

Информация

УДК 621.923

Порошковые материалы и области их применения

В.А. Скрыбин, д-р техн. наук

Пензенский государственный университет (г. Пенза, 440026, Россия)

E-mail: vs_51@list.ru

DOI: 10.31044/1994-6260-2025-0-8-43-48

Статья поступила в редакцию 18.11.2024

После доработки 27.03.2025

Принята к публикации 28.04.2025

В статье рассмотрены вопросы классификации порошковых материалов. Приведены основные группы технологических операций, необходимых для получения порошков. Рассмотрены методы получения и структура порошковых материалов. Показано, что металлические составляющие порошковых материалов обеспечивают высокую теплопроводность и прирабатываемость, а неметаллические составляющие повышают коэффициент трения и уменьшают склонность к заеданию.

Ключевые слова: порошковые материалы, классификация, технологические операции, составляющие порошковых материалов.

Порошковые материалы классифицируются на пористые и компактные. В пористых материалах после окончательной обработки сохраняется до 30% пористости, такие материалы используются преимущественно для производства фильтров и так называемых антифрикционных деталей: подшипников и втулок [1]. Эти изделия отличаются низким коэффициентом трения и пригодны к интенсивной эксплуатации, а масло, находящееся в порах подшипников, позволяет избежать их принудительного смазывания.

Компактные порошковые материалы, характеризующиеся 2–3%-й пористостью и получаемые из углеродистой стали, бронзы, латуни и алюминия, являются не менее

востребованными в различных сферах производства. В частности, используются в производстве шестеренок, корпусов подшипников и различных деталей машин.

В приборостроении и электротехнической промышленности получили широкое применение порошковые сплавы на основе цветных металлов, легко подвергаемые механической обработке и обладающие хорошей теплопроводностью и коррозионной стойкостью. Для изготовления высоконагруженных стальных деталей порошковая технология, как правило, не пригодна, хотя в первую очередь это относится к порошковым материалам с пористостью выше 3%. Исходя из этого, порошковая сталь используется

преимущественно для изготовления мало нагружаемых изделий сложной формы. Это материалы, изготовленные методом порошковой металлургии — технологическим процессом, охватывающим производство порошков металлов, сплавов и металлоподобных соединений, а также изделий из них или их смесей с неметаллическими порошками.

Порошковые материалы применяются в различных областях техники в тех случаях, когда требуются материалы со специальными свойствами, которые невозможно получить другими методами производства. В результате особенностей изготовления эти материалы имеют более высокие качественные показатели, чем материалы, полученные по традиционной технологии (литье, обработка давлением).

Порошковые материалы классифицируют по назначению (жаропрочные, коррозионно-стойкие, магнитные, антифрикционные, контактные, фрикционные и др.), по плотности (плотные, пористые), по химическому составу (чистые материалы, сплавы), по технологии получения (спеченные, компактированные). Для получения порошковых материалов применяются: твердофазное спекание, спекание в присутствии жидкой фазы, пропитка, горячее прессование, горячее изостатическое прессование. Первые четыре метода основаны на получении порошковой шихты путем смешивания компонентов, их прессования и последующего горячего спекания (или только горячего прессования); в ряде случаев применяется дополнительная обработка спеченных изделий (повторное прессование и т.п.). Эта схема является основной для получения порошковых материалов (ПМ). По такой технологии изготавливают многие изделия из ПМ, главным образом небольшие (массой 0,5—5 кг): пористые подшипники, фрикционные изделия, фильтры, твердые сплавы, магниты, контакты, изделия из тугоплавких металлов, изделия из жаропрочных сплавов (главным образом дисперсно-упрочненного типа на основе нике-

ля и алюминия), ферриты, сварочные электроды, различные детали машин и приборов. Однако такая схема не может обеспечить получение абсолютно плотного (беспористого) ПМ [2, 3], так как для этого требуется дополнительная деформация.

В последние годы интенсивно развивается новый технологический процесс получения авиационных материалов конструкционного назначения — металлургия гранул никелевых, титановых и алюминиевых сплавов. Процесс основан на получении микрослитков заданного химического состава, кристаллизующихся с высокой скоростью охлаждения, и их последующем компактировании путем изостатического прессования. Полученные прессовки (массой до 0,5—2 т) могут быть использованы как готовые изделия или как заготовки для последующей деформации. Высокая скорость охлаждения при кристаллизации позволяет вводить в сплавы повышенные количества легирующих добавок, т.е. создать новый класс порошковых материалов.

Высоколегированные порошковые материалы характеризуются равномерной мелкозернистой структурой, отсутствием пор, высоким уровнем механических свойств; применяются для изготовления деталей двигателя (диски из никелевых ПМ и др.) и фюзеляжа самолета (детали кабины сверхзвуковых самолетов из алюминиевых ПМ и др.).

Металлургия гранул позволяет значительно расширить объем применения ПМ. При использовании чистых исходных порошков можно получить спеченные материалы с меньшим содержанием примесей и с более точным соответствием заданному составу, чем у обычных литых сплавов. При одинаковом составе и плотности у спеченных материалов, в связи с особенностью их структуры, в ряде случаев свойства выше, чем у плавящихся, в частности меньше сказывается неблагоприятное влияние предпочтительной ориентировки (текстуры), которая встречается у ряда литых металлов (например, бериллия)

вследствие специфических условий затвердевания расплава. Большой недостаток некоторых литых сплавов (например, быстрорежущих сталей и некоторых жаропрочных сталей) — резкая неоднородность локального состава, вызванная ликвацией при затвердевании. Размеры и форму структурных элементов спеченных материалов легче регулировать и, главное, можно получать такие типы взаимного расположения и формы зерен, которые недостижимы для плавленного металла. Благодаря этим структурным особенностям спеченные металлы более термостойки, лучше переносят воздействие циклических колебаний температуры и напряжений, а также ядерного облучения, что очень важно для материалов новой техники.

Порошковая металлургия дает возможность получения таких материалов, которые трудно или невозможно получать другими методами. К ним относятся: некоторые тугоплавкие металлы (вольфрам, тантал); сплавы и композиции на основе тугоплавких соединений (твердые сплавы на основе карбидов вольфрама, титана и др.): композиции и так называемые псевдосплавы металлов, не смешивающихся в расплавленном виде, в особенности при значительной разнице в температурах плавления (например, вольфрам—медь); композиции из металлов и неметаллов (медь—графит, железо—пластмасса, алюминий—окись алюминия и т.д.); пористые материалы (для подшипников, фильтров, уплотнений, теплообменников) и др.

ПМ позволяет экономить металл и значительно снижать себестоимость продукции (например, при изготовлении деталей литьем и обработкой резанием иногда до 60—80% металла теряется в литники, идет в стружку).

Нанопорошки все чаще находят применение в качестве наполнителей для новых материалов и композитов, компонентов многих покрытий, катализаторов, материалов для электроники. Методов получения нанопорошков немало, но все они грешат двумя основными недостатками: во-первых, тре-

буют дорогостоящего оборудования, во-вторых, с трудом поддаются масштабированию до промышленных объемов производства. Получить качественные тонкодисперсные порошки в промышленных объемах можно на планетарных мельницах. Порошковая металлургия включает следующие основные группы технологических операций: получение исходных металлических порошков и приготовление из них шихты (смеси); компактирование порошков (или их смесей) в заготовки; спекание [4, 5].

Получение. Порошки, используемые в порошковой металлургии, состоят из частиц размером 0,01—500 мкм. Получают порошки металлов (или их соединений) механическими и физико-химическими методами. К механическим методам относят преимущественно измельчение твердых металлов. Твердые тела измельчают в мельницах с мелющими телами (барабанные вращающиеся, вибрационные, планетарные мельницы), ударного действия (вихревые, струйные, центробежные) и с вращающимися частями (аттриторы, дисковые, кавитационные, молотковые, роторные). При измельчении в мельницах хрупких материалов частицы порошка имеют осколочную форму, при измельчении пластичных материалов — чешуйчатую. Измельченные порошки характеризуются наклепом (изменением структуры и свойств, вызванным пластической деформацией) и, как правило, подвергаются отжигу.

Диспергирование, или распыление, жидких металлов и сплавов осуществляют струей жидкости или газа. При распылении водой под высоким давлением используют форсунки разных форм. Свойства распыленных порошков зависят от поверхностного натяжения расплава, скорости распыления, геометрии форсунок и других факторов. Распыление водой часто проводят в среде азота или аргона. Распылением водой получают порошки железа, нержавеющей сталей, чугунов, никелевых и др. сплавов. При распылении струи расплава газом высоко-

го давления на размер частиц влияют давление газа, диаметр струи металла, конструкция форсунки, природа сплава. В качестве распыляющего газа используют воздух, азот, аргон, водяной пар. Распыление металла осуществляют также плазменным методом или путем разбрызгивания струи металла в воду. Такими способами получают порошки бронз, латуней, олова, серебра, алюминия и др. металлов и сплавов.

Физико-химические методы получения металлических порошков включают: восстановление оксидов металлов углеродом, водородом или углеводородсодержащими газами; металлотермические способы — восстановление оксидов, галогенидов или других соединений металлов другими металлами; разложение карбониллов металлов, металлоорганических соединений; электролиз водных растворов и расплавов солей. Порошки металлоподобных соединений получают теми же методами и, кроме того, синтезом из простых веществ. Путем восстановления оксидов металлов производят порошки Fe, Co, Ni, W, Mo, Cu, Nb и других металлов. Частицы порошков имеют развитую поверхность. Разложением карбониллов металлов получают порошки Ni, Fe, W, Mo со сферической формой частиц. Электролиз водных растворов солей металлов применяют для приготовления порошков Fe, Cu, Ni, а электролиз расплавов солей — для получения порошков Ti, Zr, Nb, Ta, Fe, U.

Компактирование. Цель компактирования порошков — получение полуфабрикатов (прутки, трубы, ленты) либо отдельных заготовок, по форме приближающихся к конечным изделиям. Во всех случаях после компактирования порошок из сыпучего тела превращается в пористый компактный материал, обладающий достаточной прочностью для сохранения приданной ему формы при последующих операциях. Основные виды компактирования: одно- и двустороннее прессование в жестких металлических матрицах, прокатка, изостатическое прессование жид-

костью или газом, мундштучное прессование, шликерное литье, высокоскоростное прессование, в т. ч. взрывное, инжекционное формование.

Компактирование может осуществляться при комнатной (холодное прессование, прокатка) и при высоких температурах (горячее прессование, экструзия, прокатка). Уплотнение порошка при прессовании происходит в результате движения частиц друг относительно друга, их последующей деформации или разрушения. При относительно больших давлениях порошки пластичных металлов уплотняются в основном благодаря пластической деформации, порошки хрупких металлов и их соединений — в результате разрушения и измельчения частиц. Спрессованные заготовки из порошков пластичных металлов гораздо более прочны, чем из хрупких. Для увеличения прочности последних в порошок перед прессованием вводят жидкое связующее.

Спекание. Конечная операция порошковой металлургии — спекание — заключается в термообработке заготовок при температуре ниже температуры плавления хотя бы одного из компонентов. Его проводят с целью повышения плотности и обеспечения определенного комплекса механических и физико-химических свойств изделия. На начальной стадии спекания частицы проскальзывают друг относительно друга, между ними образуются контакты, происходит сближение центров частиц. На этой стадии скорость увеличения плотности (усадки) максимальна, но частицы еще сохраняют свою индивидуальность. На следующей стадии пористое тело может быть представлено совокупностью двух взаимно проникающих фаз — фазы вещества и «фазы пустоты». На заключительной стадии пористое тело содержит изолированные поры и уплотнение происходит в результате уменьшения их числа и размеров [6].

Спекание многокомпонентных систем осложняется взаимной диффузией. В этом случае спекание может происходить и с обра-

зованием жидкой фазы (жидкофазное спекание). Спекание, как правило, проводят в защитной (чаще всего — инертные газы) или восстановительной (водород, углеводородсодержащие газы) средах, а также в вакууме. Нагрев изделий осуществляют в электропечах (вакуумных, колпаковых, муфельных, толкательных, конвейерных, проходных, шахтных, с шагающим подом и др.), индукционных печах, прямым пропусканием тока. Спекание и прессование могут быть совмещены в одном процессе (спекание под давлением, горячее прессование).

Материалы и изделия, получаемые методами порошковой металлургии, называют порошковыми. Эти материалы условно подразделяют на конструкционные, триботехнические, фильтрующие, твердые сплавы, высокотемпературные, электротехнические, с особыми ядерными свойствами и др. Из конструкционных порошковых материалов изготавливают детали машин, механизмов и приборов, например шестерни, фланцы, зубчатые колеса, седла и корпуса клапанов, муфты, эксцентрики, кулачки, шайбы, крышки, корпуса подшипников, детали насосов, различные диски, втулки и др. Основные требования к этим порошковым материалам — повышенные механические свойства и экономичность. Детали из конструкционных порошковых материалов подразделяют на ненагруженные, мало-, средне- и сильно нагруженные, а по типу материала — на основе железа или цветных металлов и сплавов.

К триботехническим относятся антифрикционные материалы и фрикционные материалы. Оптимальные структуры антифрикционных материалов — твердая матрица и мягкий наполнитель. Для создания такой структуры наиболее эффективен именно метод порошковой металлургии. Получаемые этим методом антифрикционные изделия обладают низким и стабильным коэффициентом трения, хорошей прирабатываемостью, высокой износостойкостью, хорошей сопротивляемо-

стью схватыванию. Изделия из порошковых антифрикционных материалов являются самосмазывающимися. Твердая смазка (например, графит, селениды, сульфиды) заключена в порах самого изделия. Антифрикционные порошковые материалы могут использоваться как для изготовления объемных элементов, так и в качестве покрытий, нанесенных на подложки.

Характерный пример изделий из порошковых антифрикционных материалов — подшипники скольжения. Фрикционные порошковые материалы используют в узлах, передающих кинетическую энергию. Порошковые фрикционные материалы чаще всего состоят из металлических и неметаллических компонентов. При этом металлические составляющие обеспечивают высокую теплопроводность и прирабатываемость, а неметаллические (SiO_2 , Al_2O_3 , графит и др.) повышают коэффициент трения и уменьшают склонность к заеданию.

Фильтры из порошковых материалов по сравнению с другими пористыми изделиями обладают рядом преимуществ: высокой степенью очистки при удовлетворительной проницаемости, высокими жаростойкостью, прочностью, сопротивлением абразивному износу, теплопроводностью и др. Фильтры изготавливают спеканием свободно насыпанных или спрессованных порошков бронзы, нержавеющей стали, никеля, титана, железа. Методы порошковой металлургии позволяют изготавливать фильтры с изменяемой и регулируемой пористостью, проницаемостью и степенью очистки. Фильтры, наряду с пористыми подшипниками, составляют главную часть пористых изделий из порошковых материалов.

Методами порошковой металлургии изготавливают также пористые уплотнительные прокладки, антиобледенители, пламегасители, конденсаторы, пеноматериалы и «потеющие» материалы. Изделия из порошковых твердых сплавов, состоящих из твердых ту-

гоплавких карбидов и пластичного металлического связующего, получают путем прессования смесей порошков и жидкофазного спекания. Твердые сплавы подразделяются на содержащие WC (или его твердые растворы с др. карбидами) и безвольфрамовые (на основе TiC и др. тугоплавких соединений); они обладают высокой твердостью, прочностью, износостойкостью. Из твердых сплавов изготавливают инструменты для резания материалов, штамповки, обработки давлением, для бурения горных пород. Свойства многих инструментов из твердых сплавов существенно улучшаются при нанесении на поверхность изделий тонких (толщиной в несколько мкм) покрытий из тугоплавких соединений.

Выводы

Таким образом, технология получения порошковых материалов, основанная на дополнительном прессовании, позволяет получать практически беспористые материалы.

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет» (федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение). Никаких дополнительных гран-

тов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Витязь П.Л.** Пористые порошковые материалы и изделия из них / П.А. Витязь, В.М. Капцевич, В.К. Шелег. Минск: Выш. шк., 2005. 160 с.
2. **Скрябин В.А., Зверовщиков А.Е.** Металлографический анализ образцов из порошковых материалов // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2019. № 3. С. 33—37.
3. **Скрябин В.А., Зверовщиков А.Е.** Механизм формирования гетерогенной структуры порошковых инструментальных материалов // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2021. № 1. С. 41—44.
4. **Скрябин В.А.** Особенности финишной обработки сложногопрофильных деталей из порошковых материалов // Машиностроитель. 2004. № 9. С. 30—31.
5. **Либенсон Г.А.** Процессы порошковой металлургии в 2 т. Т. 1. Производство металлических порошков. Учебник для вузов / Г.А. Либенсон, В.Ю. Лопатин, Г.В. Копарницкий. М.: МИСИС, 2021. 368 с.
6. **Чернышева О.В.** Обработка хромовых и никелевых покрытий // Успехи современного естествознания. 2018. № 5. С. 25—32.

ООО «Наука и технологии»

Учредитель журнала ООО «Наука и технологии»

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия.

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-21982 от 21 сентября 2005 г.

Оригинал-макет и электронная версия изготовлены в ООО «СиД».

Сдано в набор 14.05.2025. Подписано в печать 15.07.2025.

Формат 60×88/8. Печать цифровая. Усл. печ. л. 5,86. Уч.-изд. л. ?,?. Тираж 120 экз. «Свободная цена».

Отпечатано в ООО «СиД»