

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Технологии металлов»

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПОРОШКОВ НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛОВ

*Методические рекомендации к лабораторным работам
для студентов специальности*

*1-36 07 02 «Производство изделий на основе трехмерных технологий»
очной и заочной форм обучения*



Могилев 2023

УДК 669.01
ББК 30.3
Т34

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Технологии металлов» «3» апреля 2023 г.,
протокол № 11

Составитель канд. техн. наук, доц. А. И. Хабибуллин

Рецензент канд. техн. наук, доц. А. Е. Науменко

В методических рекомендациях содержатся основные теоретические положения и методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Технология получения структуры и свойств порошков на основе металлов» для студентов специальности 1-36 07 02 «Производство изделий на основе трехмерных технологий» очной и заочной форм обучения.

Учебное издание

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПОРОШКОВ НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛОВ

Ответственный за выпуск	Д. И. Якубович
Корректор	А. А. Подошевка
Компьютерная верстка	Е. В. Ковалевская

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 26 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2023

Содержание

Правила техники безопасности при проведении лабораторных работ.....	4
Введение.....	5
1 Лабораторная работа № 1. Получение порошков металлов электроискровым диспергированием.....	6
2 Лабораторная работа № 2. Определение формы и размеров частиц металлических порошков	9
3 Лабораторная работа № 3. Определение времени гомогенизации шихты в смесителе «пьяная бочка».....	13
4 Лабораторная работа № 4. Определение зависимости плотности брикета от давления прессования	18
5 Лабораторная работа № 5. Спекание порошковых композиций.....	21
6 Лабораторная работа № 6. Виды и причины брака при прессовании и спекании порошков	25
Список литературы.....	29

Правила техники безопасности при проведении лабораторных работ

1 К лабораторным работам допускаются лица, прошедшие инструктаж по технике безопасности.

2 Разрешается выполнять только ту работу, которая соответствует учебному плану.

3 Лабораторные работы должны проводиться в соответствии с методическими указаниями и правилами эксплуатации учебного оборудования.

4 Запрещается:

- выполнять лабораторные работы на оборудовании с неисправностями, которые могут привести к пожарам или поражению электрическим током;
- самостоятельно устранять неисправности оборудования.

5 В аудитории необходимо соблюдать правила внутреннего распорядка.

6 **Перед началом работы** необходимо:

- провести внешний осмотр оборудования, используемого в лабораторной работе. Убедиться в наличии заземления, огнетушителя, отсутствии оголенной электропроводки;
- проверить наличие необходимых для выполнения работы образцов;
- обеспечить свободный доступ к используемому оборудованию.

7 **При выполнении лабораторной работы** запрещается: включать оборудование и приборы без разрешения преподавателя; вращать без необходимости настроечные винты и рукоятки; перемещать приборы во время работы.

8 **По окончании работы** необходимо:

- отключить от электросети оборудование и приборы;
- убрать рабочее место;
- в случае неполадок оборудования и приборов сообщить об этом преподавателю.

Введение

Целью учебной дисциплины является усвоение студентами знаний о строении и свойствах порошков металлов и сплавов, способах их производства и обработки для получения деталей с заданными свойствами и конфигурацией, а также теоретических основ и практики спекания.

Задачами учебной дисциплины являются изучение сущности технологических методов получения порошков металлов, неметаллов и химических соединений – карбидов, боридов, нитридов, оксидов металлов, а также методов формования и спекания изделий из порошков. Рассматриваются технологические возможности методов, их назначение, достоинства и недостатки, принципиальные схемы работы технологического оборудования, конструкции инструментов, приспособлений и оснастки, их назначение и применение.

В результате освоения учебной дисциплины обучающийся будет:

1) знать:

- сущность основных методов получения порошков металлов, неметаллов и химических соединений;
- технологические возможности методов, их назначение, достоинства и недостатки, область применения;
- экономическую целесообразность применения различных технологических способов формования и спекания изделий из порошков;
- принципиальные схемы работы технологического оборудования, инструментов, приспособлений и оснастки, их назначения и применения;

2) уметь:

- выбирать и обосновывать совокупность методов получения порошков, формования и спекания изделий из них;
- составлять технологический процесс обработки полученного материала с целью получения изделия с обеспечением необходимых технологических и эксплуатационных свойств;

3) владеть:

- методами выбора материала порошка, технологиями компактирования и спекания с учетом назначения и формы изделия;
- информацией о возможностях различных методов обработки изделий из порошка;
- информацией о схемах работы необходимого технологического оборудования.

1 Лабораторная работа № 1. Получение порошков металлов электроискровым диспергированием

Цель работы: изучение процесса формирования порошка меди при электроэрозионной обработке для получения порошков с шаровидной формой частиц, пригодных для 3D-технологий.

Оборудование и инструмент: микроскринер МС ЛабоМет-1, установка для электроискрового диспергирования, заготовка из медной пластины.

Медь в виде порошка широко используется в качестве исходного материала при печати на 3D-принтерах. Высокие электро- и теплопроводящие свойства, хорошая коррозионная устойчивость позволяет ей быть идеальным материалом для создания специальных сложных систем охлаждения, токопроводов, антифрикционных деталей оборудования. От гранулометрического и химического состава порошка зависят режимы печати, условия плавления, кристаллизации металла и в конечном счете качество покупаемых изделий.

Для аддитивных установок нашли применение порошки сферической формы с размерами зерна до 50 мкм при определенном соотношении крупных и мелких зерен, обеспечивающих текучесть материала. При наличии изменений в форме частиц возможно появление полос, рытвин, пор и выступов на полученной детали, а процесс ее формирования теряет стабильность.

Существует несколько способов получения порошковой меди. При механическом способе размол производится в шаровых, вихревых, вибрационных и других мельницах различной конструкции. Механическое измельчение позволяет получить частицы порошка неправильной, чешуйчатой формы. Данный способ имеет низкую производительность, большие трудозатраты и не используется для получения крупных партий.

Распыление в жидкости или газе дает округлую, осколочную либо сферическую форму гранул, однако оборудование при этом имеет значительные размеры, большую энергоемкость и повышенный расход газа.

Основными недостатками известных способов получения порошковой меди являются высокая стоимость, энергоемкость, громоздкость оборудования, взрыво- и пожароопасность, негативное влияние на экологию.

Учитывая данные недостатки, интерес представляет электроэрозионный способ получения порошка как наиболее экономичный и экологически чистый. Суть его заключается в разбрызгивании металла в условиях искрового разряда.

В последнее время появились работы, связанные с искровым разрядом для получения порошка металлов в воде, керосине и иных средах.

Получение порошка в среде аргона. Процесс проводится в металлической емкости объемом 500 мл, на дне которой укладывается медный образец, над ним устанавливается вольфрамовый электрод, после чего емкость закрывается крышкой. Аргон подается через шланг в зону образования искрового разряда. Расход аргона составляет 5 л/мин.

Количество импульсов фиксируется счетчиком импульсов СИ30-220.Щ1.Р и в зависимости от требуемого объема порошка составляет 250...2000 импульсов.

Источником питания служит экспериментальная установка оригинальной конструкции, блок-схема которой приведена на рисунке 1.1. Она содержит регулятор напряжения 1, стабилизатор 2, рабочую ёмкость энергии 3, коммутатор искры 4, регулятор частоты 5, регулятор скважности 6, механизм 7 перемещения электрода 8 по осям координат, механизм 10 перемещения диспергируемой поверхности 9.

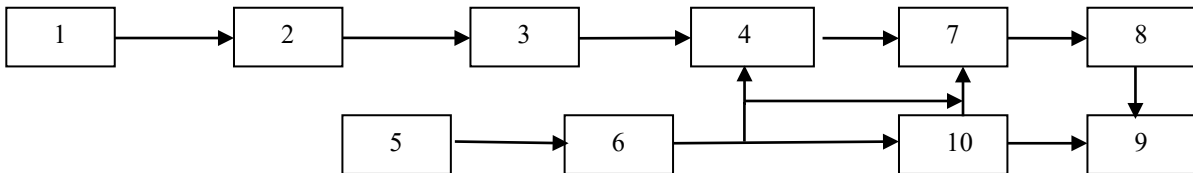


Рисунок 1.1 – Блок-схема установки диспергирования

Технические данные установки представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Технические данные установки

Напряжение, В	Частота импульсов, Гц	Ёмкость накопителя энергии, мкФ	Скважность
60...180	0,3...300	47...10000	1,1...10

Установка работает следующим образом. Регулятор напряжения 1 после стабилизатора 2 накапливает энергию в рабочей ёмкости 3, дозированное количество которой подается на коммутатор 4. Управление коммутатором 4 осуществляется импульсами с регулятора частоты 5, причем регулятором 6 задается их скважность.

Механизм подачи 7 управляет длиной электрода 8 и осуществляет его перемещение по диспергируемой поверхности 10 и осям координат в зависимости от частоты и скважности управляющих импульсов. Диспергируемая поверхность 10 имеет свой механизм перемещения 9 (например, вращение) в зависимости от интенсивности искрообразования и износа поверхности. В момент после накопления энергии в ёмкости 3 включается коммутатор искры 4 и вся накопленная мощность передается на электрод 8. Синхронно с подачей энергии электрод с помощью механизма 7 касается поверхности 10 и появляются начальные необходимые условия для протекания тока. При этом частота контакта задается генератором 5, а время контакта – регулятором скважности 6. После окончания времени контакта электрод 8 перемещается механизмом 7 в исходное положение. Это достаточное условие для возникновения искрового разряда. В месте контакта в момент разрыва электрической цепи происходит взрыв жидкоплазменной лунки металла на диспергируемой поверхности. Последствием взрыва является разбрызгивание металла, его паров и образование на поверхности 9 кратера. Брызги и пары металла затвердевают в окружающей среде и в зависимости от интенсивности теплоотвода, агрессивности и

плотности среды формируются в сферические образования произвольной формы или химические соединения.

На диспергируемой поверхности остается кратер от искрового разряда. Поэтому для равномерного износа поверхность 9 имеет механизм перемещения, а искровой разряд каждый раз происходит в новом месте. С этой же целью осуществляется перемещение электрода по осям координат.

После диспергирования порошок, оказавшийся в емкости, был полностью готов для исследований. Отсутствие необходимости фильтровать и сушить порошок значительно упрощает задачу и повышает производительность данного процесса.

Получен чистый, без посторонних включений, порошок фракционного состава, приведенного в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Режимы диспергирования в аргоне

Рабочая среда	Емкость накопителя энергии, мкФ	Напряжение, В	Частота, Гц	Фракционный состав, %		
				150...200 мкм	50...150 мкм	1...50 мкм
Ar	47	60	30	5	40	55
		180	0,3	10	45	45
	10000	60	0,3	20	40	40
		180	0,3	30	50	20

Минимальные размеры получаемых частиц порошка составляют 1...5 мкм, а максимальные – 150...200 мкм (рисунок 1.2).

Объём частиц необходимого гранулометрического состава до 50 мкм составляет от 20 % до 55 %, причем максимальный объём требуемых размеров порошка образуется при минимальных значениях напряжения и ёмкости накопителя энергии. На поверхности частиц металла наблюдаются поры. Их появление связано с высокой скоростью кристаллизации металла, при которой растворенный газ не успевает выделиться из объёма жидкости.

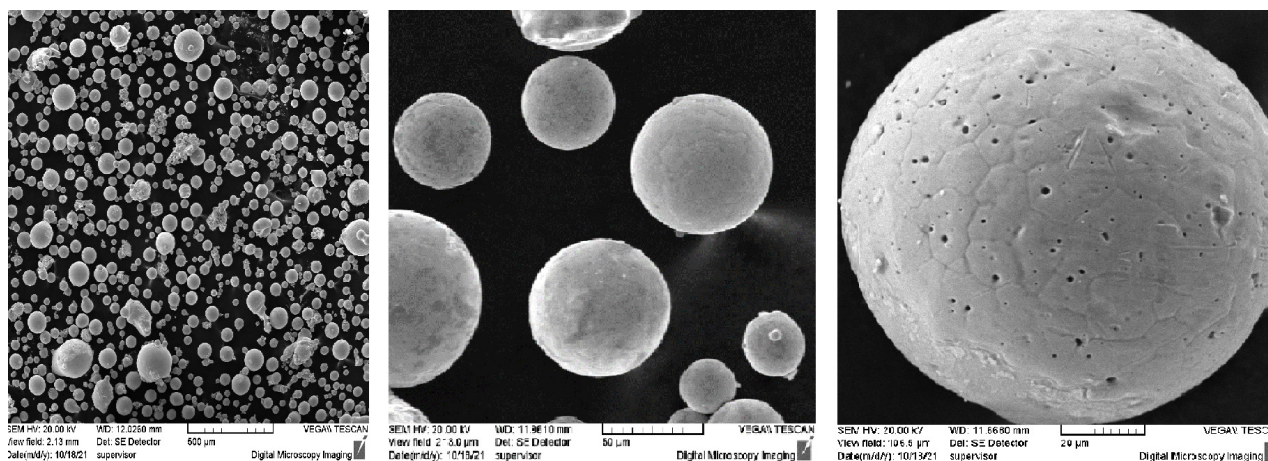


Рисунок 1.2 – Внешний вид частиц порошка, диспергируемого в аргоне

При обработке меди электроэрозионным методом в среде аргона до 60 % порошка имеют гранулометрический состав до 50 мкм, что соответствует требованиям 3D-технологий.

Задание

- 1 Провести электроэрозионную обработку медной пластины.
- 2 С помощью микроскопического анализа установить фракционный состав полученного порошка.

Контрольные вопросы

- 1 Состав установки для электроискрового диспергирования порошков металлов.
- 2 Указать преимущества и недостатки методов диспергирования порошков, применяемых для использования в 3D-технологиях?

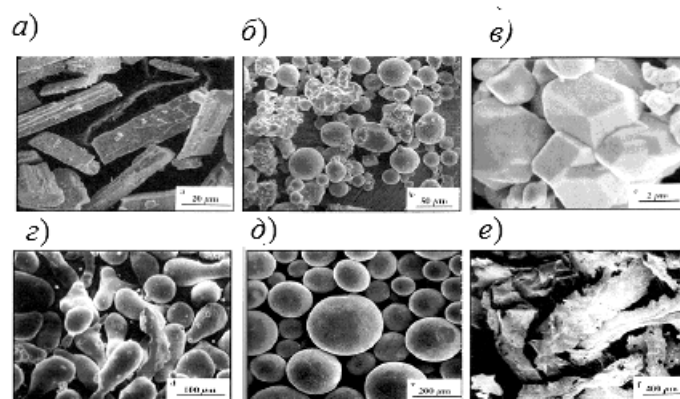
2 Лабораторная работа № 2. Определение формы и размеров частиц металлических порошков

Цель работы: определения формы и размеров частиц металлических порошков методом микроскопического анализа и распределение их дисперсности.

Оборудование и инструмент: микроскринер МС ЛабоМет-1, порошок железа ПЖ2М.

Форма частиц металлических порошков прежде всего определяется способом их производства. Например, при распылении расплава образуются порошки сферической или округлой формы. Пористые, губчатые порошки образуются в результате восстановления твердых оксидов или солей. Дендритная форма частиц типична для порошков, изготовленных электролизом. При измельчении твердых материалов в дробилках и шаровых мельницах образуются порошки осколочной формы. Порошки тарельчатой формы образуются при измельчении материала в вихревых мельницах. Для выявления формы частиц порошка применяют оптические и электронные микроскопы. На рисунке 2.1 иллюстрируются электронные микрофотографии порошков, полученных различными способами производства.

Многие свойства порошковых материалов, в том числе однородность, плотность, прочность и др., зависят от формы частиц порошка. Для характеристики формы частиц чаще всего применяют два фактора формы: фактор неравноосности Φ_n и фактор развития поверхности Φ_p . Фактор неравноосности представляет собой отношение максимального и минимального размера частиц по взаимно перпендикулярным направлениям ($\Phi_n = l_{\max} / l_{\min}$). Фактор развития поверхности – отношение квадрата наблюдаемого периметра частицы P к ее площади S ($\Phi_p = P^2 / S$).



a – теллур, механическое измельчение; *б* – сталь, распыление аргоном; *в* – вольфрам, восстановление оксидов газом; *г* – олово, распыление воздухом; *д* – сталь, центробежное распыление; *е* – олово, затвердевание капель расплава на холодном экране

Рисунок 2.1 – Микрофотографии металлических порошков, полученных различными способами

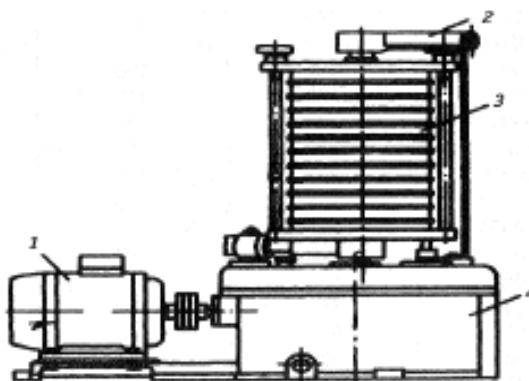
По размеру частиц порошки условно делятся на следующие группы: размер частиц менее 0,1 мкм – нанопорошки; 0,01...0,1 мкм – ультрадисперсные порошки; 0,1...10 мкм – высокодисперсные; 10...40 мкм – мелкие; 40...250 мкм – средние; 250...1000 мкм – крупные.

Отдельная порция порошка всегда содержит различные по размерам частицы. Принято выделять близкие по размерам фракции порошка. Отдельная фракция порошка – это диапазон размеров частиц между их верхним и нижним значениями. Обычно размер и характер распределения частиц некоторой массы порошка характеризуют гранулометрическим составом. Гранулометрический состав, или как его еще называют фракционный состав, – это совокупность фракций порошка, выраженных в процентах от общей массы. Для определения гранулометрического состава используют различные методы анализа, выбор которых определяется размером частиц.

Ситовой анализ. Если размер частиц более 40 мкм, то гранулометрический состав порошков определяют обычно методом ситового анализа. Навеску порошка массой 100 г (при насыпной плотности более 1,5 г/см³) просеивают через набор сит. При меньшей плотности можно уменьшить массу навески до 50 г. Стандартные сита должны быть круглыми с диаметром обечайки 200 мм, глубиной от 25 до 50 мм. Набор сухих и чистых сит устанавливается на специальное устройство (рисунок 2.2).

Наверху располагается сетка с наиболее крупными отверстиями, внизу набор сит завершается сеткой с минимальными отверстиями и поддоном.

Устройство для отсева совершает вращательное движение в горизонтальной плоскости со скоростью 300 об/мин при одновременном встряхивании с частотой 180 мин⁻¹, что обеспечивает эффективное рассеивание порошков. Для ситового анализа применяют проволочные сетки с квадратными отверстиями в соответствии с ГОСТ 6613–86 (таблица 2.1).



1 – электродвигатель; 2 – кулиса; 3 – набор сит; 4 – корпус

Рисунок 2.2 – Устройство для отсева порошков на фракции (ситовой анализатор)

Таблица 2.1 – Проволочные сетки для ситового анализа порошков

Номер сетки	Размер стороны отверстия, мкм	Диаметр проволоки, мкм	Количество отверстий на дюйме
004	40	30	355
005	50	36	295
0065	65	40	247
0071	71	50	210
008	80	50	195
01	100	60	154
0125	125	80	124
016	160	100	98

После отсева каждую фракцию порошка, находящуюся на сетке, высыплют из сит и взвешивают. Сумма всех фракций должна составлять ≥ 98 % от массы анализируемой пробы. Относительное содержание каждой из фракций X , %, вычисляют с точностью до 0,1 % по формуле $X = (G\phi / G) 100$ (где $G\phi$ – масса данной фракции порошка; G – масса пробы).

Результаты ситового анализа записывают определенным образом. Например, фракция порошка, прошедшая через сетку 018, но оставшаяся на сетке 016, обозначается как $-018...+016$ или $-180...+160$ мкм. В этом случае средний размер частиц в этой фракции определяется как среднее арифметическое:

$$d_{cp} = (180+160) / 2 = 170 \text{ мкм.}$$

Ситовый анализ, благодаря своей простоте и экономичности, является основным методом контроля гранулометрического состава порошка. Недостатками этого метода являются невозможность анализа мелких порошков (меньше 40 мкм) и искажения результатов при анализе неизометричных (тарельчатых, дендритных, иглообразных) частиц.

Микроскопический анализ. Этот вид анализа проводится в соответствии с требованиями ГОСТ 23402–78 для определения размера сферических или округлых частиц в диапазоне от 1 до 100 мкм. Измерение и подсчет количества частиц проводят визуально или автоматически. За размер частицы принимают ее максимальную хорду в горизонтальном или вертикальном направлениях. Увеличение микроскопа выбирают таким, чтобы измеряемые частицы имели размер не менее 1 мм. В поле шлифа должно быть не более 150 частиц, причем расстояние между ними должно быть по возможности не меньше размера самой частицы. Количество измеренных частиц должно быть не менее 625. Это условие уменьшает ошибку измерения до $\leq 2\%$.

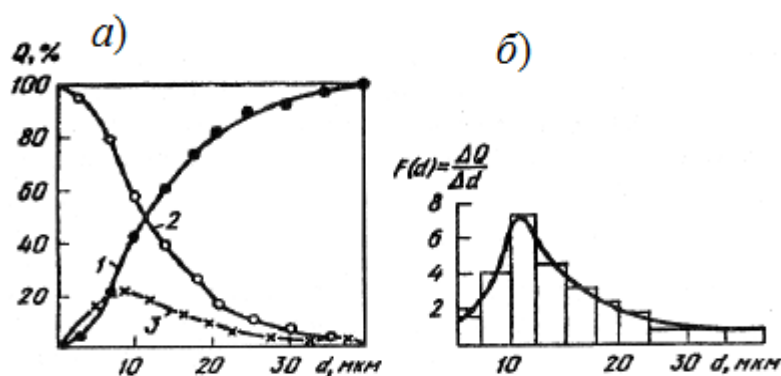
Для определения размера частиц в интервале 0,001...10 мкм применяют методы электронной микроскопии. Наиболее часто применяют растровые электронные микроскопы (РЭМ), формирующие изображение объекта при сканировании его поверхности электронным зондом.

В отдельных случаях при исследовании нанопорошков применяют просвечивающие электронные микроскопы (ПЭМ) с особо высокой разрешающей способностью. В таблице 2.2 сопоставляются характеристики микроскопов разных типов.

Таблица 2.2 – Сравнительная характеристика микроскопов

Характеристики	Оптический микроскоп	РЭМ	ПЭМ
Разрешение, мкм: рабочее при высокой квалификации оператора	5 0,2	0,2 0,01	0,01 0,001
Глубина фокуса	Малая	Высокая	Умеренная
Приготовление образца	Простое	Простое	Сложное
Стоимость исследования	Низкая	Умеренная	Высокая

Графическое представление результатов анализа. Анализ дисперсности металлических порошков часто представляют в графической форме. По оси абсцисс откладывают размер частиц, а по оси ординат их процентное содержание. Данные по содержанию различных фракций порошка можно представить в виде частной или кумулятивной (интегральной) кривой (рисунок 2.3). При построении кумулятивной кривой содержание каждой последующей по величине фракции прибавляют к содержанию предыдущей, и каждая точка кривой соответствует общему содержанию частиц больших (суммарная по плюсу) или меньших (суммарная по минусу) данного размера.



a – кривые распределения: 1 – кумулятивная кривая по минусу; 2 – кумулятивная кривая по плюсу; 3 – частная кривая распределения; b – дифференциальная кривая распределения

Рисунок 2.3 – Распределение частиц порошка по размерам

Дифференциальная кривая строится в виде группы прямоугольников. Основание каждого прямоугольника равно интервалу размеров частиц данной фракции, а его высота – содержанию фракции, отнесенному к интервалу размеров частиц данной фракции. Если интервал размеров частиц в пределах каждой фракции будет одинаков, то дифференциальная и частная кривая совпадут.

Задание

- 1 Установить на рабочий стол микроскринера порошок железа.
- 2 В поле дисплея микроскринера должно быть не более 100 частиц порошка.
- 3 Измерить размеры 100 частиц.
- 4 Построить дифференциальную кривую фракций порошка.

Контрольные вопросы

- 1 Как зависит форма порошков от способов их производства?
- 2 Перечислить методы измерений размеров частиц металлических порошков.
- 3 Указать их области применений, преимущества и недостатки.

3 Лабораторная работа № 3. Определение времени гомогенизации шихты в смесителе «пьяная бочка»

Цель работы: изучение процесса гомогенизации шихты.

Оборудование и инструмент: станок токарный WM180V, мерный стакан, порошок железа ПЖ2М и алюминия ПА-4, смеситель «пьяная бочка», микроскринер МС ЛабоМет-1.

Одной из важнейших операций при изготовлении порошковых изделий является приготовление смесей. Задача смешивания – превращение совокупности частиц при их начальном произвольном распределении в макрооднородную, гомогенную смесь. В первоначальную совокупность частиц могут входить порошки разного химического состава или разного гранулометрического состава (одного химического состава), а также их разнообразные смеси, в том числе с неметаллическими добавками. Результат и скорость смешивания зависят от формы и величины частиц, гранулометрического состава, числа смешиваемых компонентов, соотношения их плотностей, межчастичного коэффициента трения, способности частиц к агрегации.

Кроме того, эффективность смешивания зависит от траектории перемещения частиц и изменения гранулометрического состава в результате раздавливания и истирания частиц при смешивании. Эти факторы определяются конструкцией смесителя.

Смешивание – случайный процесс, поэтому соотношение компонентов в отдельных небольших объемах в различные моменты времени является случайной величиной. В конечный момент смешивания желательно получить такое состояние смеси, при котором все смешиваемые компоненты имели бы равную вероятность нахождения в любом макрообъеме смеси. В учебниках и специальной литературе содержатся формулы для расчета вероятностных характеристик процесса смешивания, однако на практике реальная продолжительность смешивания определяется опытным путем. Практический опыт показывает, что реальная длительность смешивания не должна превышать нескольких часов. Излишнее время смешивания может быть вредным, если при этом происходит нежелательное взаимодействие между компонентами или чрезмерное переизмельчение и окисление порошка. Обычно за оптимальное время смешивания принимают время, при котором 95 % и более проб содержат определяемый компонент в заданном объеме.

Если смешивается большое количество одного компонента с малым количеством другого, то вероятность достижения гомогенного состава смеси уменьшается. В таком случае для достижения более однородного состава рекомендуется применять многоступенчатое смешивание компонент. Сначала компонента, которой мало, смешивается с некоторой частью основной компоненты, а затем полученная смесь смешивается с остатком основной компоненты. Наиболее распространено механическое смешивание в шаровых мельницах и смесителях различного типа.

При смешивании в шаровой вращающейся мельнице качество смеси определяется скоростью вращения барабана, соотношением массы размольных тел и шихты, размерами размольных тел и степенью заполнения ими барабана. Лучшие результаты достигаются при скорости вращения, составляющей 20 %...40 % от критической, соотношении шихты и шаров по массе 1:1 и диаметре шаров 10...15 мм.

В тех случаях, когда измельчение при смешивании нежелательно, используют барабанные, шнековые, лопастные, центробежные, планетарные, конусные смесители и установки непрерывного действия (УНС).

Смешивание в шнековых и лопастных смесителях проводят при приготовлении пастообразных смесей или смесей с добавками различных пластифицирующих веществ, улучшающих процесс формования (раствор каучука в бензине, парафин, стеарат цинка и т. п.).

В *жидкой среде* смешивание происходит гораздо интенсивнее, чем в газовой. Это объясняется более высокой подвижностью частиц в жидкости и уменьшением силы электрического притяжения между частицами. Кроме того, в тонких щелях частиц капиллярные силы создают повышенное давление, которое разъединяет соединенные в агрегаты частицы. Жидкость препятствует пылению, что также способствует процессу получения однородной смеси. Тем не менее, применение мокрого смешивания не всегда оправдано как по экономическим, так и по техническим соображениям. Например, использование воды как среды при смешивании влечет за собой возможное дополнительное окисление порошка и потребность в проведении дополнительного восстановительного отжига. Использование вместо воды спирта значительно удорожает технологию.

Перемешивание и смешивание являются основными операциями предварительной обработки порошка. Под перемешиванием понимается усреднение порошка одного химического состава, смешивание представляет собой получение гомогенной смеси из двух и более компонент. Порошки одного состава необходимо перемешивать особенно после транспортных операций, поскольку вибрация, сопутствующая транспортировке, разделяет мелкие и крупные частицы.

Смешивание порошков и получение гомогенной порошковой массы необходимо при получении сплавов и однородном распределении различных добавок. Например, распыленные порошки оловянистой бронзы имеют более высокую твердость, чем порошки меди и олова, поэтому выгоднее пресовать смесь медных и оловянных порошков, что значительно уменьшит износ пресс-форм. Но для этого необходимо предварительно получить гомогенную смесь из порошков меди и олова, поскольку формирование бронзы будет происходить в процессе спекания и уровень свойств спеченных изделий будет в сильной степени зависеть от однородности химического состава.

Другим примером может служить технология инъекционного формования, когда связующая фаза вводится в порошок для придания ему необходимой формы. Эта фаза должна быть равномерно распределена в объеме порошка, без чего невозможно получить качественное изделие.

Аналогичным образом органические смазки смешиваются с порошком для уменьшения трения и повышения срока службы пресс-форм.

При формировании твердых порошков (оксиды, карбиды, интерметаллиды) в порошок вводят добавки (пластификаторы), повышающие прочность порошковой прессовки.

Сухое смешивание. В основе технологии смешивания порошков лежат три процесса: диффузия, конвекция и сдвиг (рисунок 3.1). Диффузионный процесс типичен для вращающегося барабана, конвективный – для шнекового смесителя, сдвиг – для лопастного смесителя.

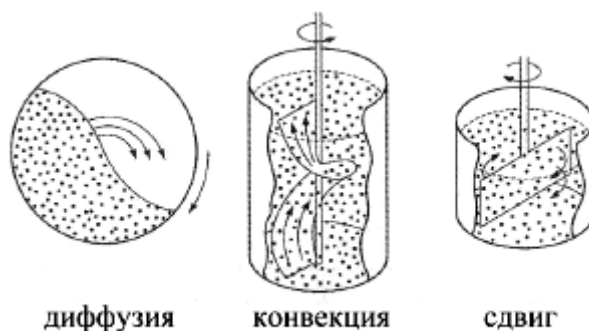


Рисунок 3.1 – Механизмы смешивания порошка

По мере увеличения объема порошка в смесителе движение порошка затрудняется, поэтому оптимальным считается заполнение объема смесителя порошком на 20 %...40 %. Скорость вращения также оказывает значительное влияние на эффективность смешивания. Наилучшие условия смешивания, когда достигается баланс центробежных и гравитационных сил. Оптимальная скорость вращения смесителя n , об/мин, рассчитывается по формуле

$$n = 32/D^{1/2},$$

где D – внутренний диаметр барабана смесителя, м.

При диаметре барабана 1 м оптимальная скорость вращения 32 об/мин. Скорость смешивания во времени сначала быстро возрастает, а затем асимптотически стремится к некоторой постоянной величине, при которой скорости смешивания и сегрегации становятся равными.

Дальнейшее продолжение смешивания нежелательно, особенно для порошков, склонных к сегрегации. Имеются и другие негативные аспекты длительного смешивания. Металлические порошки при смешивании наклепываются, что затрудняет их последующее прессование.

Порошки керамики дополнительно измельчаются. Смешивание часто приводит к дополнительному загрязнению порошка, особенно для хрупких частиц.

Оценка гомогенности смеси. Гомогенность смеси оценивается по флуктуациям состава от точки к точке. Определение состава производится измерениями плотности, теплоемкости, электропроводности, вязкости, а иногда даже по изменению цвета (цветная дефектоскопия). Качество смеси определяют и сравнением с аттестованными образцами. На рисунке 3.2 показаны три уровня гомогенности: начальный с полномасштабной сегрегацией; промежуточный с агломерированной смесью и идеальный после диспергирования агломератов.

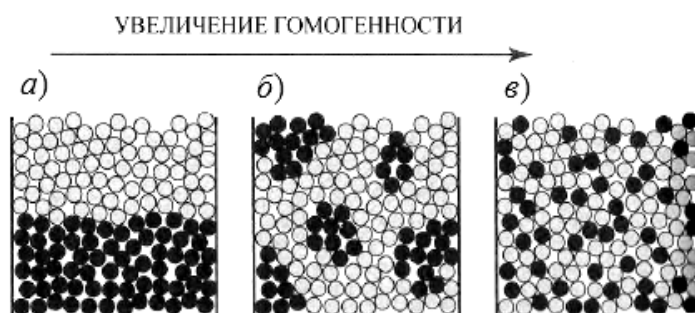
Коэффициент гомогенности смеси M определяют по формуле

$$M = S_0^2 - S^2 / S_0^2 - S_1^2,$$

где S_0^2 – среднеквадратичное отклонение по концентрации для начальной структуры смеси до смешивания;

S – отклонение по концентрации у аттестованных образцов;

S_1 – отклонение по концентрации у исследуемого образца после смешивания.



a – сегрегация по слоям; b – сегрегация с агломератами; $в$ – гомогенная смесь

Рисунок 3.2 – Уровни гомогенности порошковой смеси

Коэффициент M изменяется от 0 до 1, причем единица соответствует идеальной структуре.

При нескольких параллельных образцах в выборке среднеквадратичные отклонения определяют по стандартным статистическим правилам. Точность определения пропорциональна корню квадратному из числа образцов. Первоначальная смесь (до смешивания) рассматривается как полностью сегрегированная система, в которой исходное отклонение концентрации определяется по формуле

$$S_0^2 = X_p (1 - X_p),$$

где X_p – относительная концентрация порошка в смеси.

Финальное отклонение по концентрации после полного смешивания должно стремиться к нулю ($S_1^2 = 0$). Соответственно, $M = 1 - S^2 / S_0^2$.

При смешивании сначала под действием усилий сдвига разрушаются крупные кластеры частиц и гомогенность смеси быстро возрастает.

Сегрегация, протекающая в процессе смешивания, приводит к устойчивой определенной степени гомогенности, которая ниже идеальной. Максимальная гомогенность достигается при равенстве скоростей смешивания и сегрегации.

Кроме того, результаты смешивания контролируют по физико-технологическим свойствам шихты и химическим анализом проб.

Задание

- 1 Загрузить в смесительную камеру необходимое количество шаров.
- 2 Загрузить в смесительную камеру одинаковые объемы порошка железа и алюминия, в сумме равные объему шаров.
- 3 Установить необходимую скорость вращения токарного станка.
- 4 Плотно закрыть смесительную камеру и установить ее в патрон токарного станка.
- 5 Произвести смешивание порошковой композиции в течение 5 мин.
- 6 Отключить станок, снять смесительную камеру, открыть ее и сепарировать шихту от шаров с помощью сита.
- 7 Оценить степень гомогенности шихты с помощью микроскринера.
- 8 Повторить операции 1–7, установив время смешивания 30 мин.

Контрольные вопросы

- 1 Для чего смешивают порошки?
- 2 Какие факторы влияют на гомогенность смеси?

4 Лабораторная работа № 4. Определение зависимости плотности брикета от давления прессования

Цель работы: ознакомиться с процессами формирования порошкового материала.

Оборудование и инструмент: пресс гидравлический «Титан» НД-50, весы с разновесами, штангенциркуль и микрометр, металлический порошок, разъёмная оснастка для формирования порошкового материала.

Методы порошковой металлургии позволяют получать материалы, не только аналогичные существующим по структуре и свойствам, но и материалы, имеющие совершенно новый комплекс свойств. Такие материалы, обладая неравновесной структурой, могут сочетать в себе высокие прочность, пластичность и износостойкость в различных газовых и жидких средах, а также в вакууме и при отсутствии смазок. Получить подобные материалы традиционными способами литья и обработки давлением невозможно.

Принципиальная технологическая схема производства изделий и полуфабрикатов методами порошковой металлургии состоит из следующих основных операций: получение порошков с необходимыми свойствами; подготовка порошков к формованию; формование порошков различными методами в брикеты или в изделия определенных форм и размеров; спекание спрессованных заготовок при определенной температуре в защитно-восстановительной атмосфере; термическая и химико-термическая обработки; обработка давлением; пропитка маслом и т. п. Операция формования является одной из важнейших в

технологическом цикле, т. к. она определяет в основном возможность получения изделий необходимой геометрической формы с необходимыми физико-механическими свойствами.

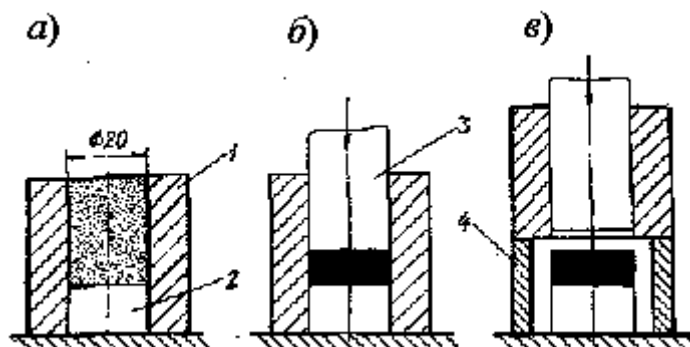
Порошки отличаются от компактных твёрдых тел значительной подвижностью частиц и способностью сохранять приданную им форму только при определенных условиях, свойством оказывать давление на ограждающую поверхность, незначительной способностью сопротивляться растягивающим усилиям и пр.

Поверхность порошка характеризуется шероховатостью (часто значительной) и наличием микроскопических или субмикроскопических трещин.

В результате контакт между соприкасающимися частицами при отсутствии внешнего давления возможен только в отдельных точках. В связи с этим действительные контактные давления в силу малости начальных поверхностей соприкосновения (0,001 %...0,01 % от общей поверхности контактирующих частиц) достигают таких значений, при которых возникают пластические деформации или местные разрушения, т. е. напряжённое состояние материала частицы в окрестностях зоны контакта должно быть близким к предельному. Сущность процесса прессования заключается в деформировании некоторого объёма сыпучего порошкового тела обжатием, при котором происходит уменьшение первоначального объёма и формирование заготовки (прессовки) заданных формы, размеров и свойств. Объём порошкового тела при прессовании изменяется в результате смещения отдельных частиц, заполняющих пустоты между ними, и деформации частиц.

При одностороннем прессовании давление на металлический порошок передается только через пуансон, обычно верхний (рисунок 4.1). Поэтому в изделиях, полученных таким способом, наблюдается большая неоднородность по плотности и твердости, и этот способ применяется только для изготовления изделий простой формы с отношением высоты к поперечному сечению не более единицы.

Процесс прессования состоит из трех стадий: засыпка порошка (см. рисунок 4.1, *а*); прессование подвижным пуансоном (см. рисунок 4.1, *б*); выпрессовка изделий (см. рисунок 4.1, *в*).



1 – матрица; 2 – пуансон неподвижный; 3 – пуансон подвижный; 4 – подставка кольцевая

Рисунок 4.1 – Три стадии прессования металлических порошков

Для получения высоких изделий с равномерной плотностью применяется двухстороннее прессование. Оно выполняется или приложением давления к верхнему и нижнему пуансонам, или приложением давления только к верхнему пуансону с принудительным опусканием подпружиненной матрицы.

При применении любого способа окончание процесса прессования контролируется или давлением (усилием) по прибору, или ограничением движения пуансона (до упора).

После прессования полученный полуфабрикат-брикет подвергается термообработке – спеканию для придания изделию необходимой прочности.

Процесс уплотнения порошкового материала с точки зрения энергосиловых затрат принято представлять в виде зависимостей: плотность брикета – давление формования при статическом сжатии порошка (рисунок 4.2, а) и плотность брикета – удельная работа (энергия) формования при динамическом сжатии порошка (рисунок 4.2, б).

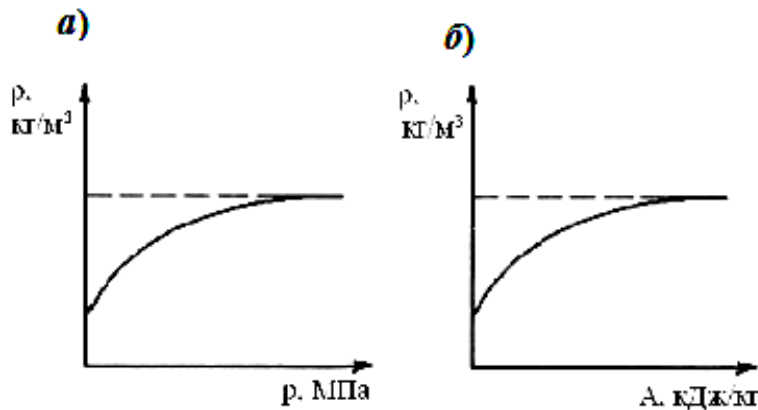


Рисунок 4.2 – Зависимость уплотнения порошкового материала от давления и удельной работы

Величины плотности ρ , кг/м^3 , и давления формования p , МПа, определяются по соответствующим формулам:

$$\rho = 4m/\pi \cdot D^2 \cdot H;$$

$$p = 4P/\pi \cdot D^2,$$

где m – масса порошкового материала, кг;

D – диаметр заготовки, м;

H – высота заготовки, м;

P – усилие сжатия, Н.

Задание

1 Произвести формование металлического порошкового материала в брикеты на гидравлическом прессе. Фиксировать ход и усилие. После прессования брикеты измерить и взвесить. Данные занести в таблицу 4.1.

2 Сделать сжатие металлического порошкового материала в пресс-форме, данные занести в таблицу 4.1. Произвести необходимые вычисления.

3 Построить график зависимости $\rho = f(p)$ (см. рисунок 4.1, а).

4 Сделать выводы по работе.

Таблица 4.1 – Результаты измерений и вычислений

Усилие P , Н	Ход H , м	Высота, м			D , м	m , кг	ρ , кг/м ³	p , МПа
		начальная H_n	конечная H_k	текущая H_m				

Контрольные вопросы

1 В чем преимущества изделий, получаемых методами порошковой металлургии, перед изделиями, изготовленными традиционными способами?

2 Из каких основных операций состоит технологическая схема получения изделий методами порошковой металлургии?

3 Почему операция формования является важнейшей в технологическом цикле производства деталей методами порошковой металлургии?

4 Какие параметры характеризуют процесс формования порошков?

5 Лабораторная работа № 5. Спекание порошковых композиций

Цель работы: ознакомление с практикой спекания порошковых композиций.

Оборудование и инструмент: печь SNOL 40/1200, баллон с аргоном, расходомер, порошковые формовки.

Атмосферы спекания и защитные засыпки. Порошковые формовки обычно спекают в среде защитного газа или в вакууме. Применение защитных газовых атмосфер и вакуума необходимо для предохранения порошковой формовки от окисления при нагреве, а также для восстановления оксидных пленок, которые всегда имеются на поверхности порошковых частиц. Окисление при спекании недопустимо, поскольку оно препятствует упрочнению порошковых тел и тормозит усадку.

Источником кислорода при спекании могут быть: кислород воздуха, пары воды в защитном газе, оксиды в спекаемом порошке и др. Металл не окисляется

в газовой атмосфере в том случае, когда парциальное давление кислорода меньше упругости диссоциации оксидов этого металла при температуре изотермической выдержки. Потому особенно трудно защитить от окисления при спекании металлы с низкой упругостью диссоциации оксидов (алюминий, титан и им подобные). Характеристика применяемых при спекании газовых сред приведена в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Характеристика защитных газовых сред

Защитная среда	Содержание компонентов, % (объем)						Точка росы, °С
	H ₂	N ₂	CO	CO ₂	CH ₄	O ₂ (≤)	
Водород технический	99,8					0,2	-30
Аммиак диссоциированный	75	25					-40
Природный газ конвертированный	75	1	22	1	0,5		+20
Эндогаз	40	40	20	1	1		От +20 до -20
Экзогаз богатый	15	15	10	5	1		От 20 до 0
Азот, высший сорт		≥ 99,994				0,005	-60
Азот, первый сорт		≥ 99,6				0,4	-40
Аргон технический, высший сорт		≤ 0,008		≤ 0,001		0,001	-55
Аргон технический, первый сорт		≤ 0,01		≤ 0,003		0,003	-50

Обычно применяемые защитные среды перед подачей в рабочее пространство печи дополнительно очищают от свободного кислорода, влаги и углекислого газа. Для очистки от кислорода газ пропускают через трубку с медной стружкой или губкой, нагретой до 400 °С...500 °С.

Можно обеспечить и более высокую степень очистки, пропуская газ через нагретый до 900 °С...1000 °С пористый ферромарганец, ферросилиций, или губчатый титан. При 450 °С...550 °С кислород активно поглощается кальцием, а при 650 °С...750 °С кальций поглощает азот. Водород пропускают через специальный аппарат с палладиевым катализатором, который обеспечивает взаимодействие кислорода с водородом при комнатной температуре и удаление кислорода в виде воды. Углекислый газ удаляют, пропуская газ через водные растворы этаноламинов. Осушку защитных газов от паров воды осуществляют прокачкой газа через адсорберы с силикагелем. Для анализа состава защитных газов используют разные типы газоанализаторов – ВТИ-2,

ОРСА, ТКГ-4 и др.

При спекании в вакууме газы удаляются из порошка значительно быстрее, полнее и при более низких температурах. Вакуум не только защищает порошковую формовку от окисления, но и способствует восстановлению оксидов. Так, например углерод, содержащийся во многих порошковых смесях, как правило, восстанавливает оксидные пленки порошковых частиц, причем этот процесс в вакууме протекает гораздо интенсивнее и при более низких температурах. Более полно и быстро в вакууме испаряются летучие примеси. Положительное влияние вакуума особенно заметно при жидкофазном спекании. В этом случае улучшается смачивание тугоплавкого компонента и быстрее происходит уплотнение порошковой формовки.

Дополнительную защиту от окисления могут обеспечить специальные засыпки, представляющие собой кварцевый песок, корракс (оксид алюминия), графитовую крупку, асбестовую мелочь и др. Часто используют смеси – комбинированные засыпки, например корракс с графитовой крупкой. Состав и расположение засыпки выбирают таким образом, чтобы создать в непосредственной близости от спекаемой формовки (вокруг нее) благоприятную защитную атмосферу. Разумеется, засыпка не должна взаимодействовать со спекаемым материалом и ее температура плавления должна быть заведомо выше.

Кроме защиты от окисления, засыпка обеспечивает более равномерный прогрев спекаемых формовок и предотвращает их припекание друг к другу.

Печи для спекания. Спекание формовок или свободно насыпанного в форму порошка проводят в печах, различающихся как по конструкции, так и по способу нагрева.

Печи классифицируют по следующим признакам:

- по типу обогрева или источника энергии (электрические, газовые);
- по принципу работы (периодического или непрерывного действия);
- по характеру рабочей атмосферы (воздушная, нейтральная, восстановительная, вакуум);
- по рабочей температуре (низкотемпературные – до 1250 °С и высокотемпературные – выше 1250 °С);
- по степени механизации (автоматические, полуавтоматические, с ручным управлением).

Печи непрерывного действия. У подобных печей обычно имеется три зоны: зона нагрева (входная зона), горячая зона и зона охлаждения. В зоне нагрева происходит испарение или выжигание смазки или пластификатора, а также релаксация напряжений, имеющих в порошковой формовке. Спекание в заданном температурном и временном режиме происходит в горячей зоне. В зоне охлаждения спеченные заготовки охлаждаются до температуры, обеспечивающей безокислительную выгрузку. Нагреватели электрических печей делают из жаростойких материалов, технические характеристики которых приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Свойства материалов для нагревательных элементов

Материал	Электросопротивление при 20 °С, Ом·мм ² /м	$T_{пл}$, °С	Максимальная рабочая температура, °С
Нихром Х15Н60	1,1	1400	1050
Сплав ЭИ325 (ОХ25Ю5)	1,4	1570	1150
Сплав ЭИ626 (ОХ27Ю5А)	1,42	2620	1300
Молибден	0,052	3000	2000
Тантал	0,15	3380	2500
Вольфрам	0,05	–	2800
Силит	800...1900	2020	1350
Мо ₂ S	0,2...0,4	–	1700
Графит	8...13	–	2400...2800

Для непрерывной транспортировки спекаемых формовок применяют конвейер из сетчатой ленты, роликовый (рольганговый) или шагающий под, а также толкатели различного типа. В конвейерной печи формовки укладывают в поддоны или прямо на конвейерную ленту из окалиностойкой проволоки и перемещают вдоль рабочего пространства печи навстречу защитному (восстанавливающему) газу.

Обычная ширина ленты – 300...600 мм, скорость движения – 2...3 м/ч. Общая длина ленты – 15...20 м при длине зоны спекания 6...10 м. Рабочая температура в печи, в зависимости от спекаемого материала и нагревательных элементов, – 1000 °С...1600 °С. Непрерывные рольганговые печи оборудованы роликами с индивидуальным приводом, по которым перемещаются короба с формовками. Производительность печей – 100 кг/ч и более.

Печи с шагающим подом имеют рабочее пространство 320×240×1840 мм, рабочая температура – 1200 °С...1400 °С, расход электроэнергии – 2,7...10,3 кВт·ч/кг, производительность – 14...70 кг/ч.

Толкательные муфельные печи наиболее просты по конструкции. Спекаемые формовки загружаются в поддоны из графита, которые механическим толкателем проталкиваются через рабочую зону печи. Защитный газ подается по принципу противотока навстречу формовкам. Рабочая температура муфельных печей – до 1400 °С, производительность – около 20 кг/ч.

Печи периодического действия. Периодически работающие печи бывают колокольного типа, муфельные и вакуумные. В колокольной печи имеется два колпака: герметичный внутренний (колокол), в котором находится спекаемая формовка, и наружный нагревательный колпак с электрообогревом. Печь экономична, благодаря малому расходу электроэнергии (150...200 кВт·ч/кг), однако имеет ограниченное применение из-за невысокой производительности и низкой температуры нагрева.

Муфельные печи получили более широкое применение. Формовки загружают в муфель из жаростойкой стали, муфель уплотняют крышкой и продувают защитным газом или водородом, затем нагревают и охлаждают

по заданной программе.

За рубежом широко применяются для спекания камерные вакуумные печи, в том числе вакуум-компрессионные, позволяющие после спекания в вакууме провести газовое изостатическое прессование без охлаждения спеченной заготовки. Применяют также микроволновые печи, например, при производстве твердых сплавов системы WC–Co.

Задание

- 1 Записать технические данные камерной печи с защитной атмосферой.
- 2 Установить прессовку порошковой композиции на под внутри камеры и закрыть двери камеры и печи.
- 3 Включить подачу аргона, установив расход газа 25 л/мин.
- 4 Включить нагрев печи, установив необходимую температуру.
- 5 Через 10 мин снизить расход газа до 15 л/мин.
- 6 Зафиксировать время выхода температуры на режим спекания.
- 7 После окончания процесса спекания отключить печь. Подачу газа сохранять в процессе охлаждения печи до 100 °С.

Контрольные вопросы

- 1 Каково назначение защитных атмосфер при спекании?
- 2 Какие Вы знаете газовые среды, применяемые при спекании? Чем они отличаются друг от друга?
- 3 Методы дополнительной очистки газов от вредных примесей.
- 4 Приведите примеры защитных засыпок и назовите требования к ним.
- 5 Классификация печей для спекания.
- 6 Как устроены печи непрерывного действия?
- 7 Как устроена колокольная печь?
- 8 В каких направлениях совершенствуются печи для спекания за рубежом?

6 Лабораторная работа № 6. Виды и причины брака при прессовании и спекании порошков

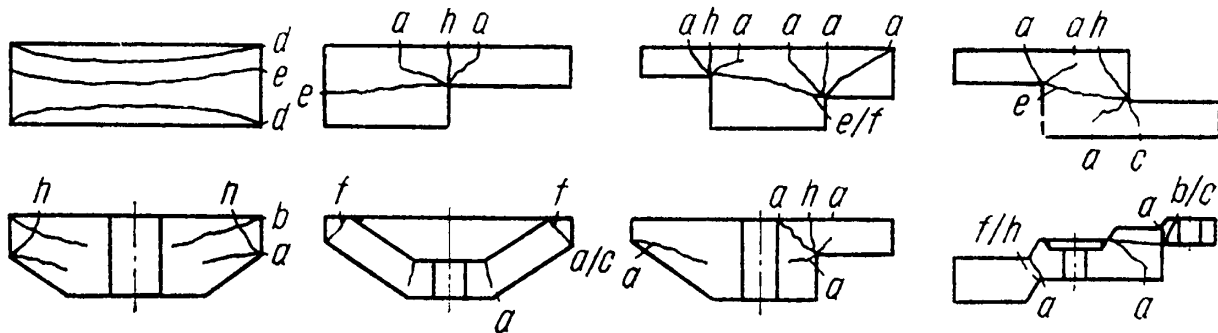
Цель работы: ознакомление с практикой выбраковки порошковых формовок.

Оборудование и инструмент: комплект порошковых формовок.

Брак при прессовании. Наиболее распространенным видом брака является *расслой* – поперечные или диагональные трещины, нарушающие целостность прессовки. Их появление обусловлено тем, что при выталкивании прессовки из матрицы пресс-формы происходит два противоположных процесса: расширение выходящего из матрицы брикета и расширение перед этим сжа-

той матрицы. В результате имеющих место деформаций по границам их действия и возникают трещины. Причинами трещин могут быть технологические факторы и ошибки при конструировании пресс-форм и изделий из порошков.

Более вероятно возникновение трещин с уменьшением прочности брикетов (гладкие, окисленные и наклепанные частички порошка с обилием смазки) при высоких усилиях прессования в связи с ростом упругих сил в прессовке в случае неравномерного распределения компонентов порошковых смесей по объему прессовки. Неправильная конструкция пресс-формы (например, отсутствие конусности у матрицы со стороны выпрессовывания брикета из нее) или ее перекося при прессовании приводят к неравномерному сбросу усилия, что вызывает дополнительные напряжения в прессовке при удалении ее из матрицы. К трещинам может привести слишком медленная выпрессовка брикета и в особенности остановки во время выпрессовывания. Способствует появлению трещин наличие в прессуемой заготовке тонких стенок или резких переходов (рисунок 6.1).



a – неравномерное распределение напряжений; b, c – неправильный ход верхнего пуансона; d – использование плохо прессуемого твердого материала; f – плохая смазка стенок пресс-формы; h – деформация матрицы при прессовании

Рисунок 6.1 – Причины возникновения трещин при прессовании

Часто при прессовании наблюдается *неравномерная плотность* в отдельных местах прессовки или *непропрессовка*, вызванные неравномерным распределением порошка по объему пресс-формы низким усилием прессования или занижением навески при прессовании до упора.

Возможен *брак по размерам*, связанный с увеличением упругого последействия в случае повышения жесткости порошка, неправильной конструкцией или размерами пресс-формы, неточностью дозирования порошка или нарушением режима прессования (завышением или занижением давления).

Задиры матрицы приводят к многочисленным рискам на поверхности прессовки, а недостаточно качественная обработка (шлифовка) рабочей поверхности пуансонов – к *сколам на торцах* прессовки, особенно на их краях.

При появлении брака необходимо установить его причины и принять ме-

ры к их устранению путем подбора соответствующих давлений прессования, изменения размеров и конструкции пресс-формы или детали, а также варьируя свойства порошка.

Брак при прессовании составляет до 2 %...3 %. Бракованные по тем или иным признакам прессовки в большинстве случаев, хотя и не всегда, могут быть возвращены в производство после соответствующего дробления и измельчения. Иногда получаемый при этом порошок небольшими порциями подмешивают к исходному материалу.

Брак при спекании и его предупреждение. Спекание – заключительная основная операция технологической схемы производства изделий методом порошковой металлургии.

Поэтому при спекании возможно появление брака как в результате нарушения режимов нагрева и охлаждения заготовок, так и в результате выявления каких-либо отклонений при осуществлении более ранних операций формования или изготовления порошков и их смесей (шихт).

Ниже рассматриваются часто встречающиеся виды брака.

Скрытый расслой – появление в спеченном изделии трещин, возникших при прессовании, невидимых невооруженным глазом. Брак неисправим.

Коробление и искажение формы – обычно наблюдается в плоских изделиях, у которых толщина мала по сравнению с длиной. Типичный вид брака у спеченных изделий из дисперсных порошков с большой усадкой. Появлению этого вида брака способствует плохое смешивание компонентов шихты, неоднородная плотность формовки и слишком быстрый ее нагрев при спекании. Этот вид брака иногда не всегда можно устранить холодной или горячей рихтовкой изделия. С целью предупреждения брака рекомендуется: тщательно смешивать компоненты шихты, устранять причины неоднородной плотности, применять спекание под давлением и медленный нагрев формовок при спекании.

Пережог – проявляется в виде дефектов структуры порошкового изделия (грубая структура, повышение пористости, растрескивание). Брак неисправим. Предупреждение брака – более тщательный контроль температуры спекания.

Недопекание – низкая плотность и прочность в результате заниженной температуры спекания и (или) недостаточной длительности спекания. Брак можно исправить повторным спеканием.

Окисление – окалина, коррозия, цветы побежалости на поверхности спеченного изделия. Причиной брака является нарушение состава защитной атмосферы. Если оксиды легко восстанавливаются, брак можно исправить повторным спеканием в восстановительной атмосфере. При трудно восстанавливаемых оксидах брак неисправим.

Корочка – дефект поверхностного слоя, который по структуре отличается от основного металла и не отвечает заданным требованиям. Обычно такой вид брака связан с разложением органических связей, вводимых в порошок. Брак неисправим. Для его предупреждения рекомендуется медленный и равномерный нагрев формовки с применением защитной газовой атмосферы и эффективных засыпок.

Выпотевание – выделение жидкой фазы на поверхности спеченного изделия. Такой брак характерен для жидкофазного спекания и вызван плохой смачиваемостью расплавом тугоплавкого компонента. Брак неисправим. Для его предупреждения необходимо откорректировать химический состав спекаемого материала.

Диффузионная пористость – возникает при спекании формовок из компонентов с резко отличающимися коэффициентами диффузии. Для предупреждения брака требуется корректировка состава спекаемого материала.

Обезуглероживание – снижение содержания углерода в поверхностном слое изделия. Возникает из-за окислительной атмосферы в печи. Для предупреждения брака надо обеспечить эффективную защитную атмосферу, закрывать поддоны (лодочки) со спекаемыми изделиями металлическими или графитовыми крышками, применять защитные засыпки. Слабо обезуглероженные изделия можно исправить повторным спеканием в углеродосодержащей засыпке.

Сажистый налет – темный налет на поверхности изделий в результате разложения оксида углерода, метана или других углеводородов. Такой брак возможен при наличии на поверхности формовок перед спеканием тяжелых масел. Предупреждение брака – тщательный технологический контроль за введением добавок в порошок.

Вспучивание – образование пузырей на поверхности спеченного изделия. Причины – интенсивное газовыделение при жидкофазном спекании, местные перегревы из-за неравномерности нагрева порошковой формовки в печи, вызывающие расплавление какого-либо компонента при твердофазном спекании. Брак неисправим.

Разъедание и шероховатость поверхности – нарушение целостности поверхностного слоя из-за разложения или восстановления каких-либо химических соединений, которые были на поверхности формовки или образовались при нагреве в печи. Предупреждение брака – тщательный технологический контроль.

Брак при спекании, особенно неисправимый брак, значительно ухудшает экономику производства порошковых изделий. При появлении брака необходимо принять немедленные меры по выявлению причин его возникновения и их устранению, обеспечив тщательный контроль качества на всех технологических операциях.

Задание

- 1 Для заданных изделий определить видимые дефекты.
- 2 Указать причины их возникновения.
- 3 Предложить меры по их устранению или недопущению.

Контрольные вопросы

- 1 Перечислите виды брака при спекании.
- 2 Причины появления брака «скрытый расслой» и меры по его предупреждению.

3 Окисление и обезуглероживание порошковых формовок. Как исправить эти виды брака?

4 Предложите меры по устранению таких видов брака, как искажение формы и коробление спеченных формовок.

Список литературы

1 Материаловедение. Технология композиционных материалов : учебник / А. Г. Кобелев [и др.]. – Москва: КНОРУС, 2020. – 270 с.

2 **Богодухов, С. И.** Материаловедение: учебник / С. И. Богодухов, Е. С. Козик. – 3-е изд., стер. – Старый Оскол : ТНТ, 2018. – 536 с.

3 **Бондаренко, Г. Г.** Материаловедение: учебник / Г. Г. Бондаренко, Т. А. Кабанова; под ред. Г. Г. Бондаренко. – 2-е изд. – Москва: Юрайт, 2021. – 327 с.