

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Кафедра «Цифровое проектирование»

Т.А. Перевай

ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Учебное пособие

Севастополь
СевГУ
2024

УДК 621.762(075.8)

ББК 34.39я73

П27

Р е ц е н з е н т :

А.Ю. Тараховский – канд. техн. наук, доцент,
заведующий кафедрой «Цифровое проектирование»

А.А. Мецлер – канд. техн. наук, инженер-технолог ООО «Полесье»

Перевай, Т.А.

П27 Порошковая металлургия : учебное пособие / Т.А. Перевай; Севастопольский государственный университет, Политехнический институт, кафедра «Цифровое проектирование». – Севастополь: СевГУ, 2024. – 81 с.; ил. – Текст : электронный.

В учебном пособии изложены основные вопросы, связанные с производством порошковых материалов и изделий. Рассмотрены методы получения и свойства металлических порошков, процессы формирования и спекания заготовок, области применения и свойства порошковых изделий.

Предназначены для студентов технических направлений, аспирантов по научной специальности 2.6.5. «Порошковая металлургия и композиционные материалы».

УДК 621.762(075.8)

ББК 34.39я73

Методические указания рассмотрены и утверждены на заседании кафедры «Цифровое проектирование», протокол № 7 от 4 апреля 2024 г.

Допущено к изданию ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» в качестве учебного пособия «Порошковая металлургия» для студентов всех форм обучения, аспирантов по научной специальности 2.6.5. «Порошковая металлургия и композиционные материалы».

© Перевай Т.А., 2024
© ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет», 2024

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
Глава 1. История развития порошковой металлургии.....	6
Глава 2. Производство металлических порошков и их свойства.....	10
2.1. Производство металлических порошков.....	10
2.2. Свойство металлических порошков.....	18
Глава 3. Формование металлических порошков.....	22
Глава 4. Материалы, используемые в технологии порошковой металлургии.....	39
Глава 5. Основные операции технологического процесса изготовления изделий методом порошковой металлургии.....	65
Глава 6. Изделия порошковой металлургии и их свойства.....	73
6.1. Металлокерамические подшипники.....	73
6.2. Пористые материалы и возможности их применения в промышленности.....	75
Глава 7. Перспективы развития порошковой металлургии.....	78
Заключение.....	80
Библиографический список.....	81

ВВЕДЕНИЕ

Порошковой металлургией называют область техники, охватывающую совокупность методов изготовления порошков металлов и металлоподобных соединений, полуфабрикатов и изделий из них или их смесей с неметаллическими порошками без расплавления основного компонента.

Из имеющихся разнообразных способов обработки металлов порошковая металлургия занимает особое место, так как позволяет получать не только изделия различных форм и назначений, но и создавать принципиально новые материалы, которые другим путем получить или очень трудно, или невозможно. У таких материалов можно получить уникальные свойства, а в ряде случаев существенно повысить экономические показатели производства. При этом способе в большинстве случаев коэффициент использования материала составляет около 100 %.

Порошковая металлургия находит широчайшее применение для различных условий работы деталей изделий. Методами порошковой металлургии изготавливают изделия, имеющие специальные свойства: антифрикционные детали узлом трения приборов и машин (втулки, вкладыши, опорные шайбы и т.д.), конструкционные детали (шестерни, кулачки и др.), фрикционные детали (диски, колодки и др.), инструментальные материалы (резцы, пластины резцов, сверла и др.), электротехнические детали (контакты, магниты, ферриты, электрошетки и др.) для электронной и радиотехнической промышленности, композиционные (жаропрочные и др.) материалы.

Основные преимущества использования порошковой металлургии:

- **снижает затраты** на дальнейшую механическую обработку, которая может быть исключена или существенно уменьшена. Получает готовое изделие точное по форме и размерам. Обеспечивает высокое качество поверхности изделия.

- **использует** энерго- и ресурсосберегающие технологии. Уменьшает количество операций в технологической цепи изготовления продукта. Использует более чем 97 % стартового сырья. Реализует многие последующие сборочные этапы ещё на стадии спекания.

- **позволяет** получать изделия с уникальными свойствами, используя многокомпонентные смеси, объединяя металлические и не металлические компоненты. Изделия различной пористости (фильтры) с регулируемой проницаемостью; Подшипники скольжения с эффектом самосмазывания.

- **получает** более высокие экономические, технические и эксплуатационные характеристики изделий по сравнению с традиционными технологиями.

- **упрощает** зачастую изготовление изделий сложной формы.

Глава 1. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Порошки металлов применяли и в древнейшие времена. Порошки меди, серебра и золота применяли в красках для декоративных целей в керамике, живописи во все известные времена. При раскопках найдены орудия из железа древних египтян (за 3000 лет до нашей эры), знаменитый памятник из железа в Дели относится к 300 году нашей эры. До 19 века не было известно способов получения высоких температур (около 1600...1800 °С). Указанные предметы из железа были изготовлены кричным методом: сначала в горнах при температуре 1000 °С, восстановлением железной руды углем получали крицу (губку), которую затем многократно проковывали в нагретом состоянии, а завершали процесс нагревом в горне для уменьшения пористости.

С появлением доменного производства от крицы отказались и о порошковой металлургии забыли.

Заслуга возрождения порошковой металлургии и превращения в особый технологический метод обработки принадлежит русским ученым П.Г. Соболевскому и В.В. Любарскому, которые в 1826 г., за три года до работ англичанина Воллстана, разработали технологию прессования и спекания платинового порошка.

После первых работ П.Г. Соболевского по разработке процесса изготовления монет из порошка платины, выполненных в России в 1826–1827 гг. стало развиваться новое направление в науке - порошковая металлургия.

В 1924 г. Т.М. Алексеенко-Сербиным была организована первая лаборатория тугоплавких металлов на Московском электроламповом заводе, а затем создана мощная сеть научных учреждений, таких как Институт проблем материаловедения АН Украины, НИИ твердых сплавов, НИИ порошковой металлургии Белорусского политехнического института,

ЦНИИЧМ им. Бардина, НИИТ Автопром, ВИЛС, ВНИИЭМ, КТБ МИ, Институт титана, Гипроникель, ИМЕТ им. Байкова и другие.

Большое участие в решении проблем порошковой металлургии принимают кафедры многих высших учебных заведений – Московского института стали и сплавов, Киевского, Новочеркасского, Нижегородского, Пермского, Ереванского политехнических институтов, Харьковского университета и т.д.

После организации Г.А. Меерсоном в 1923 г. на Московском кабельном заводе производства порошка вольфрама и получения в 1932 г. на Ленинградском механическом заводе первых промышленных партий порошка электролитического железа, работы ученых привели к созданию ряда оригинальных процессов изготовления металлических порошков, которые нашли применение.

Процесс получения железного порошка комбинированным восстановлением окалины газом и сажой в 1948–1958 гг. был положен в основу строительства Броварского завода порошковой металлургии (Украина). В 1953–1957 гг. организовано производство порошков сложнолегированных сталей и сплавов методом металлотермического восстановления. Разработан метод получения легированных порошков железа диффузионным насыщением. Получены порошки карбонильным методом, механическим измельчением, исследуются процессы получения порошков восстановлением окислов, электролизом водных растворов и расплавленных сред. Внедрены методы получения металлических порошков распылением расплавов.

В настоящее время изготавливаются в промышленном масштабе порошки таких металлов, как железо и его сплавы, никель, медь, кобальт, алюминий, титан, олово, цинк, свинец, магний, вольфрам, молибден, тантал, ниобий и другие.

Существенные успехи достигнуты в разработке теоретических основ и технологии процессов прессования и формования изделий из порошков.

Первые систематические исследования, выполненные в 1936–1937 гг. положили начало развитию работ в этой области. Исследованы закономерности прессования в пресс-формах, процесс вибрационного уплотнения, гидростатического и изостатического, горячего, динамического и взрывного прессования, горячей штамповки, формования порошков прокаткой и т.д.

1926–1946 гг. – начало работ в области теоретических основ процессов спекания. Исследования в этой области позволили оптимизировать ряд технологических режимов и создать новые процессы - например, активированное спекание вольфрама, спекание металлоалмазных композиций инструментального назначения, изготовление электроконтактных, антифрикционных и конструкционных изделий с применением пропитки расплавленными металлами и пр.

Первыми видами изделий из порошков, производство которых было организовано в 1918 г., были медно-графитовые щетки. В дальнейшем создано большое количество электроконтактных материалов на основе серебра с добавками никеля, окиси кадмия, графита; на основе вольфрама с пропиткой медью и ряд других.

Широкое развитие получило производство твердых сплавов и инструментов из них, которое было организовано в 1928–1929 гг. на Московском электроламповом заводе.

В 1932 г. на заводе "Электроугли" было организовано производство бронзографитовых подшипников, а в 1934 г. – железографитовых материалов.

В 60-х годах широко развились работы по созданию спеченных конструкционных материалов на железной основе, с пропиткой прессовок медью и ее сплавами, с введением в состав материала углерода в виде графита или порошка белого чугуна, с заполнением пор материала стеклом, что дало повышение прочности до 75...80 кг/мм². Применение легированных порошков в сочетании с горячей штамповкой или высокоскоростным холодным прес-

сованием с последующим спеканием позволило получить материалы с прочностью выше 200 кг/мм².

Активно разрабатывались и другие материалы – фрикционные, уплотнительные, износостойкие, магнитные, фильтровые, инструментальные, волокновые, дисперсно-упрочненные. Созданы ряд материалов, изготавливаемых методами прокатки – токосъемные пластины, электродные ленты, биметаллическая проволока и другие биметаллические и триметаллические материалы.

Типовая технология производства заготовки изделий методом порошковой металлургии включает четыре основные операции:

- 1) получение порошка исходного материала;
- 2) формование заготовок;
- 3) спекание;
- 4) окончательную обработку.

Каждая из указанных операций оказывает значительное влияние на формирование свойств готового изделия.

Глава 2. ПРОИЗВОДСТВО МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ И ИХ СВОЙСТВА

2.1. Производство металлических порошков

В настоящее время используют большое количество методов производства металлических порошков, что позволяет варьировать их свойства, определяет качество и экономические показатели.

Условно различают два способа изготовления металлических порошков:

- 1) физико-механический;
- 2) 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.

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 и динамическое – удар, срез – истирание, первые два вида имеют место при получении крупных частиц, второй и третий – при тонком измельчении. При дроблении твердых тел затрачиваемая энергия выполняет работу упругого и пластического деформирования и разрушения, нагрева материалов, участвующих в процессе размельчения.

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.

Окончательный размол полученного материала проводится в шаровых вращающихся, вибрационных или планетарных центробежных, вихревых и молотковых мельницах.

Шаровая мельница (рис. 1) - простейший аппарат, используется для получения относительно мелких порошков с размером частиц от нескольких единиц до десятков микрон.

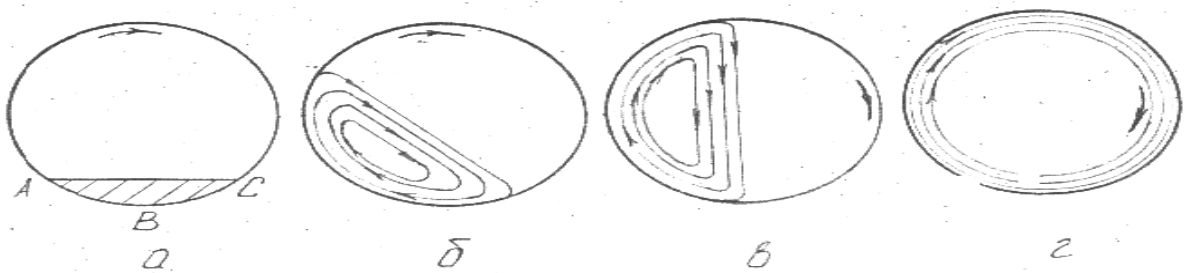


Рис 1. Схемы движения шаров в мельнице:

а – режим скольжения; б – режим перекатывания;

в – режим свободного скольжения; г – режим критической скорости

При вращении барабана шары поднимаются вследствие трения на некоторую высоту и поэтому возможно несколько режимов измельчения:

- 1) скольжения,
- 2) перекатывания,
- 3) свободного падения,
- 4) движения шаров при критической скорости вращения барабана.

В случае скольжения 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 (рис. 1, а), 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. Масса размольных тел 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.

Рабочая камера (1), внутри которой размещаются шары для помола, стоит на пружинах (3). Пружины изолируют станину мельницы (7) от вибрационного воздействия. Дебалансный вал вибрационной мельницы приводится в движение электродвигателем (2). Крутящий момент вала может регулироваться при помощи выносных дебалансных групп, закрытых кожухом (4). Материал для помола непрерывно подается (чаще всего шнековым питателем) в загрузочное отверстие (5). Выгрузка материала происходит «самотеком» через разгрузочный люк (6).

При более высокой частоте воздействия внешних сил на частицы материала применяют вибрационные мельницы (рис. 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. 2 мельнице 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. 2. Схема вибрационной мельницы

Тонкое измельчение трудноразмалываемых материалов часто выполняют на планетарных центробежных мельницах с шарами, используемыми для размолла. По сравнению с шаровыми мельницами в планетарных центробежных мельницах, размол в сотни раз интенсивнее и одновременно в несколько раз менее производителен, так эта мельница периодического, но не непрерывного (как шаровая) действия с ограниченной загрузкой измельчаемого материала.

Для размолла пластичных материалов используют процесс измельчения, в 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 °С: алюминия, железа, сталей, меди, цинка, свинца, никеля и других металлов и сплавов.

Сущность измельчения расплава состоит в дроблении струи расплава либо высокоэнергонасыщенным газом или жидкостью, либо механическим распылением, либо сливанием струи расплава жидкую среду (например, воду). Основной частью технологического узла является форсунка.

Для распыления металл плавят в электропечах. В зависимости от свойств расплава и требований к качеству порошке 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. Охлаждающей средой для распыленной струи, может быть, вода, газ, органическая жидкость.

При различных условиях распыления получают частички порошка каплеобразной, шарообразной и других форм. Размеры частиц получают от 1 мм до сотых долей миллиметра.

Далее рассмотрим химико-металлургический метод – восстановление металлов из окислов и солей. Простейшая реакция восстановления может быть представлена так:



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

Стрелки показывают возможное одновременное существование соединений восстанавливаемого металла в восстановителя и возможное повторное образование исходного соединения MeA. Восстановителем может быть то вещество, которое при выбранной температуре процесса имеет большее ритмическое сродство к неметаллической составляющей восстанавливаемого соединения, чем получаемый. В качестве восстановителей используют – водород, окись углерода, диссоциированный аммиак, конвертированный природный газ, эндотермический и природные газы, кокс, термоштыб 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 сродства”) является величина свободной энергии, высвобождающейся при образовании соответствующего химического соединения. Чем больше выделяется энергии, тем прочнее химическое соединение.

В реакции восстановления всегда должна выделяться тепловая энергия.

Технологическая практика производства порошков восстановлением. Железные порошки получают восстановлением окисленной руды или прокатной окалины. Железо в указанных материалах находится, а виде окислов: Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , FeO – окиси, закись-окиси и закиси железа. Существующие методы восстановления окислов железа разнообразны.

Медные, никелевые и кобальтовые порошки легко получают восстановлением окислов этих металлов, так как они обладают низким сродством к кислороду. Сырьем для производства порошков этих металлов служат либо окись меди Cu_2O , CuO , закись никеля NiO , окись-закись кобальта Co_2O_3 , Co_3O_4 , либо окалина от проката проволоки, листов и т.д. Восстановление проводят в муфельных или в трубчатых печах водородом, диссоциированным аммиаком или конвертированным природным газом. Температура восстановления сравнительно низка: меди – 400...500 °С, никеля – 700...750 °С, кобальта – 520...570 °С. Длительность процесса восстановления 1 - 3 ч при толщине слоя окисла 20...25 мм. После восстановления получают губку, которая легко растирается в порошок.

Порошок вольфрама получают из вольфрамового ангидрида, являющегося продуктом разложения вольфрамовой кислоты H_2WO_4 (прокаливание при 700...800 °С) или паравольфрамата аммония $5(\text{Na}_4)_2\text{O} \cdot 12\text{WO}_3 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$ (разложение при 300 °С и более). Восстановление проводят либо водородом при температуре 850...900 °С, либо углеродом при температуре 1350...1550 °С в электропечах.

Этим методом (восстановления) получают порошки молибдена титана, циркония, тантала, ниобия, легированных сталей и сплавов

Электролиз

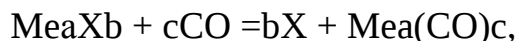
Этот способ наиболее экономичен при производстве химически чистых порошков меди. Физическая сущность электролиза состоит в том, что при прохождении электрического тока водный раствор или расплав соли металла, выполняя роль электролита, разлагается, металл осаждается на катоде, где его ионы разряжаются $\text{Me} + \text{ne} = \text{Me}$. Сам процесс электрохимического превращения происходит на границе электрод (анод или катод) - раствор. Источником ионов выделяемого металла служат, как правило, анод, состоящий из этого металла, и электролит, содержащий его растворимое

соединение. Такие металлы как никель, кобальт, цинк выделяются из любых растворимых 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 поверхностно активных веществ. Очень большое влияние на характер осадков оказывает чистота электролита, материал электрода и характер его обработки.

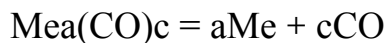
Карбонильный процесс

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

- получение карбонила из исходного соединения



- образование металлического порошка



Основным требованием к таким соединениям является их легколетучесть и небольшие температуры образования и термического разложения (кипения или возгонки). На первой операции - синтеза карбонила - отделение карбонила от ненужного вещества X достигается благодаря летучести карбонила. На втором этапе происходит диссоциация (разложение) карбонила путем его нагрева. При этом возникающий газ CO может быть использован для образования новых порций карбониллов. Для синтеза карбониллов используют металлсодержащее сырье: 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 °С, Этим

методом получают порошки железа, никеля, кобальта, хрома, молибдена, вольфрама.

2.2. Свойство металлических порошков

Свойство металлических порошков характеризуются химическими, физическими и технологическими свойствами. Химические свойства металлического порошка зависят от химического состава, который зависит от метода получения порошка и химического состава исходных материалов. Содержание основного металла в порошках составляет 98 - 99 %. Допустимое количество примесей в порошке определяется допустимым их количеством в готовой продукции. Исключение сделано для окислов железа, меди, никеля, вольфрама и некоторых других, которые при нагреве в присутствии восстановления легко образуют активные атомы металла, улучшающие спекаемость порошков. В металлических порошках содержится значительное количество газов (кислород, водород, азот и др.), как адсорбированных на поверхности, так и попавших внутрь частиц в процессе изготовления или при последующей обработке, газовые пленки на поверхности частиц порошка образуются самопроизвольно из-за ненасыщенности полей силовых в поверхностных слоях. С уменьшением частиц порошка увеличивается адсорбция газов этими частицами.

При восстановлении химических соединений часть газов-восстановителей и газообразных продуктов реакции не успевает выйти наружу и находится либо в растворенном состоянии, либо в виде пузырей. Электролитические порошки содержат водород, выделяющийся на катоде одновременно с осаждением на нем металла. В карбонильных порошках присутствуют растворенные кислород, окись и двуокись углерода, а в распыленных порошках – газы, механически захваченные внутрь частиц.

Большое количество газов увеличивает хрупкость порошков и затрудняет прессование. Интенсивное выделение газов из спрессованной

заготовки при спекании может привести к растрескиванию изделий. Поэтому перед прессованием или в его процессе применяют вакуумирование порошка, обеспечивающее удаление значительного количества газов.

При работе с порошками учитывают их **токсичность** и **пирофорность**. Практически все порошки оказывают вредное воздействие на организм человека, однако и компактном виде (в виде мелких частичек порошка) большинство металлов безвредно. **Пирофорность**, т.е. способность к самовозгоранию при соприкосновении с воздухом, может привести к воспламенению порошка и даже взрыву. Поэтому при работе с порошками строго соблюдают специальные меры безопасности. Физические свойства частиц характеризуют; форма, размеры и гранулометрический состав, удельная поверхность, плотность и микротвердость.

Форма частиц. В зависимости от метода изготовления порошка получают соответствующую форму частиц: сферическая – при карбонильном способе в распылении, губчатая – при восстановлении, осколочная – при измельчении в шаровых мельницах, тарельчатая

- при вихревом измельчении, дендритная – при электролизе, каплевидная - при распылении. Эта форма частиц может несколько изменяться при последующей обработке порошка (размол, отжиг, грануляция). Контроль формы частиц выполняют на микроскопе. Форма частиц значительно влияет на плотность, прочность и однородность свойств прессованного изделия. Размер частиц и гранулометрический состав. Значительная часть порошков представляет собой смесь частиц порошка размером от долей микрометра до десятых долей миллиметра. Самый широкий диапазон размеров частиц у порошков, полученных восстановлением и электролизом. Количественное соотношение объемов частиц различных размеров к общему объему порошка называют гранулометрическим составом.

Удельная поверхность – это сумма наружных поверхностей всех частиц, имеющих в единице объема или массы порошка. Для

металлических порошков характерна величина удельной поверхности от 0,01 до 1 м²/г (у отдельных порошков – 4 м²/г у вольфрама, 20 м²/г у карбонильного никеля). Удельная поверхность порошка зависит от метода получения его и значительно влияет на прессование и спекание.

Плотность. Действительная плотность порошковой частицы, носящая название пикнометрической, в значительной мере зависит от наличия примесей закрытых пор, дефектов кристаллической решетки и других причин и отличается от теоретической. Плотность определяют в приборе – пикнометре, представляющем собой колбочку определенного объема и заполняемую сначала на 2/3 объема порошком и после взвешивания дозаполняют жидкостью, смачивающей порошок и химически инертной к нему. Затем снова взвешивают порошок с жидкостью. И по результатам взвешиваний находят массу порошка в жидкости и занимаемый им объем. Деление массы на объем позволяет вычислить пикнометрическую плотность порошка. Наибольшее отклонение плотности порошковых частиц от теоретической плотности наблюдают у восстановленных порошков из-за наличия остаточных окислов, микропор, полостей.

Микротвердость порошковой частицы характеризует ее способность к деформированию. Способность к деформированию в значительной степени зависит от содержания примесей в порошковой частице и дефектов кристаллической решетки. Для измерения микротвердости в шлифованную поверхность частицы вдавливают алмазную пирамиду с углом при вершине 136° под действием нагрузки порядка 0,5... 200 г. Измерение выполняют на приборах для измерения микротвердости ПМТ-2 и ПМТ-3.

Технологические свойства порошка определяют: насыпная плотность, текучесть, прессуемость и формуемость.

Насыпная плотность – это масса единицы объема порошка при свободном заполнении объема.

Текучесть порошка характеризует скорость заполнения единицы объема и определяется массой порошка, высыпавшегося через отверстие заданного диаметра в единицу времени. От текучести порошка зависит скорость заполнения инструмента и производительность при прессовании. Текучесть порошка обычно уменьшается с увеличением удельной поверхности и шероховатости частичек порошка и усложнением их формы. Последнее обстоятельство затрудняет относительное перемещение частиц.

Влажность также значительно уменьшает текучесть порошка.

Прессуемость и формуемость. Под прессуемостью порошка понимают свойство порошка приобретать при прессовании определенную плотность в зависимости от давления, а под формуемостью – свойство порошка сохранять заданную форму, полученную после уплотнения при минимальном давлении. Прессуемость в основном зависит от пластичности частиц порошка, а формуемость – от формы и состояния поверхности частиц. Чем выше насыпная масса порошка, тем хуже, в большинстве случаев, формуемость и лучше прессуемость. Количественно прессуемость определяется плотностью спрессованного брикета, формуемость оценивают качественно, по внешнему виду спрессованного брикета, или количественно – величиной давления, при котором получают неосыпающийся, прочный брикет.

Глава 3. ФОРМОВАНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ

Целью формования порошка является придание заготовкам из порошка формы, размеров, плотности и механической прочности, необходимых для последующего изготовления изделий. Формование включает следующие операции: отжиг, классификацию, приготовление смеси, дозирование и формование.

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 – это процесс разделения порошков по величине частиц. Порошки с различной величиной частиц используют для составления смеси, содержащей требуемый процент каждого размера. Классификация частиц размером более 40 мкм производят в проволочных ситах. Если свободный просев затруднен, то применяют протирачные 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 задачей ее является обеспечение однородности смеси, так как от этого зависят конечные 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 и установках непрерывного действия.

Равномерное и быстрое распределение частиц порошков в объеме смеси достигается при близкой по абсолютной величине плотности смешиваемых компонентов. При большой разнице абсолютной величины плотностей наступает расслоение компонентов. В этом случае полезно применять раздельную загрузку 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 объемов 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.

Для формования изделий из порошков применяют следующие способы: прессование в стальной пресс-форме, изостатическое прессование, прокатку порошков, мундштучное прессование, шликерное формование, динамическое прессование.

Прессование в стальной пресс-форме

При прессовании, происходящем в закрытом объеме (рис. 3) возникает сцепление частиц, и получают заготовку требуемых формы и размеров. Такое изменение объема происходит в результате смещения и деформации отдельных частиц и связано с заполнением пустот между частицами порошка и заклинивания – механического сцепления частиц. У пластичных материалов деформация возникает вначале у приграничных контактных участков малой площади под действием огромных напряжений, а затем распространяется вглубь частиц.

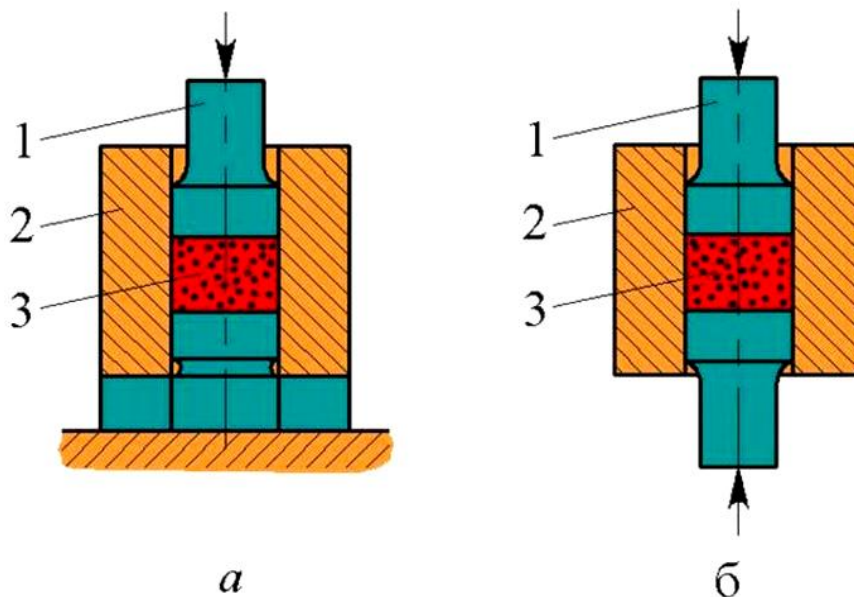


Рис. 3. Схема прессования в пресс-форме (1 – пуансон, 2 – матрица, 3 – порошок)

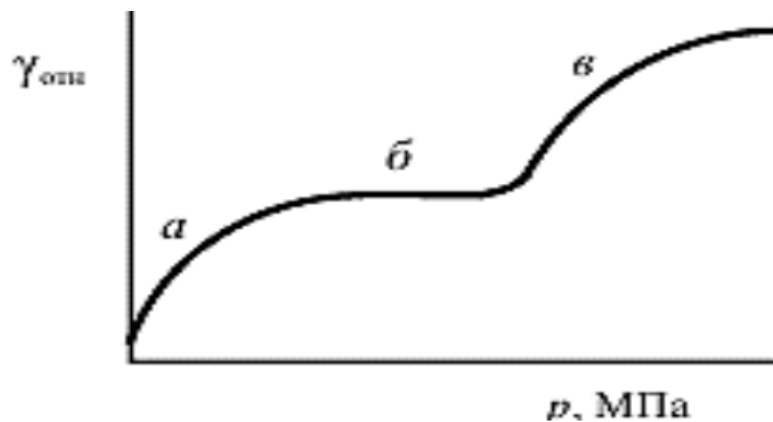


Рис. 4. Кривая процесса уплотнения частиц порошка

У хрупких материалов деформация проявляется в разрушении выступов частиц. Кривая процесса уплотнения частиц порошка имеет три характерных участка (рис. 4). Наиболее интенсивно плотность нарастает на участке «а» при относительно свободном перемещении частиц, занимающих пустоты. После этого заполнения пустот возникает горизонтальный участок «б» кривой, связанный с возрастанием давления и практически неизменяющейся плотностью, т.е. неизменным объемом порошка. При достижении предела текучести при сжатии порошкового тела начинается деформация частиц и третья стадия процесса уплотнения (участок «в»). При перемещении частиц порошка в пресс-форме возникает давление порошка на стенки. Это давление меньше давления со стороны сжимающего порошок пуансона из-за трения между частицами и боковой стенкой пресс-формы и между отдельными частицами. Величина давления на боковые стенки зависит от трения между частицами, частицами и стенкой пресс-формы и равна 25...40 % вертикального давления пуансона. Из-за трения на боковых стенках по высоте изделия вертикальная величина давления получается неодинаковой: у пуансона наибольшей, а у нижней части – наименьшей (см. рис. 3). По этой причине невозможно получить по высоте отпрессованной заготовки равномерную плотность. Неравномерность плотности по высоте заметна в тех случаях, когда высота больше минимального поперечного сечения. При прессовании засыпанных в цилиндрическую пресс-форму одинаковых доз порошка, разделенных прокладками из тонкой фольги, получают отдельные слои различной формы и размера.

В вертикальном направлении каждый верхний слой оказывается тоньше нижележащего. Изгиб слоев объясняется меньшей скоростью перемещения порошка у стенки из-за трения, чем в центре. Наибольшая плотность получается на расстоянии около 0.2...0.3 наименьшего поперечного размера прессуемого изделия, что связано с действием сил трения между торцом пуансона и порошком.

Для получения более качественных изделий после прессования

- получения более равномерной плотности по различным сечениям применяют смазки (стеариновую кислоту и ее соли, олеиновую кислоту, поливиниловый спирт, парафин, глицерин и др.), уменьшающие внутреннее трение и трение на стенках инструмента. Смазку обычно)- в порошок, что обеспечивает наилучшие производственные показатели.

При выталкивании изделия из пресс-формы из-за упругого увеличения ее поперечных размеров, размеры изделия несколько превышают размеры поперечного сечения матрицы. Величина изменения размеров зависит от величины зерен и материала порошка, формы и состояния поверхности частиц, содержания окислов, механических свойств материала, давления прессования, смазки, материала матрицы и пуансона и других параметров. В направлении действия прессующего усилия изменения размеров больше, чем в поперечном направлении.

Представленная схема (см. рис. 3) показывает одностороннее прессование, которое применяют для прессуемых изделий с соотношением высоты и к наименьшему размеру поперечного сечения $d:H/d = 2...3$. Если это соотношение больше 3, но меньше 5, то применяют схему двухстороннего прессования; при большем соотношении размеров применяют другой метод.

Прессование сложных изделий, т.е. изделий с неодинаковыми размерами в направлении прессования, связано с трудностями обеспечения равномерной плотности спрессованного изделия в различных сечениях. Эту задачу решают путем применения нескольких пуансонов, через которые прикладывают к порошку различные усилия (рис. 5). Иногда при изготовлении изделий сложной формы предварительно прессуют заготовку, а затем придают ей окончательную форму при повторном обжатии - прессовании и спекании.

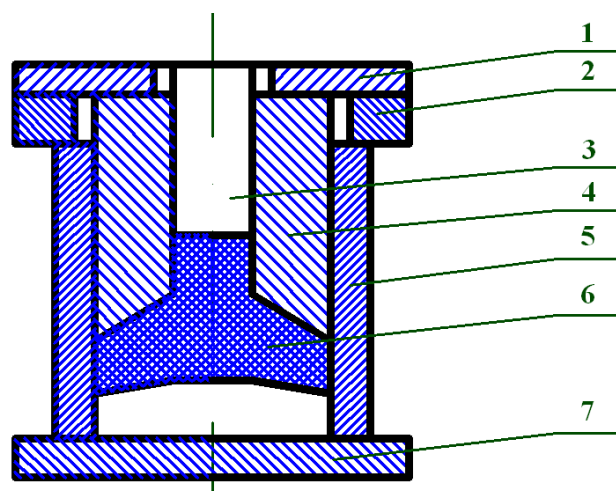


Рис. 5. Схема прессования в пресс-форме сложного изделия:

1, 2, 7 – прокладки, 3, 4 – пуансоны, 5 – матрица, 6 – вставка

При прессовании кроме стальных пресс-форм - основного инструмента производства используют гидравлические универсальные или механические прессы. Для прессования сложных изделий используют специальные многоплунжерные прессовые установки.

Давление прессования зависит в основном от требуемой плотности изделий, вида порошка и метода его производства. Давление прессования зависит в основном от требуемой плотности изделий, вида порошка и метода его производства. Давление прессования в этом случае может составлять (3 - 5) пределов текучести материала порошка.

Изостатическое прессование – это прессование в эластичной оболочке под действием всестороннего сжатия. Если сжимающее усилие создается жидкостью, прессование называют гидростатическим. При гидростатическом прессовании порошок засыпают в резиновую оболочку и затем помещают ее после вакуумирования и герметизации в сосуд, в котором поднимают давление до требуемой величины. Из-за практического отсутствия трения между оболочкой и порошком спрессованное изделие получают с равномерной плотностью по всем сечениям, а давление прессования в этом случае меньше, чем при прессовании в стальных пресс-формах. Перед прессованием порошок подвергают виброуплотнению. Гидростатическим

прессованием получается цилиндры, трубы, шары, тигли и другие изделия сложной формы. Этот способ выполняют в специальных установках для гидростатического прессования.

Недостатком гидростатического прессования является невозможность получения прессованных деталей с заданными размерами и необходимость механической обработки при изготовлении изделий точной формы и размеров, а также малая производительность процесса.

Мундштучное прессование – это формование заготовок из смеси порошка с пластификатором путем продавливания ее через отверстие в матрице. В качестве пластификатора применяют парафин, крахмал, поливиниловый спирт, бакелит. Этим методом получают трубы, прутки, уголки и другие изделия большой длины. Схема процесс представлена на рис. 6.

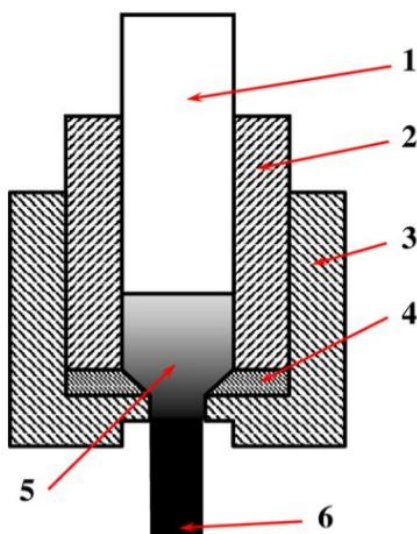


Рис. 6. Схема мундштучного прессования: 1– пуансон, 2 – матрица, 3 – мундштук, 4 – конусная вставка, 5 – порошок, 6 – формовка

Обычно мундштучное прессование выполняют при подогреве материала изделия и в этом случае обычно не используют пластификатор; порошки алюминия и его сплавов прессуют при 400 °С, меди - 800...900 °С, никеля - 1000...1200 °С, стали - 1050...1250 °С. Для предупреждения окисления при

горячей обработке применяют защитные среды (инертные газы, вакуум) или прессование в защитных оболочках (стеклянных, графитовых, металлических - медных, латунных, медно-железной фольге). После прессования оболочки удаляют механическим путем или травлением в растворах, инертных спрессованному металлу.

Шликерное формование – представляет собой процесс заливки шликера в пористую форму с последующей сушкой. Шликер в этом случае - это однородная концентрированная взвесь порошка металла в жидкости. Шликер готовят из порошков с размером частиц 1...2 мкм (реже до 5...10 мкм) и жидкости – воды, спирта, четыреххлористого водорода. Взвесь порошка однородна и устойчива в течение длительного времени. Форму для шликерного литья изготавливают из гипса, нержавеющей стали, спеченного стеклянного порошка. Формирование изделия после заливки формы взвесью порошка заключается в направленном осаждении твердых частиц на стенках формы под действием направленных к ним потоков взвеси (порошка в жидкости). Эти потоки возникают в результате впитывания жидкости в поры гипсовой формы под действием вакуума или центробежных сил, создающих давление в несколько мегапаскалей. Время наращивания оболочки определяется ее толщиной и составляет 1...60 мин. После удаления изделия из формы его сушат при 110...150 °С на воздухе, в сушильных шкафах.

Плотность изделия достигает 60 %, связь частиц обусловлена механическим зацеплением. Этим способом изготавливают трубы, сосуды и изделия сданной формы.

Динамическое прессование – это процесс прессования с использованием импульсных нагрузок. Процесс имеет ряд преимуществ: уменьшаются расходы на инструмент, уменьшается упругая деформация, увеличивается плотность изделий. Отличительной чертой процесса является скорость приложения нагрузки. Источником энергии являются: взрыв заряда взрывчатого вещества, энергия электрического разряда в жидкости,

импульсное магнитное поле, сжатый газ, вибрация. В зависимости от источника энергии прессование называют взрывным, электрогидравлическим, электромагнитным, пневмомеханическим и вибрационным. Установлено значительное выделение тепла в контактных участках частичек, облегчающее процесс их деформирования и обеспечивающее большее уплотнение, чем при статическом (обычном) прессовании. Уплотнение порошка под воздействием вибрации происходит в первые 3 - 30 с. Наиболее эффективно использование вибрации при прессовании порошков непластичных и хрупких материалов. С применением виброуплотнения удастся получить равноплотные изделия с отношением высоты к диаметру 4...5:1 и более.

Спекание

Спеканием называют процесс развития межчастичного сцепления и формирования свойств изделия, полученных при нагреве сформованного порошка. Плотность, прочность и другие физико-механические свойства спекенных изделий зависят от условий изготовления: давления, прессования, температуры, времени и атмосферы спекания в других факторов.

В зависимости от состава шихты различают твердофазное спекание (т.е. спекание без образования жидкой фазы) и жидкофазное, при котором 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.

Все металлы имеют кристаллическое строение и уже при комнатной температуре совершают значительные колебательные движения относительно положения равновесия. С повышением температуры энергия и амплитуда атомов увеличивается и при некотором их значении возможен переход атома в новое положение, где его энергия и амплитуда снова

увеличиваются и возможен новый переход в другое положение. Такое перемещение атомов носит название диффузии и может совершаться как по поверхности (поверхностная диффузия), так и в объеме тела (объемная диффузия). Движение атомов определяется занимаемым ими местом. Наименее подвижны атомы, расположенные внутри контактных участков частичек порошка, наиболее подвижны атомы, расположенные свободно - на выступах и вершинах частиц. Вследствие этого, т.е. большей подвижности атомов свободных участков и меньшей подвижности атомов контактных участков, 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.

Усадка при спекании может проявляться в изменении размеров и объема, и поэтому различают линейную и объемную усадку. Обычно усадка в направлении прессования больше, чем в поперечном направлении. Движущей силой в процессе усадки при спекании является стремление системы к уменьшению запаса поверхностной энергии, что возможно только при сокращении суммарной поверхности частиц, порошке. Но этой причине порошки с развитой поверхностью уплотняются при спекании с наибольшей скоростью, как обладающие большим запасом поверхностной энергии.

При спекании иногда наблюдается нарушение процесса усадки.

Это нарушение выражается в недостаточной степени усадки или в увеличении объема. Причиной этого является: снятие упругих остаточных напряжений после прессования, 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 объеме пор более

7 % (когда расширение газов в закрытых порах вызывает увеличение объема). Пленки невосстанавливающихся окислов тормозят процессы диффузии, препятствуя усадке.

Рекристаллизация при спекании приводит к росту зерен и уменьшению суммарной поверхности частиц, что энергетически выгодно. Однако рост зерен ограничен тормозящим влиянием посторонних включений на поверхностях зерен: порами, пленками, примесями. Различают рекристаллизацию внутризеренную и межчастичную.

Перенос атомов через газовую среду. Это явление наблюдают при испарении вещества и конденсации его на поверхности других частиц, что происходит при определенной температуре. Такой перенос возникает из-за различной упругости паров вещества над этими поверхностями, обусловленный их различной кривизной у нескольких соприкасающихся частиц. Перенос вещества увеличивает межчастичные связи и прочность сцепления частиц, способствует изменению формы пор, но не изменяет плотности при спекании.

Влияние некоторых технологических параметров на свойства спеченных тел. Свойства исходных порошков - величина частиц, их форма, состояние поверхности, тип окислов и степень совершенства кристаллического строения - определяют скорость изменения плотности и свойства спрессованных изделий. При одинаковой плотности спеченных изделий механические и электрические свойства тем выше, чем меньше были частицы порошка, шероховатость поверхности частиц и дефекты кристаллического строения способствуют усилению диффузии, увеличению плотности и прочности изделия. Структура изделия спеченных из тонкоизмельчённых порошков отличается наличием большого числа крупных зерен, образовавшихся в результате рекристаллизации при спекании. 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, в общем, 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 минут до 2 - 3 часов. Атмосфера спекания влияет на показатели качества. Плотность изделий выше при спекании в восстановительной, чем при спекании в нейтральной среде. Очень полно и быстро проходит спекание в вакууме, которое по сравнению со спеканием в нейтральной среде обычно начинается при более низких температурах и дает повышенную плотность изделия.

Температурный интервал спекания разделяют на три этапа. На первом этапе (температура до 0,2...0,3 $T_{пл}$) плотность почти не изменяется, здесь удаляются пластифицирующие присадки и адсорбированные поверхностью частички газа, частично снимаются остаточные напряжения (1-го и частично 2-го рода), ослабляется физическое взаимодействие между частицами порошка. На втором этапе (температура около 0,5 $T_{пл}$) развиваются процессы восстановления окислов и удаления газообразных продуктов. Плотность может несколько снижаться. Третий – высокотемпературный этап (температура около 0,9 $T_{пл}$) этап интенсивного спекания, характеризуется значительным увеличением скоростей диффузионных процессов, рекристаллизации, развитием полностью металлических контактов, существенным увеличением плотности материала.

Горячее прессование – это процесс одновременно прессования и спекания порошков при температуре 0,5...0,8 температуры плавления ($T_{пл}$)

основного компонента шихты. Это позволяет использовать увеличение текучести шихты при повышенных температурах с целью получения малопористых изделий. В этом случае силы давления формования суммируются с внутренними физическими силами, приводящими к уплотнению. Наиболее существенными результатами горячего прессования являются максимально быстрое уплотнение и получение изделия с минимальной пористостью при сравнительно малых давлениях. Механизм уплотнения идентичен наблюдаемому при обычном спекании: образование межчастичного контакта, рост плотности с одновременным увеличением размеров частиц и дальнейший рост частиц при незначительном дополнительном уплотнении. Изделия после горячего прессования обладают более высоким пределом текучести, большим удлинением, повышенной твердостью, лучшей электропроводностью и более точными размерами, чем изделия, полученные путем последовательного прессования порядка и спекания. Указанные свойства тем выше, чем больше давление прессования. Горячепрессованные изделия имеют мелкозернистую структуру.

Горячее прессование нагретого порошка или заготовки выполняют в пресс-форме. Нагрев осуществляют обычно электрическим током (рис. 7).

До приложения давления к порошку пресс-форма с порошком или порошок могут быть нагреты и другим способом, материалом для изготовления пресс-форм служат жаропрочные стали (при температурах до 1000 °С) графит, силицированный графит, имеющий повышенную механическую прочность. В настоящее время расширяется применение пресс-форм из тугоплавких окислов, силикатов и других химических соединений. Для предупреждения взаимодействия прессуемого материала с материалом пресс-формы внутреннюю поверхность ее покрывают каким-либо инертным составом (жидкое стекло, эмаль, нитрид бора и др.) или металлической фольгой. Кроме того, для предупреждения окисления прессуемого изделия применяют защитные среды (восстановительные или

инертные) или вакуумирование. Горячее прессование выполняют на специальных гидравлических прессах, имеющих устройства для регулирования температуры при прессовании.

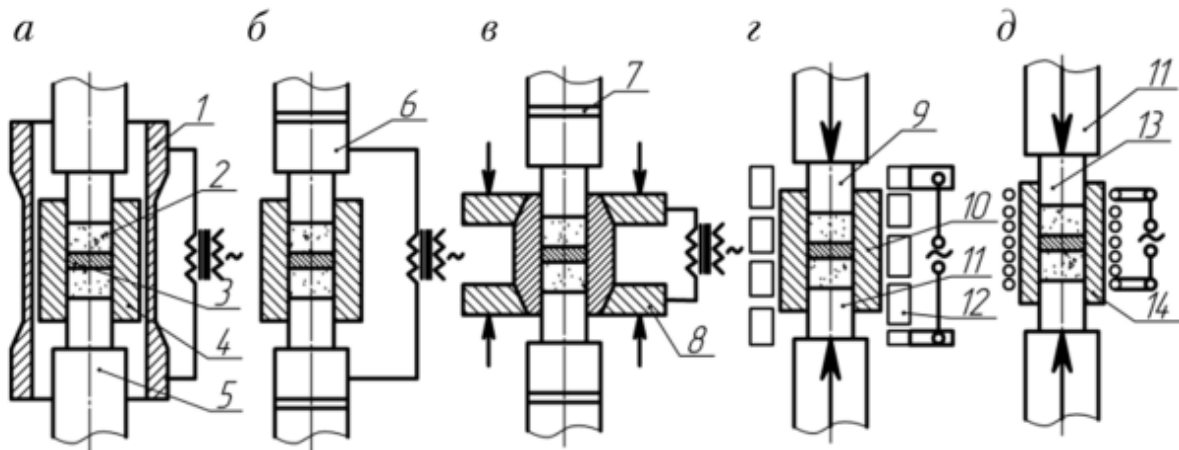


Рис. 7. Схемы конструкций пресс-форм для двустороннего горячего прессования в сочетании с нагревом: а - косвенный нагрев; б - прямой нагрев при подводе тока к пуансонам; в - простой нагрев при подводе тока к матрице; г - индукционный нагрев графитовой матрицы; д - индукционный нагрев порошка в керамической пресс-форме;
 1 - нагреватель; 2 - порошок; 3 - брикет; 4 - матрица; 5,6 - пуансоны; 7 - изоляция;
 8 - графитовый контакт; 9 - графитовый пуансон; 10 - графитовая матрица;
 11 - керамика; 12 - индуктор; 13 - керамический пуансон; 14 - керамическая матрица

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 % 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 прессонок, 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.

Дополнительные операции

Пропитка жидкими металлами. При изготовлении электроконтактных и некоторых конструкционных материалов широко применяют пропитку спрессованного и затем спеченного пористого каркаса из более тугоплавкого материала жидкой металлической составляющей композиции. При этом жидкий металл или сплав заполняет сообщающиеся поры заготовки из тугоплавкого компонента. Существует два варианта пропитки. По первому варианту на пористый каркас помещают пропитывающий металл в виде кусочка с объемом равным объему пор каркаса и нагревают в печи до температуры плавления пропитывающего материала. При этом расплав впитывается порами тугоплавкого каркаса. По второму способу пористый каркас помещают в расплав пропитывающего металла или в зацепку из порошка пропитывающего металла. Впитывание протекает под действием капиллярных сил. Скорость пропитки составляет десятые доли миллиметра в

секунду и увеличивается с повышением температуры. Температура пропитки обычно на 100...150 °С превышает температуру плавления пропитывающего металла. Однако эта температура не должна превышать температуру плавления металла каркаса. Для улучшения смачиваемости к пропитываемому металлу добавляют различные присадки.

Дополнительные технологические операции используют для достижения чистоты поверхности и точности (механическая обработка, калибровка), для получения физических и механических свойств - химико-термическая обработка и различные пропитки.

Механическая обработка имеет особенности, вызванные пористостью материала. Режущий инструмент испытывает микроудары, приводящие его к быстрому затуплению. Для обработки применяют твердые сплавы; для получения высокой чистоты поверхности применяют алмазный инструмент.

Пропитка изделий маслом (машинным или веретенным) при температуре 110...120 °С происходит в течение 1 часа, масло заполняет поры изделий и в процессе работы поступает по капиллярам к поверхности трения. Это в ряде случаев позволяет избавиться от смазки изделий в процессе работы и улучшает условия трущейся пары.

Химико-термическая обработка позволяет улучшить механические свойства изделий, расширить область применения.

Нитроцементация – увеличивает износостойкость деталей: коррозионная стойкость увеличивается по сравнению со спеченными в 6 - 8 раз: износостойкость в 30 раз при содержании азота до 1 %.

Диффузионное хромирование – увеличивает износо- и коррозионную стойкость в несколько раз.

Гальванические покрытия имеют особенность, вызванную наличием пор. Для предотвращения проникновения электролита в поры необходимо их

заполнение. Этого достигают за счет тщательной шлифовки и полировки - образуется уплотненный наружный слой с малой пористостью.

Калибрование применяют для получения размеров 6 - 11 квалитета точности и $R_a = 1,25 \dots 0,32$ мкм. Калибруют как по одному (наружному или внутреннему диаметру), так и по нескольким параметрам. Нужно иметь ввиду, что минимальный припуск необходимо брать в пределах $0,05 \dots 0,07$ мм. Детали, имеющие в структуре цементит, необходимо перед калибровкой отжиг.

Глава 4. МАТЕРИАЛЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ТЕХНОЛОГИИ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Материалы, используемые в технологии порошковой металлургии условно можно разделить на 3 группы: конструкционные, антифрикционные и фрикционные. Каждая группа материалов способна выполнить свою функцию.

К группе *конструкционных материалов* относятся материалы, из которых изготавливаются детали конструкций (машин и сооружений), воспринимающих силовую нагрузку. Определяющими параметрами таких материалов являются повышенные механические свойства, твердость, жаропрочность, коррозионная стойкость.

Антифрикционные материалы (от лат. *frictio* – трение) – это материалы, используемые для деталей машин (подшипники, втулки и др.), работающих при трении скольжения и обладающих в определённых условиях низким коэффициентом трения. Отличительной особенностью их является низкая способность к адгезии, хорошая прирабатываемость, теплопроводность и стабильность свойств. Кроме антифрикционных свойств, они должны обладать необходимой прочностью, сопротивлением коррозии в среде смазки, технологичностью и экономичностью. В большинстве случаев, антифрикционные материалы применяются для подшипников скольжения.

Фрикционные материалы применяются для изготовления деталей, работающих в условиях трения скольжения, и имеющие большой коэффициент трения (для материалов, работающих в условиях смазки, 0,05 -0,12; при сухом трении – от 0,17 до 0,25). Они обладают высокой стабильностью свойств при различных климатических условиях, высокой износостойкостью, хорошей теплопроводностью, что предопределяет длительный срок службы фрикционных дисков при эксплуатации.

Конструкционные материалы на основе железа

По условное обозначение марок состоит из букв и цифр. Буквы указывают: П – на принадлежность материала к порошковому, К – на назначении материала (конструкционный), остальные буквы – на содержание легирующих элементов (Д – медь, Х – хром, Ф – фосфор, К – сера, М – молибден, Г – марганец, Т – титан, Н – никель).

Основу материала в обозначении марок не указывают. Цифры, стоящие после букв ПК, указывают на среднюю массовую долю углерода в сотых долях процента. Массовую долю углерода, равную 1 %, в обозначении марки материала не указывают.

Цифры, стоящие после букв, указывают на массовую долю в материале легирующих компонентов в процентах; отсутствие цифры означает, что массовая доля компонента меньше или равна единице.

Условное обозначение конструкционного порошкового материала состоит из обозначения его марки и через дефис – минимальной плотности (г/см^3).

Пример условного обозначения:

– сталь порошковая конструкционная малоуглеродистая со средней массовой долей углерода 0,1 % и минимальной плотностью $6,8 \text{ г/см}^3$:

ПК10-68 ГОСТ 28378-89

сталь порошковая конструкционная медьникелевая со средней массовой долей углерода 0,4 %, никеля 2 %, меди 2 % и минимальной плотностью $6,4 \text{ г/см}^3$:

ПК40Н2Д2-64 ГОСТ 28378-89

Применение в качестве исходного материала чистого железного порошка при изготовлении конструкционных деталей ограничено из-за низких прочностных свойств спеченного железа, определяющихся характером межчастичных границ. Повышение механических свойств конструкционного изделия возможно за счёт дополнительного использования легирующих эле-

ментов (фосфор, медь, хром, никель, молибден) и операции химико-термической обработки (азотированию, сульфидированию, хромированию).

В практике машиностроения и технологии порошковой металлургии наибольшее распространение получили конструкционные порошковые материалы на основе железа: сталь малоуглеродистая, углеродистая и медистая; хромистая, марганцовистая и медьникельмарганцовистая; нержавеющая (табл. 1).

Таблица 1 - Химические составы (масс. %, основа – железо) конструкционных порошковых материалов по ГОСТ 28378–89

Марка	C	Cu	Ni	Mo	Cr	Другие элементы
1	2	3	4	5	6	7
Стали малоуглеродистые, углеродистые, медистые						
ПК10	≤ 0,30	–	–	–	–	–
ПК40	0,31–0,60	–	–	–	–	–
ПК70	0,61–0,90	–	–	–	–	–
ПК10Ф	≤ 0,30	–	–	–	–	P: 0,8–1,2
ПК10Д2Ф	≤ 0,30	1–3	–	–	–	P: 0,8–1,2
ПК10Д3	≤ 0,30	1–4	–	–	–	–
ПК10Д3К	≤ 0,30	1–4	–	–	–	S: 0,15–0,40
ПК10Д5	≤ 0,30	4–6	–	–	–	–
ПК40Д3	0,31–0,60	1–4	–	–	–	–
ПК40Д3К	0,31–0,60	1–4	–	–	–	S: 0,15–0,40
ПК40Д3КФ	0,31–0,60	1–4	–	–	–	S: 0,15–0,40
ПК70Д3	0,61–0,90	1–4	–	–	–	–
Стали никельмолибденовые, медьникелевые, медьникельмолибденовые						
ПК10Н2М	≤ 0,30	–	1–3	0,3–0,7	–	–
ПК10Н2Д2	≤ 0,30	1–3	1–3	–	–	–
ПК10Н4Д4	≤ 0,30	2–6	2–6	–	–	–
ПК10Н2Д6М	≤ 0,30	4–8	1–3	0,3–0,7	–	–
ПК40НМ	0,31–0,60	–	0,5–1,0	0,3–0,7	–	–
ПК40Н2М	0,31–0,60	–	1–3	0,3–0,7	–	–
ПК40Н2Д2	0,31–0,60	1–3	1–3	–	–	–
ПК40Н3Д2Х	0,31–0,60	1–3	2–4	–	0,5–0,15	–
ПК40Н3Д2М	0,31–0,60	1–3	1–3	0,3–0,7	–	–
ПК40Н4Д2М	0,31–0,60	1–3	3–5	0,3–0,7	–	–
ПК70Н2Д2	0,61–0,90	1–3	1–3	–	–	–

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7
Стали хромистые, марганцовистые, хромоникельмарганцовистые						
ПК70Х3	0,61–0,90	–	–	–	2,0–4,0	–
ПКХ6	0,91–1,20	–	–	–	5,0–7,0	–
ПК40Х2	0,31–0,60	–	–	–	1,0–3,0	–
ПК40Г2	0,31–0,60	–	–	–	–	Mn: 1,0–3,0
1	2	3	4	5	6	7
ПК40ХН2Г	0,61–0,90	–	1,0–3,0	–	0,5–1,5	Mn: 0,5–1,5
ПКГ13	0,91–1,20	–	–	–	–	Mn: 12,0–14,0
Стали нержавеющей						
ПК10Х13М2	≤ 0,10	–	–	1,0–3,0	12,0–14,0	–
ПК10Х25	≤ 0,10	–	–	–	24,0–26,0	–
ПК20Х13	0,10–0,30	–	–	–	12,0–14,0	–
ПК40Х13М2	0,30–0,50	–	–	1,0–3,0	12,0–14,0	–
ПК10Х17Н2	≤ 0,15	–	1,0–3,0	–	16,8–18,0	–
ПК10Х18Н9Т	≤ 0,10	–	8,0–10,0	–	17,0–19,0	Ti: 0,5–0,8
ПК10Х18Н15	≤ 0,10	–	14,0–16,0	–	17,0–19,0	–

Введение меди в материал на основе железа увеличивает предел текучести и временное сопротивление материала, но несколько снижает его пластичность и вязкость, повышает сопротивляемость порошкового материала атмосферной коррозии. При спекании железомедных материалов выше температуры плавления меди (1083 °С) медь находится в жидком состоянии, взаимодействует с железом и образует твёрдый раствор замещения на основе γ -железа с максимальной концентрацией меди в растворе до 8 %. При медленном охлаждении медь выделяется по границам зёрен железа в виде богатой медью ε -фазы, в α -железе содержание меди уменьшается до 0,2 - 0,35 %.

Введение никеля в порошковый материал на основе железа повышает прочность и пластичность стали, при этом легирование порошкового железа только никелем применяется редко вследствие необходимости высоких температур и длительных выдержек при спекании для получения однородной структуры.

Присадка к чистому железу 5 % никеля повышает прочность и твердость материала, оставляя его пластичность практически без изменений. В

связи с тем, что никель при спекании вызывает большую усадку, для получения безусадочных изделий с высокими механическими свойствами порошковые стали легируются медью и никелем. При одновременном легировании никелем и медью (Ni - 4 % и Cu - 2 %) прочность на разрыв образцов с пористостью 10 % достигает 400 - 420 МПа, удлинение – 7 - 8 %, твердость – 120 - 127 НВ. Такие же образцы, легированные только 2 % меди, показывают следующие свойства при 10 % пористости: прочность на разрыв – 280 - 300 МПа, удлинение – 3 - 4 %, твердость - 100 НВ. Наиболее благоприятное сочетание прочности и пластичности наблюдается в сплавах, содержащих от 1 до 5 % каждого из этих элементов.

Легирование порошковой стали на основе железа карбидообразующим элементом – молибденом (0,5 - 5 %) ограничено из-за низкого коэффициента диффузии его в α - и γ -железо, что затрудняет получение однородного твёрдого раствора. Введение молибдена в железо приводит к интенсивной усадке и интенсивному росту зерна при спекании. Легирование порошковых сталей молибденом производится только при изготовлении ответственных тяжело нагруженных деталей. В практике порошковой металлургии более распространено комплексное легирование молибденом и никелем.

Распространённым и дешёвым карбидообразующим элементом является хром, способный образовывать двойные и сложные карбиды. Хром способствует увеличению прочности и износостойкости, хорошей закаляемости порошковой стали. В спеченной хромистой стали присутствует широкая гамма структур, от ферритной до сорбитной со сложными карбидами. Это объясняется высокой устойчивостью оксидов, температура диссоциации которых почти достигает температуры плавления чистого хрома. Наличие оксидов затрудняет диффузионные процессы, а само спекание необходимо производить при высоких температурах в остроосушенных восстановительных средах (водороде, дислоцированном аммиаке).

Из неметаллических легирующих элементов практическое применение в порошковой металлургии нашёл фосфор. По соображениям вязкости содержание фосфора в порошковой стали ограничиваются 0,3 - 0,6 %. Вследствие образования твёрдых растворов с железом фосфор стабилизирует Fe_α . Стали, содержащие более 0,55 % фосфора можно спекать без фазовых превращений. Повышенная скорость самодиффузии в α -фазе способствует миграции материала при спекании и допускает спекание при пониженной температуре (1000 °C). При 0,3 % фосфора, сталь упрочняется аналогично введению 2 % меди, с усадкой более 1 %. Наличие фосфора в системах Fe – Cu – P и Fe – Ni – P способствует формированию жидкой фазы при температуре 920 °C, ускоряющей процесс спекания.

Марганец принадлежит к переходным металлам, расширяющим область существования γ -Fe, увеличивая твёрдость феррита, повышает устойчивость переохлаждённого аустенита и снижает температуру мартенситного превращения. Марганец относится к элементам, обладающим высоким упрочняющим действием в стали, одна недостаточно широко используется в порошковой стали из-за необходимости использования восстановительной атмосферы с высокой степенью осушки. Так, при температуре 800 °C необходимо использование атмосферы с точкой росы – 77 °C, при температуре 1100 °C – 54 °C.

Титан, как легирующий элемент железа не используется. Он применяется как элемент, который оказывает влияние на другой легирующий элемент. Так в композиции Fe – Ni – Co – Mo, титан образует с никелем твёрдые фазы, упрочняющие металл.

В результате термообработки сера с железом образует эвтектику - сульфид железа, температура плавления которого 988 °C. Сульфид железа вызывает красноломкость, то есть хрупкость при высоких температурах, так при нагреве до 1000 - 1200 °C сульфид железа, располагающийся по границам зёрен, разрушает связи между зёрнами и при деформации вызывает по-

явление трещин. Механические свойства порошковых конструкционных материалов на основе железа представлены в табл. 2.

Таблица 2 - Механические свойства порошковых конструкционных материалов

Марки	Плотность, 10^3 кг/м^3	Твердость НВ, МПа	Временное сопротивление при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %
	Не менее			
1	2	3	4	5
<i>Стали малоуглеродистые, углеродистые, медистые</i>				
ПК10	6,0	400	100	2
	6,4	500	140	3
	6,8	650	180	4
	7,2	800	220	6
	7,6	900	260	20
<i>Стали малоуглеродистые, углеродистые, медистые</i>				
ПК40	6,0	550	140	—
	6,4	750	190	1
	6,8	900	240	2
	7,2	1000	290	4
	7,6	1100	400	10
ПК70	6,0	800	200	—
	6,4	1000	250	1
	6,8	1200	300	1
	7,4	1450	600	4
ПК10Ф	6,8	650	200	3
ПК10Д2Ф	6,0	600	200	1
ПК10Д3	6,0	550	160	1
	6,4	650	200	2
	6,8	750	240	3
	7,4	900	500	15
ПК10Д3К	6,0	550	160	1
	6,4	650	200	2
ПК10Д5	6,0	750	200	—
	6,4	850	240	1
	6,8	950	280	2
	7,4	1100	600	10
ПК40Д3	6,0	800	220	—
	6,4	1000	280	—
ПК40Д3К	6,0	800	220	—
	6,4	1000	280	—
ПК40Д3КФ	6,0	850	240	—
	6,4	1050	300	—

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5
ПК70ДЗ	6,0	1000	270	—
	6,4	1200	340	—
	6,8	1400	420	—
	7,4	1600	700	3
<i>Стали никельмолибденовые, медьникелевые, медьникельмолибденовые</i>				
ПК10Н2М	6,8	700	240	8
	7,2	850	270	12
	7,6	1000	450	18
1	2	3	4	5
ПК10Н2Д2	6,4	700	240	3
	6,8	900	270	4
	7,2	1100	300	6
	7,6	1300	500	15
ПК10Н4Д4	6,4	900	300	2
	6,8	1200	500	3
ПК10Н2Д6М	7,4	1800	800	3
ПК40НМ*	6,8	900	300	4
	7,2	1100	340	6
	7,6	1300	600	10
<i>Стали никельмолибденовые, медьникелевые, медьникельмолибденовые</i>				
ПК40Н2М*	6,4	800	260	2
	6,8	1000	320	4
	7,2	1200	380	5
	7,6	1400	700	7
ПК40Н2Д2*	6,4	1000	300	1
	6,8	1200	360	2
	7,4	1500	700	5
ПК40Н3Д2Х*	6,4	1200	350	1
	6,8	1500	500	2
ПК40Н2Д2М*	6,8	1500	440	3
	7,4	1800	780	6
ПК40Н4Д2М*	6,8	1800	600	1
	7,4	2200	880	4
ПК70Н2Д2*	6,4	1200	330	—
	6,8	1500	440	—
	7,4	2000	800	3
<i>Стали хромистые, марганцовистые, хромоникельмарганцовистые</i>				
ПК70Х3*	6,4	1100	350	—
	6,8	1400	450	—
ПК40Х2*	6,4	900	300	1
	6,8	1100	400	2
	7,4	1400	700	4
ПКХ6*	7,4	1800	800	—
ПК40Г2*	7,4	1400	700	5
ПК40ХН2Г*	6,4	1000	320	1
	6,8	1200	450	2
	7,4	1500	850	6
ПКГ13*	7,4	2400	—	—

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5
<i>Стали нержавеющей</i>				
ПК20X13M2*	7,4	1000	400	12
ПК10X25	7,4	1600	400	15
ПК20X13*	6,4	1800	320	1
	6,8	2100	420	2
	7,4	2500	480	6
ПК40X13M2*	7,4	2800	550	4
ПК10X17H2*	6,8	2300	400	2
	7,2	2700	500	8
1	2	3	4	5
ПК10X18H9T	6,4	850	320	3
	6,8	950	380	4
	7,2	1050	400	5
	7,6	1300	550	15
ПК10X18H15	6,4	800	300	4
	6,8	900	380	5
	7,2	1000	400	6
	7,6	1250	550	20

Примечание. Нормы временного сопротивления, относительного удлинения и твердости являются справочными и приведены для выбора марок материала. Для марок с плотностью $7,4 \text{ г/см}^3$ и самозакаливающихся материалов свойства приведены для отожженного состояния. * Самозакаливающиеся стали. Технологическими операциями процесса изготовления изделий конструкционного назначения из порошка железа являются:

- шихтоприготовление;
- прессование;
- спекание;
- калибрование;
- повторное спекание;
- пропитка;
- пароксидирование.

В табл. 3 приведены области применения, назначения и дополнительные способы обработки порошковых конструкционных материалов на основе железа.

Таблица 3 - Области применения, свойства и виды дополнительных обработок порошковых конструкционных материалов по ГОСТ 28378–89

Обозначения марок по ГОСТ	Обозначение материалов по ГОСТ	Основная область применения	Характеристика свойств и видов дополнительной обработки
1	2	3	4
ПК10	ПК10-6,0	Изделия пористые ненагруженные	1, 7.1
	ПК10-6,4		
	ПК10-6,8		
ПК40	ПК40-6,0		1, 4
	ПК40-6,4		
	ПК40-6,8		
ПК10Д3	ПК10Д3-6,0		1, 2, 7.1
	ПК10Д3-6,4		1, 4
ПК10Д3К	ПК10Д3К-6,0		1, 2, 3, 7.1
	ПК10Д3К-6,4		
ПК10Д5	ПК10Д5-6,0		1, 7.2
	ПК10Д5-6,4		
ПК10Ф	ПК10Ф-6,8		1, 6
ПК10Д2Ф	ПК10Д2Ф-6,0		1
ПК10Н2М	ПК10Н2М-6,8		1, 5, 7.1
ПК10Н2Д2	ПК10Н2Д2-6,4	Изделия пористые малонагруженные	1, 7.1
	ПК10Н2Д2-6,8		
ПК40Д3	ПК40Д3-6,4		1, 2, 4
	ПК40Д3-6,8		
ПК40Д3К	ПК40Д3К-6,0		1, 2, 3, 4
	ПК40Д3К-6,4		1, 4
ПК40Д3КФ	ПК40Д3КФ-6,8	Изделия пористые малонагруженные	1, 2, 3, 4
ПК40Д3КФ	ПК40Д3КФ-6,4		1, 3, 4,
ПК40Н2Д2	ПК40Н2Д2-6,4		4, 5
ПК40Н3Д2Х	ПК40Н3Д2Х-6,4		
ПК10Д3	ПК10Д3-6,8		1, 2, 7.1
ПК10Д5	ПК10Д5-6,8		1, 7.2
ПК10Н4Д4	ПК10Н4Д4-6,4	Изделия пористые средненагруженные	1, 2.4, 7.1
	ПК10Н4Д4-6,8		
ПК40Н2Д2	ПК40Н2Д2-6,8		4, 5, 7.3
ПК40ХН2Г	ПК40ХН2Г-6,8		
ПК40Х2	ПК40Х2-6,8		4, 7.3
ПК40НМ	ПК40НМ-6,8		1, 4, 7.3
ПК40Н2М	ПК40Н2М-6,8	Изделия пористые нагруженные	1, 4, 5, 7.3
ПК40Н2Д2М	ПК40Н2Д2М-6,8		4, 5, 7.3
ПК40Н4Д2М	ПК40Н4Д2М-6,8		
ПК70	ПК70-6,0	Изделия пористые износостойкие	7.3
	ПК70-6,4		
	ПК70-6,8		
ПК70Д3	ПК70Д3-6,0		
	ПК70Д3-6,4		

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4
	ПК70ДЗ-6,8		
	ПК70Н2Д2-6,8		
ПК70ХЗ	ПК70ХЗ-6,4	Изделия пористые высокоизносостойкие	7.3
	ПК70ХЗ-6,8		
ПК10	ПК10-7,2	Изделия плотные малонагруженные	1, 7.1
	ПК10-7,6		
ПК40	ПК40-7,2	Изделия плотные среднеагруженные	1, 4, 7.3
	ПК40-7,6		
ПК10ДЗ	ПК10ДЗ-7,4		1, 7.1, 7.2
ПК10Д2Н2	ПК10Д2Н2-7,2		1, 7.1
	ПК10Д2Н2-7,6		
	ПК10Н2М-7,6		
ПК40Н2Д2	ПК40Н2Д2	Изделия плотные тяжелонагруженные	4, 5, 7.1, 7.4
ПК40Н2Д2М	ПК40Н2Д2М		1, 4, 5, 7.3, 7.4
ПК40НМ	ПК40НМ-7,6		
ПК40Н2М	ПК40Н2М-7,6		
ПК10Д5	ПК10Д5-7,2		
ПК10Н3Д6М	ПК10Н3Д6М-7,2		—
ПК70	ПК70-7,4	Изделия плотные износостойкие	7.3
ПК70ДЗ	ПК70ДЗ-7,4		7.3, 7.4
ПК70Н2Д2	ПК70Н2Д2-7,4		
ПК40Х2	ПК40Х2-7,4	Изделия плотные износостойкие, подвер- гающиеся большим ударным нагрузкам	4, 5, 7.3, 7.4
ПК40Г2	ПК40Г2-7,4		
ПК40ХН2Г	ПК40ХН2Г-7,4		
ПК40Н4Д2М	ПК40Н4Д2М-7,4		
ПКХ6	ПКХ6-7,4	Изделия плотные высокоизносостойкие	7.3, 7.4
ПКГ13	ПКГ13-7,4		
ПК20Х13	ПК20Х13-6,4	Изделия износостойкие коррозионностойкие	8.1, 7.4
ПК10Х17Н2	ПК10Х17Н2-6,8		8.2, 7.4
ПК10Х18Н9Т	ПК10Х18Н9Т-6,4	Изделия пористые коррозионно-стойкие	1, 3, 7.1, 8.3
	ПК10Х18Н9Т-6,8		
ПК10Х18Н15	ПК10Х18Н15-6,4		
	ПК10Х18Н15-6,8		
ПК20Х13	ПК20Х13-7,4	Изделия плотные износостойкие и коррозионно-стойкие	8.1, 7.4
ПК40Х13М2	ПК40Х13М2-7,4		8.2, 7.4
ПК10Х17Н2	ПК10Х17Н2-7,4		

Примечание. В таблице приняты следующие обозначения характеристики свойств и видов дополнительной обработки: 1 - изделия, подвергающиеся калиброванию с целью получения точных размеров; 2 - изделия с незначительным изменением размеров при спекании; 3 - изделия, хорошо обрабатываемые резанием; 4 - изделия с умеренной износостойкостью; 5 - изделия с повышенной ударной вязкостью; 6 - изделия магнитомягкие;

7 - изделия, подвергаемые термической обработке по действующим НТД; 7.1 - химико-термической; 7.2 - старению; 7.3 - закалке и отпуску; 7.4 - отжигу с целью улучшения обрабатываемости резанием; 8 - изделия коррозионностойкие: 8.1 - в атмосферных условиях; 8.2 - в слабоагрессивных средах; 8.3 - в агрессивных средах; 8.4 - в агрессивных средах, кроме кипящих растворов солей и кислот; 8.5 - стойкие к межкристаллитной коррозии; 9 - изделия жаростойкие; 10 - изделия со стабильным коэффициентом теплового расширения; 12 - все изделия при необходимости могут подвергаться защитным покрытиям по действующим НТД; 13 - все изделия, за исключением содержащих медь, могут подвергаться сварке.

Антифрикционные материалы на основе железа

По ГОСТ [7] условное обозначение состоит из букв и цифр. Буквы указывают: П – принадлежность материала к порошковому, А – назначение материала – антифрикционный, после дефиса – основа материала и легирующие элементы: Ж – железо, Д – медь, О – олово, Гр – графит, Х – хром, Н – никель, Ф – фосфор, Б – бор, К – сера, Мс – дисульфид молибдена, Цс – сернистый цинк, Л – латунь, М – молибден.

Пример условного обозначения:

- порошковый антифрикционный материал на основе железа легированный углеродом по ГОСТ 26802:

ПА - ЖГр ГОСТ 26802-86.

Химический состав, пористость, твёрдость и микроструктура порошковых антифрикционных материалов на основе железа представлены в табл.

4.

Таблица 4 - Химический состав, механические свойства и микроструктура порошковых антифрикционных материалов на основе железа

Марка	Cu	C	S	Прочее	Пористость, %	Твёрдость НВ, МПа	Микроструктура
	%						
1	2	3	4	5	6	7	8
ПА-Ж	-	0,3	-	-	17-34	200	Феррит, поры, допускается перлит до20 %
ПА-ЖД	2,5-3,5	0,3	-	-	12-28	450	-
ПА-ЖД5	4,8-10,0	0,5	-	-	16-27	500	То же, допускаются отдельные включения меди, цементитадо 10 %
ПА-ЖК	-	0,3	0,1-0,5	-	17-22	400	Феррит, включения сульфидов, поры, допуск. перлит до 20 %,включения цементита до 5 %
ПА-ЖГр	-	0,5-1,2	-	-	15-25	500	Перлит, графит, поры, доп. феррит до 40 %, включения цементита до 10 %
ПА-ЖГр2	-	1,4-2,0	-	-	15-25	500	То же
ПА-ЖГр3	-	2,2-3,2	-	-	15-25	450	То же
ПА-ЖГрД	2,3-3,5	0,5-1,2	-	-	15-25	600	То же
ПА-ЖГр2Д	2,5-3,0	1,5-2,8	-	-	13-23	600	То же
ПА-ЖГрД5	4,8-10,0	0,7-1,3	-	-	16-27	500	То же, допускаютсявключения меди
ПА-ЖГрК	-	0,6-1,2	0,6-1,0	-	17-23	500	Перлит, графит, вкл. сульфидов, поры, допускается феррит до 40%, отдельные включения цементита до 15%
ПА-ЖГр2К		2,0-2,8	0,6-1,0	-	17-25	600	То же
ПА-ЖГрДК	2,3-3,5	0,8-1,5	0,2-0,5	-	15-25	600	То же
ПА-ЖГрДК6	2,7-3,5	0,6-1,5	1,6-6,0	-	18-25	600	Зернистый перлит, твёрдый раствор меди в железе, сульфиды, поры, включения и разорванная серкацементита

Продолжение таблицы 4

1	2	3	4	5	6	7	8
ПА-ЖГрЛ	12,0-15,0	0,4-1,5	-	Zn 5,0-7,0	Не более 18	600	Перлит, латунь, допускается феррит до 40 % и включения цементита до 15 %
ПА-ЖГрЦс	-	0,6-1,4	0,4-1,1	Zn < 2,7	15-20	500	Перлит, сульфиды, графит, поры, феррит до 30% и включения цементита до 15 %
ПА-ЖГрЗЦс	-	2,2-3,2	0,6-1,3	Zn < 2,7	10-20	600	То же
ПА-ЖГрЦсОК	-	0,7-1,4	1,5-1,9	Zn < 2,7 Sn 0,8-1,2	14-20	500	Перлит, феррит 30 - 60 %, сульфиды, графит, поры
ПА-ЖГрФК	-	0,6-1,2	0,8-1,2	P 0,3-0,7	До 20	1100	Перлит, сульфиды, фосфористая эвтектика, поры, допускается феррит до 40 %
ПА-ЖГрФ1К	-	0,6-1,2	0,8-1,2	P 0,8-1,2	До 20	1200	То же
ПА-ЖГрДФК	-	0,2-0,6	0,1-0,4	Cu 2,5-3,5 P 0,1-0,5	17-25	600	То же
ПА-ЖГрДФМс	-	0,2-0,6	0,6-1,5	-	18-23	500	То же и до 10% цементита
ПА-ЖГрДМс	-	0,6-1,3	1,5-2,4	Ni < 1,5 Cu 2,5-3,5 Mo 1,5-3,6	15-25	700	Перлит, сульфиды, свобод графит, поры, доп. до 40 % феррита, до 10 % цементита
ПА-ЖГрЗМ	-	1,8-3,0	-	Mo 13,0-16,0	15-23	600	Перлит, свобод графит, включения карбидов до 15%, феррит до 30%, поры
ПА-ЖНГрЗМ	-	1,8-3,0	-	Ni 39,0-43,0 Mo 13,0-16,0	12-23	700	Твёрдый раствор с участками перлита и мартенситоподобной структуры, отдельные включения карбидов, свободный графит, поры
ПА-ЖНГр10Цс	-	7,5-11,0	0,4-1,2	Ni 40,0-44,0 Zn < 1,9 Mn < 2,2	8-18	230	Твёрдый раствор с включениями участков перлита и карбидов, графит, сульфиды, поры

Продолжение таблицы 4

1	2	3	4	5	6	7	8
ПА-ЖХ18Н15КБ	-	0,2-1,5	0,3-1,5	Ni 12,0-16,0 Mo 0,2-0,5	18-26	600	Гетерогенная структура на основе легированного аустенита, включения перлитоподобного титана, карбидов, сульфидов, поры
ПА-ЖФК	-	-	0,8-1,2	P 0,3-0,7	-		Феррит с включениями сульфидов, фосфорная эвтектика, поры
ПА-ЖФ1К	-	-	0,8-1,2	P 0,8-1,2	До 20	950	То же
ПА-ЖХ20КБ	-	0,2-0,8	0,3-1,5	Mo 0,2-0,5 Cr17,0-23,0 B 0,02-0,80	20-30	700	Легированный хромом и бором феррит, включения сульфидов, карбидов, боридов, поры

Предел прочности на изгибе, временное сопротивление при растяжении и ударная вязкость антифрикционных порошковых материалов на основе железа приведены в табл. 5.

Таблица 5 - Предел прочности на изгибе, временное сопротивление при растяжении и ударная вязкость антифрикционных порошковых материалов на основе железа

Марка материала	Предел прочности при изгибе, МПа	Временное сопротивление при растяжении, МПа не менее	Ударная вязкость, кДж/м ²
1	2	3	4
ПА-Ж	130	85	30
ПА-ЖД	250	120	39
ПА-ЖД5	300	150	40
ПА-ЖК	170	120	-
ПА-ЖДК	250	120	30
1	2	3	4
ПА-ЖГр	140	120	30
ПА-ЖГр2	110	100	20
ПА-ЖГр3	110	70	15
ПА-ЖГрД	250	150	30

Продолжение таблицы 5

1	2	3	4
ПА-ЖГр2Д	200	150	25
ПА-ЖГрД5	250	150	30
ПА-ЖГрК	140	100	30
ПА-ЖГр2К	150	100	20
ПА-ЖГрДК	200	150	25
ПА-ЖГрДК1	200	150	20
ПА-ЖГрДК6	220	-	-
ПА-ЖГрЛ	-	300	150
ПА-ЖГрЦс	180	140	-
ПА-ЖГр3Цс	160	100	20
ПА-ЖГрЦсОК	180	-	-
ПА-ЖГрФК	-	180	70
ПА-ЖГрФ1К	-	240	60
ПА-ЖГрДФК	-	200	20
ПА-ЖГрДФМс	200	200	20
ПА-ЖГрДМс	220	200	40
ПА-ЖГр3М	150	60	10
ПА-ЖНГр3М	250	180	20
ПА-ЖНГр10Цс	50	50	8

Условия работы и области применения материалов приведены в табл. 6.

Таблица 6 - Условия работы и области применения порошковых антифрикционных материалов на основе железа

Марка	Условия работы	Область применения
1	2	3
ПА-Ж ПА-ЖК	Работают при обильной смазке, давлении до 2,5 МПа и скоростях скольжения 1-2 м/с. В режиме самосмазывания нагрузки до 1,5 МПа, коэффициент трения 0,03-0,06. Присутствие серы увеличивает срок службы и улучшает обрабатываемость материала	Прецизионные подшипники приборов, бытовой аппаратуры, текстильного оборудования
ПА-ЖД, ПА-ЖД5, ПА-ЖДК, ПА-ЖГр, ПА-ЖГр2, ПА-ЖГр3, ПА-ЖГрД, ПА-ЖГрД5, ПА-ЖГр2Д	Работают в условиях ограниченной и обильной смазки при давлениях до 4 и 10 МПа соответственно и скорости скольжения до 3 м/с; в режиме самосмазывания до 2 МПа. Коэффициент трения 0,035-0,125 в зависимости от количества смазки и состава материала. Материалы с увеличенным содержанием графита работают на верхнем пределе указанных нагрузок, при скоростях скольжения до 5 м/с имеют больший срок службы, меньший износ и коэффициент трения. Присутствие серы увеличивает износостойкость и улучшает обрабатываемость материала	Подшипники и детали узлов трения тракторов, сельхозмашин, станков, приборов, аппаратов бытовой техники, автомобилей, например, деталей телескопических амортизаторов, редукторов лебедки и др.

Продолжение таблицы 6

1	2	3
ПА-ЖГрК, ПА-ЖГр2К, ПА-ЖГрДК, ПА-ЖГр ДК1, ПА-ЖГрДК6, ПА-ЖГрЦс	Работают в режиме самосмазывания и ограниченной подачи смазки при давлении до 12 МПа, при скоростях скольжения 3 - 8 м/с, при повышенных температурах до 250 °С. Коэффициент трения 0,01 - 0,1	Подшипники скольжения и другие детали узлов трения автомобилей, станков, различных машин и механизмов. Например, втулки направляющей клапана компрессора бытового холодильника и др.
ПА-ЖГрЛ	Работает в условиях ограниченной смазки при давлении 8 Мпа, скорости скольжения 2 - 5 м/с и температуре от -60 до +100°С; имеет коэффициент трения не более 0,1 и улучшенную притираемость по сравнению с латуной	Пробки кранов воздушных, водяных, паромасляных и других систем, например, кранов тормозных систем паровозов, вагонов и др.
ПА-ЖГрЗЦс	Работает в режиме самосмазывания ограниченной смазкой при скоростях скольжения до 100 м/с; давлениях до 20 Мпа при скорости 5-10 м/с. Работает в паре с закаленными сталями, имеет высокую износостойкость (до 8 раз большую, чем бронзы, баббиты, подшипники качения, чугуны), низкий коэффициент трения (0,02-0,2), величина которого зависит от условий трения	Подшипники, втулки, вкладыши, торцовые уплотнения быстровращающихся валов различных машин, двигателей, электроверетен, приборов и т. д.
ПА-ЖГрЦсОК	Работает в режиме самосмазывания и ограниченной смазки в диапазоне скоростей скольжения 5 -75 м/с при давлениях от 0,1 до 10 МПа, уменьшающихся с повышением скорости. Работает в паре с закаленными и нормализованными сталями, обладает повышенной износостойкостью (в 2,5 раза превышает износостойкость пористого бронзографита), имеет коэффициент трения 0,03 - 0,1	Узлы трения вьюркового веретена, подшипники активатора стиральной машины и др. Бытовых приборов, текстильного оборудования и т. п.
ПА-ЖГрФК, ПА-ЖГрФ1К	Работает в условиях ограниченной смазки при давлении до 20 МПа; скорости скольжения от 0,5 до 12 м/с. Коэффициент трения 0,01- 0,05. Мало-пористые материалы используются для работы без смазки при давлениях до 3 МПа. Рабочая температура до 200 °С, коэффициент трения 0,19-0,33	Подшипники и другие детали узлов трения станков, машин и механизмов

Продолжение таблицы 6

1	2	3
ПА-ЖГрДФК, ПА-ЖГрДФМс, ПА-ЖГрДМс	Работают в условиях ограниченной смазки и без смазки при давлениях до 2,5 МПа. Имеют низкий износ и коэффициент трения 0,08-0,12	Детали узлов трения автомобилей (шайбы, сухари, втулки), например, втулка маятникового рычага передней подвески автомобиля ГАЗ-14 и др.
ПА-ЖГрЗМ, ПА-ЖНГрЗМ	Работают в условиях ограниченной смазки без смазки в широком диапазоне скоростей скольжения от 0,1 до 100 м/с; допустимые давления до 18 МПа, температура до 450 °С на воздухе. Имеют коэффициент трения 0,03 - 0,20, повышенную износостойкость по сравнению с другими материалами на основе железа. Введение никеля повышает коррозионную стойкость материала, позволяет использовать его при трении в присутствии влаги и ее паров	Подшипники верхних опор скольжения шпинделя барабанов хлопкоуборочных машин, электрометров, уплотнения бессмазочных компрессоров, приборов и др.
ПА-ЖНГрЮЦс	Предназначен для работы в воде, паре и других несмазывающих жидкостях; работает по закаленным и незакаленным поверхностям. Допустимые давления до 10 МПа, скорости скольжения до 50 м/с, температура до 250 °С; коэффициент трения 0,03 - 0,3 в зависимости от режима трения. Имеет в 2- 6 раз более высокую износостойкость по сравнению с антегмитом, текстолитом, пластографитом и фторопластом	Горцовые уплотнения насосов установок по обработке молока, масла и молочных продуктов; подшипники опор скольжения моечных ванн, красильно-отделочных и сушильных агрегатов текстильной промышленности и т. п.
ПА-ЖФК, ПА-ЖФ1К, ПА-ЖФКМ	Работают в условиях ограниченной смазки при давлениях до 20 МПа, в диапазоне скоростей скольжения 0,5 - 6,0 м/с; рабочая температура до 200 °С; коэффициент трения 0,009 - 0,030. Малопористые материалы способны работать без смазки при давлениях до 3,5 МПа и скорости скольжения 0,8 м/с. Коэффициент трения 0,19 - 0,30.	Подшипники и другие детали узлов трения станков; машин и механизмов
ПА-ЖХ20КБ, ПА-ЖХ18Н15КБ	Предназначены для работы без смазки в воде и других агрессивных средах, при температурах до 600 °С, скоростях скольжения до 60 м/с. Имеют более высокую износостойкость в присутствии абразива, чем закаленная сталь 40Х13.	Армировочные втулки насосов водоподъема, подшипники химической аппаратуры, двигателей, приборов и т. д.

Антифрикционные материалы на основе меди

В порошковой металлургии достаточно широкое распространение получили антифрикционные материалы на основе меди – бронзы. Бронзами называют медные сплавы, в которых основными легирующими элементами являются различные металлы, кроме цинка. Бронза по сравнению с латуной обладает более высокой прочностью, коррозионной стойкостью и антифрикционными свойствами. Бронза весьма стойка на воздухе, в морской воде, растворах большинства органических кислот, углекислых растворах. Большинство бронз (за исключением алюминиевых) хорошо поддаются сварке и пайке твердыми и мягкими припоями. По [8] химический состав и механические свойства антифрикционных порошковых материалов на основе меди представлены в табл. 7 и 8.

Таблица 7 - Химический состав антифрикционных порошковых материалов на основе меди

Марка	Sn	C	Fe	Ni	Cr	Пористость, %	Твердость, НВ, МПа	Микроструктура
1	2	3	4	5	6	7	8	9
ПА-БрО	9,5-10,5	До 0,25	-	-	-	18-27	350	Однородный α -твердый раствор олова в меди, поры. Допускается присутствие эвтектоида, состоящего из твердого раствора и фазы $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$
ПА-БрОГр	9,5-10,5	0,5-1,0	-	-	-	15-28	250	То же и графит
ПА-БрОГр2	9,0-11,0	1,5-2,5	-	-	-	15-25	250	-
ПА-БрОГр4	9,0-11,0	3,0-4,5	-	-	-	10-25	200	-
ПА-БрОГр	7,5-8,5	0,5-1,0	19-21	-	-	18-28	200	-
ПА-БрОХ	4,5-5,5	-	-	6,5-7,5	9,5-10,5	4-20	900	Однородный α -твердый раствор Sn и Cr в меди с включением хромсодержащей фазы, поры

Продолжение таблицы 7

1	2	3	4	5	6	7	8	9
ПА-БрОХН	4,5-5,5	-	-	6,5-7,5	9,5-10,5	4-20	9000	Однородный твердый раствор Cu, Ni и Сг в меди с включениями хромсодержащей фазы и соединения Ni ₃ Sn, поры
ПА-ДГр10	-	9,0-11,0	-	-	-	2-9	200	Медная матрица с равномерно распределенными включениями графита, поры

Таблица 8 - Механические свойства антифрикционных порошковых материалов на основе меди

Марка материала	Предел прочности при изгибе, МПа	Временное сопротивление при растяжении, МПа	Ударная вязкость, кДж/м ²
	Не менее		
ПА-БрО	100	60,0	13,0
ПА-БрОГр	—	78,5	—
ПА-БрОГр2	—	70,0	—
ПА-БрОГр4	—	60,0	—
ПА-БрОЖГр	—	78,5	—
ПА-БрОХ	390	176,0	2,0
ПА-БрОХН	430	215,0	2,0
ПА-ДГр10	50	-	8,0

Условия работы и области применения порошковых антифрикционных материалов на основе меди представлены в табл. 9.

Таблица 9 - Условия работы и области применения порошковых антифрикционных материалов на основе меди

Марка	Условия работы	Область применения
ПА-БрО	При смазке маслом допустимое давление до 5 МПа при скорости скольжения 2 м/с. При ограниченной смазке маслом и в режиме самосмазывания допустимое давление до 1,9 МПа при скорости скольжения до 1,5 м/с в диапазоне температур от –60 до +120 °С. Не требуют дополнительной смазки в течение 3-5 тыс. часов, имеют низкий коэффициент трения (0,01-0,04), низкий уровень шума	Подшипники узлов трения приборов магнитной записи и воспроизведения, малогабаритных редукторов, электродвигателей, акустических приборов, машин по обработке пищевых продуктов, бытовых приборов, текстильных машин и др. Применяются с целью замены подшипников качения, литых сплавов на основе цветных металлов (бронз, баббитов и др.)

Продолжение таблицы 9

1	2	3
ПА-БрОГр, ПА-БрОГр2, ПА-БрОГр4, ПА-БрОЖГр	При смазке маслом допустимое давление до 6 МПа при скорости скольжения до 2 м/с. В режиме самосмазывания допустимое давление до 3 МПа при скорости скольжения 1 - 2 м/с, имеют коэффициент трения 0,03 - 0,06, низкий износ, бесшумны в работе	Подшипники узлов трения швейных машин, аппаратов и приборов бытовой техники, соковыжималок, фенов, магнитофонов, электрических двигателей малой мощности, конвейеров, счетно-вычислительных машин, плат малогабаритных редукторов, автомобилей, тракторов, комбайнов, мотоциклов и т.п. Заменяют оловянные литые бронзы, латуни, подшипники качения.
ПА-БрОХ, ПА-БрОХН	Предназначены для работы в условиях смазки при средних и тяжелых нагрузках (7 - 10 МПа), при незначительных скоростях скольжения (около 1 м/с). Могут подвергаться термобработке (закалке, старению), повышающей их физико-механические свойства. Коэффициент трения при смазке до 0,1 без смазки до 0,7	Детали узлов трения для машиностроения, автостроения, приборостроения, гидронасосов, судостроения и др. Заменяют баббиты, литые бронзы типа марок Бр05Ц5С5; БрО012; БрОЗО; БрАЖ9-4, БрАЖМц10-3-1,5 и др.
ПА-ДГр10	Предназначены для работы без смазки, при высоких скоростях скольжения (до 50 м/с), в присутствии активных жидких и газовых сред	Узлы трения насосов, приборов и др. механизмов, торцевые уплотнения быстровращающихся валов

Пористые проницаемые материалы

Одним из важных направлений порошковой металлургии является создание пористых проницаемых материалов, отличительной особенностью которых является наличие взаимосвязанной системы пор. Такая система пор обеспечивает проницаемость газов и жидкостей, способность задерживать инородные включения, транспорт жидкости по капиллярам и удержание её в порах, способность поглощать энергию ударов и вибрации, рассеивать открытое пламя. Пористые проницаемые порошковые изделия характеризуются большой проницаемостью, устойчивостью к тепловым ударам, возможностью регенерации (частично или полностью восстанавливать свои фильт-

рующие способности), а также имею возможность управления их свойствами в широких пределах.

Производство пористых материалов методом порошковой металлургии включает в себя две основные технологические операции, которые определяют весь комплекс эксплуатационных свойств получаемых материалов: формование и спекание.

Бронзовые пористые проницаемые материалы

Основным сырьём таких изделий является порошок оловянистой или свинцовистой бронзы. Способ изготовления включает спекание порошка свободной насыпкой в специальной технологической оснастке (нержавеющая сталь) в защитно-восстановительной атмосфере при температуре 800 ± 20 °С.

Пористые проницаемые материалы из коррозионностойкой стали

Исходным материалом является порошок коррозионностойкой стали Х18Н9 (ПРХ18Н9) ГОСТ 14086-79. Способ изготовления изделия включает в себя прессование при давлении 5 тс/см^2 и спекание при температуре 1300 °С. Отличительной особенностью изделий из коррозионностойкой стали является возможность применения в агрессивных средах.

Никелевые пористые проницаемые материалы

Исходным материалом является порошок никелевый карбонильный ПНК-0Т2 ГОСТ 9722-79. Способ изготовления – прессование при давлении 3 – 4 тс/см² и спекание в среде защитно-восстановительной атмосферы при температуре 1000 – 1050 °С.

Титановые пористые проницаемые материалы

Исходным материалом являются титановые порошки, восстановленные из TiO₂гидридом кальция, а также порошки сплавов Ti-Zr-Al. Фильтрующие элементы из порошка титана используются для фильтрации питьевой воды, соков с тонкостью фильтрации 3 – 10 мкм, очистки воды от примесей железа, алюминия, других металлов, нитратов, бактериологических загрязнений.

Высокопористые ячеистые материалы

Исходный материал – порошки К-монеля, никелевых, медных сплавов, нихромов, керамические. Способ изготовления – осаждение металлического порошка из шликера на полимерную основу с последующим её термическим разложением, удалением и спеканием металлических частиц при температурах, зависящих от используемого материала. Размер ячеек фильтрующего элемента от 0,5 до 5,0 мм, пористость – 99 %.

Фрикционные материалы

В настоящее время в машиностроении возможно применение фрикционных материалов: на основе термореактивных смол (формованные из массы; прессованные из картона (картонно-бакелитовые) со специальной пропиткой; изготовленные из текстильной ленты с пропиткой (тканобакелитовые); спирально-навитые, изготовленные из армированной нити с пропиткой; эллипсо-навитые, из армированной нити, но уложенные более рациональным способом); углерод-углеродные (представляют собой композиты на основе углеродных тканей и высокомодульных волокон, использующихся в тормозах самолётов, гоночных машин Формула-1, спортивных мотоциклов, высокоскоростного железнодорожного транспорта и подъёмно-транспортных устройств); асбофрикционные; кевларовые (использующиеся в электронно-управляемых автоматических трансмиссиях престижным моделям автомобилей, в частности в трансмиссии Chrysler A604); металлокерамические.

Все компоненты, входящие в состав металлокерамических фрикционных материалов, получаемых методом порошковой металлургии условно можно разделить на три категории:

- материалы основы;
- материалы смазки, предохраняющие фрикционный материал от чрезмерного износа;

- материалы, обеспечивающие высокое значение фрикционных свойств.

В общем случае использование металла в качестве материала основы обеспечивает материалу высокую теплопроводность и прирабатываемость, а также большую величину отношения коэффициента трения материала к интенсивности его износа при торможении, что является очень важным для улучшения эффективности работы фрикционного узла.

Следует отметить, что среди большого разнообразия **материалов основы** (титан, оксид алюминия, окись меди, серый чугун, никель, алюминий и др.) наибольшее распространение получили медь для работы в условиях смазки и железо для работы без смазки. При высокой температуре на поверхности трения, медь, имеющая относительно низкую температуру плавления, проявляет склонность к схватыванию с контртелом, приводящую к вырыванию частичек материала, намазыванию на стальную поверхность, неустойчивости работы. Эти обстоятельства ограничивают её применение только для низкотемпературных узлов, температура на поверхностях, трения которых не превышает 300 °С. При более высоких рабочих температурах на поверхностях трения (до 1000...1200 °С) в качестве материала основы используется железо.

Общеизвестный принцип дополнительного легирования различными элементами для улучшения комплекса свойств, применим и для фрикционных материалов. Наибольшее распространение в качестве легирующего элемента для фрикционных материалов на медной основе получило олово 8 - 12 %, дающее возможность получать твёрдый раствор (оловянистая бронза) с комплексом высоких прочностных, триботехнических и эксплуатационных свойств. Бронза является наиболее эффективным материалом в условиях трения, а процесс получения готового изделия характеризуется высокой технологичностью. В [2] указывается, что по результатам исследований в условиях трения со смазкой, большей износостойкостью характеризуются бронзы

с однофазной гомогенной структурой. Согласно диаграмме состояния, медь-олово при температуре спекания фрикционного материала на основе меди МК-5 и М-140 порядка 780 °С образуется твёрдый раствор, в который переходит до 15 % олова.

Многими авторами отмечается, что концентрация олова в составе оловянистой бронзы существенно влияет на скорость приработки и величину износа в процессе приработки. Металлические вещества (свинец, висмут, сурьма) и не металлические (графит, дисульфид молибдена, сульфид меди, нитрид бора) являются по мнению многих авторов основными материалами, служащими **в качестве смазки** и предохраняющими фрикционный материал от чрезмерного износа и заедания узла, улучшают антизадирные свойства. Отмечается, что для материалов, работающих в условиях смазки количество таких веществ значительно ниже (5 -10 %), чем для узлов, работающих без смазки (до 20 %), из-за того, что масло в процессе работы полностью не выдавливается и образует тонкую плёнку на трущейся поверхности.

В качестве материала смазки наиболее часто используется свинец и графит. Действие графита объясняется тем, что в процессе трения чешуйки, отрываясь одна от другой, покрывают трущиеся поверхности, создавая устойчивый защитный слой.

Действие свинца как твёрдой смазки объясняется тем, что при значительном нагреве трущейся пары, содержащиеся в структуре металлокерамики обособленные частицы свинца, расплавляются и служат своего рода неметаллической смазкой. Увеличение температуры на рабочих поверхностях приводит к увеличению количества расплавленного свинца.

Увеличение содержания материалов смазки в составе фрикционного материала приводит к снижению механических свойств, коэффициента трения и повышению износостойкости. Анализ фрикционных материалов на медной основе показал, что оптимальное содержание свинца 7 - 12 %, графита до 8 %.

Свинец и графит не взаимодействуют в процессе спекания с медью. Присутствие свинца в составе фрикционного материала на медной основе представляется в виде равномерно распределённых обособленных частиц, занимающих небольшой объём.

Добавки, обеспечивающие достаточно высокий коэффициент трения, оптимальный уровень зацепления с рабочей поверхностью сопрягаемого материала и сохранения её оптимальных свойств относятся к **фрикционным**. Суммарное содержание фрикционных добавок (оксиды кремния, алюминия, железа; нитриды бора, магния, марганца, хрома, титана; карбиды бора; силициды железа; муллит; ситалл; чугун и др.) определяется энергонагруженностью узла и составляет 0,5 - 10 % в материалах для работы при сравнительно низких температурах на рабочих поверхностях, 10 - 15 % в материалах применяемых в средненагруженных узлах, 15 - 25 % и более в материалах работающих при высоких температурах на поверхностях трения (1000 °С и выше).

Влияние фрикционных добавок на свойства порошкового материала весьма сложное и не однообразное. С увеличением их количества, уменьшается плотность материала и растёт пористость, а фрикционные, прочностные характеристики и характеристики износа, в большинстве случаев, изменяются немонотонно, проходя через максимум или минимум, т.е. для каждой из добавок существует оптимум её содержания во фрикционном материале, на это указывается многими авторами.

Глава 5. ОСНОВНЫЕ ОПЕРАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Шихтоприготовление

Операция шихтоприготовления состоит из классификации порошков по размерам частиц, смешивания. На данной технологической операции вводят технологические присадки различного назначения: пластификаторы (для снижения износа пресс-формы, увеличения плотности детали за счёт снижения коэффициента трения); легкоплавкие присадки, улучшающие процесс спекания, и различные летучие вещества, для получения деталей с заданной пористостью. Для повышения текучести порошок иногда предварительно гранулируют.

Как правило, количество пластификатора составляет 0,2 - 1,0 %, так как большее содержание приводит к росту прессовки, её разупрочнению. В табл. 10 приведены температуры плавления и кипения или диссоциации пластификаторов, применяемых в порошковой металлургии.

Таблица 10 - Температура плавления и диссоциации пластификаторов

Смазка	Формула смазки	Температура плавления, °С	Температура кипения или диссоциации, °С
Стеарат цинка	$Zn(C_{18}H_{35}O_2)_2$	140	335
Стеарат кальция	$Ca(C_{18}H_{35}O_2)_2$	180	350
Стеарат алюминия	$Al(C_{18}H_{35}O_2)_3$	120	360
Стеарат магния	$Mg(C_{18}H_{35}O_2)_2$	132	360
Стеарат свинца	$Pb(C_{18}H_{35}O_2)_2$	116	360
Стеарат лития	$LiC_{18}H_{35}O_2$	221	320
Стеариновая кислота	$CH_3(CH_2)_{16}COOH$	69,4	360
Олеиновая кислота	$C_{18}H_{33}O_2$	13	286
Бензойная кислота	C_6H_5COOH	122	249
Капроновая кислота	$CH_3(CH_2)_4COOH$	-	205
Парафин	От $C_{22}H_{46}$ до $C_{27}H_{56}$	40-60	320-390
Дисульфид молибдена	MoS_2	1185	-
Дисульфид вольфрама	WS_2	1250	-
Сульфид марганца	MnS	1655	-
Графит	C (кристаллический)	3500	-
Триоксид молибдена	MoO_3	795	-

В практике порошковой металлургии наибольшее распространение в качестве пластификатора получили стеарат цинка и дисульфид молибдена.

Прессование

С целью получения требуемой формы изделия осуществляется операция прессования. В процессе прессования увеличивается контакт между частицами, уменьшается пористость, деформируются или разрушаются отдельные частицы. Прочность получаемой заготовки обеспечивается силами механического сцепления частиц порошка, электростатическими силами притяжения и трения. С увеличением давления прессования прочность возрастает. Давление распределяется неравномерно по высоте прессуемой заготовки из-за влияния сил трения порошка о стенки пресс-формы. Это является причиной получения заготовок с различной прочностью и пористостью по высоте. В зависимости от габаритных размеров и сложности прессуемых заготовок применяют одно- и двустороннее прессование.

Односторонним прессованием изготавливают заготовки простой формы с отношением высоты к диаметру меньше единицы и заготовки типа втулок с отношением диаметра к толщине стенки меньше трех, вследствие чего обеспечивается равномерная плотность получаемых заготовок. Двусторонним прессованием получают заготовки сложной формы, при этом требуемое давление для получения равномерной плотности уменьшается на 30 - 40 %.

При извлечении детали из пресс-формы ее размеры увеличиваются. Величина упругого последействия в направлении прессования составляет 0,3 - 0,5 % и 0,1 - 0,2 % в направлении, перпендикулярном прессованию. В табл. 11 приведены значения давлений прессования для получения требуемой плотности изделия.

Таблица 11 - Режимы технологических операций для получения изделий с требуемой плотностью

Плотность, г/см ³	Режимы технологических операций
6,0 – 6,6	Давление прессования – 500...700 МПа, температура спекания – 1150...1200 °С, время – 2 часа
6,7 – 7,1	Давление прессования – 400...600 МПа; I спекание: температура 800...850 °С, время – 1 час; допрессовка под давлением 600...1000 МПа; II спекание: температура – 1150...1200 °С, время – 2 часа
7,2 – 7,5	Давление прессования 400 – 600 МПа, спекание при температуре 1150...1200 °С, время – 2 часа; нагрев до 1100 °С и штамповка под давлением 800...1000 МПа
7,6 – 7,8	Давление прессования 600...700 МПа, спекание при температуре 1100...1200 °С, время – 2 часа совместно с пропиткой медью или латунью

Спекание

Спекание проводят для повышения прочности предварительно спрессованных заготовок. В процессе спекания вследствие температурной подвижности атомов порошков одновременно протекают такие процессы, как диффузия, восстановление поверхностных окислов, рекристаллизация и др. Температура спекания обычно составляет 0,6–0,9 температуры плавления порошка однокомпонентной системы или ниже температуры плавления основного материала для порошков, в состав которых входит несколько компонентов. Процесс спекания рекомендуется проводить за три этапа: I – нагрев до температуры 150...200 °С (удаление влаги); II – нагрев до 0,5 температуры спекания (снятие упругих напряжений и активное сцепление частиц); III – окончательный нагрев до температуры спекания. Время выдержки после достижения температуры спекания, но всему сечению составляет 30–90 мин. Увеличение времени и температуры спекания до определенных значений приводит к увеличению прочности и плотности в результате активизации процесса образования контактных поверхностей. Превышение указанных технологических параметров может привести к снижению прочности за счет роста зерен кристаллизации. Режимы спекания для получения изделий требуемой плотности приведены в табл. 4. При содержании в смеси до 1,0 - 1,2 % графита оптимальная

температура спекания составляет 1150...1200 °С, при содержании графита выше 1,2 - 1,5 % - 1050 - 1150 °С. Время спекания определяется масштабом садки и массой изделия, и не превышает, как правило, 2 часа.

Спекание изделий из порошка проводят в среде защитно-восстановительной атмосферы. Её использование необходимо для предохранения спекаемых материалов от окисления, а также для восстановления оксидных плёнок на поверхности. Химический состав и сравнительная стоимость получения защитно-восстановительных атмосфер представлены в табл. 12.

Таблица 12 - Химический состав и сравнительная стоимость защитно-восстановительных атмосфер

Газ	Химический состав, %								Сравнительная стоимость, %
	H ₂	O ₂	N ₂	H ₂ O	NH ₃	CO	CO ₂	CH ₄	
Водород	99,8	0,2	-	0,5	-	-	-	-	100
Диссоциированный аммиак	75	-	25	0,01	0,02	-	-	-	30-50
Экзотермический газ	15-16	-	73,5	-	-	10	0,5	1,5	3-10
Эндотермический газ	38-40	-	38-42	-	-	18-20	1	1	5-20
Азот	-	-	95	-	-	-	-	-	20-30

С целью устранения цементитной сетки рекомендуется нормализация при 780 °С и выдержка при 680 °С в течение 1,5 часа. При закаливании пористых изделий наличие пор способствует образованию устойчивой паровой рубашки, ухудшающей теплоотвод от стенок изделий, и вызывает пятнистую твёрдость. Интенсивное перемешивание закалочной среды способствует повышению твёрдости изделий на 2-3 единицы. Повышение пористости уменьшает закалённую зону и способствует получению на поверхности изделий вместо структуры чистого мартенсита структуры мартенсит-бейнит или даже троостита: при переходе от поверхности в глубь изделия может наблюдаться переход от мартенситно-бейнитной структуры к троститной и даже к сорбитной (закалка в воду или водные растворы солей) или от троститной структуры к сорбитной (закалка в масло). Микротвёрдость спеченной стали после закалки составляет: при пористости 13 % 7400 – 8600 МПа, при 34 % - 6000 – 7000 МПа.

В качестве закалочной среды рекомендуется вода или водные растворы солей, для сталей склонных к охрупчиванию и коррозионному растрескиванию предпочтительнее применение масла. Изделия, полученные методом порошковой металлургии, могут подвергаться химико-термической обработке: борированию, цементация, азотирование, нитроцементация, цианирования, алитирование (для повышения твёрдости и износостойкости); силицированию (для повышения коррозионной стойкости изделий, работающих в агрессивных средах); хромированию (для повышения износостойкости, коррозионной стойкости и окислостойкости); цинкованию (для повышения коррозионной стойкости). В табл. 13 приведены технологические режимы химико-термической обработки изделий, полученных методом порошковой металлургии.

Таблица 13 - Режимы химико-термической обработки порошковых изделий

Наименование процесса	Состав насыщающей среды	Режим процесса	Твёрдость
Цементация газовая	Смесь эндогаза и городского газа (16-20%CO, 12-16%, CH ₄ +C ₂ H ₆ , 303- 40%H ₂)	950 °С, 6...12 ч, глубина слоя 0,6...1,4 мм	58-64 HRC
Цементация в твёрдом карбюраторе	Древесный уголь 70 – 76 %, CaCO ₃ <3,5 %, BaCO ₃ 20 - 25 %	920...930 °С, 6...16 ч, глубина слоя 0,6...1,8 мм	58-64 HRC (после закалки и низкотемпературного отпуска)
Азотирование газовое	Продукт диссоциированного аммиака NH ₃ при степени диссоциации 15-50%	540-560 °С, 35 - 65 ч, глубина слоя 0,5...0,7 мм	9500-10000 МПа
Нитроцементация	Эндогаз 80 - 90 %, природный газ 5 - 8 %, аммиак 2,5 – 5 %	840...870 °С, 8-9 ч, глубина слоя 0,8...1,0 мм	60 HRC (после закалки и низкотемпературного отпуска)
Цианирование высокотемпературное	При расплавлении 50 % NaCN, 50 % NaCl	840...950 °С, 1 ч, глубина слоя 0,20...0,25 мм	9800...11500 МПа (изделия с плотностью более 7,2 г/см ³)
Алитирование в порошковых смесях	Алюминий (пудра или порошок) – 49%, Al ₂ O ₃ - 49%; NH ₄ Cl-2%	900-950 °С, 2-12 ч, глубина слоя – 0,1-1,0 мм	3400...3900 МПа (процесс ведётся в среде азота или водорода)

Калибрование

В порошковой металлургии возможно применение двух методов калибрования: раздельное калибрование по внутреннему и наружному диаметрам и комбинированное (объёмное) - одновременно по наружному и внутреннему диаметрам. На практике наиболее часто применяют комбинированный метод.

К главным факторам, определяющим усилие калибрования, относятся размеры калибруемых изделий, толщина стенок, пористость, материал изделий, припуск на калибровку. При выборе калибрующего оборудования принимается расчётное усилие калибрования равное 40 - 120 % усилия прессования, при этом: при калибровании по внутреннему и внешнему диаметрам усилие калибрования должно составлять 40 - 50 %; при объёмном 100 - 120 %.

Точность размеров, прессованных не термообработанных изделий соответствует: для высотных размеров 12 - 14 квалитетам, для диаметральных – 6 - 8 квалитетам.

При проектировании пресс-форм на калибровку следует учитывать явление упругого последействия. Так в табл. 14 приведены значения упругого последействия при различной пористости и значения калибруемого размера.

Таблица 14 - Влияние упругого последействия (%) к припуску на калибрование

Пористость, %	Калибровочный припуск (%) от калибровочного размера		
	0,5	1,0	1,5
15,0	0,12	0,2	0,3
22,5	0,1	0,15	0,2
30,0	0,06	0,1	0,15

Точность размеров после операции калибрования определяется в основном точностью прессового оборудования и используемой технологической оснастки.

Наружный и внутренний диаметры изделий калибруются с разными припусками, так: наружный - по возможности с большим (обеспечивая надлежащую прочность посадки и закрытие пор); внутренний – по возможности

меньшим (чтобы выровнять имеющую шероховатость, упрочнить и уплотнить материал). Применение очень больших припусков на калибровку наружного диаметра нецелесообразно, так как приводит к резкому возрастанию высоты калибровочных пресс-форм за счёт удлинения заходной части, а также переуплотнению всего объёма изделия или даже появлению поясных трещин на втулке.

В табл. 15 приведены калибровочные припуски наружного диаметра при калибровании изделий из железного графита и железа при различной пористости.

Таблица 15 - Калибровочные припуски для калибрования наружного диаметра

Материал	Пористость, %	Калибровочный припуск (%) от калибруемого размера		
		минимальный	средний	максимальный
железографит	15,0	0,5	0,7	0,8
	22,5	0,8	1,0	1,2
	30,0	1,0	1,2	1,5
железо	15,0	0,6	0,8	0,9
	22,5	0,9	1,2	1,3
	30,0	1,2	1,4	1,6

Минимальные припуски следует применять тогда, когда условия работы изделий характеризуются небольшими и спокойными нагрузками, а также в том случае, если толщина стенок втулки не превосходит 3 мм и отношение длины втулки к диаметру не менее двух.

Максимальный припуск рекомендуется применять для изделий, работающих в тяжёлых условиях, а также когда соотношение длины и диаметра втулки близко к единице.

Среднее значение припуска может применяться всюду, где условия работы не относятся к категории тяжёлых.

Особенность выбора припуска на калибрование внутренней поверхности втулки состоит в том, что его величина не связана с размерами изделия. Эту величину необходимо согласовать с характеристиками условий эксплуатации, исходной шероховатостью спеченной поверхности и спецификой деформируемости материала.

Для повышения качества калиброванной поверхности минимальное значение калибровочного припуска для поверхности трения должна превосходить высоту микронеровностей спеченной поверхности в 2 – 2,5 раза, то есть минимальный припуск для калибрования поверхностей трения должен быть не менее 2,5 или 0,2 – 0,3 мм.

Увеличение минимального припуска при объёмном калибровании не вызывает существенного изменения наклёпа, а уплотнение пористого каркаса растёт значительно. С учётом этого не рекомендуется принимать калибровочные припуски для калибрования поверхностей трения более 0,5 мм не зависимо от размера втулки.

Парооксидирование

Одним из методов, позволяющих повысить антифрикционные и коррозионные характеристики изделий является оксидирование. В технологии порошковой металлургии получило распространение паротермическое оксидирование, суть которого состоит в создании оксидной плёнки перегретым паром. Процесс состоит в нагреве до температуры 350 – 370 °С, выдержка 20-30 минут, подача нагретого пара до температуры 250 – 280 °С, подъём температуры до 550 °С и выдержки в течение 1,5 часа. При этом на поверхности формируется оксидная плёнка толщиной 10-18 мкм состоящая из магнетита (Fe_3O_4) и незначительного (0,2 – 2,3 %) количества $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$.

Глава 6. ИЗДЕЛИЯ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ И ИХ СВОЙСТВА

6.1. Металлокерамические подшипники

Металлокерамические материалы являются в ряде случаев эффективными заменителями антифрикционных подшипниковых сплавов - бронзы, латуни и др.

В подшипниках скольжения находят применение следующие металло-керамические материалы: бронзографит, пористое железо и пористый железографит.

Одно из основных преимуществ металлокерамических вкладышей заключается в наличии в них пор, способствующих образованию устойчивой масляной пленки в подшипнике. В результате предварительной пропитки вкладыша (втулки) в нагретом масле большое количество капилляров вкладыша заполняется маслом и благодаря этому трущаяся поверхность обеспечивается смазочной пленкой в течение длительного времени.

Различные режимы работы требуют применения металлокерамических подшипников с различной степенью пористости. Для тяжелых условий работы (ударные нагрузки, высокие скорости), при которых нужна повышенная механическая прочность опоры, следует применять подшипники из мелких порошков (обладающие более высокими механическими и антифрикционными качествами, чем подшипники из крупных порошков) с низкой пористостью. Для средних нагрузок рекомендуется пористость 22 - 28 %. Для работы без дополнительной смазки желательно применение подшипников из крупных порошков пористостью 25 - 35 %. Чем больше пластичность и чем меньше пористость спеченного порошкового металла, тем больше он приближается по свойствам к компактному металлу.

При нормальной температуре (200 °C), спокойной нагрузке и достаточной смазке (примерно 3 капли в минуту на 1 см² поверхности трения) желе-

зографитовые подшипники пористостью 22 - 28 % удовлетворительно работают при следующих режимах:

V(м/с)	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
P(кг/см ²)	70	65	60	55	55	35	18	8

Для подшипников пористостью 15 - 20 % допускаемые удельные нагрузки могут быть повышены против указанных на 20 - 30 %. При работе металлокерамических подшипников со скоростью $v < 1$ м/с применяется консистентная смазка, при больших скоростях – жидкие минеральные масла. Подводить масло рекомендуется через такие же смазочные канавки, как у подшипников из литых металлов.

Для тонкостенных втулок с повышенной пористостью применяется также подпитка подшипника через наружную стенку.

При повышенных температурах (до 300 С° железозографитовые подшипники могут работать при малых скоростях ($v < 0,1$ м/с) с графитовой смазкой. Самосмазываемость пористых железозографитовых подшипников относится только к малым нагрузкам и скоростям, когда $p_v < 1$ кгм/см² · с.

Пористые железозографитовые подшипники изготавливают преимущественно в виде цилиндрических втулок и поставляют в готовом к установке виде. При назначении толщины стенки исходят из условий прочности и способности материала впитывать масло.

В общем случае толщина стенки может быть ориентировочно принята равной $0,2d$ (d – диаметр вала). Самосмазывающиеся подшипники лучше изготавливать относительно тонкостенными. При обычной смазке толщина стенки может быть принята примерно равной $0,1d$ (если выполнены условия прочности), но не менее 2 мм. При изготовлении металлокерамических вкладышей допуски на внутренний и наружный диаметры выдерживаются в пределах 3-го, а иногда и 2-го классов точности. Железографитовые втулки запрессовываются в корпус по прессовым посадкам. Для обеспечения зазора в подшипнике необходимо учитывать, что уменьшение внутреннего диаметра

втулки равно примерно 0,7 - 1 величины натяга. Зазор в металлокерамическом подшипнике ориентировочно принимается равным 0,001 - 0,002 диаметра вала. Доводка внутреннего диаметра до требуемого размера может быть произведена калибровкой, а также протягиванием и развертыванием.

При обработке резанием качество рабочей поверхности получается значительно ниже, чем при калибровке. При $p = 15 + 60 \text{ кг/см}^2$ и $v = 2,5 \text{ м/с}$ минимальное количество масла на 1 см^2 расчетной поверхности вкладыша составляет (ориентировочно) 1,5 - 5 капель. При больших удельных давлениях желательно применение кольцевой смазки, масляной ванны или смазки под давлением.

6.2. Пористые материалы и возможности их применения в промышленности

К группе пористых относятся антифрикционные, фрикционные материалы, фильтры и так называемые "потеющие" материалы.

Бронзовые фильтры обычно изготавливаются из порошков со сферической формой частиц, полученных путем распыления жидкого металла. Температура спекания составляет 800...900 °С. Продолжительность спекания от 30 минут до 1 часа. Бронзовые фильтры с размером частиц порошка 50...130 мкм используются для грубой очистки, 2...30 мкм – для тонкой. Бронзовые фильтры находят широкое применение в промышленности для очистки жидкого горючего в дизелях и реактивных двигателях, смазочных материалов и сжатых газов от твердых примесей размерами 5 – 200 мкм, а также для очистки разбавленных кислот и щелочей, расплавленного парафина и т.д.

Пористые материалы, изготавливаемые из порошков электролитического и карбонильного никеля методом прессования и последующего спекания при температуре 1000...1100 °С, предназначены для работы в качестве фильтров и пористых электродов. Последние находят широкое применение в электрохимии и катализе. Так, щелочные аккумуляторы, электроды которых представляют собой высокопористые никелевые пластины, по сравнению с

обычными аккумуляторами имеют меньший вес и габариты. Большое применение находят фильтры из нержавеющей стали, которые обладают более высокой коррозионной стойкостью и значительно дешевле чистого никеля. Для изготовления фильтров применяются порошки из нержавеющей сталей X17H2, X18H9, X30 и др. Технология их изготовления: прессование или прокатка с последующим спеканием при температуре 1200...1250 °С в течение 2 – 3 часов. Фильтры из нержавеющей сталей показали хорошие результаты при очистке жидкого литья, горячего доменного и мартеновского газов. Как преграда для распространения пламени они находят применение в автогенной технике, в производстве ацетилена, в газопламенной обработке металлов, в резервуарах низкокипящих и взрывоопасных жидкостей. Применение пористых материалов для борьбы с обледенением самолетов позволяет снизить на 50% расход антифриза. Использование пористого титана в различных отраслях техники обусловлено рядом его ценных свойств, главным из которых является высокая коррозионная стойкость во многих агрессивных средах и высокая удельная прочность. Пористые титановые материалы получают из порошков с размером частиц менее 60 мкм. С наполнителем, а также из электролитического порошка с размером частиц до 1 мм без наполнителя. Такие изделия спекают в специальной атмосфере при температуре 950...1150 °С в течение 1,5 – 2 часов. Пористый титан стоек в азотной кислоте и щелочных растворах, обеспечивает тонкость очистки 5 мкм и менее.

Пористое охлаждение - один из эффективных способов охлаждения высокотемпературных узлов и механизмов. Испарительное охлаждение предусматривает принудительное пропускание жидкости через пористую среду. В этом случае тепло, выделяющееся на поверхности пористого тела, поглощается и рассеивается испарительным охлаждающим устройством. Установлено, что охлаждение испарением более эффективно, чем конвективное или пленочное в равнозначных системах. Так, применение сопловых и рабочих турбинных лопаток позволило повысить температуру рабочего газа с 840 °С

до 1200 °С и увеличить снимаемую мощность на 10 %. Возможности использования пористого материала для контроля температуры на поверхности практически не ограничены. Детали из пористого металла могут использоваться для создания условия локального нагрева и одновременно они могут быть использованы для охлаждения локального перегрева механизмов.

Весьма перспективно применение в промышленности тепловых труб, обеспечивающих выравнивание температурного поля в различных аппаратах и установках и изотермические условия обработки тех или иных материалов. Так, использование низкотемпературных тепловых труб в электрических машинах для охлаждения роторов и статоров двигателей, генераторов, а также обмоток трансформаторов позволило увеличить их мощность на 30 – 50%. Успешно используются тепловые трубы для охлаждения высоковольтных выключателей большой мощности. Тепловые трубы и паровые камеры имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными элементами передачи тепла, например, циркуляционными теплообменниками: они не имеют подвижных деталей, бесшумны, не требуют расхода энергии на перекачку теплоносителя из зоны конденсации в зону испарения, обладают малым термическим сопротивлением по сравнению с металлическими стержнями таких же геометрических параметров и имеют небольшой вес.

Вышеперечисленных примеров достаточно, чтобы показать широкие возможности для использования пористых материалов в различных отраслях техники. Трудно предвидеть все возможные области применения пористых материалов и изделий из них. Одно, несомненно: потребность в пористых материалах возрастает.

Глава 7. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Благодаря структурным особенностям продукты порошковой металлургии более термостойки, лучше переносят воздействие циклических колебаний температуры и напряжения, а также ядерного облучения, что очень важно для материалов новой техники.

Порошковая металлургия имеет и недостатки, тормозящие ее развитие: сравнительно высокая стоимость металлических порошков; необходимость спекания в защитной атмосфере, что также увеличивает себестоимость изделий порошковой металлургии; трудность изготовления в некоторых случаях изделий и заготовок больших размеров; сложность получения металлов и сплавов в компактном состоянии; необходимость применения чистых исходных порошков для получения чистых металлов.

Недостатки порошковой металлургии и некоторые ее достоинства нельзя рассматривать как постоянно действующие факторы: в значительной степени они зависят от состояния и развития, как самой порошковой металлургии, так и других отраслей промышленности. По мере развития техники порошковая металлургия может вытесняться из одних областей и, наоборот, завоевывать другие. Развитие дугового, электроннолучевого, плазменного плавления и электроимпульсного нагрева позволили получать не достижимые прежде температуры, вследствие чего удельный вес порошковой металлургии в производстве несколько снизился. Вместе с тем прогресс техники высоких температур ликвидировал такие недостатки порошковой металлургии, 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 обжата порошков при высоких температурах в

основном преодолены и трудности изготовления беспористых заготовок крупных размеров.

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение порошковой металлургии, ее развитие имеет важное значение для всего мира. Например, такие как США и Япония ежегодно инвестируют и расширяют эту отрасль промышленности. Это можно проследить на следующей схеме:

Страны	1994	2004	2014	2023
США	47 тыс. т.	118 тыс. т.	812 тыс. т.	2045 тыс. т.
Япония	4 тыс. т.	17 тыс. т.	106 тыс. т.	455 тыс. т.

То есть производство спеченных металлов за период с 1994 по 2023 гг. в США возросло в 43,5 раза, а в Японии – в почти в 114 раз.

Не последнее место занимает порошковая металлургия и в нашей стране. Она представлена такими предприятиями как завод порошковой металлургии в г. Молодечно и многими другими. Неоспоримым доказательством полезности использования порошковых является то, что в период кризиса эти предприятия не только выживают, но и расширяют производство.

С увеличением масштабов выпуска и совершенствованием методов изготовления порошков решаются такие проблемы порошковой металлургии как: дороговизна исходных материалов. При массовом производстве расходы, связанные с необходимостью изготовления индивидуальных приспособлений (пресс-форм) для каждого вида деталей сократятся до минимума. С исследованием и использованием на производстве получения чистых порошков распылением расплавленного железа решены такие проблемы как необходимость получения достаточно чистых исходных материалов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Герман, Р. М. Порошковая металлургия от А до Я: учебно-справочное пособие / Р. М. Герман. - Долгопрудный: Интеллект, 2009. - 336 с. - ISBN 978-5-91559-021-2. - Текст: электронный. - URL: <https://znanium.com/catalog/product/1870056> (дата обращения: 25.05.2023).

2. Металлические порошки. Изделия из металлических порошков: справочник / М. И. Алымов, Ю. В. Левинский, Е. В. Вершинина [и др.]; под ред. д. т. н., проф. М. И. Алымова, проф. Ю. В. Левинского. - Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. - 560 с. - ISBN 978-5-9729-0736-6. - Текст: электронный. - URL: <https://znanium.com/catalog/product/1833130> (дата обращения: 25.05.2023).

3. Либенсон, Г. А. Процессы порошковой металлургии: в 2-х т. Т. 2. Формование и спекание: учебник / Г. А. Либенсон, В. Ю. Лопатин, Г. В. Комарницкий. - Москва: ИД МИСиС, 2002. - 320 с. - ISBN 5-87623-098-7. - Текст: электронный. - URL: <https://znanium.com/catalog/product/1242246> (дата обращения: 25.05.2023).

4. Волкогон, Г. М. Современные процессы порошковой металлургии: учебное пособие / Г. М. Волкогон, Ж. В. Еремеева, Д. А. Дедовской. - Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2020. - 208 с. - ISBN 978-5-9729-0509-6. - Текст: электронный. - URL: <https://znanium.com/catalog/product/1168590> (дата обращения: 25.05.2023)

Учебное издание

Перевай Татьяна Анатольевна

ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Учебное пособие

В авторской редакции

Изд. № 46/2024. Объем 5,25 п.л. Усл. печ. л. 4,88. Уч.-изд. л. 5,145.
Издательский центр ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»