зависят от условий изготовления: давления, прессования, температуры, времени и атмосферы спекания и других факторов.

Характерной особенностью спекания является то, что оно проводится без расплавления основного компонента шихты. Обычно спекание проводят при температуре 0,7 – 0,9 от абсолютной температуры плавления этого компонента. При спекании происходят гомогенизация материала прессовки, если используются шихты из смеси порошков компонентов, развитие межчастичного сцепления, усадка и сфероидизация пор.

В практике спекания различают твердофазное и жидкофазное спекание. В последнем случае легкоплавкие компоненты смеси порошков расплавляются.

**Твердофазное спекание.** При твердофазном спекании протекают следующие основные процессы: поверхностная и объемная диффузия атомов, усадка, рекристаллизация, перенос атомов через газовую среду.

При нагревании прессовки интенсифицируются объемная и поверхностная диффузии. Атомы металла, расположенные на поверхности пор, имеют различную подвижность. Наименее подвижны атомы, расположенные внутри контактных участков частиц порошка, наиболее подвижны атомы, расположенные на выступах поверхности частиц. Вследствие различной подвижности атомов обусловлен переход значительного количества атомов к контактному участку. Поэтому происходит расширение контактных участков и округление пустот между частицами без изменения объема при поверхностной диффузии.

Сокращение суммарного объема пор возможно только при объемной диффузии. При этом происходит изменение геометрических размеров изделия - усадка (рис.4.4). Усадка при спекании проявляется в изменении размеров и объема, и поэтому различают линейную и объемную усадку. Обычно усадка в направлении прессования больше, чем в поперечном направлении.

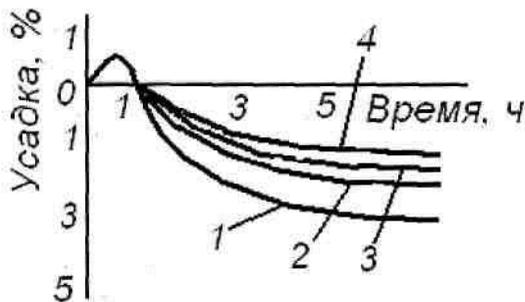


Рис.4.4. Усадка спрессованного порошка железа при 900° С при различном давлении: 1– 400 МПа; 2– 600 МПа; 3– 800 МПа; 4– 1000 МПа

Движущей силой процесса усадки при спекании является стремление системы к уменьшению запаса поверхностной энергии, что возможно только при сокращении суммарной поверхности частиц порошка. По этой причине порошки с развитой поверхностью уплотняются при спекании с наибольшей скоростью, как обладающие большим запасом поверхностной энергии.

В начальный период спекания наблюдается увеличение объема прессовки. Причинами этого является: снятие остаточных напряжений, наличие невосстанавливающихся окислов, фазовые превращения и выделение адсорбированных и образующихся при химических реакциях восстановления окислов газов. Рост объема спекаемых тел наблюдается при образовании закрытой пористости и когда расширение газов в закрытых порах вызывает увеличение объема.

При спекании происходят также рекристаллизационные процессы. В отличие от рекристаллизации компактных материалов миграция границ зерен в порошковых материалах затруднена тормозящим влиянием неметаллических включений, порами, примесными сегрегациями.

Увеличение давления прессования приводит к уменьшению усадки (объемной и линейной), повышению всех показателей прочности – сопротивлению разрыву и сжатию, твердости. С повышением температуры плотность и прочность спеченных изделий возрастает тем быстрее, чем ниже было давление прессования. Обычно температура спекания составляет 0,7 – 0,9 температуры плавления наиболее легкоплавкого материала, входящего в состав шихты (смеси порошков). Выдержка при постоянной температуре вызывает сначала резкий, а затем более медленный рост плотности, прочности и других свойств спеченного изделия.

Наибольшая прочность достигается за сравнительно короткое время и затем почти не увеличивается. Время выдержки для различных материалов длится от 30... 45 мин до 2 - 5 ч. Атмосфера спекания влияет на показатели качества. Плотность изделий выше при спекании в восстановительной, чем при спекании в нейтральной среде. Наиболее быстро проходит спекание в вакууме, которое по сравнению со спеканием в нейтральной среде обычно начинается при более низких температурах и дает повышенную плотность изделия. Интенсификация процесса спекания достигается специальными приемами. Для этого используют химические и физические способы активирования спекания. Химическое активирование заключается в изменении состава атмосферы спекания. Так, например, добавка в атмосферу спекания хлористых или фтористых соединений способствует активному соединению с ними выступов частичек, а образующиеся соединения снова восстанавливаются до металла, атомы которого конденсируются в местах с минимальным запасом свободной энергии. Оптимальной является 5 – 10%-ная концентрация хлористого водорода в водородной восстановительной среде, интенсивное уплотнение спекаемой заготовки наблюдается при добавке в порошок изделия малого количества металла с меньшей температурой плавления. Например, к вольфраму добавляют никель; к железу - золото и т.п. В настоящее время широко применяют физические способы активирования спекания: циклическое изменение температуры, воздействие вибраций или ультразвука, облучение прессовок, наложение сильного магнитного поля.

**Жидкофазное спекание.** При жидкофазном спекании в случае смачивания жидкой фазой твердой фазы увеличивается сцепление твердых частичек, а при плохой смачиваемости жидкая фаза тормозит процесс спекания, препятствуя уплотнению. Смачивающая жидкая фаза приводит к увеличению скорости диффузии компонентов и облегчает перемещение частиц твердой фазы. При жидкофазном спекании можно получить практически беспористые изделия. Различают спекание с жидкой фазой, присутствующей до конца процесса спекания, и спекание с жидкой фазой, исчезающей вскоре после ее появления, когда конечный период спекания происходит в твердой фазе.

## 5. Порошковые и композиционные материалы

### 5.1. Порошковые материалы

Порошковыми называют материалы, изготавливаемые на основе металлических и неметаллических порошков. Они классифи-

цируются по остаточной пористости и назначению. По первому признаку различают пористые и высокоплотные порошковые материалы. Пористые порошковые материалы имеют остаточную пористость в пределах 10-35% и изготавливаются путем прессования металлических порошков в изделия необходимой формы и размеров и последующего спекания сформованных изделий в вакууме или защитной атмосфере. Для изготовления высокоплотных порошковых материалов используют технологии, включающие в себя термомеханическое воздействие на пористую заготовку, например, горячую допрессовку нагретой пористой заготовки. Значения остаточной пористости колеблются в пределах 0,5 – 3%. По назначению порошковые материалы разделяются на две группы: 1) конструкционные материалы для изготовления деталей машин (валы, рычаги, шестерни, втулки), к которым предъявляются требования по конструктивной прочности; 2) материалы для деталей специального назначения, которые должны обладать износостойкостью, коррозионной стойкостью, красностойкостью, жаропрочностью, низким коэффициентом трения и т.д.

**Конструкционные порошковые материалы** имеют широкий диапазон химического состава и свойств. Очевидно, что механические свойства зависят от значения остаточной пористости, а следовательно, от технологии их получения. По уровню допускаемого нагружения они разделяются на четыре типа: ненагруженные ( $\sigma_b < 20$  МПа, остаточная пористость 20 – 25%); малонагруженные ( $\sigma_b = 200 - 300$  МПа, остаточная пористость 12 – 18%); средненагруженные ( $\sigma_b = 450 - 600$  МПа, остаточная пористость 8 – 12%); высоконагруженные ( $\sigma_b = 600-1000$  МПа, остаточная пористость менее 3%). Чаще всего в качестве конструкционных материалов используют углеродистые и легированные стали. Они маркируются аналогично компактным. Приведем механические свойства углеродистых сталей (табл. 5.1).

Таблица 5.1 Механические свойства углеродистых сталей (С-0,1%)

Пористость, %	$\sigma_b$ МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	КС, кДж/м <sup>2</sup>
20	120-140	3	–	100~

## Технология машиностроения

12	170-210	6	–	180
3	300	2	–	–
2	380	15	36	900

Легированные порошковые стали получают из смеси порошков компонентов, легированных порошков, лигатур, пропиткой железного пористого каркаса жидким металлом или сплавом.

Приведем механические свойства некоторых легированных сталей (табл. 5.2).

Таблица 5.2 Механические свойства легированных сталей

Марка стали	Пористость, %	$\sigma_b$ , МПа	НВ, МПа	КС, кДж/м <sup>2</sup>
10Д2п	15-20	250	–	70
40Д3п	2	1100	–	530
40Хп	13	500	–	ПО
40Хп	2	1150	–	580
10Н4Д2п	10-13	250	800	–
20Н2Д2п	2	1150	1500	–

Широкое применение находят порошковые антифрикционные материалы. Из них изготавливают подшипники скольжения для различных отраслей промышленности. В антифрикционных материалах с пористостью 10 – 35% металлическая основа является твердой составляющей, а поры, заполняемые маслом, графитом или пластмассой, выполняют роль мягкой составляющей. Пропитанные маслом пористые подшипники способны работать без дополнительной смазки в течение нескольких месяцев, а подшипники со специальными «карманами» для запаса масла в течение 2–3 лет. Во время работы подшипника масло нагревается, вытесняется из пор, образуя смазочную пленку на трущихся поверхностях. Таким образом, они могут работать без принудительного смазывания за счет «выпотевания» масла, находящегося в порах. Такие подшипники широко применяют в машинах для пищевой и текстильной промышленности, где попадание смазки на продукцию недопустимо.

Для пористых антифрикционных материалов используют

## Технология машиностроения

железо-графитовые, железомедно-графитовые, бронзографитовые, алюминиево-медно-графитовые и другие композиции. Процентный состав этих композиций зависит от эксплуатационных требований, предъявляемых к конструкциям деталей. Антифрикционные порошковые сплавы имеют низкий коэффициент трения, легко прирабатываются, выдерживают значительные нагрузки и обладают хорошей износостойкостью.

Рассмотрим наиболее распространенные железографитовые композиции. Они маркируются ЖГр1, ЖГр2, ... ЖГр7. Цифра указывает содержание графита в %. Структура металлической основы железографитовых материалов должна быть перлитной с массовой долей связанного углерода  $-1,0\%$ . Такая структура допускает наиболее высокие скорости и нагрузки при наименьшем износе подшипников. Добавка к железографитовым материалам серы ( $0,8-1,0\%$ ) или сульфидов ( $3,5-4,0\%$ ), образующих сульфидные пленки на трущихся поверхностях, улучшает прирабатываемость, уменьшает износ и прихватываемость сопряженных деталей. Коэффициент трения железографита по стали при смазке  $0,07-0,09$ . Подшипники из железографита применяют при допустимой нагрузке не более  $1000-1500$  МПа и максимальной температуре  $100-200^\circ\text{C}$ .

Механические свойства железографита:  $\sigma_b = 180-300$  МПа и твердость  $60-120\text{HB}$ .

Для сравнения приведем характеристики бронзографита, содержащего  $8-10\%$  Sn и  $2-4\%$  графита (БрОГр10-2, БрОГр8-4). Коэффициент трения бронзографита по стали без смазывания  $0,04-0,07$  и со смазыванием  $0,05-0,007$ . Механические свойства бронзографита:  $\sigma_b = 30-50$  МПа, твердость  $25-50$  HB. Допустимая нагрузка  $400-500$  МПа и рабочая температура не выше  $200-250^\circ\text{C}$ .

Фрикционные материалы представляют собой сложные композиции на медной или железной основе. Коэффициент трения повышается добавкой асбеста, карбидов тугоплавких металлов и различных окислов. Для уменьшения износа в композиции вводят графит или свинец. Фрикционные материалы обычно применяют в виде биметаллических элементов, состоящих из фрикционного слоя, спеченного под давлением с основой (лентой или диском). Коэффициент трения по чугуны (трение без смазочного материала) для материала на железной основе составляет  $0,18-0,40$ , а на медной основе -  $0,17-0,25$ . Они способны выдерживать температуру в зоне трения до  $500-600^\circ\text{C}$ . Фрикционные сплавы на медной основе применяют для условий жидкостного трения в паре с закаленными стальными деталями (сегменты,

## Технология машиностроения

диски сцепления и т.д.) при давлении до 400 МПа и скорости скольжения до 40 м/с с максимальной температурой 300–350°C. Типичным фрикционным материалом на основе меди является сплав МК5, содержащий 4% Fe, 7% графита, 8% Pb, 9% Sn, 0–2%Ni.

Для работы в условиях трения без смазочного материала (деталей тормозов самолетов, тормозных накладок тракторов, автомобилей, дорожных машин, экскаваторов и т.д.) применяют материалы на железной основе. Наибольшее применение получил материал ФМК-11 (15% Си, 9% графита, 3% асбеста, 3% SiO<sub>2</sub> и 6% барита), фрикционные материалы изготавливают в виде тонких секторов (сегментов, полос) и крепят на стальной основе (для упрочнения).

Широко применяют порошковые материалы для **фильтрующих изделий**. Фильтры в виде втулок, труб, пластин из порошков Ni, Fe, Ti, Al, коррозионно-стойкой стали, бронзы и других материалов с пористостью 45–50% (размер пор 2–20 мкм) используют для очистки жидкостей и газов от твердых примесей.

В электротехнике и радиотехнике применяют порошковые магниты на основе Fe–Ni–Al–сплава (типа алнико) и др. Свойства порошковых магнитов нередко выше свойств литых магнитов.

Большое применение в машинах для контактной сварки, приборах связи получили контакты из порошковых материалов. Для этой цели применяют псевдосплавы тугоплавких металлов (W и Mo) с медью (МВ20; МВ40, МВ60 МВ80), серебром (СМ30, СМ60 СМ80, СВ30, СВ50, СВ85 и др.) или с оксидом кадмия (ОК8, ОК12, ОК15) и др. Контакты отличаются высокой прочностью, электропроводимостью и электроэрозионной стойкостью. Токо-съемники (щетки) изготавливают из порошков меди (или серебра) с графитом (углем).

Все больше порошковая металлургия применяется для изготовления специальных сплавов: жаропрочных на никелевой основе, дисперсионно-упрочненных материалов на основе Ni, Al, Ti и Cr. Методом порошковой металлургии получают различные материалы на основе карбидов W, Mo и Zr.

Сплавы на основе цветных металлов (АЛП–2, АЛПД–2–4, АЛПЖ12–4, БрПБ–2, БрПОЮ–2 , БрПОЮЦЗ–3, ЛП58Г2–2 и др.) нашли широкое применение в приборостроении электротехнической промышленности и электронной технике. В марке сплавов первые буквы, указывают класс материала («Ал» - алюминий, «Б»- бериллий, «Бр» - бронза, «Л» - латунь и т.д.), буква «П» - порошковый сплав и число после дефиса - пористость материала в процентах. Буквы («Д» - медь, «Ж» - железо, «Г» - марганец и

др.) и цифры в марке указывают состав сплава. Так же как обычные сплавы, порошковые сплавы на основе цветных металлов обладают высокой теплопроводностью и электропроводимостью, коррозионной стойкостью, хорошо обрабатываются резанием и давлением.

Спеченные алюминиевые сплавы (САС) применяют в тех случаях, когда путем литья и обработки давлением трудно получить соответствующий сплав. Изготавливают САС с особыми физическими свойствами. САС содержат большое количество легирующих элементов (например, САС1: 25-30% Si, 5-7% Ni, остальное Al). Из САС1 делают детали приборов, работающих в паре со сталью при температуре 20-200°C, которые требуют сочетания низкого коэффициента линейного расширения и малой теплопроводности.

В оптико-механических и других приборах применяют высокопрочные порошковые сплавы системы Al-Zn-Mg-Si (ПВ90, ПВ90Т1 и др.). Эти сплавы обладают высокими механическими свойствами, хорошей обрабатываемостью резанием и релаксационной стойкостью. Изделия из этих сплавов подвергают термической обработке.

Все более широкое применение получают компактные материалы из порошков углеродистой и легированной стали, бронз, латуней, сплавов алюминия и титана для изготовления всевозможных шестерен, кулачков, кранов, корпусов подшипников, деталей автоматических передач и других деталей машин.

## 5.2. Композиционные материалы

**Композиционные материалы с металлической основой.** Композиционные материалы состоят из металлической матрицы (чаще Al, Mg, Ni и их сплавы), упрочненной высокопрочными волокнами (волокнистые материалы) или тонкодисперсными тугоплавкими частицами, не растворяющимися в основном металле (дисперсно-упрочненные материалы). Металлическая матрица связывает волокна (дисперсные частицы) в единое целое.

## Технология машиностроения

Композиционные материалы волокнистым наполнителем (упрочнителем) по механизму армирующего действия делят на дискретные, в которых отношение длины волокна к диаметру  $l/d \sim 10 \div 10^3$ , и с непрерывным волокном, в которых  $l/d \rightarrow \infty$ . Дискретные волокна располагаются в матрице хаотично. Диаметр волокон от долей до сотен микрометров. Чем больше отношение длины к диаметру волокна, тем выше степень упрочнения.

Часто композиционный материал представляет собой слоистую структуру, в которой каждый слой армирован большим числом параллельных непрерывных волокон. Каждый слой можно армировать также непрерывными волокнами, сотканными в ткань, которая представляет собой исходную форму, по ширине и длине соответствующую конечному материалу. Нередко волокна сплетают в трехмерные структуры.

Композиционные материалы отличаются от обычных сплавов более высокими значениями временного сопротивления и предела выносливости (на 50-100 %), модуля упругости, коэффициента жесткости ( $E/\gamma$ ) и пониженной склонностью к трещинообразованию.

Применение композиционных материалов повышает жесткость конструкции при одновременном снижении ее металлоемкости.

Прочность композиционных (волокнистых) материалов определяется свойствами волокон; матрица в основном должна перераспределять напряжения между армирующими элементами. Поэтому прочность и модуль упругости волокон должны быть значительно больше, чем прочность и модуль упругости матрицы. Жесткие армирующие волокна воспринимают напряжения, возникающие в композиции при нагружении, придают ей прочность и жесткость в направлении ориентации волокон.

Для упрочнения алюминия, магния и их сплавов применяют борные ( $\sigma_b = 2500-3500$  МПа,  $E = 38-420$  ГПа) и углеродные ( $\sigma_b = 1400-3500$  МПа,  $E = 160-450$  ГПа) волокна, а также волокна из тугоплавких соединений (карбидов, нитридов, боридов и оксидов), имеющих высокие прочность и модуль упругости. Так, волокна карбида кремния диаметром 100 мкм имеют  $\sigma_b = 2500-3500$  МПа,  $E = 450$  ГПа. Нередко используют в качестве волокон проволоку из высокопрочных сталей.

Повышение жаропрочности никелевых сплавов достигается армированием их вольфрамовой или молибденовой проволокой. Металлические волокна используют и в тех случаях, когда требуются высокие теплопроводность и электропроводимость.

## Технология машиностроения

Перспективными упрочнителями для высокопрочных и высокомодульных волокнистых композиционных материалов являются нитевидные кристаллы из оксида и нитрида алюминия, карбида и нитрида кремния, карбида бора и др., имеющие  $\sigma_b = 15000-28000$  МПа и  $E = 400-600$  ГПа.

В табл. 5.1 приведены свойства некоторых волокнистых композиционных материалов.

Таблица 5.1 Механические свойства композиционных материалов на металлической основе

Материал	$\sigma_b$	$\sigma_{-1}$	E, ГПа	$\sigma_b / \gamma$	E/Y
	МПа				
Бор-алюминий (ВКА-1А)	1300	600	220	500	84,6
Бор-магний (ВКМ-1)	1300	500	220	590	100
Алюминий-углерод (ВКУ-1)	900	300	220	450	100
Алюминий-сталь (КАС-1А)	1700	350	110	370	24,40
Никель-вольфрам (ВКН-1)	700	150	-	-	-

Композиционные материалы на металлической основе обладают высокой прочностью и жаропрочностью, в то же время они малопластичны. Однако волокна в композиционных материалах уменьшают скорость распространения трещин, зарождающихся в матрице, и практически полностью исключают внезапное хрупкое разрушение. Отличительной особенностью одноосных волокнистых композиционных материалов являются анизотропия механических свойств вдоль и поперек волокон и малая чувствительность к концентраторам напряжения.

Однако необходимо учитывать, что матрица может передавать напряжения волокнам только в том случае, когда существует прочная связь на поверхности раздела армирующее волокно - матрица. Для предотвращения контакта между волокнами матрица должна полностью окружать все волокна, что достигается при содержании ее не менее 15-20%.

Матрица и волокно не должны между собой взаимодействовать (должна отсутствовать взаимная диффузия) при изготовлении или эксплуатации, так как это может привести к понижению прочности композиционного материала.

Анизотропия свойств волокнистых композиционных материалов учитывается при конструировании деталей для оптимизации свойств путем согласования поля сопротивления с полями напряжения.

Армирование алюминиевых, магниевых и титановых сплавов непрерывными тугоплавкими волокнами бора, карбида кремния, диборида титана и оксида алюминия значительно повышает жаропрочность. Особенностью композиционных материалов является малая скорость разупрочнения во времени с повышением температуры.

Основным недостатком композиционных материалов с одно- и двумерным армированием является низкое сопротивление межслойному сдвигу и поперечному обрыву. Этого недостатка лишены материалы с объемным армированием.

**Дисперсно-упрочненные композиционные материалы.** В отличие от волокнистых композиционных материалов в дисперсно-упрочненных композиционных материалах матрица является основным элементом, несущим нагрузку, а дисперсные частицы тормозят движение в ней дислокаций. Высокая прочность достигается при размере частиц 10-500 нм при среднем расстоянии между ними 100-500 нм и равномерном распределении их в матрице. Прочность и жаропрочность в зависимости от объемного содержания упрочняющих фаз не подчиняются закону аддитивности. Оптимальное содержание второй фазы для различных металлов неодинаково, но обычно не превышает 5-10% (об).

Использование в качестве упрочняющих фаз стабильных тугоплавких соединений (оксиды тория, гафния, иттрия, сложные соединения оксидов и редкоземельных металлов), нерастворяющихся в матричном металле, позволяет сохранить высокую прочность материала до 0,9-0,95T<sub>пл</sub>. В связи с этим, такие материалы чаще применяют как жаропрочные. Дисперсно-упрочненные композиционные материалы могут быть получены на основе большинства применяемых в технике металлов и сплавов.

Наиболее широко используют сплавы на основе алюминия - САП (спеченный алюминиевый порошок). САП состоит из алюминия и дисперсных чешуек Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Частицы Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> эффективно тормозят движение дислокаций и тем самым повышают прочность сплава. Содержание Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в САП колеблется от 6-9 % (САП-1) и до 13-18 % (САП-3). С увеличением содержания Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> повышается от 300 для САП-1 до 400 МПа для САП-3, а относительное удлинение соответственно снижается с 8 до 3%. Плотность этих материалов равна плотности алюминия, они не уступают ему по коррозионной

стойкости и даже могут заменять титан и коррозионно-стойкие стали при работе в интервале температур 250-500°C. По длительной прочности они превосходят деформируемые алюминиевые сплавы. Длительная прочность  $\sigma_{100}$  для сплавов САП-1 и САП-2 при температуре 500°C составляет 45-55 МПа.

Большие перспективы у никелевых дисперсно-упрочненных материалов. Наиболее высокую жаропрочность имеют сплавы на основе никеля с 2 -3 об.% двуоксида тория или двуоксида гафния. Матрица этих сплавов обычно  $\gamma$ - твердый раствор Ni+20%Cr, Ni+15%Mo, Ni+20%Cr и Mo.

Широкое применение получили сплавы ВДУ-1 (никель, упрочненный двуокисью тория), ВДУ-2 (никель, упрочненный двуокисью гафния) и ВД-3 (матрица Ni+20% Cr, упрочненная окисью тория). Эти сплавы обладают высокой жаропрочностью. При температуре 1200°C сплав ВДУ-1 имеет  $\sigma_{100} \sim 75$  МПа и  $\sigma_{1000} \sim 65$  МПа, сплав ВД-3  $\sigma_{1000} \sim 65$  МПа. Дисперсно-упрочненные композиционные материалы, так же как волокнистые, стойки к разупрочнению с повышением температуры и длительности выдержки при данной температуре.

Области применения композиционных материалов не ограничены. Они применяются в авиации для высоконагруженных деталей самолетов (обшивки, лонжеронов, нервюры, панелей и т.д.) и двигателей (лопаток компрессора и турбины и т.д.), в космической технике для узлов силовых конструкций аппаратов, подвергающихся нагреву, для элементов жесткости, панелей, в автомобилестроении для облегчения кузовов, рессор, рам, панелей кузовов, бамперов и т.д., в горной промышленности (буровой инструмент, детали комбайнов и т.д.), в гражданском строительстве (пролеты мостов, элементы сборных конструкций высотных сооружений и т.д.) и в других отраслях промышленности.

Применение композиционных материалов обеспечивает новый качественный скачок в увеличении мощности двигателей, энергетических и транспортных установок, уменьшении массы машин и приборов.

**Композиционные материалы с неметаллической матрицей.** Они нашли широкое применение. В качестве неметаллических матриц используют полимерные, углеродные и керамические материалы. Из полимерных матриц наибольшее распространение получили эпоксидная, фенолоформальдегидная и полиимидная. Матрица связывает композицию, придавая ей форму. Упрочнителями служат волокна: стеклянные, углеродные, борные, органические, на основе нитевидных кристаллов (оксидов, карбидов, боридов, нитридов и др.), а также металлические (про-

## Технология машиностроения

волоки), обладающие высокой прочностью и жесткостью. Применяется укладка упрочнителей из трех, четырех и более нитей. Наибольшее применение получила структура из трех взаимно перпендикулярных нитей. Упрочнители могут располагаться в осевом, радиальном и окружном направлениях.

Трехмерные материалы могут быть любой толщины в виде блоков, цилиндров. Система из четырех нитей строится путем расположения упрочнителя по диагоналям куба. Структура из четырех нитей равновесна, имеет повышенную жесткость при сдвиге в главных плоскостях. Однако создание четырехнаправленных материалов сложнее, чем трехнаправленных.

Армирующие материалы могут быть в виде волокон, жгутов, нитей, лент, многослойных тканей. Объемные ткани увеличивают прочность на отрыв и сопротивление сдвигу по сравнению со слоистыми.

В слоистых материалах волокна, нити, ленты, пропитанные связующим, укладываются параллельно друг другу в плоскости укладки. Плоскостные слои собираются в пластины. От порядка укладки слоев по толщине пакета зависит жесткость материала при изгибе и кручении.

По виду упрочнителя композиционные материалы классифицируют на стекловолокниты, карбоволокниты с углеродными волокнами, борволокниты и органоволокниты.

Свойства композиционных материалов зависят от состава компонентов, их сочетания, количественного соотношения и прочности связи между ними. Содержание упрочнителя в ориентированных материалах составляет 60-80% (об), в неориентированных (с дискретными волокнами и нитевидными кристаллами) - 20-30% (об). Чем выше прочность и модуль упругости волокон, тем выше прочность и жесткость композиционного материала. Свойства матрицы определяют прочность композиции при сдвиге и сжатии и сопротивление усталостному разрушению.

Этот вид материалов обладает анизотропией, поэтому при конструировании детали необходимо учитывать направление действующих нагрузок. Изменяя схему укладки упрочнителей, можно влиять на степень анизотропности материала.

Свойства некоторых композиционных материалов с полимерной матрицей приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 Физико- механические свойства однонаправленных композиционных материалов с полимерной матрицей

## Технология машиностроения

Материал	Плотность, т/м <sup>3</sup>	Предел прочности МПа				Модуль упругости, ГПа			Удельная жесткость Е/ρ 10 <sup>3</sup> км	Относительно удлинение при разрыве, %	Удельная прочность кг/см	Ударная вязкость, кДж/м <sup>2</sup>	Сопр. усталост на базе 10 <sup>7</sup> циклов, МПа
		при растяжении	при сжатии	при изгибе	при сдвиге	при растяжении	при изгибе	при сдвиге					
<b>Карбоволокниты</b>													
КМУ-1л	1,4	650	350	800	25	120	100	2,8	8,6	0,5	46	50	300
КМУ-1у	1,47	1020	400	1100	30	180	145	3,5	12,2	0,6	70	44	500
КМУ-1в	1,55	1000	540	1200	45	180	165	5,3	11,5	0,6	65	84	350
КМУ-2в	1,3	380	-	-	-	81	-	-	6,2	0,4	30	-	-
<b>Бороволокниты</b>													
КМБ-1м	2,1	1300	1160	1750	60	270	250	9,8	-	0,3-0,5	-	90	400
КМБ-1к	2,0	900	920	1250	48	214	223	7,0	10,7	0,3-0,4	43	78	350
КМБ-2к	2,0	1000	1250	1550	60	260	215	6,8	13,0	0,3-0,4	50	110	400
КМБ-3к	2,0	1300	1500	1450	75	260	238	7,2	12,5	0,3-0,4	65	110	420
Карбоволокнит с углер. матрицей КУП-ВМ	1,35	200	260	640	42	160	165	-	-	-	-	12	240
<b>Органоволокниты</b>													
с эластичным волокном	1,15-1,3	100-190	75-180	100-180	-	25-80	-	-	0,22-0,6	10-20	8-15	500-600	-
с жестким волокном	1,2-1,4	650-700	180-200	400-450	-	35	-	-	2,7	2-5	50	-	-

## 6. Обработка порошковых материалов

### 6.1. Термическая обработка

Основные закономерности термической обработки

порошковых

материалов такие же, как и при обработке компактных материалов. Однако наличие пористости, неоднородности структуры требует корректировку режимов термической обработки.

Особенностями порошковых материалов являются неметаллические включения, поры, пониженная теплопроводность, наследственная мелкозернистость. Эти особенности необходимо учитывать при назначении режимов термической обработки.

Порошковые материалы подвергаются различным видам отжига (полный, неполный, диффузионный, рекристаллизационный), закалки и отпуску.

Отжигу подвергаются детали после калибрования и повторного прессования для снятия остаточных напряжений и устранения неоднородностей структуры, а также для улучшения обрабатываемости. Для материалов на основе железных порошков отжиг обычно проводится при температуре 1020 – 1050 °С. В результате формируется структура зернистого перлита с повышенными пластическими свойствами.

Распространенным видом термической обработки является закалка. Она широко применяется для повышения свойств высокоплотных порошковых материалов. Что касается пористых материалов, то к ним не предъявляются высокие требования по механическим свойствам, поэтому упрочняющая термическая обработка к ним применяется значительно реже. Наличие пористости накладывает ограничения на выбор условий нагрева и охлаждения. Такие изделия нельзя нагревать в солевых расплавах и охлаждать в солевых растворах. Соли остаются в порах изделия, вызывая коррозию. Кроме того, пористые материалы подвержены появлению закалочных трещин, что обуславливает снижение скорости охлаждения и глубины закаленного слоя. Для их нагрева применяется защитная атмосфера.

Температура нагрева под закалку порошковых сталей несколько выше, чем у компактных, и составляет в зависимости от состава 860 -1000°С. Повышение температуры нагрева под закалку может приводить в отдельных случаях к появлению остаточного аустенита, устранить который можно обработкой холодом. Так как порошковые материалы имеют более низкую теплопроводность, чем компактные, что сказывается в повышении длительности нагрева и уменьшении прокаливаемости, теплопроводность понижается с увеличением пористости и содержания структурно свободного графита.

Охлаждение при закалке высокоплотных изделий проводят в воде, водных растворах солей, масле. Обычно на поверхно-

сти изделий образуется мартенсито-бейнитная структура, которая переходит в трооститную, а затем в сорбитную.

Отжиг порошковых изделий проводится с целью повышения степени гомогенности и улучшения обрабатываемости резанием. При отжиге пористых изделий требуется защитная атмосфера.

## 6.2. Механическая обработка

Технологические возможности порошковой металлургии обеспечивают получение деталей с точностью 8-9 классов. Для повышения их точности, а также для создания поверхностей, которые нельзя сформовать ПМ (резьбы, отверстия в направлении, перпендикулярном направлению прессования, закрытые пазы и т.п.), порошковые детали подвергаются механической обработке, которая имеет особенности по сравнению с механической обработкой компактных материалов.

Механическая обработка имеет особенности, вызванные пористостью материала. Режущий инструмент испытывает микроудары, приводящие его к быстрому затуплению. В этом случае происходит уплотнение материала обработанной поверхности, замазывание пор и повышение шероховатости. При увеличении пористости снижаются силы резания, и повышается шероховатость. При обработке пористых материалов не рекомендуется применять СОЖ на водной основе, а также содержащие щелочи и кислоты, что приводит к попаданию химически активных составляющих СОЖ в поры и коррозии деталей после механической обработки.

При резании антифрикционных материалов, пропитанных маслом, снижается сила резания, возрастает стойкость режущих инструментов. Их обработку можно проводить с более высокой скоростью резания, что приводит к уменьшению шероховатости.

При обработке резанием порошковых материалов применяют инструменты из быстрорежущей стали, твердых сплавов, минералокерамики, технических алмазов. Выбор инструментального материала определяется экономической целесообразностью его использования, стойкостью и производительностью. Из твердых сплавов отдается предпочтение группе ВК. Для получения высокой чистоты поверхности применяют алмазный инструмент. Рекомендуемые значения скорости резания приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1 Зависимость скорости резания (м/мин) от обрабатываемого и инструментального материалов

Обрабатываемый материал	Материал инструмента			
	P6M5	BK3	BK6	BK8
Чугун	60	180	145	170
ЖГр1	-	70	60	50
Сталь 40п	40	250	220	200

Влияние твердости обрабатываемого материала на скорость резания учитывается поправочными коэффициентами.

Значение подачи выбирается в зависимости от заданной шероховатости поверхности (табл.6.2)

Таблица 6.2 Влияние подачи (мм/об) на шероховатость поверхности

Обрабатываемый материал	Rz в зависимости от подачи			
	0,03-0,06	0,06-0,1	0,1-0,25	0,25-0,5
Чугун	25	30	35	40
ЖГр1	15	20	25	35
Сталь 40п	7	0	16	18

## 7. Технологические требования, предъявляемые к конструкциям порошковых деталей

В связи с ограниченными возможностями формообразования деталей при изготовлении их методами ПМ важное значение приобретают принципы отбора деталей, переводимых на изготовление их методами ПМ. При этом необходимо учитывать ряд факторов - материал, применяемый при их изготовлении, режимы их термической и химико-термической обработок и обработки резанием, условия и режимы эксплуатации изделия. Одним из определяющих факторов является сложность их формы. В зависимости от сложности формы изделий, отходы при производстве и затраты на механическую обработку могут перекрывать другие преимущества порошковой металлургии. Применение порошковой металлургии для изготовления изделий будет оправдано только тогда, когда в общей технологии изготовления достигается положительный экономический эффект или другие методы изготовления не обеспечивают заданных свойств. Оценка экономической целесообразности изготовления изделий простых и сложных форм методами ПМ не представляет особых сложностей и в ос-

новном отражает их серийность. В случае изготовления изделий особо сложной формы рентабельность производства дополнительно определяется затратами на изготовление деталей пресс-форм, которые возрастают по мере усложнения формы порошковых изделий, необходимостью применения специальных прессов, например, прессов с боковым давлением и т.п., повышенными затратами на механическую обработку. При прессовании в пресс-формах крупных деталей относительная стоимость изделия резко увеличивается, так как требуется применение более мощных (обычно гидравлических) прессов, которые, как правило, тихоходны, что снижает производительность труда. В связи с тем что при прессовании порошков применяют давление (500-1000МПа), площадь поверхности, на которую прикладывается давление прессования, лимитируется размерами пресс-формы и мощностью прессы.

### **7.1. Технологичность конструкции спеченной детали**

Общие требования к форме деталей изложены в ГОСТ 29278-92 («Изделия порошковой металлургии. Конструктивные элементы»). В зависимости от применяемых конструктивных элементов изделия порошковой металлургии различают простой, сложной и особо сложной форм.

К изделиям простой формы относятся:

- изделия без переходов по высоте;
- изделия без отверстия или с одним отверстием и с торцами, ограниченными параллельными плоскостями.

Дополнительными конструктивными элементами изделий простой формы являются стенки, фаски, пазы и зубья.

К изделиям сложной формы относятся:

- изделия с одним переходом по высоте, без отверстия и с торцами, ограниченными параллельными плоскостями;
- изделия с одним или несколькими отверстиями, с одним переходом по высоте и торцами, ограниченными параллельными плоскостями.

К изделиям особо сложной формы относятся:

- изделия с двумя или более переходами и буртами по высоте, с торцами, ограниченными параллельными или непараллельными плоскостями, криволинейными плоскостями;
- изделия, ограниченные одной или более коническими, сферическими и другими криволинейными поверхностями.

Дополнительными конструктивными элементами изделий сложной и особо сложной формы являются стенки, фаски, пазы, зубья, бурты, выступы, уклоны, углубления в торцах.

## Технология машиностроения

Конструктор при проектировании порошковых изделий должен учитывать возможные изменения размеров при прессовании и спекании порошковых заготовок, величины которых в большинстве случаев определяются экспериментально, и назначать более жесткие и легко воспроизводимые допуски, определенные в ГОСТ 29278-92. Установлено, что методами ПМ можно получать готовые изделия без механической обработки с отклонением перпендикулярно к направлению прессования в пределах от 0,025 до 0,13 мм на длине 25мм. Более жесткие отклонения могут быть получены с помощью специальных методов ПМ- повторного прессования после спекания или динамического горячего прессования (ДГП), горячей штамповки. Шероховатость прессованных изделий зависит от шероховатости рабочих поверхностей деталей пресс-форм. Внешние поверхности порошковых изделий имеют практически ту же шероховатость, что и рабочие поверхности матрицы, знаков, сердечников и других элементов пресс-формы.

Порошковые материалы, используемые для изготовления изделий конструкционного назначения, могут быть разделены на две группы: 1) для изготовления изделий в целях замены обычных углеродистых и легированных сталей, чугунов, некоторых цветных металлов и сплавов; и 2) материалы со специальными свойствами, получить которые можно только при производстве изделий методами ПМ.

Наиболее характерными деталями первой группы являются шатуны, шестерни, храповики, кулачки, ригеля, накидные и специальные гайки, рычаги и многие другие, которые выпускаются промышленностью методами литья и механической обработки. Изготовление деталей этой группы рентабельно только при массовом производстве одинаковых изделий, так как подготовка производства, включающая изготовление пресс-форм, установка их на пресс и отладка процесса прессования, длительный и дорогостоящий процесс. Так, например, если производительность прессования в зависимости от типа пресса (пресс-автомат, механический, гидравлический прессы) составляет от 150-200 до 2000 и более прессовок в час, то на смену инструмента (пресс-формы) и его наладку затрачивается от 1 до 30 ч. В связи с этим принято считать, что изготовление изделий методами ПМ может быть оправдано в том случае, если эти изделия составляют в серии 10000-50 000 штук (простой формы), 5000-10 000 штук (сложной формы) и 500-1000 штук (особо сложной формы). В некоторых случаях производство более мелких партий порошковых изделий связано со сложностью или невозможностью изготовления изде-

## Технология машиностроения

лий традиционными методами, а используемые порошковые технологии снижают себестоимость, материалоемкость и энергозатраты и повышают производительность труда.

В табл. 7.1 приведены основные конструктивные элементы порошковых изделий, которыми, согласно ГОСТ 29278-92, являются: отверстия, радиальные переходы, пазы, зубья, стенки, фаски, уклоны, пояски, рифленные поверхности, бурты, выступы и углубления на торцах. Вид и характеристика конструктивных элементов в порошковой изделии определяются возможностью их изготовления прессованием с последующим спеканием или штамповкой пористых заготовок. Плотность порошковых изделий обеспечивается технологией их изготовления и изменяется от 50 до 100% от их теоретической плотности. Значение плотности порошкового изделия должно быть указано в нормативно-технической документации на конкретное изделие.

Таблица 7.1 Требования к выбору конструктивных элементов

Характеристика изделия с применением конструктивным элементом	Элемент, чертеж элемента	Требования к конструктивным элементам: вид, форма, параметры. Технология формирования изделия
Изделия типа полого цилиндра	1. Стенка	$S \geq 0,8$ мм; $H_k/S \leq 1$ . Одностороннее прессование пористых изделий
		$S \geq 0,8$ мм; $1 \leq H_k/S \leq 1$ . Двухстороннее прессование пористых изделий

## Технология машиностроения

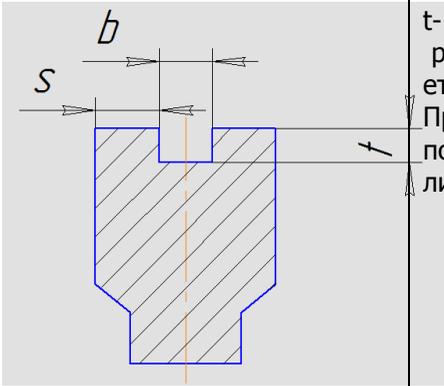
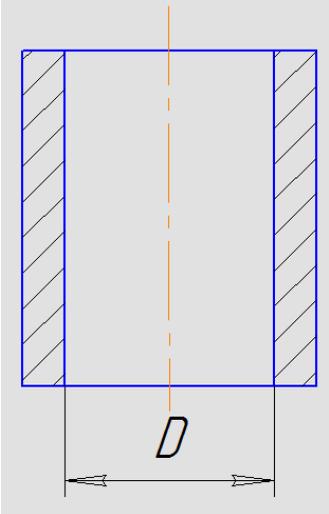
		$S \geq 2$ мм; $H_k/S > 10$ Двух- стороннее прес- сование пори- стых изделий; поперечное прессование пористых изде- лий
		$S \geq 2$ мм; $0,6 \leq H_k/S \leq 1$ . Штамповка вы- сокоплотных изделий дву- сторонней осад- кой из пористых заготовок
		$S \geq 2$ мм; $1 \leq H_k/S \leq 2$ . Штамповка вы- сокоплотных изделий дву- сторонней осад- кой из пористых заготовок
		$S \geq 2$ мм; $H_k \geq$ $40$ ; $H_k/S \geq 3$ . Штамповка вы- сокоплотных изделий попе- речным уплот- нением пори- стых заготовок
Изделия с одним и бо- лее перехо- дами по вы-	Радиус перехода	$R \geq 0,25$ мм. Прессование пористых изде- лий

<p>сотке на наружном диаметре</p>		<p><math>R=(0,3-0,5)</math> мм. Штамповка пористых заготовок для высокоплотных изделий.</p>
<p>Изделия любой формы</p>	<p>Фаска</p>	<p><math>0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ</math> Прессование пористых изделий</p>

Технология машиностроения

		<p> <math>0,15 \leq c \leq 0,5</math> мм;  <math>K \leq 0,3</math> мм.          Штамповка вы-          сокоплотных          изделий       </p>

Технология машиностроения

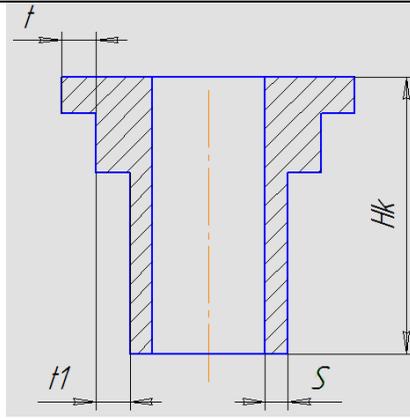
<p>Изделия любой формы с пазом на торцах</p>	<p style="text-align: center;">Паз</p> 	<p><math>b \geq 1</math> мм  <math>t</math> - не регламентируется.          Прессование пористых изделий</p>
<p>Изделия любой формы</p>	<p style="text-align: center;">Отверстие</p> 	<p><math>D \geq 10</math> мм          Штамповка высокоплотных изделий</p>

<p>Изделия с выступающими на внутренних и наружных боковых поверхностях</p>	<p>Выступ</p>	<p><math>S \geq 2</math> мм;  <math>t</math> - не регламентируется.          Прессование пористых изделий. Штамповка высокоплотных изделий осадки пористой заготовки с предварительно выполненным выступом</p>
<p>Изделия любой формы с выступом на торце</p>		<p><math>S \geq 2</math> мм;  <math>t \geq 0,5</math> мм          Прессование пористых изделий составным пуансоном</p> <p><math>S \geq 5</math> мм;  <math>t \geq 3</math> мм          Штамповка высокоплотных изделий осадкой пористой заготовки с предварительно выполненным выступом</p>

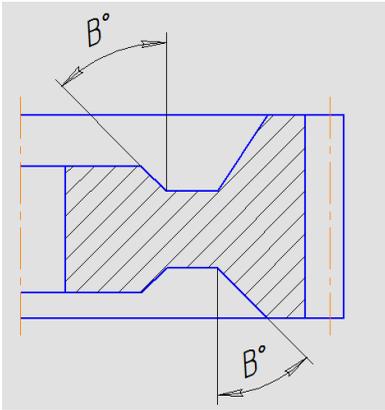
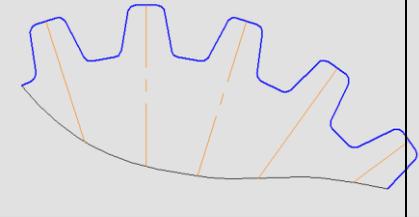
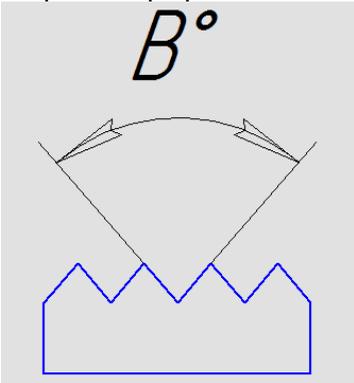
## Технология машиностроения

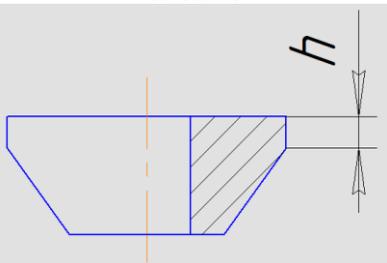
Изделия с одним переходом по высоте на наружной поверхности	<p style="text-align: center;">Бурт</p>	<p><math>t \geq 0,8</math> мм                      Двустороннее прессование пористых изделий</p> <p><math>t \leq 3</math> мм; <math>H_k/S \leq 2</math>                      Штамповка высокоплотных изделий двусторонней осадкой пористой заготовки без бурта с поперечным течением материала</p> <p><math>t \geq 3</math> мм; <math>H_k/S \leq 2</math>                      Штамповка высокоплотных изделий двусторонней осадкой пористой заготовки с буртом</p> <p><math>t \geq 3</math> мм;  <math>2 \leq H_k/S \leq 15</math>                      Штамповка высокоплотных изделий односторонней осадкой бурта с последующим уплотнением всей заготовки</p>
Изделия с двумя и более переходами по высоте на наружной по-	<p style="text-align: center;">Бурт</p>	<p><math>t, t_1 \geq 0,8</math> мм                      Двустороннее прессование пористых заготовок</p>

## Технология машиностроения

верхности		<p> <math>t \leq 3</math> мм;  <math>H_k/S \leq 2</math>; <math>t_1</math>- не регламентируется.                      Штамповка высокоплотных изделий двусторонней осадкой пористой заготовки без бурта с поперечным течением материала                 </p>
		<p> <math>t \geq 3</math> мм; <math>H_k/S \leq 2</math>;  <math>t_1</math>- не регламентируется.                      Штамповка высокоплотных изделий двусторонней осадкой пористой заготовки с буртом                 </p>
		<p> <math>t \geq 3</math> мм;  <math>2 \leq H_k/S \leq 15</math>; <math>t_1</math>- не регламентируется.                      Штамповка высокоплотных изделий односторонней осадкой бурта с последующим уплотнением всей заготовки                 </p>

## Технология машиностроения

Изделия типа шестерен, шкивов и т.п.	<p style="text-align: center;">Уклон</p> 	$t \geq 3 \text{ мм}$ ; $H_k/S \leq 2$ ; Штамповка высокоплотных изделий двусторонней осадкой пористой заготовки с буртом
Изделия типа шестерни цилиндрической (с модулем $m$ )	<p style="text-align: center;">Зубья шестерни</p> 	Изделия типа шестерен, шкивов и т.п.
Изделия с рифленой поверхностью	<p style="text-align: center;">Поверхность рифленая</p> <p style="text-align: center;"><math>B^\circ</math></p> 	$B \geq 30^\circ$ Прессование пористых изделий. Штамповка

Изделия с конической поверхностью	<p style="text-align: center;">Поясок</p> 	$h \geq 1$ Прессование пористых изделий. Штамповка
-----------------------------------	---	--

## 7.2 Технология и особенности изготовления горячедеформированных деталей типа шестерен

Разработка технологического процесса изготовления детали из порошкового материала должна основываться на закономерностях формирования его структуры и свойств. Для горячей штамповки порошковых материалов особое внимание должно уделяться созданию условий для завершения межчастичного сращивания в ходе горячей допрессовки. Очевидно, что какая бы ни была структура в объеме материала, окруженном бывшей поверхностью частицы порошка, до определенного уровня межчастичного взаимодействия сращивания свойства порошкового материала будут определяться не морфологическими структурными особенностями, а качеством сращивания.

Одним из преимуществ технологии горячей штамповкой является экономия (до 60%) используемых материалов в сравнении с традиционными методами металлообработки. Кроме того, замена изготовления зубчатых колес обработкой резанием из прутков и поковок на технологию горячей штамповки позволяет снизить трудоемкость их изготовления и себестоимость, а также высвободить дефицитный парк металлообрабатывающих станков и, соответственно, занимаемые ими производственные площади.

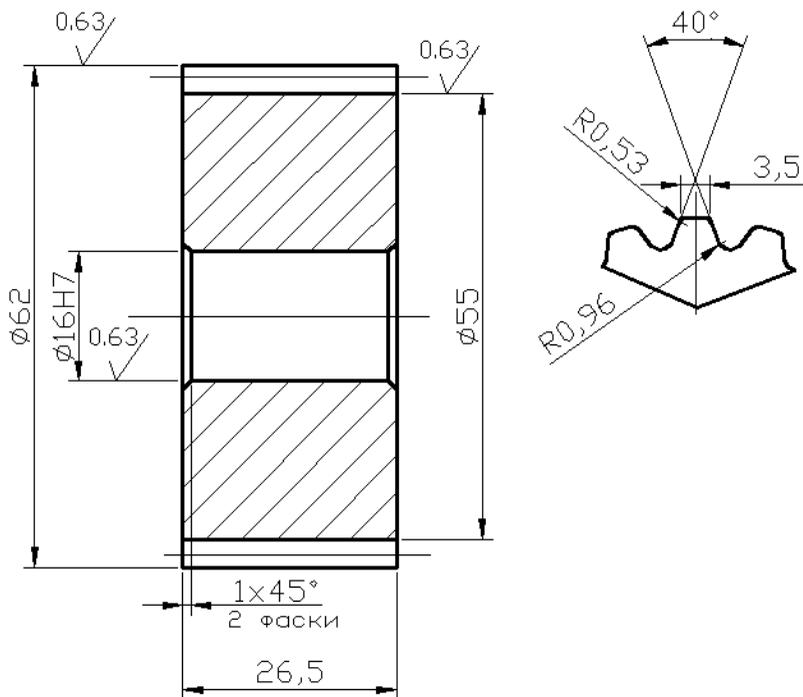


Рис. 7.1. Зубчатый шкив ленточного конвейера

Для производства зубчатого шкива использовался железный порошок АВС 100.30. Масса готовой продукции составляла 511 грамм. Пористость при холодном прессовании обеспечивалась в пределах 23%. С целью получения гомогенной структуры заготовки спекались при температуре 1100°C в течении 2 часов. Заготовки не имели предварительно сформированных зубьев, а формообразование последних осуществлялось при горячей штамповке. Перед штамповкой заготовки нагревались до температуры 1000°C, а температура матрицы составляла 600°C. Конечная пористость составляла 2%. Режимы горячей штамповки назначались в соответствии с условиями завершения пластической деформации в полость матрицы и недопущения сохранения в структуре материала микротрещин.

## Технология машиностроения

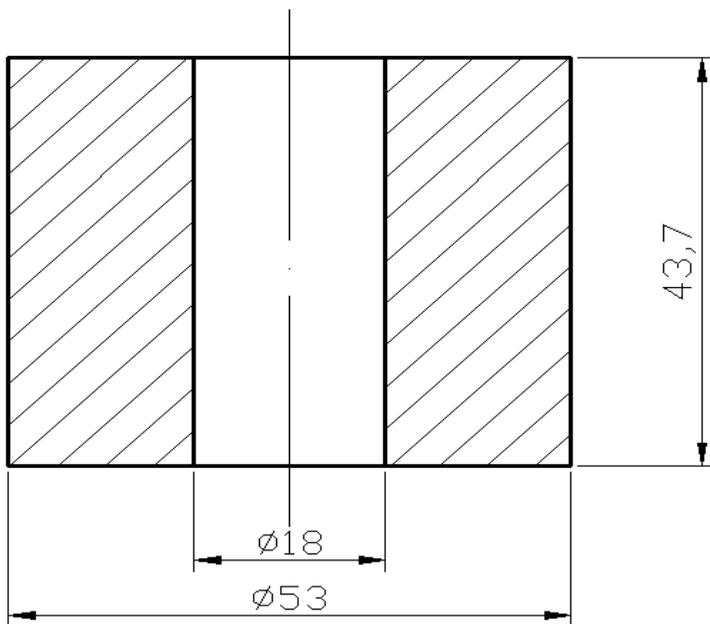


Рис. 7.2 Пористая порошковая заготовка

### 7.3 Инструментальная оснастка для изготовления зубчатого шкива ленточного транспортера

При изготовлении матрицы для опытной партии зубчатых шкивов с числом зубьев  $Z=21$ , наиболее доступной оказалась технология нарезания зубьев долбяком. Была достигнута точность, позволяющая прессовать шестерни, соответствующие 9-му качеству точности.

Известно, что обработку резанием можно осуществлять на материалах с незначительной твердостью. Для обеспечения стойкости матриц требуется термическая обработка с целью повышения твердости. Применение объёмной закалки приводит к поводке материала, искажению профиля матрицы.

Размер и форма рабочей полости матрицы исключили возможность применения шлифования для достижения необходимой точности зубьев. Чтобы свести к минимуму искажение профиля матрицы при последующей термообработке, была принята следующая технология её изготовления:

- 1) Изготовление заготовки на токарном станке;
- 2) Закалка и отпуск;
- 3) Чистовая обработка всех размеров и долбление зубьев;

#### 4) Азотирование.

Заготовка матрицы из стали 4Х5 МФС ГОСТ 5950-73 подвергалась улучшению до твердости HRC 28-30. После этого производилась чистовая обработка всех размеров и долбление зубьев. С целью повышения стойкости после окончательной механической обработки матрицы азотировались. Азотирование осуществлялось в среде аммиака со степенью диссоциации 35% при температуре 530°C в течении 15 часов. При этом толщина азотированного слоя составила 0,2-0,25 мм. Искажение профиля рабочей полости матрицы после азотирования не наблюдалось.

Для осуществления горячей штамповки использовался механический пресс К2232. Схема блока для горячей штамповки пористых порошковых формовок показана на рисунке 7.3. Использование данного блока позволило повысить качество штампуемых деталей и точность проведения экспериментов за счёт стабилизации процесса горячей штамповки по времени. При ГШ в блоке использовались пористые порошковые заготовки простой формы без предварительного оформления трапецеидального профиля зубьев, а формообразование зубчатого венца происходило путем радиального течения материала заготовки в полости матрицы. Спроектированный и изготовленный блок позволил осуществлять прессование по двухсторонней схеме с плавающей матрицей.

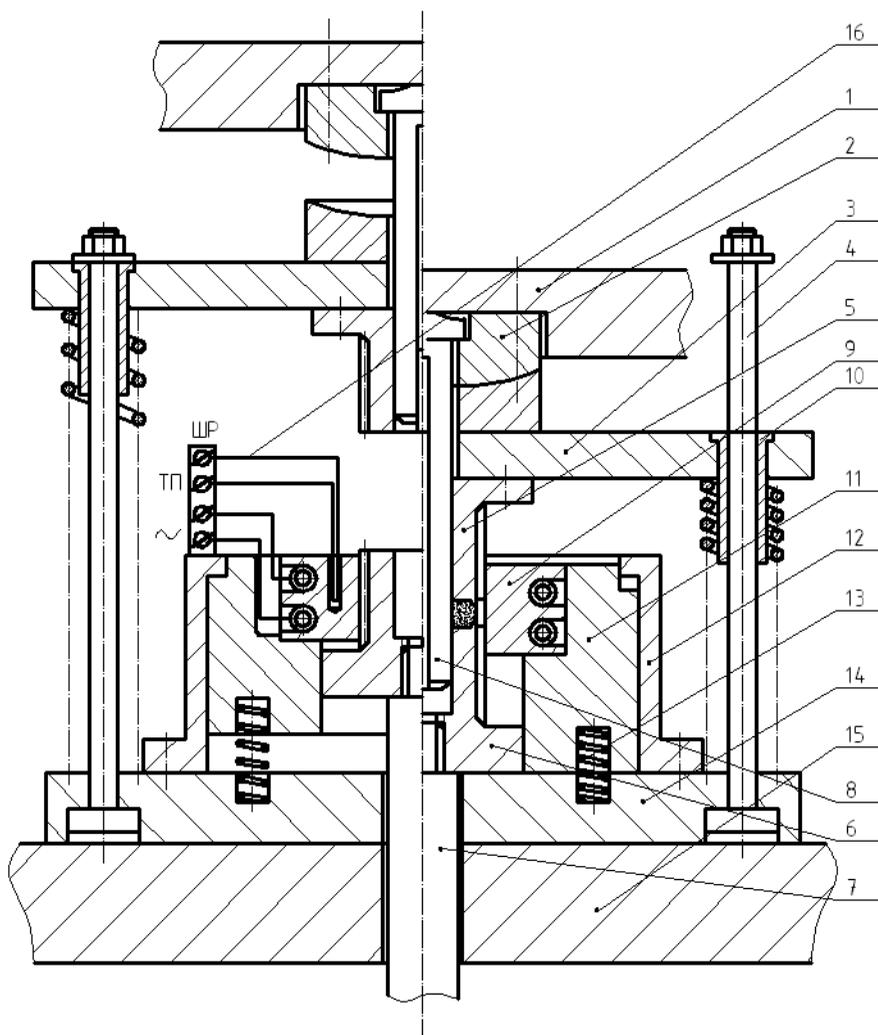


Рис. 7.3. Схема блока для горячей штамповки изделий из пористых порошковых заготовок

Блок имеет три плиты. Верхняя плита 1 крепится к ползуну кривошипного пресса и соединена двумя штангами с механизмом выталкивателя. Кроме этого, на верхней плите 1 закреплена сферическая опора 2 и игла 8. Сферическая опора предназначена для устранения перекосов, которые имеют место из-за деформации станины пресса. Усилие от ползуна передается через сферическую опору на промежуточную плиту 3, которая движется по четырём направляющим колоннам 4, закрепленным в нижней

## Технология машиностроения

плите 14. Движение плиты вверх обеспечивается возвратными пружинами, расположенными соосно на колонках. На промежуточной плите закреплён верхний пуансон 5. На нижней плите 14 закрепляется направляющий стакан матрицы 12, в котором установлена матрица 9 в обойму 11. Для обеспечения двусторонней схемы формования матрица с бандажом имеет возможность перемещаться вдоль оси направляющего стакана. В верхнем положении матрица удерживается пружинами 13. В канавках матрицы расположен нагревательный элемент 10, который поддерживает её температуру в заданных пределах. Температура контролируется при помощи термопары 16. Нижний пуансон 6 находится в постоянном сопряжении с матрицей 9 и в процессе штамповки опирается на нижнюю плиту 14, закреплённую на подштамповой плите пресса 15. Нижний пуансон 6 при помощи штока 7 соединён с механизмом выталкивателя.

Блок работает следующим образом.

В начале рабочего цикла ползун пресса, верхняя плита, промежуточная плита и выталкиватель с нижним пуансоном находятся в верхнем положении. Нагретая заготовка укладывается на нижний пуансон. Включается рабочий ход пресса. Верхняя плита вместе с выталкивателем и нижним пуансоном движутся вниз, заготовка попадает в полость матрицы, а стержень выходит из верхнего пуансона. При движении ползуна вниз, верхняя плита через сферическую опору передает усилие промежуточной плите и верхнему пуансону, перемещая их вниз, при этом сжимаются возвратные пружины. Нижний пуансон с заготовкой останавливается, упираясь в нижнюю плиту. При дальнейшем движении ползуна вниз начинается процесс уплотнения заготовки: верхний пуансон входит в матрицу, соприкасается с заготовкой и начинает её деформировать. Под действием сил трения между уплотняемой заготовкой и матрицей последняя вместе с бандажом начинает двигаться вниз, сжимая пружины. За счёт этого осуществляется двусторонняя схема прессования, так как нижний пуансон остается неподвижным. Пройдя нижнюю мертвую точку, ползун начинает двигаться вверх, поднимая за собой верхнюю плиту. Промежуточная плита под действием возвратных пружин также движется вверх, выводя верхний пуансон из полости матрицы. Дойдя до упоров, промежуточная плита останавливается, а верхняя плита продолжает двигаться вверх. Далее стержень заходит во внутрь верхнего пуансона и происходит снятие спрессованного изделия, если оно осталось на стержне. Одновременно начинается движение вверх штока выталкивателя с нижним пуансоном и если спрессованное изделие осталось в матрице, то нижний пуансон

## Технология машиностроения

выталкивает его. Матрица в обойме под действием пружин возвращается в исходное положение. Затем производится удаление изделия с нижнего пуансона и цикл прессования повторяется. Перед каждым циклом штамповки пресс-форма смазывается путём распыления водной эмульсии графита.

Конструкция блока позволяет расположить устройство для автоматической подачи заготовок и удаления спрессованных изделий. Блок, оснащенный таким устройством, позволяет осуществлять горячую штамповку в автоматическом режиме. Созданный блок является универсальным. Лёгкость смены формующего инструмента позволяет быстро перенастраивать его для штамповки различных изделий. Кроме этого, его конструкция позволяет осуществлять штамповку по одноосной схеме уплотнения. В этом случае матрица с бандажом опускается вниз до упора и фиксируется в этом положении.

### Список литературы

1. Дорофеев Ю.Г. Динамическое горячее прессование пористых порошковых заготовок. М., «Металлургия», 1977. – 216с.
2. Егоров М.с., Егоров С.Н. Горячедеформированные порошковые низколигированные конструкционные стали. – монография , ЮРГТУ (НПИ)-2008г.
3. Р.В. Егорова, М.С.Егоров, А.В.Скориков. Свободная осадка нагретых цилиндрических образцов порошковых материалов ASTALOY 85 MO, DISTALOY HP – 1 фирмы «Höganäs»// Металлург.- 2013.- №5.- С.82-86.
4. Дорофеев В.Ю., Егоров С.Н. Межчастичное сращивание при формировании порошковых горячедеформированных материалов. М., 2003. – с. 152.