

Журнал «Все материалы. Энциклопедический справочник»

Ежемесячный научно-технический и производственный журнал

Журнал издается с 2006 г.

В журнале приводится информация о самых различных свойствах черных и цветных металлов, сплавов, композитов, пластмасс, керамики, стекол, клеев, герметиков, связующих, каучуков, лакокрасочных материалов, резин, растворителей, стройматериалов, материалов для упаковки, драгметаллов и др.

Главный редактор

академик РАН, д-р хим. наук **А.А. Берлин**

Заместитель главного редактора

д-р техн. наук, проф. МГТУ им. Н.Э. Баумана **Г.В. Малышева**

Редакционный совет

Баннх О.А., академик РАН, д-р техн. наук
Васильев В.В., академик РАН, д-р техн. наук
Каблов Е.Н., академик РАН, д-р техн. наук
Мешалкин В.П., академик РАН, д-р техн. наук
Милехин Ю.М., академик РАН, д-р техн. наук
Новаков И.А., академик РАН, д-р хим. наук

Холькин А.И., академик РАН, д-р хим. наук
Бурханов Г.С., чл.-корр. РАН, д-р техн. наук
Стороженко П.А., чл.-корр. РАН, д-р хим. наук
Гейкин В.А., д-р техн. наук, проф.
Дуб А.В., д-р техн. наук, проф.
Кульков А.А., д-р техн. наук, проф.

Редакционная коллегия

Абраимов Н.В., д-р техн. наук
Баннх И.О., канд. техн. наук
Войтович В.А., канд. техн. наук, доц.
Ковалевский М.А., канд. эконом. наук
Кравченко И.Н., д-р техн. наук, проф.
Петрова А.П., д-р техн. наук, проф.
Русин М.Ю., д-р техн. наук, проф.

Сидоров О.И., д-р техн. наук
Симонов-Емельянов И.Д., д-р техн. наук, проф.
Стоянов О.В., д-р техн. наук, проф.
Цветков В.Е., д-р техн. наук, проф.
Шевченко Ю.Н., канд. техн. наук
Шиповская А.Б., д-р хим. наук, проф.
Юрков Г.Ю., д-р техн. наук, проф.

Редактор Кудрина А.В.

Адрес редакции:

105215, Москва, 9-я Парковая ул., д. 60.

E-mail: admin@nait.ru, <http://www.nait.ru>

Телефон редакции: (495) 988-98-67.

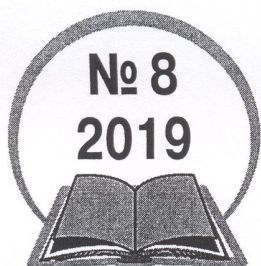
E-mail: korhimk@nait.ru

Адрес для почтовых отправлений:

105215, Москва, 9-я Парковая ул., д. 60.

За достоверность информации и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели.
При использовании материалов журнала в любой форме ссылка на журнал обязательна.

© ООО «Наука и технологии», 2019



ВСЕ МАТЕРИАЛЫ

ЭНЦИКЛОПЕДИЧЕСКИЙ СПРАВОЧНИК

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

**Рекомендован ВАК для публикации результатов диссертаций
на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук**

С 2011 г. журнал «Все материалы. Энциклопедический справочник» переводится на английский язык и выпускается издательством "Pleiades Publishing, Ltd" как приложение к журналу "Polymer Science, Series D", распространение которого осуществляет издательство "Springer".

Переводная версия журнала входит в международные реферативные базы данных систем цитирования (индексирования): Academic OneFile, Chemical Abstracts Service (CAS), El-Compendex, Expanded Academic, Google Scholar, INSPEC, OCLC, PASCAL, SCImago, SCOPUS, Summon by Serial Solutions.

СОДЕРЖАНИЕ

Композиционные материалы

- Короткова Ю.А., Шаулов А.Ю., Грачев А.В., Владимиров Л.В., Шашкин Д.П., Лалаян В.М., Берлин А.А. Низкотемпературные неорганические полимеры и армированные композиты . . . 2
- Спиридонов А.М., Соколова М.Д., Охлопкова А.А. Полимерные композиционные материалы на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена, наполненного органомодифицированным цеолитом . . . 7
- Петухова Е.С., Федоров А.Л. Исследование физико-механических свойств пластифицированных полиэтиленовых композитов при различных температурах. . . 12

Материаловедение и технология новых материалов

- Кузнецов Ю.А., Кравченко И.Н. Исследование механизма взаимодействия частиц с металлической подложкой при сверхзвуковом газодинамическом напылении . . . 18

Повышение качества материалов

- Пахомова С.А., Помельникова А.С., Рыжова М.Ю., Симич-Лафицкая Е.М. Повышение качества автомобильных сталей . . . 25
- Борукаев Т.А., Шаов А.Х., Хараев А.М., Кяров А.А. Огнестойкость и физико-механические свойства полиамида-6 и полипропилена, содержащие соли на основе меламина и минеральных кислот . . . 31

Информация

- Скрябин В.А., Спицын И.А. Свойства порошков и их влияние на структуру и свойства порошковых материалов . . . 38
- Новости литературы . . . 46

Информация

УДК 621.923

Свойства порошков и их влияние на структуру и свойства порошковых материалов

В.А. Скрябин¹, д-р техн. наук, И.А. Спицын², д-р техн. наук¹ Пензенский государственный университет (г. Пенза, 440026, Россия)² Пензенский государственный аграрный университет (г. Пенза, 440014, Россия)

E-mail: vs_51@list.ru

DOI: 10.31044/1994-6260-2019-0-8-38-45

Статья поступила в редакцию 09.01.2019

После доработки 01.03.2019

Принята к публикации 23.04.2019

В статье рассмотрены свойства порошков и их влияние на структуру и свойства порошковых материалов, рассмотрены физические свойства, характеризующие форму, размер и распределение частиц по фракциям, их удельную поверхность, плотность, микротвердость, а также технологические свойства; рассмотрены методы исследования свойств порошковых материалов, которые можно применять для изготовления и ремонта деталей из различных металлов и сплавов. Сами порошковые материалы в качестве изделий могут подвергаться финишной абразивной обработке в разных производственных условиях.

Ключевые слова: свойства порошков и их влияние на структуру и свойства порошковых материалов, химический анализ, физические свойства, структура, изготовление и ремонт деталей, финишная абразивная обработка, производственные условия.

Для получения порошковых материалов и деталей из них применяют металлические и неметаллические порошки, которые характеризуются определенными химическим составом, физическими и технологическими свойствами.

Химические свойства порошков определяются содержанием основного металла, примесей, механических загрязнений, газов. Наличие примесей зависит от состава исходных материалов, методов производства порошков, усло-

вий хранения. Содержание основного металла в порошках, как правило, составляет не менее 98—99%. Для большинства порошковых изделий такая чистота является удовлетворительной.

Большое влияние на структуру и свойства порошковых материалов оказывают оксиды, которые могут содержаться в порошках. Оксиды ухудшают прессуемость, вызывают повышенный износ пресс-форм. При спекании в восстановительной среде часть оксидов вос-

становливаются, что повышает спекаемость таких порошков. Однако при большом количестве оксидов, не восстанавливающихся при спекании, механические свойства порошковых материалов снижаются. Особенно отрицательное влияние оказывают трудно восстанавливаемые оксиды хрома, марганца, алюминия, титана и др. [1—3].

В порошках содержится значительное количество газов, адсорбированных на поверхности или попавших внутрь частиц при изготовлении порошка. Образование газа происходит при спекании в результате разложения содержащихся в порошке примесей и смазок, вводимых в состав порошковой шихты для улучшения прессуемости. Газ ухудшает условия прессования, а при спекании интенсивное выделение газа затрудняет усадку, приводит к короблению изделий и даже к образованию трещин и разрушению изделий.

Химический анализ металлических порошков проводят по методикам, применяемым для литых металлов и сплавов аналогичного состава. Исключением является кислород, содержание которого определяют по количеству образовавшегося пара при восстановлении навески порошка чистым и хорошо осушенным водородом (ГОСТ 18897—73 «Порошки металлические. Метод определения потери мас-

сы при прокаливании в водороде»). Пары воды улавливают пятиокисью фосфора, оксидом кальция или другим активным поглотителем и рассчитывают количество кислорода по привесу поглотителя.

К физическим свойствам порошков относят: форму, размер и распределение частиц по фракциям, их удельную поверхность, плотность, микротвердость.

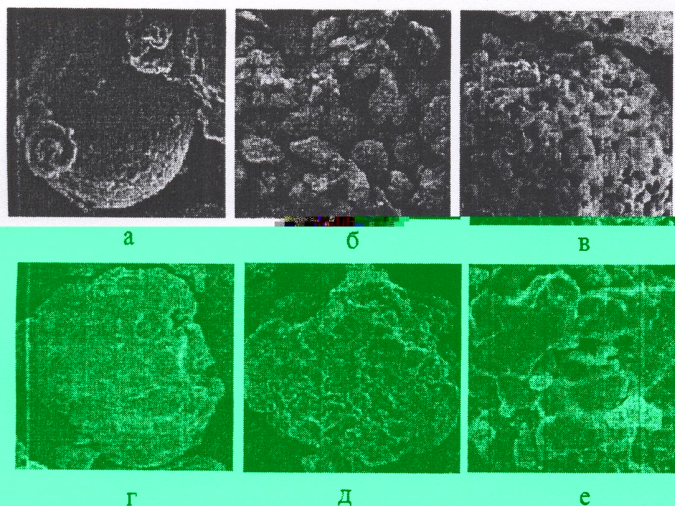
Форма частиц зависит от способа получения порошка:

Форма частиц	Способ получения
Сферическая.....	Карбонильный, распыление
Губчатая	Восстановление
Осколочная.....	Измельчение в шаровых мельницах
Тарельчатая.....	Вихревое измельчение
Дендритная.....	Электролиз

Определяют форму частиц при помощи электронного или оптического микроскопов (ГОСТ 25849—83 «Порошки металлические. Метод определения формы частиц»). При использовании оптических микроскопов пробу порошка помещают на предметное стекло и добавляют каплю глицерина или скипидара. Пробу распределяют по стеклу для разрушения конгломератов и накрывают покровным стеклом. Оценку соотношения размеров можно производить количественно с помощью статистически среднего из отношений длины частиц к поперечнику.

Более детальное изучение формы порошков и состояния их поверхности проводят на электронном растровом микроскопе. Частицы помещают в микроскоп и исследуют в диапазоне увеличений от 35 до 5000 раз. Такие исследования позволяют оценить форму частиц, их размер, состояние поверхности. Внешний вид частиц некоторых порошков показан на рисунке [4—5].

Форма частиц порошков оказывает большое влияние на физические и технологические свойства порошков: насыпную плотность, прессуемость, а также плотность прессовок и равномерность ее распределения. Наименьшую насыпную



Форма частиц порошков:

а — сферическая, (×500); б — осколочная (×100); в — коралловидная (×700); г — плотная (×500); д — губчатая (×500); е — бородавчатая (×500)

плотность имеют порошки с дендритной формой, а наибольшую — сферической. Наоборот, дендритные порошки обладают лучшей прессуемостью, а для получения прессовок высокой плотности из сферических порошков необходимо прикладывать большее давление. Порошки с чешуйчатой формой прессуются плохо и изделия из них склонны к расслоению.

Размер применяемых в порошковой металлургии частиц порошков колеблется от долей микрометра до 0,5–1,0 мм. В каждой партии порошка содержатся частицы различных размеров. В зависимости от набора размеров частиц, порошок характеризуется гранулометрическим (фракционным) составом. Фракция — это группа частиц, имеющих определенные размеры и характеризуемая максимальным и минимальным значением размеров. Например, фракция $-0,100 + 0,063$ означает, что в этой группе порошков содержатся частицы меньше 0,1 и больше 0,063 мм.

Гранулометрический состав порошка выражает процентное содержание фракций в этом порошке. Например, запись $(-0,100 + 0,063) - 10\%$, свидетельствует о том, что в данной партии порошка количество фракции $(-0,100 + 0,063)$ составляет 10%. Гранулометрический состав порошка определяют ситовым, седиментационным, микроскопическим и другими методами анализа.

Наиболее простым и распространенным является метод ситового анализа (ГОСТ 18318–94 «Порошки металлические. Определение размера частиц сухим просеиванием»). Навеску порошка массой 100 г просеивают на специальной установке через набор сит. Остаток порошка на каждом сите тщательно снимают, взвешивают и в зависимости от размера ячеек сит определяют состав фракции и гранулометрический состав. Результаты определения анализируют следующим образом:

по результатам ситового анализа, зная верхний и нижний пределы размеров частиц, находят средний арифметический размер частиц порошка в каждой i -той фракции:

$$d_i = \frac{d_{\max} + d_{\min}}{2}, \quad (1)$$

где $d_{\max}$, $d_{\min}$ — верхний и нижний пределы размеров частиц в i -той фракции; зная массу каждой фракции (m_i), определяют средний размер частиц порошка d_c во всей партии:

$$d_c = \sum m_i d_i / \sum m_i; \quad (2)$$

согласно математической статистике величины среднеквадратичного отклонения размеров частиц порошка от их среднего значения находят по следующей формуле:

$$\sigma = \left[\frac{\sum (d_i - d_c)^2 \cdot m_i}{\sum m_i} \right]^{0,5}; \quad (3)$$

степень полидисперсности порошка оценивают по коэффициенту вариации:

$$\eta = \frac{\sigma}{d_c}. \quad (4)$$

Например, если $d_c = 0,072$; $\sigma = 0,044$ и $\eta = 0,611$, в партии преобладают средние и мелкие частицы при довольно высокой однородности размеров.

Условно порошки в зависимости от размеров частиц делят на группы: ультрадисперсные (размер частиц до 500 нм), ультратонкие (0,5–10 мкм), тонкие (10–40 мкм), средней крупности (40–250 мкм), грубые или крупные (250–1000 мкм).

От размеров частиц зависит насыпная плотность, давление прессования, прессуемость, изменение размеров при спекании, механические и другие свойства порошковых материалов. При спекании прессовок из мелких порошков обычно наблюдается усадка, а при использовании крупных порошков, наоборот, — рост спекаемых изделий.

Под удельной поверхностью порошкообразных тел понимается суммарная поверхность всех частиц порошка, взятая в единице объема или массы. Величина удельной поверхности служит косвенным методом оценки дисперсности и активности частиц порошка, она определяется размером и формой частиц, степенью развитости их поверхности. Эта характеристика влияет на содержание в порошке адсорбированных газов, стойкость частиц к коррозии, активность процессов при прессовании

и спекании. Для различных порошков величина удельной поверхности составляет от 0,01 до 10—20 м²/г. Определяют удельную поверхность методом адсорбции красителей, азота или аргона, измерением газопроницаемости.

Плотность порошковой частицы зависит от совершенства макро- и микроструктуры, наличия оксидов, нитридов, других примесей. Истинную плотность частиц порошка определяют с помощью мерных сосудов — пикнометров. Пикнометр, имеющий объем $V_{\text{пик}}$, на 1/2—2/3 заполняют исследуемым порошком и взвешивают. Затем в пикнометр заливают жидкость, взбалтывают и доливают до отметки, фиксирующей объем. Объем жидкости в пикнометре:

$$V_{\text{ж}} = (M_2 - M_1) / \gamma_{\text{ж}}, \quad (5)$$

где M_1 — масса пикнометра с порошком; M_2 — масса пикнометра с порошком и жидкостью; $\gamma_{\text{ж}}$ — плотность жидкости.

Тогда пикнометрическая плотность порошка:

$$\gamma_{\text{пик}} = (M_1 - M) / (V_{\text{пик}} - V_{\text{ж}}), \quad (6)$$

где M — масса сухого пикнометра.

Пикнометрическая жидкость не должна взаимодействовать с порошком и хорошо его смачивать. Наиболее широко применяют керосин, спирт, бензол, ацетон.

Микротвердость частиц порошка позволяет оценить их способность деформироваться при прессовании. Определяют микротвердость на приборе ПМТ-3. Так как размеры частиц невелики, используют нагрузки до 15—20 г.

К *технологическим свойствам* порошков относят насыпную плотность и плотность утряски, уплотняемость и формуемость. Эти свойства, зависящие от формы и размеров частиц, их удельной поверхности и микротвердости, в свою очередь влияют на процесс прессования порошков и, в конечном счете, в значительной мере определяют свойства порошковых материалов.

Насыпная плотность — это масса свободно насыпаемого порошка, отнесенная к единице объема. Данная характеристика определяется плотностью материала порошка, размерами и формой частиц, состоянием их поверхности.

Определяют насыпную плотность, засыпая порошок в мерную емкость через воронку или специальный прибор — волюмометр, представляющий собой прямоугольный канал с наклонными перегородками (ГОСТ 19440—94 «Порошки металлические. Определение насыпной плотности: Часть 1. Метод использования воронки. Часть 2. Метод волюмометра Скотта»). Избыток порошка с поверхности емкости удаляют стеклянной пластинкой, взвешивают емкость с порошком и пустую и определяют насыпную плотность (γ_n)

$$\gamma_n = (M_2 - M_1) / Y, \text{ г/см}^3, \quad (7)$$

где M_2 , M_1 — масса емкости с порошком и пустой, г; Y — объем емкости, см³.

Для определения *плотности утряски* порошок помещают в специальный встряхивающий прибор, уплотняют встряхиванием и определяют аналогично определению насыпной плотности (ГОСТ 25279—93 «Порошки металлические. Определение плотности после утряски»).

Текучесть порошков определяют временем истечения из воронки через калиброванное отверстие порции порошка (ГОСТ 20899—98 «Порошки металлические. Определение текучести с помощью калиброванной воронки (прибора Холла)»).

Уплотняемость порошков характеризует их способность к уменьшению объема под воздействием внешней силы. Для определения уплотняемости пробы порошка прессуют в специальной пресс-форме под давлением 200, 400, 500, 600, 700 и 800 МПа. При каждом давлении изготавливают по три образца. Находят массу и объем образцов и рассчитывают плотность:

$$\gamma = M / Y, \text{ г/см}^3. \quad (8)$$

За результат измерения принимают среднее арифметическое значение при испытании, округленное до второго десятичного знака (ГОСТ 25280—90 «Порошки металлические. Метод определения уплотняемости»).

Формуемость порошка характеризуется интервалом значений плотности, при которых прессовки после извлечения из пресс-формы не осыпаются и не имеют расслоенных трещин. Определяют ее на брикетах специальной фор-

мы, обеспечивающих линейное распределение плотности по длине брикета.

Определение химических и физико-механических свойств порошковых материалов производят как по стандартным методикам, принятым для материалов, полученных литьем, так и по методикам, разработанным специально для порошковых материалов. Особенно это касается материалов с высокой пористостью.

Химический состав порошковых материалов, как и исходных порошков, проводят по методикам, применяемым для литых металлов и сплавов аналогичного состава. Так как большинство порошковых изделий имеют пористую структуру, то во избежание ошибок при химическом анализе за счет возможного содержания в порах посторонних включений (остатков защитной среды спекания, жидкостей после обработок и т.п.) перед химическим анализом пористые пробы продувают сжатым воздухом и обрабатывают соответствующими растворителями (промывка в бензине, спирте, кипяченой воде и т.п.).

Для определения *пористости* сначала методом гидростатического взвешивания по ГОСТ 18898—89 «Изделия порошковые. Методы определения плотности, содержания масла и пористости» определяют плотность порошкового материала. Сущность метода заключается в следующем. Образец взвешивают с погрешностью не более 0,01 г, пропитывают парафином для закрытия пор, очищают поверхность и взвешивают с той же точностью сначала на воздухе, а затем в воде. Плотность вычисляют с округлением до 0,01 по формуле:

$$\gamma = m_1 \gamma_{\text{в}} / (m_2 - m_3), \quad (9)$$

где m_1 — масса образца, взвешенного на воздухе, г; m_2 , m_3 — масса пропитанного образца, взвешенного на воздухе и в воде; $\gamma_{\text{в}}$ — плотность воды, г/см³.

На образцах правильной формы плотность можно определить, найдя объем по геометрическим размерам. Зная плотность, по формуле (9) рассчитывают относительную плотность, а по формуле (3) пористость материала. Плотность беспористого материала такого же химического состава определяют методом пик-

нометрии или рассчитывают, если известен химический состав, по формуле аддитивности:

$$\gamma_{\text{к}} = 100 / (N_1 / \gamma_1 + N_2 / \gamma_2 + N_3 / \gamma_3 + \dots), \quad (10)$$

где N_1 , N_2 , N_3 — содержание компонентов в шихте по массе, %; γ_1 , γ_2 , γ_3 ... — плотности этих компонентов.

Пористость может быть открытой, сообщающейся с поверхностью, и закрытой. *Открытую пористость* определяют гидростатическим методом. Для этого образцы перед взвешиванием в воде вакуумируют и пропитывают жидкостью с известной плотностью. Открытую пористость рассчитывают по формуле:

$$\vartheta_0 = (m_2 - m_1) 100 \gamma_{\text{в}} / (m_2 - m_3) \gamma_{\text{ж}}, \quad (11)$$

Закрытую пористость определяют по формуле:

$$\vartheta_3 = \vartheta - \vartheta_0, \quad (12)$$

где ϑ — общая пористость.

На свойства порошковых материалов и изделий оказывает большое влияние не только общая пористость, но и ее распределение по сечению детали [4]. Для оценки равноплотности образец или опытную деталь разрезают на несколько частей и находят плотность каждой из них. *Равноплотность* оценивают по соотношениям:

$$H = 1 - \gamma_{\text{min}} \cdot \gamma_{\text{max}}, \quad (13)$$

$$S = \gamma_i \cdot \gamma_{\text{ср}}^{-1}, \quad (14)$$

где γ_{min} , γ_{max} , $\gamma_{\text{ср}}$ — плотность участков с минимальной, максимальной и средней плотностью, γ_i — плотность i -го участка.

Определение *твердости* проводят в соответствии с ГОСТ 25698—98 «Материалы металлические спеченные, исключая твердые сплавы. Определение кажущейся твердости материалов в основном с равномерной твердостью по сечению». В зависимости от диапазона твердости используют методы Бринелля (ГОСТ 9012—59), Роквелла (ГОСТ 9013—59) или Виккерса (ГОСТ 2999—75).

У порошковых материалов, в отличие от кованных, определенного соотношения между твердостью и прочностью не наблюдается. Для пористых материалов твердость является

функцией сил связи между частицами, плотностью и степенью прочности частиц в месте испытания. Твердость пористых материалов есть некая «средняя» твердость металла и пустоты пор, поэтому по ней нельзя судить о твердости металлической основы. Для определения твердости металлической фазы используют метод микротвердости.

Прочность, пластичность и вязкость порошковых материалов определяют на стандартных образцах, полученных механической обработкой заготовок, либо на специальных образцах, полученных двухсторонним прессованием, спеченным и обработанным по режимам, предусмотренным технологией изготовления изделий. Механические свойства беспористых порошковых материалов определяют по стандартным методикам, применяемым для литых металлов. Проводят испытания на универсальных испытательных машинах, отвечающих требованиям ГОСТ 28840—90 «Машины для испытания материалов на растяжение, сжатие и изгиб. Общие технические требования».

Перед испытаниями образцы подвергают визуальному контролю. При обнаружении искривлений, раковин, инородных включений испытания не проводят. На образцах, пригодных для проведения испытаний, удаляют заусенцы и притупляют острые кромки.

Временное сопротивление при растяжении, относительное удлинение и относительное сужение пористых материалов определяют стандартными методами на образцах, изготовленных в соответствии с ГОСТ 18227—98 «Материалы металлические спеченные, исключая твердые сплавы. Образцы для испытания на растяжение», прессуют в пресс-формах с матрицей из твердого сплава или инструментальной стали и спекают по соответствующим режимам.

При изготовлении образцов механической обработкой из готовых изделий их размеры должны соответствовать ГОСТ 14987 «Металлы. Методы испытания на растяжение». Рекомендуется изготавливать образцы с двумя переходами на концах с радиусом сопряжения от 1,5 до 5 мм.

Разрушающую нагрузку определяют с точностью до 1%, размеры образца в рабочей части — с точностью до 0,01 мм.

При испытании образцов диаметром меньше 4 мм полученные результаты нельзя сравнивать с результатами, полученными на образцах больших диаметров.

Предел прочности при растяжении определяют по формуле:

$$\sigma_B = \frac{P}{F}, \text{ Н/мм}^2, \quad (15)$$

где P — нагрузка, Н; F — сечение образца в рабочей части, мм².

Для определения остаточного удлинения на образцах на расстоянии $(25 \pm 0,01)$ мм наносят контрольные риски. Начальную и конечную длину образца измеряют с точностью до 0,05 мм. Относительное удлинение вычисляют по формуле:

$$\delta = 100(l - l_0)/l_0, \% \quad (16)$$

При определении относительного сужения толщину образца измеряют на участке расчетной длины не менее чем в трех местах, а ширину — посередине рабочей части с точностью до 0,05 мм. По наименьшим размерам вычисляют площадь поперечного сечения, округляют полученный результат до 0,1 мм² и рассчитывают относительное сужение по формуле:

$$\psi = 100(F - F_0)/F_0, \% \quad (17)$$

Предел прочности при изгибе определяют на образцах, изготовленных в соответствии с ГОСТ 18228—94 «Материалы металлические спеченные, кроме твердых сплавов. Определение предела прочности при поперечном изгибе».

Приспособление для испытания должно иметь расстояние между опорами $(40 \pm 0,21)$ мм, радиус гибочных опор и гибочного пуансона — 2 мм. Скорость перемещения пуансона до разрушения образца должна быть в пределах 0,5—1,0 мм/мин. Предел прочности при изгибе определяют по формуле:

$$\sigma_U = \frac{3Pl_0}{2b^2h}, (\text{МПа}), \quad (18)$$

где P — разрушающая нагрузка, Н; l_0 — расстояние между опорами, мм; b — толщина образца, мм; h — ширина образца, мм.

Предел прочности твердых сплавов при изгибе определяют по ГОСТ 20019—74 «Сплавы твердые спеченные. Метод определения предела прочности при поперечном изгибе». Испытывают призматические образцы с шероховатостью поверхности не более 0,63 мкм, длиной (35 ± 1) мм, шириной $(5 \pm 0,25)$ мм, толщиной $(5 \pm 0,25)$ мм. Приспособление для проведения испытаний изготавливают из твердого сплава на основе карбида вольфрама. Предел прочности вычисляют по формуле (18).

Одним из методов определения прочности порошковых материалов является испытание на *радиальное сжатие* кольцевых образцов. Согласно ГОСТ 26529—85 «Материалы порошковые. Метод испытания на радиальное сжатие» образец в виде кольца нагружают плитами испытательной машины до его разрушения.

Предел прочности при радиальном сжатии образца (максимальное напряжение, возникающее в момент разрушения или появления в нем трещины) вычисляют по формуле:

$$\sigma = P_{\max}(D - a)/La^2, \text{ МПа}, \quad (19)$$

где $P_{\max}$ — максимальная нагрузка, предшествующая моменту разрушения образца или появления в нем трещины, Н; D — наружный диаметр образца, мм; a — толщина стенки образца, мм; L — длина образца, мм.

Испытания проводят не менее чем на трех образцах и рассчитывают среднее арифметическое. Результаты округляют до первого десятичного знака.

Для определения прочности прессовок до спекания, некоторых твердых и хрупких материалов применяют испытания на сжатие в направлении, перпендикулярном давлению прессования. Такие испытания называют диаметральной сжатием, непрямым испытанием на растяжение, Бразильским тестом. *Непрямое испытание на растяжение* позволяет более точно судить о прочности межчастичных связей в порошковом материале, так как предел прочности при осевом сжатии практически не зависит от состояния межчастичных контактов. Предел прочности при испытании образцов на диаметральной сжатие рассчитывают по формуле:

$$\sigma_B = \frac{2P_{\max}}{\pi Dh}, \quad (20)$$

где $P_{\max}$ — максимальная сила, при которой образуются трещины на поверхности образца; D, h — диаметр и толщина образца.

Испытание на ударную вязкость является наиболее структурно чувствительным методом. Оно дает представление о строении порошкового материала: качестве межчастичных связей [5], форме пор, количестве неметаллических включений. Эта характеристика представляет более полную информацию о качества материала, т.к. переход от статических нагрузок к динамическим вызывает изменение всех свойств, связанных с пластическим деформированием.

Определяют ударную вязкость пористых порошковых материалов на образцах по ГОСТ 26528—98 «Материалы металлические спеченные, исключая твердые сплавы. Метод испытания на ударный изгиб», а беспористых — по ГОСТ 9454—78, применяемому для литых металлов. Образцы изготавливают механической обработкой из готовых деталей или двухсторонним прессованием и спеканием по режиму изготовления деталей, с надрезом по ГОСТ 9454—78 или без надрезов по ГОСТ 26528—98.

Ударную вязкость образцов без надреза K_C , Дж/см², рассчитывают по формуле:

$$K_C = \frac{K}{S_c}, \quad (21)$$

где K — работа удара, Дж; S_c — площадь поперечного сечения образца, см².

Модуль нормальной упругости (модуль Юнга) твердых сплавов определяют по ГОСТ 25095—82 «Сплавы твердые спеченные. Модуль определения модуля упругости (модуль Юнга)» методом возбуждения продольных ультразвуковых колебаний и оценкой собственной резонансной частоты колебаний. Для испытаний используют цилиндрические образцы диаметром 6 мм или призматические с размерами 6×8×65 мм. Модуль нормальной упругости рассчитывают по формуле:

$$E = 4 \cdot 10^{-3} L^2 \gamma f^2, \quad (22)$$

где γ — плотность образца, г/см³; f — частота колебаний, Гц.

Важной характеристикой пористых проницаемых материалов является *проницаемость* газов и жидкостей, которую определяют по ГОСТ 25283—93 «Материалы спеченные проницаемые. Определение проницаемости жидкостей». Сущность метода заключается в пропускании через образец, имеющий форму диска диаметром от 25 до 100 мм и толщиной от 0,25 до 10 мм, а также параллелепипеда, кольца или цилиндрической гильзы с рабочей поверхностью от 25 до 100 мм². Коэффициент проницаемости (м²) рассчитывают по формуле:

$$K = Q\mu h / S\Delta p, \quad (23)$$

где Q — расход газа или жидкости в режиме ламинарного течения, м³/с; μ — коэффициент динамической вязкости, Па·с; h — толщина образца, м; S — активная поверхность сечения образца, м²; Δp — перепад давления газа или жидкости на образце, Па.

В некоторых случаях применяют технологические методы испытаний: на деформируемость, осадку при повышенных температурах, уплотняемость при холодной или горячей штамповке и т.п. Специальные свойства — антифрикционные, износостойкость, коррозионную стойкость, магнитные и электрические свойства и др. определяют по методикам, принятым для материалов, полученных по литейной технологии. Таким образом, порошковые материалы, исходя из физико-механических характеристик, структуры и свойств, можно

успешно применять при изготовлении и ремонте различных изделий.

Выводы:

показано, каким образом свойства порошков влияют на структуру и свойства порошковых материалов;

установлено, что порошковые материалы можно использовать при изготовлении и ремонте деталей для достижения заданного качества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Витязь П.Л., Капцевич В.М., Шелег В.К. Пористые порошковые материалы и изделия из них. Минск.: Выш. шк., 2005. 160 с.
2. Скрыбин В.А., Зверовщиков А.Е. Металлографический анализ образцов из порошковых материалов // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2019. № 3. С. 33—37.
3. Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов. М.: Металлургия, 1983. 360 с.
4. Савицкий А.П. Многоуровневое моделирование объемных изменений двухкомпонентных порошковых тел при спекании // Журнал технической физики. 2010. Т. 80. Вып. 3. С. 63—68.
5. Либенсон Г.А. Процессы порошковой металлургии в 2-х т. Т. 1. Производство металлических порошков. Учебник для вузов / Либенсон Г.А., Лопатин В.Ю., Копарницкий Г.В. М.: МИСИС, 2001. 368 с.