

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Технологии металлов»

МАТЕРИАЛЫ АДДИТИВНОГО СИНТЕЗА

*Методические рекомендации к лабораторным работам
для студентов специальности 1-36 07 02 «Производство изделий
на основе трехмерных технологий»
очной и заочной форм обучения*

**МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ, КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ
И ИЗДЕЛИЯ ИЗ НИХ**



Могилев 2023

УДК 669.01
ББК 30.3
МЗ4

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Технологии металлов» «25» ноября 2022 г.,
протокол № 9

Составители: канд. техн. наук, доц. А. С. Федосенко;
А. С. Оленцевич

Рецензент А. Е. Науменко

В методических рекомендациях рассмотрены вопросы, связанные с материалами на основе металлов, применяемыми для изготовления изделий в области аддитивного производства. Отражены основные методы изучения структуры и свойств порошков и изделий.

Учебно-методическое издание

МАТЕРИАЛЫ АДДИТИВНОГО СИНТЕЗА

Ответственный за выпуск	Д. И. Якубович
Корректор	Т. А. Рыжикова
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 36 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

1 Лабораторная работа № 1. Способы повышения сыпучести порошкообразных материалов	4
2 Лабораторная работа № 2. Исследование технологических свойств порошков с формой частиц, отличных от сферической.....	7
3 Лабораторная работа № 3. Влияние термической обработки на структуру и свойства металлических изделий, полученных послойным синтезом...	11
4 Лабораторная работа № 4. Способы дуговой наплавки, применяемые в области аддитивных технологий	13
5 Лабораторная работа № 5. Особенности структуры изделий, полученных послойным сплавлением порошкообразного материала.....	16
6 Лабораторная работа № 6. Структура керамических материалов, полученных методами аддитивных технологий.....	19
7 Лабораторная работа № 7. Механические способы обработки изделий, полученных методами аддитивных технологий.....	22
8 Лабораторная работа № 8. Формирование 3D-моделей методом напыления	26
9 Лабораторная работа № 9. Структура и свойства материалов, получаемых методами газотермического напыления.....	30
10 Лабораторная работа № 10. Особенности структуры слоев, полученных наплавкой разнородных материалов.....	33
11 Лабораторная работа № 11. Структура изделий, полученных послойной наплавкой материала в виде проволоки.....	37
12 Лабораторная работа № 12. Влияние химического состава композиции на структуру и свойства механически легированных порошков.....	41
13 Лабораторная работа № 13. Влияние режимов механосинтеза на технологические характеристики синтезируемых порошков.....	45
Список литературы.....	48

1 Лабораторная работа № 1. Способы повышения сыпучести порошкообразных материалов

Цель работы: получение знаний о способах повышения сыпучести порошковых материалов.

Оборудование и инструмент: образцы порошкообразных материалов, стереомикроскоп Альтами, прибор для определения сыпучести порошков Hflow-1.

Общие сведения

Одним из важнейших показателей порошковых материалов является форма их частиц. Оптимальной считается сферическая форма, поскольку в данном случае материал обладает наилучшей сыпучестью (текучестью), определяющей качество формируемого слоя «строительного материала». В связи с этим в промышленных масштабах для получения таких порошков используют лишь определенные технологии.

Чаще всего применяют технологию газового распыления в атмосфере инертного газа. Поток газа высокого давления распыляет жидкий металл, который формируется в сферические капли и затем застывает при охлаждении ниже температуры плавления. Твердые частицы просеивают и сортируют по размеру. Для активных металлов распыление и упаковка осуществляются в защитной атмосфере.

Для получения мелких порошков широко используют следующие технологии.

1 *VIGA (вакуумная индукционная газовая атомизация)*, используемая в промышленных установках вакуумного индукционного плавления.

2 *EIGA (индукционная плавка электрода с распылением жидкого металла газом (аргон))*. Медленно вращающийся электрод опускается в кольцевой индуктор, образуящиеся на электроде капли металла капают, попадают в систему форсунок и распыляются инертным газом.

3 *Плазменная атомизация* – в качестве источника нагрева используется плазма. В основе оборудования – плазмотрон или набор плазмотронов, сконцентрированных в точку и генерирующих ионизированный газ.

4 *Вакуумная атомизация*. Атомайзер состоит из двух камер. В плавильной камере создается избыточное давление газа (водород, гелий, азот). Попадая в верхнюю распылительную камеру с вакуумом, растворенный в расплаве газ выходит на поверхность и «взрывает» капли металла изнутри. В результате образуется облако сферических капель, превращающихся в мелкодисперсный порошок.

К недостаткам технологий следует отнести сложность и высокую стоимость оборудования, отсутствие возможности изготовления тугоплавких материалов, значительное время на переналадку оборудования, под каждый конкретный материал (до 12 ч).

В то же время существуют перспективные технологии получения порошков, не обеспечивающие возможности получения порошков со сферической формой

частиц. В большинстве случаев такие материалы пропускают через высокотемпературный поток, позволяющий полностью или частично расплавить частицы материала, придав им более округлую форму. Наибольшее распространение получил способ плазменной сфероидизации. Он позволяет не только получить материалы со сферической формой частиц, но и очистить их от примесей и уменьшить размер, увеличивая их плотность.

Обработка заключается в следующем. Стандартный металлический порошок, частицы которого имеют геометрические недостатки, помещают в поток плазмы. Оплавляясь, частицы порошка под действием сил поверхностного натяжения приобретают сферическую форму (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Схема сферической частицы металла

Каждая частица, находящаяся в струе плазмы, испытывает значительные тепловые нагрузки, но так как скорость обработки очень высока, частица не успевает расплавиться до конца, особенно это касается частиц с размером более 100 мкм из тугоплавких металлов (рисунок 1.2).

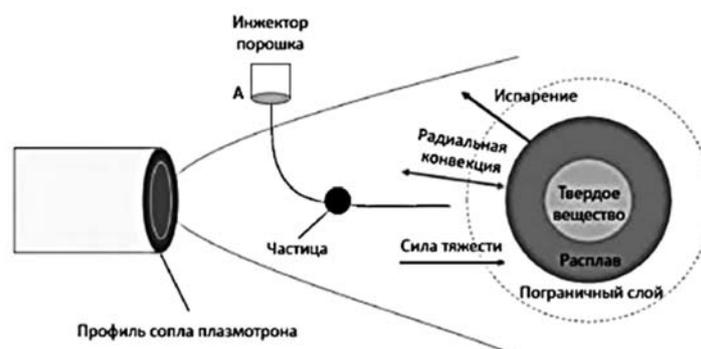


Рисунок 1.2 – Схематическое изображение дискретной частицы, движущейся в потоке плазмы, ее нагрев

Сфероидизация обеспечивает однородную сыпучесть порошка, повышает насыпную плотность, устраняет внутренние полости и трещины каждой отдельно взятой частицы. Поверхность частиц, обработанных плазмой, становится гладкой, за счет чего они не агломерируются и не загрязняются во время переноса газом. Чистота порошка возрастает.

В настоящее время разработаны специальные серийно выпускаемые установки, предназначенные для сфероидизации частиц порошковых материалов. Одним из производителей такого оборудования является фирма ТЕКНА. В основе оборудования лежит использование индукционных плазменных горелок. Оно может использоваться для обработки всех групп материалов, от металлов до керамики. Установки занимают площадь до 13 м². При этом они отличаются относительно низкой производительностью. Так, установка TekSphero-15 способна обрабатывать до 1 кг порошка в час.

Обработка порошков, состоящих из частиц неправильной формы, механическими способами.

Несмотря на эффективность плазменной сфероидизации, данный способ подготовки порошка отличается высокой сложностью и стоимостью оборудования при достаточно низкой производительности.

В ряде случаев целесообразнее использовать способы, основанные не на расплавлении частиц обрабатываемого материала, а на механическом воздействии. Оно не обеспечивает возможности получения абсолютно сферических частиц, однако способно повысить сыпучесть материалов и их насыпную плотность. Это достигается путем изменения рельефа поверхности частиц за счет удаления мелких, слабо связанных с основной частицей сателлитов, а также сглаживания острых краев.

Механическое воздействие может оказываться несколькими способами. Одним из них является обработка порошка в смеси с частицами абразивного материала, в качестве которого используется порошок с высокой твердостью (белый чугун, карбид вольфрама, карбид кремния и др.). При этом частицы абразивного материала превосходят размер частиц обрабатываемого порошка в несколько раз. Это необходимо в первую очередь для предотвращения засорения обрабатываемого материала частицами абразива. В процессе интенсивного трения абразивные частицы оказывают воздействие на обрабатываемый порошок, что позволяет удалить с поверхности его частиц мелкие сателлиты, а также несколько скруглить острые грани.

Вторым способом является подготовка суспензии, состоящей из инертной по отношению к порошку жидкости и обрабатываемого порошка. Смесь помещается в сосуд, стенки которого изготовлены из металлического или керамического материала. С помощью крыльчатки, установленной на валу электродвигателя, суспензия приводится в движение. В результате интенсивного трения частиц между собой и о стенки сосуда достигается эффект, аналогичный описанному выше. Обработка может длиться до нескольких часов.

Третий способ заключается в обработке порошка в смеси с шарами размером 2...7 мм в медленно вращающемся барабане. Это обеспечивает эффект перекачивания порошка с шарами, что позволяет оказывать «мягкое» ударное воздействие шаров на частицы. Данное воздействие способствует удалению мелких сателлитов и некоторому округлению частиц, а также разрушению крупных конгломератов, состоящих из слабо связанных между собой мелких гранул.

Контрольные вопросы

- 1 Перечислите основные способы получения порошков со сферической формой частиц.
- 2 Какие недостатки у промышленных способов получения порошков?
- 3 В чем заключается плазменная сфероидизация порошков?
- 4 В каких случаях используют плазменную сфероидизацию порошков?
- 5 Перечислите плюсы и минусы плазменной сфероидизации порошков.
- 6 В чем заключаются механические способы улучшения сыпучести порошков с неправильной формой частиц?

Ход работы

- 1 Ознакомиться с устройством и работой прибора для определения сыпучести Hvof-1.
- 2 Взять образцы порошковых материалов, не подвергавшихся улучшению сыпучести и прошедших дополнительную обработку.
- 3 Взвесить порошковые материалы массой 50 г.
- 4 Загрузить порошок в воронку прибора. Засечь время с помощью секундомера и открыть отверстие воронки. Определить время истечения каждого порошка.
- 5 Записать в отчет время, затраченное на истечение порошка, прошедшего специальную подготовку, и порошка без подготовки.
- 6 Определить, насколько улучшилась сыпучесть порошка после обработки.

Содержание отчета

- 1 Цель работы.
- 2 Основные теоретические положения.
- 3 Результаты измерений.

2 Лабораторная работа № 2. Исследование технологических свойств порошков с формой частиц, отличных от сферической

Цель работы: ознакомиться со способами оценки сыпучести и насыпной плотности порошковых материалов, отличающихся пониженной сыпучестью.

Оборудование и инструмент: лабораторная установка для определения сыпучести порошковых материалов по углу естественного откоса, лабораторная установка для определения насыпной плотности порошков.

Общие сведения

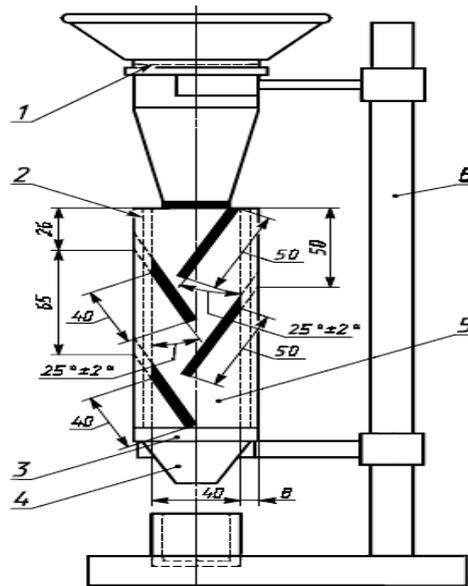
Одним из наиболее широко используемых способов определения сыпучести (текучести) металлических порошков является метод с помощью прибора Холла,

представляющего собой калиброванную воронку. Данный прибор также используется для определения насыпной плотности порошков. Однако данный прибор позволяет работать лишь с хорошо текучими порошками, которые способны свободно просыпаться через отверстие с максимальным диаметром 5 мм. В ряде случаев данный диаметр является недостаточным. В первую очередь это касается порошков с небольшим размером и неправильной формой частиц. В связи с этим в некоторых случаях указанный метод использоваться не может.

1 Определение насыпной плотности металлических порошков с помощью волюмометра Скотта.

Сущность метода. Метод распространяется на порошки, которые свободно не протекают через *воронку* с отверстием диаметром 5 мм и соответствует ГОСТ 19440–94. Он основан на измерении массы определенного количества порошка, который в свободно насыпанном состоянии заполняет емкость известного объема.

Свободно насыпанное состояние получается при заполнении емкости путем последовательного прохождения порошка через систему наклонных пластин волюмометра (рисунок 2.1).



1 – латунное сито; 2 – сторона коробки из стекла; 3 – деталь нижнего соединения; 4 – нижняя квадратная воронка; 5 – сторона коробки из дерева; 6 – стойка

Рисунок 2.1 – Вид сбоку волюмометра Скотта

Насыпную плотность определяют как отношение массы к объему.

В верхней части прибора располагается воронка с большим и малым конусами, разделенными цилиндрической частью, и имеющая латунное сито с отверстиями размером 1,18 мм (допускается 1,25 мм). Ниже размещена коробка квадратного сечения с четырьмя стеклянными наклонными пластинками, которые удерживаются с помощью пазов на противоположных (*боковых*) ее сторонах. Пластинки установлены таким образом, чтобы порошок последовательно падал

на каждую из них, вследствие чего падение порошка прерывается, а скорость его потока уменьшается.

Стойка и горизонтальное виброустойчивое основание обеспечивают крепление емкости, коробки и воронки на одной оси. Цилиндрическая емкость вместимостью $(25 \pm 0,05)$ см³ и внутренним диаметром (30 ± 1) мм.

Емкость и воронки изготовляют из немагнитного устойчивого против коррозии металла. Для взвешивания используются *лабораторные* весы с погрешностью не более 0,05 г. Обычно порошок испытан в состоянии поставки, т. е. в воздушно-сухом состоянии.

Порядок проведения испытания.

Порошок насыпают в воронку до полного заполнения им емкости (*стакана*) и до начала пересыпания из нее.

Выравнивают порошок линейкой и следят, чтобы его не уплотнить или не вычерпнуть, не толкнуть или не вызвать вибрацию емкости. Поверхность порошка выравнивают однократным движением с помощью немагнитной линейки, повернутой ребром к верхнему торцу емкости.

После выравнивания поверхности порошка следует слегка постучать по емкости, чтобы порошок осел и не рассыпался при перемещении, и удалить с наружной поверхности емкости прилипшие частицы. Массу порошка определяют с точностью до 0,05 г. Определение выполняют на трех испытуемых порциях.

Насыпную плотность ρ_{as} , г/см³, вычисляют по формуле

$$\rho_{as} = \frac{m}{V} = \frac{m}{25}, \quad (2.1)$$

где m – масса испытуемого порошка в емкости (стакане), г;

V – вместимость емкости, см³.

Записывают среднее арифметическое значение трех определений с точностью до 0,01 г/см³ (то есть с округлением до второго десятичного знака), а также наибольший и наименьший результаты, если расхождение между ними превышает 1 % среднего значения.

2 Определение насыпной плотности с помощью сообщающихся цилиндров.

Данный метод может быть использован в тех случаях, когда предыдущий способ не применим. Это могут быть порошки с пластинчатой или игольчатой формой частиц. Его можно использовать в качестве экспресс-метода, для получения сравнительных результатов для серии материалов.

Метод заключается в том, что в цилиндр емкостью 100 см³ загружается порошок объемом 70 см³. Сосуд закрывается ответной емкостью объемом $(25 \pm 0,05)$ см³. После этого система сообщающихся сосудов медленно поворачивается по часовой стрелке на угол 540°. Скорость вращения должна выбираться так, чтобы обеспечивалось пересыпание порошка, но исключалось его падение. После поворота внешний цилиндр медленно поднимают вверх, в резуль-

тате чего избыточная часть порошка высыпается на специальный приемный поддон. Далее однократным движением лишний материала удаляется с поверхности мерного сосуда. Порошок с емкостью взвешивается.

Общая методика отбора проб и расчет полученной насыпной плотности осуществляется аналогично методу, описанному выше.

3 Определение сыпучести порошкового материала по углу естественного откоса.

Метод может быть использован как для порошков с хорошей сыпучестью, так и для материалов с неудовлетворительным показателем данной характеристики. Он заключается в измерении угла естественного откоса, образующегося при истекании порошка из цилиндра.

Исследуемый порошок загружается в цилиндр, изготовленный из немагнитного материала и установленный на специальную площадку диаметром 50 мм. Цилиндр медленно поднимают вверх, при этом скорость перемещения должна обеспечивать ссыпание порошка и не допускать его резкого падения.

В результате ссыпания материала образуется горка конусообразной формы. Лишний порошок при этом ссыпается в специальный приемный лоток.

Не допуская ударов и колебаний, выполняют фотосъемку полученного конуса под углами 0° и $\pm 45^\circ$.

Полученные снимки порошка импортируются в графический редактор (КОМПАС, AutoCAD и др.), имеющий в качестве одного из инструментов функцию измерения угла. С помощью редактора устанавливаются линии, ограничивающие исследуемый конус порошка с трех сторон (нижняя горизонтальная линия и две линии боковых скатов). Определяется угол наклона между горизонтальной и наклонной линиями.

Съемка с трех сторон позволяет получить более точный результат измерений.

Метод позволяет исследовать сыпучие материалы различных классов, включая порошки с любой формой частиц, а также материалы, сыпучесть которых может существенно изменяться в результате режимов обработки или переработки (измельчение, деформация, изменение формы частиц, нагрев и пр.).

Контрольные вопросы

1 Укажите прибор для измерения насыпной плотности плохо текучих материалов и объясните принцип его действия.

2 Опишите конструкцию волюметра Скотта.

3 Как рассчитывают насыпную плотность материала?

4 Опишите способ определения насыпной плотности материала с помощью сообщающихся сосудов.

5 В чем заключается способ определения сыпучести материала по углу естественного откоса?

Ход работы

1 Ознакомиться с устройством и работой лабораторных установок для определения сыпучести по углу естественного откоса и насыпной плотности.

2 Получить образцы порошков. Согласно указаниям преподавателя провести измерение сыпучести по углу естественного откоса с помощью лабораторной установки.

3 Согласно указаниям преподавателя определить насыпную плотность порошков с помощью лабораторной установки.

4 Полученные результаты занести в отчет.

Содержание отчета

1 Цель работы.

2 Основные теоретические положения.

3 Результаты исследований.

3 Лабораторная работа № 3. Влияние термической обработки на структуру и свойства металлических изделий, полученных послойным синтезом

Цель работы: изучить структуру материалов, полученных многослойной наплавкой методами селективного лазерного сплавления и плазменной наплавки после различных видов термической обработки.

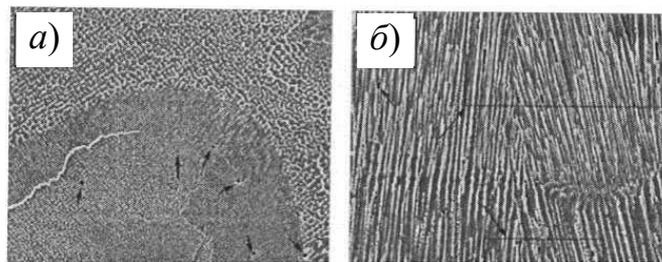
Оборудование и материалы: образцы, полученные на 3D-принтере, а также многослойной плазменной наплавкой с помощью установки EuTronic GAP 2501 DC с горелкой GAP E150P, микроскоп металлографический.

Общие сведения

Процесс аддитивного производства выполняется под управлением системы автоматизированного трехмерного проектирования. Программное обеспечение управляет нанесением тонких слоев металлического порошка (титановый сплав Ti6Al4V, кобальт-хромовый сплав, нержавеющая сталь, никелевые сплавы и др.) на подложку, а затем материал выборочно расплавляется лазерным лучом с высокой точностью. Таким образом, слой за слоем создается готовый объект.

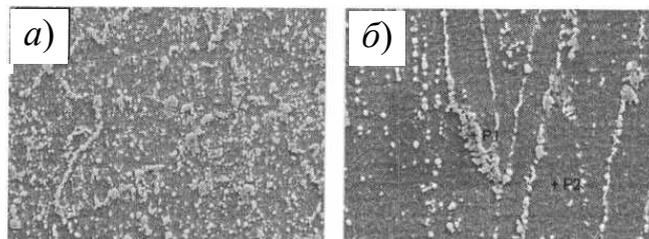
Изделия, изготовленные с использованием послойного синтеза (селективное лазерное сплавление), отличаются значительными внутренними напряжениями, снижающими нагрузку, которую может выдержать деталь. Образование напряженного состояния связано с локальным нагревом/охлаждением в значительном температурном диапазоне. Уменьшить внутренние напряжения можно термической обработкой. Она также используется для изменения структурно-фазового состояния материала с целью увеличения пластичности и прочности.

Влияние термообработки на микроструктуру и механические свойства деталей можно продемонстрировать на примере микроструктуры и механических свойств образцов из сплава Inconel 718, полученных методом селективного лазерного плавления. Исходный материал – порошок с размером частиц до 50 мкм. Микроструктура образца до термообработки представляла собой мелкие дендриты (рисунок 3.1), после термообработки (термообработка на твердый раствор (980 °С, 1 ч, охлаждение на воздухе) с последующим двойным старением (720 °С, 8 ч, охлаждение с печью, далее 620 °С, 8 ч, охлаждение на воздухе) – дендритные кристаллы исчезли, появились выделения вторичных фаз по границам зерен (рисунок 3.2).



a – горизонтальное сечение; *б* – вертикальное сечение

Рисунок 3.1 – Микроструктура образца из сплава Inconel 718, полученного методом селективного лазерного сплавления



a – горизонтальное сечение; *б* – вертикальное сечение

Рисунок 3.2 – Микроструктура образца из сплава Inconel 718, полученного методом селективного лазерного сплавления, после термической обработки

Эти выделения представляют собой сложную фазу с ромбической кристаллической структурой и фазы Лавеса. Механические свойства образцов после термической обработки сопоставимы со свойствами образцов, полученных обработкой давлением.

Важным требованием к процессу термообработки изделий, полученных способами аддитивного производства, является однородное распределение температуры: изделие выдерживается при строго определенной температуре в течение заданного времени. Процесс должен выполняться в среде инертного газа для предотвращения окисления изделия, сопровождающегося ухудшением его физико-химических свойств.

Как известно, в материалах, полученных послойным синтезом, присутствуют

различные виды дефектов, основным из которых являются поры. Их наличие существенно влияет на механические свойства детали при циклических нагрузках. Пористость и другие несовершенства структуры в ряде случаев устраняют применением горячего изостатического прессования (ГИП), которое можно считать одной из разновидностей термической обработки. Проведение ГИП позволяет получать образцы с относительной плотностью около 100 %. Его применение заметно увеличивает усталостную прочность изделий, полученных методом селективного лазерного плавления, и приближает ее значение к таковой у деталей, полученных традиционными методами.

Контрольные вопросы

- 1 С какой целью проводят ТО изделий, полученных АТ?
- 2 Какой вид ТО применяют для изделий, полученных АТ?
- 3 Для чего проводят горячее изостатическое прессование?
- 4 С какой целью проводят отжиг изделий?
- 5 Как влияет термическая обработка на структуру сплава Inconel 718?

Ход работы

- 1 Получить у преподавателя образцы, изготовленные послойным синтезом способами селективного лазерного сплавления и плазменной наплавки.
- 2 Изучить микроструктуру образцов после формирования изделия, закалки и отжига.
- 3 Зарисовать структуру образцов после каждого вида термообработки.

Содержание отчета

- 1 Цель работы.
- 2 Описание особенностей структуры исследуемых образцов.
- 3 Вывод о влиянии термической обработки на структуру образцов.

4 Лабораторная работа № 4. Способы дуговой наплавки, применяемые в области аддитивных технологий

Цель работы: ознакомиться с технологиями получения трехмерных изделий, базирующимися на способах дуговой наплавки, применяемых в промышленности.

Оборудование и материалы: образцы, полученные многослойной дуговой наплавкой, микроскоп металлографический, стереомикроскоп.

Общие сведения

В настоящее время в аддитивном производстве наибольшее применение получили дуговые способы наплавки с использованием в качестве конструкционного материала проволоки. К этим технологиям относятся электродуговая

наплавка в среде защитного газа плавящимся электродом (Wire Arc Additive Manufacturing, WAAM), электродуговая наплавка неплавящимся электродом в среде инертного газа (Gas tungsten arc welding, GTAW), дуговая плазменная наплавка (Plasma Wire Deposition, PWD). В основе данных способов аддитивного производства лежит классический процесс электродуговой сварки.

Типы систем, применяемых для производства изделий дугowymi способами наплавки.

Компоновочная схема оборудования дуговой наплавки на данный момент представлена тремя основными разновидностями: работа-техническими комплексами, порталными и консольными установками.

В составе робототехнического комплекса (РТК) могут использоваться один, два или более роботов. Каждый из роботов может выполнять однотипные операции по наплавке, тем самым увеличивая общую производительность и габариты обработки. Также возможна схема задействования одного робота для наплавки, а второго – для несилевой фрезерной обработки.

При использовании классической станочной схемы в виде портала или консоли становится доступным внедрение неразрушающего контроля, полноценной фрезерной обработки, а также обкатки и проковки. Также следует отметить более высокую безопасность, точность позиционирования, качество наплавки, удобство и интуитивность программирования. При этом системы станочного типа дороже РТК.

Преимущества дугowych способов наплавки: стоимость сварочной проволоки в 2–10 раз по сравнению с порошками; широкая номенклатура проволочных материалов; коэффициент использования материала может превышать 90 %.

РТК и станки для проволочной наплавки заметно выигрывают в размерах получаемых деталей. Обычно полезный рабочий объем превышает 1 м³, что является на данный момент недостижимым для принтеров, работающих по принципу послойной печати порошковыми материалами. В настоящее время наиболее часто используют 3-осевые промышленные установки, хотя выпускаются и 5-осевые версии. Недостаток последних – область построения по объему почти в 4 раза меньше. РТК, как правило, не имеют ограничений области построения, особенно 3-осевые, однако в этом случае робот должен перемещаться по специальным направляющим, что приводит к ухудшению точности получаемого изделия. Использование 5-осевой обработки возможно только с применением глобусных поворотных столов, что сильно уменьшает рабочий объем.

Подача проволоки в зону плавления может быть коаксиальная, боковая и двойная. При использовании двойной подачи проволоки производительность вырастает почти в 2 раза, но одновременно с этим может несколько ухудшиться качество.

Качество. Относительная пористость изделий составляет не более 2 %. В то же время в дугowych способах производства приходится внимательно следить за качеством защитной сварочной смеси (аргон, гелий, СО₂ и др.).

В классической технологии WAAM на поверхность детали оказывается достаточно высокое тепловое воздействие. За счет этого повышается степень термической деформации заготовки (на степень деформации также влияет качество ат-

мосферы, количество углеродов и влаги). Для уменьшения коробления расчетным путем учитывают тепловое расширение и внутренние напряжения, а также применяют различные технологические приемы.

В некоторых случаях совмещают наплавку с послойной обкаткой – проковкой. Это позволяет получить механические свойства на уровне или выше основного материала с изотропной структурой, уменьшить размер зерна и снять остаточные напряжения в детали.

Производительность и точность. Все проволочные технологии кратно превосходят по скорости популярные способы аддитивного производства металлических изделий (рисунок 4.1). Так, производительность технологий WAAM/3DMP может превышать 5 кг/ч или 450...1000 см³/ч в зависимости от материала. Плазменная технология RPD от Norsk Titanium позволяет достичь производительности 5...10 кг/ч. Использование комбинированных источников, например плавящегося электрода и плазменной наплавки, может обеспечить до 15 кг/ч.

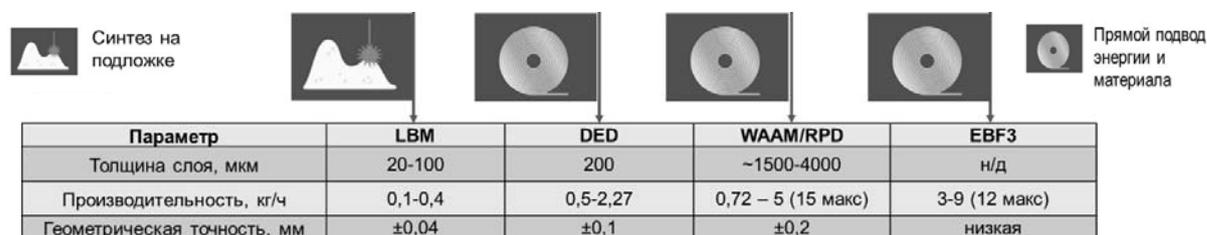


Рисунок 4.1 – Сравнение производительности и точности систем аддитивного производства по металлу

С другой стороны, геометрическая точность и повторяемость проволочных технологий значительно ниже, чем у газопорошковой наплавки DED и селективного лазерного сплавления SLM. Но если принять во внимание производство изделий как заготовок под механообработку, то точность изделия не играет столь важной роли.

Наиболее ощутимый эффект будет наблюдаться при использовании перечисленных способов для наплавки труднообрабатываемых материалов: коррозионно-стойких и жаропрочных сталей и сплавов; материалов с высокой твердостью и прочностью; сплавов на основе титана и тугоплавких металлов (вольфрам, молибден, ниобий).

Контрольные вопросы

- 1 Дайте характеристику типам систем, применяемым для производства трехмерных изделий дуговыми способами наплавки.
- 2 Перечислите преимущества использования материалов в виде проволоки.
- 3 Каково качество изделий, получаемых послойным синтезом при использовании проволоки?
- 4 Чем определяется высокая эффективность использования способов дуговой наплавки в области аддитивных технологий?

Ход работы

1 Получить у преподавателя образцы, полученные многослойной дуговой и плазменной наплавками.

2 С помощью стереомикроскопа изучить морфологию образцов. Используя металлографический микроскоп изучить микроструктуру образцов до и после травления.

3 Дать характеристику поверхности исследуемых образцов, а также их микроструктуры после каждого вида термообработки.

Содержание отчета

1 Цель работы.

2 Общее описание применяемых технологий, их преимущества и недостатки.

3 Описать особенности макро- и микроструктуры исследуемых образцов.

5 Лабораторная работа № 5. Особенности структуры изделий, полученных послойным сплавлением порошкообразного материала

Цель работы: изучить особенности структуры материалов, полученных многослойной наплавкой методами селективного лазерного сплавления (СЛС); ознакомиться с основными видами возникающих дефектов и причиной их образования.

Оборудование и материалы: образцы, полученные методами селективного лазерного сплавления, микроскоп металлографический, реактивы для травления микрошлифов.

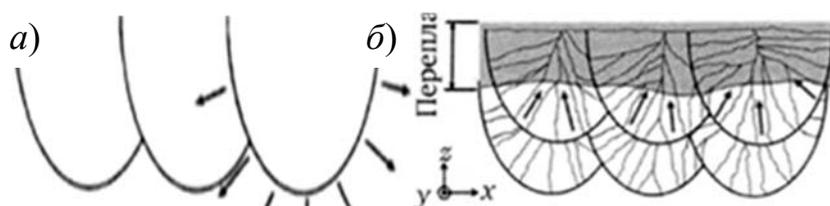
Теоретические сведения

На эксплуатационные характеристики изделий, полученных методом СЛС, влияет целая совокупность факторов и параметров технологического процесса. К основным факторам, обуславливающим особенности микроструктуры и физико-механических свойств СЛМ-материалов, следует отнести тепловой режим, размеры и мощность лазерного или электронного луча, скорость сканирования, стратегию сканирования (траекторию обхода) лучом, условия среды рабочей камеры и характеристики металлопорошковой композиции.

Температура предварительного прогрева платформы построения с подложкой из металлического порошка отличается для различных систем СЛС. Некоторые аддитивные установки работают при температуре подогрева подложки от 80 °С до 200 °С, в то время как системы, основанные на методе электронно-лучевого сплавления (ЭЛС), требуют для некоторых сплавов температуры до 1100 °С. Низкая температура подложки вызывает более высокий градиент температур по выращиваемому объекту, тем самым увеличивая величину остаточных напряжений, что негативно влияет на точность изделия.

Атмосфера рабочей камеры. В рабочей камере создается и поддерживается защитная среда из инертных газов (азот или аргон) для СЛС-машин или вакуум для ЭЛС-установок. Глубокий вакуум приводит к увеличению испарения металла из ванны расплава и дегазации примесей. Инертный газ и направление его потоков влияют на пористость и количество примесей в изделиях, синтезированных по технологии СЛС, вследствие возможного переноса в зону сканирования оксидных включений, образующихся в процессе плавления порошка.

Тепловой режим в зоне построения. Для послойного синтеза характерно образование неравновесной микроструктуры. При затвердевании металла в ванне расплава температурный градиент направлен перпендикулярно по отношению к ее границам (рисунок 5.1, *а*). Именно это служит причиной направленного роста кристаллитов от периферии зоны расплава к ее центру. Вместе с тем при нанесении последующего слоя происходит частичный переплав нижележащего слоя, что приводит к изменению ориентации зерен (рисунок 5.1, *б*).



а – отвод тепла в ванне расплава; *б* – переплав нижележащего слоя и перекристаллизация

Рисунок 5.1 – Условия возникновения однонаправленных вытянутых зерен при СЛС

Направленная кристаллизация также способствует формированию крупнозернистой дендритной структуры. При этом может наблюдаться эпитаксиальный рост зерен, при котором расплавленный металл каждого слоя, кристаллизуясь, является продолжением предыдущего слоя закристаллизовавшегося материала. В результате этого изделие может состоять из крупных вытянутых зерен, проходящих через все тело изделия.

Стратегия сканирования. Стратегии сканирования, которые обычно используются в СЛС-системах, условно можно разделить на две основные группы. К первой относятся два вида траекторий обхода лучом со сплошным параллельным заполнением. Вторая группа включает в себя стратегии «шахматной доски», где область заполнения разбивается на квадратные области со штриховкой соседних секторов, как правило, во взаимно перпендикулярных направлениях.

Параметры луча. Фокусирование лазерного излучения оказывает заметное влияние на качество получаемой поверхности. Считается наиболее целесообразным схождение пучка лазерного излучения в верхних частях гранул. Это позволяет обеспечить последовательную перекристаллизацию сплава, получить более плотную структуру материала без пор, отличающуюся повышенной твердостью.

Характеристики металлопорошковой композиции, такие как гранулометрический состав, морфология поверхности частиц, пористость, микротвердость, наличие неметаллических включений, наряду с технологическими параметрами процесса послойного синтеза оказывают значительное влияние на структуру и

ФМС изготавливаемых изделий. Они влияют на равномерность распределения частиц по платформе построения, а также плотность расплавленного слоя в процессе СЛС.

Содержание большого количества мелкодисперсных частиц позволяет уменьшить шаг построения, что, в свою очередь, увеличивает качество поверхности и возможности воспроизведения более мелких элементов. В то же время, если порошок содержит много гранул размером менее 10 мкм, это приводит к его слипанию и образованию комков. Стабильность процесса снижается. В случае, если металлопорошковая композиция будет состоять из частиц только крупной фракции, детали имеют повышенную шероховатость и пористость.

Таким образом, требуется оптимальное значение среднего размера частиц с целью минимизации пористости в материале синтезируемой детали.

Основные дефекты, образующиеся при селективном лазерном или электронно-лучевом сплавлении.

1 Нерасплавленные частицы. Нерасплавленные частицы могут оставаться внутри объемов неперекрывающихся сканированных дорожек. При неоптимизированных параметрах обработки, таких как более низкая мощность лазера или более высокая скорость сканирования, некоторые частицы могут остаться нерасплавленными. Их появление также может быть вызвано конгломерацией частиц порошка.

2 Пористость и незаполненные пустоты. Пористость может возникать в результате использования слишком крупного порошка, недостаточной мощности источника тепла, особенностей теплофизических свойств порошков. Причинами пористости могут стать посторонние примеси в порошке, влага, нестабильные соединения, разлагающиеся при плавлении основного материала.

Различают пористость первого и второго рода. Пористость первого рода обусловлена металлургическими процессами, происходящими при плавлении и кристаллизации металла. Пористость второго рода, или пустоты, обусловлена несплавлением материала. Пустоты могут возникать из-за недостаточно плотного распределения порошка в слое перед процессом плавления. Некоторые из этих пустот и пор образуются между каждой гранулой порошка, что создает закрытые поры, а некоторые соединяются, что создает открытую пористость. Расстояние между ваннами расплава также является одним из факторов, способствующих образованию пористости, называемой «межпроходной пористостью».

3 Микротрещины. Во время лазерного плавления из-за больших температурных градиентов и высоких скоростей охлаждения возникают остаточные термические внутренние напряжения, которые могут привести к образованию трещин. Кроме того, компоненты внутри стальной композиции могут иметь разные термические коэффициенты, что при нагреве может привести к термическому несоответствию, вызывающему напряжение. Эти напряжения могут вызвать микротрещины внутри микроструктуры стали.

Контрольные вопросы

- 1 Перечислите факторы, оказывающие влияние на качество трехмерных изделий, получаемых из порошковых материалов.
- 2 Как влияет окружающая атмосфера на качество синтезируемых изделий?
- 3 Перечислите основные виды дефектов, характерных для трехмерных изделий, получаемых послойным синтезом из порошков.
- 4 В чем особенность структуры материалов, полученных послойным синтезом?
- 5 Укажите причины появления нерасплавленных частиц и пустот в теле изделия.

Ход работы

- 1 Получить у преподавателя образцы, изготовленные способом селективного лазерного сплавления.
- 2 Дать описание основным факторам, влияющим на структуру и свойства трехмерных изделий, указать основные виды дефектов и причины их образования.
- 3 Зарисовать структуру образцов с дефектами.

Содержание отчета

- 1 Цель работы.
- 2 Основные теоретические положения.
- 3 Результаты изучения структуры образцов.

6 Лабораторная работа № 6. Структура керамических материалов, полученных методами аддитивных технологий

Цель работы: ознакомиться с технологическими особенностями получения методами аддитивных технологий керамических изделий, а также их структурой и областью применения.

Оборудование и материалы: образцы, полученные спеканием частиц керамических материалов, микроскоп металлографический.

Теоретические сведения

Керамические материалы находят применение в термохимически сложных средах. Они имеют уникальные электрические, оптические и магнитные свойства.

Используя аддитивные технологии для формирования сложных керамических деталей можно сократить процент брака, повысить гибкость производства и обеспечить быстрое изготовление высокоточных керамических деталей.

В соответствии со стандартом ISO/ASTM существуют две основные категории процессов аддитивного производства с точки зрения формообразования:

1) одностадийные, в которых детали изготавливаются за одну операцию, а базовая геометрическая форма и основные свойства изделия достигаются одновременно;

2) многоступенчатые процессы («косвенные» процессы), в которых детали изготавливаются в две или более операций, где первая обычно обеспечивает базовую геометрическую форму, а последующая – заданные свойства материала.

Большинство процессов АП для формования керамики представляют собой многоступенчатые (косвенные) процессы, в которых используется связующий материал для формования частиц керамического порошка. Это связующее, как правило, удаляется при последующей термической обработке. Единственными одностадийными процессами являются прямая передача энергии в место построения и плавление в порошковом слое. Последний процесс включает в себя селективное лазерное плавление (СЛМ) и селективное лазерное спекание (СЛС).

Процесс струйной печати, относящийся к многоступенчатым технологиям, заключается в избирательной подаче жидкого связующего агента для соединения слоев порошковых материалов (binder jetting). Он реализован на трехмерных принтерах, состоящих из печатающей головки и устройства для нанесения порошка. Устройство может формировать керамические компоненты, сначала нанося слой керамического порошка, а затем связующий материал, чтобы избирательно связывать керамический порошок.

Наиболее распространенные в промышленном применении технологии 3D-печати на основе суспензионной керамики обычно включают в себя жидкие или полужидкие системы, состоящие из связующего и мелких керамических частиц. Изделие может быть напечатано на 3D-принтере путем фотополимеризации, струйной печати или экструзии.

К основным материалам на основе керамики для 3D-печать можно отнести следующие.

Оксид алюминия или глинозем. Этим материалом печатается большинство конечных изделий, для которых требуются высокие прочностные механические характеристики, хорошая детализация, химическая устойчивость. Он обладает хорошей теплопроводностью, твердостью, стойкостью к коррозии и огнеупорности, отличный диэлектрик. Применяется в катализе, водоочистке, электронике. Максимальная плотность – 99,9 %, шероховатость $Ra = 0,3$ мм.

Оксид циркония. Основное применение – эстетические изделия, например ювелирные украшения. Очень прочный. Является биологически совместимым с живыми тканями и обладает высокой химической стойкостью. Диоксид циркония применяется в изготовлении зубного пломбирочного материала, покрытий, создающих тепловые барьеры, ювелирных украшений. Можно изготавливать изделия с высоким разрешением, полировать.

Материалы на основе *кремнезема* для литья по выплавляемым моделям. Материалы на основе кремнезема с различными добавками являются превосходными керамическими решениями для производства литейных стержней в литейном производстве по выплавляемым моделям благодаря их высокой температурной стабильности, термостойкости и выщелачиваемости.

Преимущества керамических материалов: высокая механическая прочность,

твердость и износостойкость получаемых деталей; малая плотность, легкость изделий; высокие рабочие температуры (до 3500 °С), керамика – отличный теплоизолятор, поэтому изделия не деформируются при большом диапазоне температур; химическая стойкость – изделия способны работать в агрессивных средах, защищены от любых форм коррозии; превосходные диэлектрические свойства позволяют широко использовать этот материал в электронике и компьютерной технике; ударная вязкость – отдельные виды керамики используются для механических деталей, способных выдерживать большие нагрузки в механических агрегатах, таких как подшипники; радиационная устойчивость позволяет использовать ее в атомной промышленности; биосовместимость – напечатанные изделия можно использовать для замены костных структур в теле человека.

Сферы применения: аэрокосмическая промышленность, литейная промышленность, машиностроение, химическая промышленность, медицина, атомная промышленность и др.

Как уже отмечалось выше, в основном используют двухстадийный процесс изготовления трехмерных изделий. На первой стадии путем экструзии или послойного нанесения порошка и связующего формируется основа изделия, а затем проводится термическая обработка. Последняя способствует выгоранию лишнего связующего и спеканию керамической основы материала. Поскольку температура спекания, как правило, заметно ниже температуры плавления материала основы, синтезируемые изделия всегда отличаются повышенной пористостью по сравнению, к примеру, с изделиями, полученными селективным лазерным сплавлением.

Применение послойного синтеза керамических изделий с использованием суспензии позволяет изготавливать детали с размером не более нескольких миллиметров (рисунок 6.1).

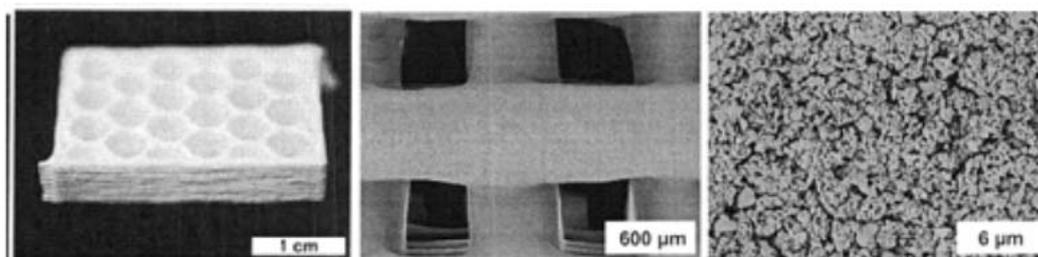


Рисунок 6.1 – Изображения спеченных слоистых конструкций, полученных с использованием капиллярных суспензий из керамических частиц. Температура спекания – 1300 °С, время – 2 ч

Контрольные вопросы

- 1 Перечислите способы получения трехмерных изделий из керамических материалов.
- 2 Дайте характеристику основному способу, применяемому для получения трехмерных изделий из керамических материалов.
- 3 Опишите сущность косвенного способа получения керамических изделий.

4 Укажите материалы, получившие широкое распространение для изготовления керамических изделий трехмерными технологиями.

5 Перечислите преимущества керамических материалов и область их применения.

Ход работы

1 Получить у преподавателя образцы керамических изделий, полученных путем спекания порошкообразных материалов.

2 С помощью металлографического микроскопа изучить микроструктуру образцов.

3 Выявленные особенности строения материалов отметить в отчете.

Содержание отчета

1 Цель работы.

2 Краткое описание технологических особенностей получения изделий из керамических материалов способами аддитивного производства.

3 Описание структуры исследуемых образцов.

7 Лабораторная работа № 7. Механические способы обработки изделий, полученных методами аддитивных технологий

Цель работы: изучить способы постобработки изделий, получаемых методами аддитивного производства.

Оборудование и материалы: образцы, полученные послойным синтезом, камера абразивоструйная, перчатки резиновые, дробь чугунная колотая.

Теоретические сведения

Операции *постобработки* используют для повышения качества и преодоления ограничений, характерных аддитивному производству. Основными видами обработки являются: удаление поддерживающего материала; улучшение текстуры материала; повышение точности; улучшение эстетического восприятия.

1 Удаление поддерживающего материала. Материал поддержки (*support material*) – вспомогательный материал – используется в аддитивном производстве для построения сложных объектов и увеличения качества и стабильности построения. Поддержки используют для печати нависающих конструкций, изделий со сложной детализацией, тонкими стенками и т. д. (рисунок 7.1).

Поддержки удаляют механическими способами. Для этого используют различный инструмент, включая ножи, ножницы, кусачки, абразивные станки (отрезные, электроэрозионные). На данном этапе производства доводка проводится с помощью абразивных кругов, дисков, брусков и т. д.

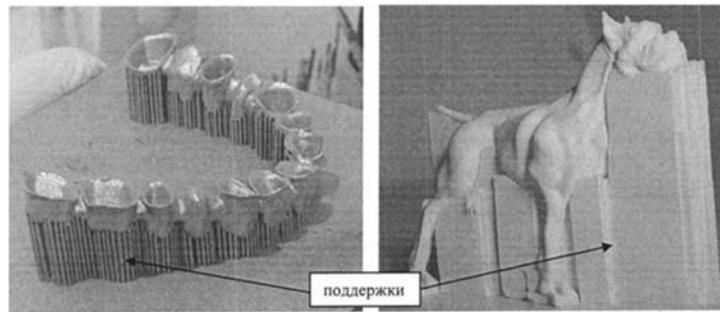
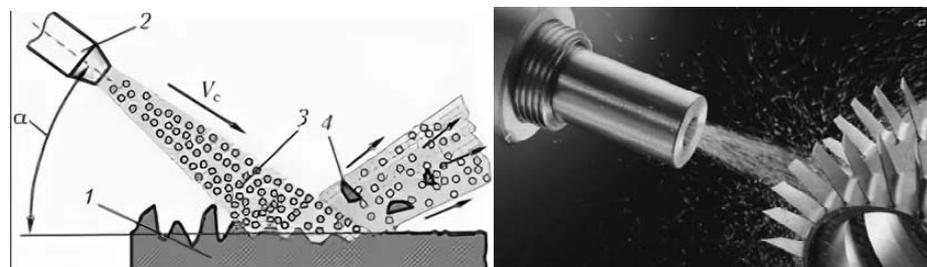


Рисунок 7.1 – Напечатанные изделия с поддержками

2 Улучшение текстуры материала. Нежелательными особенностями текстуры поверхности деталей, полученных в процессе аддитивного производства, являются ступенчатость, адгезия порошка, узоры, отпечатки после удаления поддерживающего материала и др. Тип постобработки, используемой для улучшения текстуры поверхности, зависит от требуемой степени шероховатости поверхности. Наиболее часто используемыми автоматическими методами улучшения текстуры поверхности является галтовка внешних элементов и механическая обработка струей абразивного материала, в основном для внутренних элементов.

Дробеструйная (пескоструйная) обработка заключается в использовании сильного воздушного потока, который увлекает за собой металлическую, керамическую или изготовленную из полимера дробь. Ударяясь с большой силой о поверхность, дробь оказывает на нее абразивное и деформирующее воздействие. (рисунок 7.2).



V_c – скорость струи; 1 – поверхность; 2 – форсунка; 3 – струя абразивного материала; 4 – микрочастицы удаляемого материала

Рисунок 7.2 – Струйная гидроабразивная обработка, представляющая собой процесс ударного воздействия на обрабатываемую поверхность высокоскоростной гидроабразивной

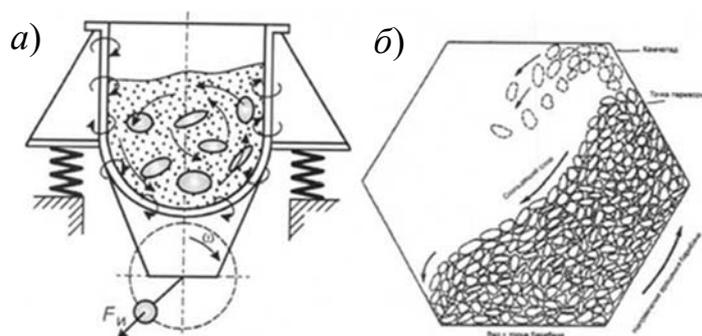
Такой вид обработки зачастую используют для снижения шероховатости поверхности, образующейся в процессе послойного синтеза, в том числе для удаления частиц металла, не прошедших полного расплавления. Также его применяют для создания шероховатых или матовых поверхностей заданных параметров на деталях. Степень шероховатости зависит от материала, из которого изготовлена дробь и силы потока воздуха.

В качестве абразива используют чугунную колотую, стальную дробь, алюминиевую и керамическую дробь, оксид кремния, материалы на основе пластиков.

Галтовка. Это вид финишной обработки, при котором абразивный материал (галтовочные тела) загружается в емкость оборудования вместе с обрабатываемой заготовкой. В процессе активного перемешивания обрабатываемых деталей с галтовочными телами происходит их взаимодействие, в результате которого качество поверхности обрабатываемых деталей улучшается. Процесс позволяет устранить различные загрязнения, посторонние частицы, сгладить неровности, получить глянцевую поверхность.

Галтовочные тела имеют различную форму, структуру и изготавливают из различного материала. Форма галтовочных тел напрямую зависит от геометрических параметров обрабатываемой детали. Абразив должен обрабатывать все контуры заготовки и достигать даже малейших впадин и отверстий.

На сегодняшний день выделяют роторный и вибрационный типы устройств для галтовки (рисунок 7.3).



а – аппарат вибрационного действия; б – аппарат барабанного типа

Рисунок 7.3 – Схемы галтовочных устройств

Суть роторной галтовки заключается во взаимодействии обрабатываемого металла и абразива внутри вращающегося барабана.

Наиболее распространенным является вибрационный метод. Вибрация абразива происходит благодаря вибрационному приводу, на который установлена рабочая емкость. Обработка поверхностей происходит быстрее и качественнее. Этот метод позволяет обрабатывать заготовки любых размеров и формы.

Повышение точности. Для доводки большинства деталей, полученных в процессе аддитивного производства, применяют плоское и круглое шлифование, обработку резанием, фрезерование, сверление. Для этого используют высокоточные станки с числовым программным управлением (ЧПУ).

3 Улучшение свойств материала пластической деформацией в горячем состоянии. Наличие пор, внутренних микротрещин и подобных дефектов материала существенно влияет на механические свойства детали при циклических нагрузках. В изделиях, полученных методом селективного лазерного плавления, их количество можно уменьшить, применяя *горячее изостатическое прессование (ГИИП)*, которое позволяет получать образцы с относительной плотностью практически 100 %. Оно представляет собой технологический процесс, при котором изделие подвергается воздействию инертного газа под большим давлением при вы-

сокой температуре. ГИП позволяет достигать окончательной или почти окончательной формы при изготовлении сложных деталей из металлов. Равенство давления по всем направлениям приводит к изотропности свойств.

Применение ГИП увеличивает усталостную прочность изделий, изготовленных методом селективного лазерного плавления, и приближает ее значение к таковой у деталей, полученных традиционными методами.

Достоинствами технологии является возможность получения равномерной плотности и текстуры, практически 100-процентное уплотнение материалов, возможность обработки изделий сложной формы с внутренними полостями, гибкость технологии, возможность быстрого перехода на новый вид изделия.

Контрольные вопросы

- 1 Для чего используют поддержки в аддитивных технологиях и какими способами их удаляют?
- 2 С какой целью выполняют дробеструйную обработку изделий?
- 3 Перечислите материалы, применяемые для дробеструйной обработки.
- 4 Для чего используется галтовка?
- 5 В чем заключается процесс галтовки?

Ход работы

- 1 Получить у преподавателя образцы для абразивной обработки.
- 2 Одеть защитные перчатки.
- 3 Включить подачу абразива в пистолет и провести обработку его поверхности, удерживая сопло пистолета под углом около 45° к обрабатываемой поверхности.
- 4 Выключить подачу абразива.
- 5 Визуально оценить изменения поверхности образца после обработки.
- 6 Наблюдения занести в отчет.

Содержание отчета

- 1 Цель работы.
- 2 Описание основных способов постобработки, применяемых для изделий, полученных послойным синтезом.
- 3 Описание поверхности образцов до и после абразивной обработки.

8 Лабораторная работа № 8. Формирование 3D-моделей методом напыления

Цель работы: изучить технологические особенности изготовления трехмерных изделий путем многослойного напыления частиц жидкого металла.

Оборудование и материалы: экспериментальная установка плазменного напыления.

Общие сведения

Как и в других отраслях промышленности, в области аддитивных технологий существует ряд новых способов получения изделий, находящихся на стыке традиционных способов производства. Одним из таких способов является *Spray forming*, объединяющий процессы литья (плавка металла), распыления металла (порошковая металлургия) и газотермического напыления.

Сущность процесса получения заготовки заключается в напылении металла на подложку послойно. Металл расплавляют в индукционной печи и на выходе из тигля распыляют на мелкие капли струей инертного газа. Капли металла размером 10...100 мкм осаждаются на подложку, формируя заготовку детали для дальнейшей обработки (рисунок 8.1). В отличие от заготовки, изготовленной литьём, изделие «выращенное» методом *Spray forming* обладает более однородной микроструктурой.

На схеме (см. рисунок 8.1, *a*) снизу вверх: тигель с расплавом, приемная воронка, распылительное устройство, капли металла, формируемое изделие и поверхность, на которой образуется изделие.

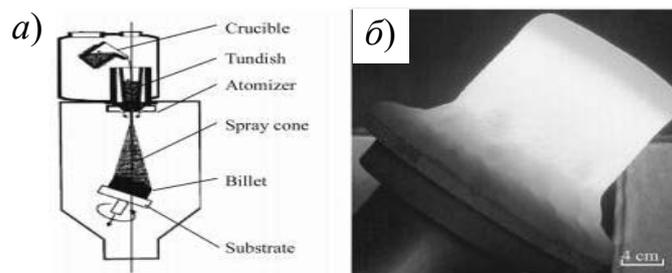
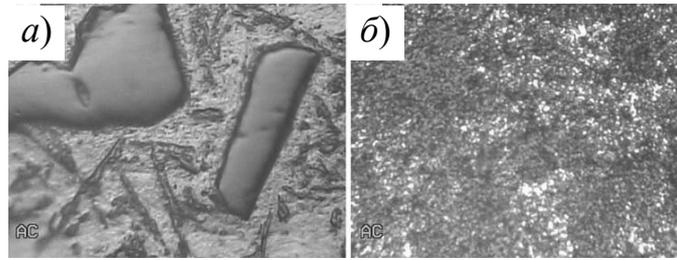


Рисунок 8.1 – Схема технологии *spray forming* (*a*) и изделие, полученное данной технологией (*b*)

Основными достоинствами данного метода является отсутствие ликваций компонентов сплава по массиву заготовки, однородность микроструктуры и малый размер зерна (рисунок 8.2), возможность формирования новых материалов с уникальными свойствами, а также создание всевозможных покрытий, возможность получения композиций из биметаллов.

Технология *Spray forming* перспективна для создания так называемых градиентных материалов (с переменными по сечению физико-химическими свойствами), которые могут быть получены методом послойного нанесения различных материалов через два (или более) распылительных сопла.



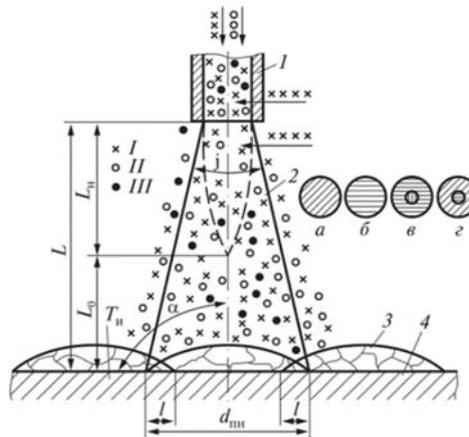
a – отливка; *б* – Spray forming, x400

Рисунок 8.2 – Микроструктура сплава Al – 15 % Si

К недостаткам можно отнести достаточно большие потери металла (до 30 %) при распылении и осаждении металла на подложку и довольно высокую сложность управления процессом, требующую более высокой квалификации персонала.

Особенностью Spray forming является наличие микропор в структуре материала, появление которых связывают с «захватом» молекул газа при распылении и осаждении частичек металла. Пористость металла устраняют горячим изостатическим прессованием, прокаткой или ковкой.

По данной технологии на первом этапе создается САД-модель, по которой «выращивается» стереолитографическая мастер-модель, используемая для изготовления силиконовой или RIM-формы. В форму заливают жидкую керамику и получают керамическую модель-реплику (на рисунке 8.3 – «Ceramic Pattern»). Керамическую модель устанавливают в Spray forming машину и послойно напыляют на её поверхность расплавленный металл. Таким способом получают «слепок» с керамической реплики.



1 – сопловая часть генератора частиц; *2* – двухфазный поток; *3* – покрытие; *4* – элемент поверхности напыления; *I* – конденсированные напыляемые частицы; *II* – атомы, молекулы распыляющего газа; *III* – паровая фаза; α – угол расхождения потока; *a* – угол встречи потока с поверхностью напыления; d_m – диаметр пятна напыления; T_{II} – температура напыляемого изделия; *l* – перекрытие проходов; L – дистанция напыления

Рисунок 8.3 – Схема процесса газодинамического напыления покрытий

Данный метод разработан для изготовления ответственных деталей из специальных сплавов с повышенными требованиями.

Формирование изделий методами газотермического напыления.

Близкими по принципу к рассмотренной выше технологии формирования изделий являются газотермические способы напыления. Они объединяют способы нанесения покрытий, при которых слой на поверхности подложки (изделия или модели) образуется из частиц, нагретых до расплавленного или пластифицированного состояния и ударяющихся о нее с большой скоростью, после чего мгновенно кристаллизующихся и остывающих (см. рисунок 8.3). В результате этого процесса образуется слой, состоящий из плотно уложенных друг на друга деформированных частиц, связанных между собой на атомарном уровне (рисунок 8.4).

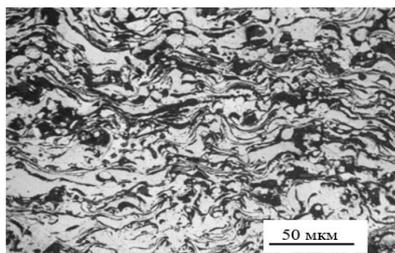


Рисунок 8.4 – Классическая структура газотермического покрытия

Основными параметрами технологического процесса нанесения газотермических покрытий являются скорость газового потока, его температура и мощность, определяющие производительность напыления, а также качество получаемого слоя.

Наиболее распространены такие методы нанесения газотермических покрытий, как газопламенное, плазменное, детонационное напыления, а также дуговая металлизация.

При **газопламенном напылении** источником тепла является высокотемпературное пламя, образующееся в результате сгорания топлива, находящегося в газообразном состоянии. Температура струи при этом достигает 3000 °С. Различают газопламенное напыление порошка и проволоки.

Достоинства способа: относительно низкая цена оборудования и его простота; возможность напыления внутренних поверхностей с диаметром менее 200 мм; низкий уровень шума; небольшая эмиссия канцерогенных веществ.

Недостатки способа: малая кинетическая энергия частиц; невозможность эффективного напыления мелких порошков.

Детонационное напыление – это процесс, при котором порошок ускоряется и нагревается энергией взрыва газоздушнoй или газокислородной смеси. В качестве горючего могут использоваться ацетилен, метан или пропан-бутан. Частота циклов зависит от конструкции установки и может достигать 8...10 Гц.

Из-за дискретности нанесения порошка, сложности и ненадежности конструкции, а также высокой шумности способ так и не получил широкого распространения. До сих пор существуют только лабораторные и полупромышленные устройства.

Электродуговое напыление проволокой – процесс расплавления двух проволок посредством горения электрической дуги между ними, диспергирования

расплава и перенос частиц сжатым воздухом. Это один из наиболее энергетически эффективных методов формирования металлических покрытий. Эффективный КПД распылителя имеет наиболее высокое значение из всех газотермических способов нанесения покрытий – 70 %...90 %. Производительность устройств электродугового напыления – до 100 кг/ч.

Плазменное напыление основано на разогреве и ускорении частиц наносимого материала с помощью высокотемпературного плазменного потока, представляющего собой сжатую струю высокоионизированного газа, образующуюся в результате разложения рабочих газообразных соединений под действием электрической дуги.

Формирование струи происходит в специальных установках, получивших название плазмотронов. Температура потока низкотемпературной плазмы, применяющейся в установках плазменного напыления, составляет 20000 °С...30000 °С. Способ позволяет получать качественные слои практически из любых металлов и химических соединений. К недостатку данной технологии можно отнести относительно высокую сложность оборудования.

Контрольные вопросы

- 1 В чем заключается процесс получения изделий способом распыления расплава?
- 2 Укажите преимущества использования технологии распыления расплава.
- 3 Какие изделия получают способом распыления расплава.
- 4 В чем заключается процесс формирования слоев методами газотермического напыления?
- 5 Перечислите основные способы нанесения газотермических покрытий.

Ход работы

- 1 Ознакомиться с устройством и принципом работы установки плазменного напыления.
- 2 Ознакомиться с областью применения и технологическими возможностями газотермического напыления.

Содержание отчета

- 1 Цель работы.
- 2 Описание процесса получения изделий распылением расплава и газотермическими способами напыления.
- 3 Краткое описание устройства установки плазменного напыления.

9 Лабораторная работа № 9. Структура и свойства материалов, получаемых методами газотермического напыления

Цель работы: изучить особенности строения и свойства покрытий, получаемых способами газотермического напыления.

Оборудование и материалы: микрошлифы плазменных покрытий, металлографический микроскоп.

Общая характеристика

Газотермическое напыление заключается в расплавлении частиц напыляемого материала с помощью мощного высокотемпературного потока. Частицы порошка подаются в высокотемпературный поток, где плавятся, ускоряются и осаждаются на подложку (образец). Соударение с твердой подложкой расплавленной частицы сопровождается сильной деформацией последней. Процессы удара и деформации происходят одновременно с затвердеванием частицы. Даже при максимальной производительности напыления покрытие формируется из отдельных затвердевших частиц и имеет характерную чешуйчатую структуру (рисунок 9.1).

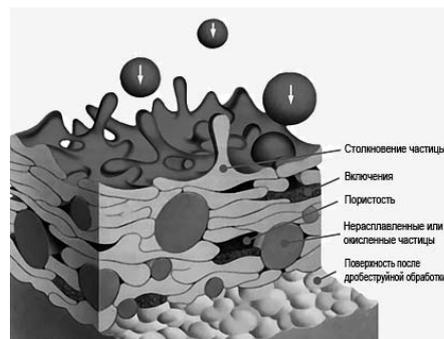


Рисунок 9.1 – Схема формирования газотермического покрытия

Формирование газотермических покрытий происходит многостадийно. Первая стадия формирования напыляемого материала представляет собой сближение частицы и подложки до расстояния межатомного взаимодействия. На второй стадии образуется химическая связь между атомами в результате обмена электронами. На третьей стадии происходит объемное взаимодействие, которое лимитируется временем поддержания в зоне контакта высоких температур. Химические и тепловые процессы, происходящие на всех трех стадиях взаимодействия частицы с подложкой или напыленным слоем, определяют уровень сцепления материала покрытия с основой.

Структура многослойного покрытия значительно сложнее структуры компактного материала. При формировании покрытия имеют место два типа взаимодействия: адгезионное – между напыляемым материалом и поверхностью подложки и когезионное – между напыляемыми частицами.

Напыляемый материал, если он имеет кристаллическое строение, состоит из

структурных элементов – зерно, частица, слой. С помощью оптического микроскопа можно наблюдать два типа границ – между слоями покрытия и между покрытием и основой.

Из-за высоких скоростей кристаллизации в газотермических покрытиях можно получить области с аморфной структурой.

Особенностью газотермических покрытий является то, что расплавленные частицы напыляемого материала активно взаимодействуют с кислородом воздуха и их поверхность окисляется. Образующаяся окисная пленка разделяет их и препятствует образованию прочных металлических связей частиц с основой и между собой. В случае содержания значительного количества оксидных включений покрытие может иметь неоднородную, пористую структуру. Обычно пористость металлических покрытий не превышает 10 %. Пористость керамических покрытий из Al_2O_3 и ZrO_2 составляет 10 %...15 %. Покрытия из самофлюсующихся сплавов на основе никеля могут иметь пористость менее 2 %.

Металлическое покрытие получается достаточно хрупким, с низким пределом прочности на растяжение и низкой усталостной прочностью напыленного материала (сопротивление на разрыв для сталей в среднем составляет 10...12 МПа). Поэтому покрытие не увеличивает прочность детали.

Покрытие характеризуется относительно слабой **прочностью сцепления** с основным металлом и частиц между собой, так как без применения специального дополнительного воздействия она определяется молекулярными силами взаимодействия контактирующих между собой участков и чисто механическим сцеплением напыляемых частиц с неровностями поверхности детали. Только в некоторых локальных точках отдельные частицы могут свариваться с металлом детали. Поэтому, например, прочность сцепления покрытия (МПа) при электрометаллизации составляет 10...25, при газопламенной – 12...28, при плазменной до 40. В связи с этим металлизация не применяется для восстановления деталей, работающих при высоком напряжении на сдвиг (зубья шестерен, кулачки и др.), подвергающихся ударным нагрузкам, а также небольших по площади поверхностей, воспринимающих значительные нагрузки (резьба, канавки и т. д.).

К специальным методам повышения сцепления покрытия с основой относятся: предварительный подогрев детали до температуры 200 °С...300 °С, нанесение промежуточного слоя (подслоя) из легкоплавких или трудноплавких материалов (сплавы никель – алюминий, никель – титан, молибден), оплавление покрытия.

Напыленные покрытия хорошо работают на сжатие. Например, временное сопротивление сжатию стального покрытия составляет 800...1200 МПа, что выше, чем у чугуна.

Твердость металлизированного слоя обычно выше твердости исходного металла из-за закалки наносимого материала в процессе металлизации, наклепа переносимых частиц металла при ударе о поверхность и наличия в сформированном слое окисных пленок.

Однако его **износостойкость** не связана с твердостью и при сухом трении может быть в 2–3 раза меньше, чем у металла детали, поэтому металлизированные покрытия нельзя применять в сопряжениях, работающих без смазки или с перио-

дически подаваемой смазкой. В то же время при наличии смазки металлизированные покрытия обеспечивают более низкий коэффициент трения в сопряжениях и большую износостойкость деталей. Это связано с тем, что благодаря пористости металлизированный слой впитывает масло до 9 % своего объема. Таким образом, наблюдается эффект самосмазывания покрытия. При недостаточной подаче смазки или при ее временном прекращении заедание наступает значительно позже по сравнению с неметаллизированной поверхностью. Значительной износостойкостью обладают плазменные покрытия из тугоплавких материалов, что обусловлено их физико-механическими свойствами.

В условиях абразивного износа высокую стойкость имеют покрытия из самофлюсующихся сплавов на основе никеля и оксидной керамики.

Применение функциональных газотермических покрытий в различных отраслях. Методами газотермического напыления можно наносить разные виды покрытий с различными свойствами. Это покрытия, отличающиеся высокой коррозионной стойкостью, твердостью, износостойкостью, жаростойкостью и жаропрочностью. Используют материалы на основе металлов и сплавов, керамические, а также композиционные металлокерамические материалы. Особой износостойкостью отличаются газотермические покрытия с содержанием твердых фаз карбидов вольфрама, титана и др. Их используют, к примеру, для узлов тяжело нагруженных деталей агрегатов, особенно в случаях, когда необходима высокая стойкость против схватывания.

Термобарьерные покрытия представляют собой композиционные керамические или металлокерамические покрытия с керамическим слоем (или слоями). Они обладают низкой теплопроводностью. Их наносят на различные детали тепловых машин: клапаны, поршни, головки цилиндра дизельных двигателей, рабочие и сопловые лопатки и детали камеры сгорания газовых турбин и др. Схема работы такого покрытия представлена на рисунке 9.2.

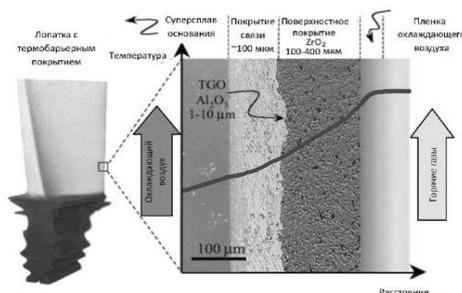


Рисунок 9.2 – Общий вид изделия, а также микроструктура функциональных термобарьерных покрытий и схема их действия

Использование термобарьерных покрытий для защиты лопаток газовой турбины позволяет повысить температуру рабочего газа на выходе в турбину при сохранении неизменной температуры сплава, из которого изготовлена лопатка, уменьшить расход газа, используемого для охлаждения, снизить температуру стенки лопатки при неизменной температуре рабочего газа, использовать более загрязненное топливо, т. к. термобарьерные покрытия обеспечивают защиту от коррозии за счет нанесения коррозионного металлического подслоя.

Контрольные вопросы

- 1 Опишите процесс формирования газотермического покрытия.
- 2 Опишите особенности структуры газотермических покрытий.
- 3 Дайте сравнительный анализ газотермических покрытий и классических материалов.
- 4 Где используются газотермические покрытия?
- 5 Укажите преимущества и недостатки газотермического напыления.

Ход работы

- 1 Получить у преподавателя образцы газотермических покрытий.
- 2 Изучить микроструктуру газотермических покрытий под микроскопом.
- 3 Зарисовать структуру образцов.

Содержание отчета

- 1 Цель работы.
- 2 Основные теоретические положения формирования структуры и свойств покрытий, получаемых газотермическим напылением.
- 3 Описание структуры газотермических покрытий.

10 Лабораторная работа № 10. Особенности структуры слоев, полученных наплавкой разнородных материалов

Цель работы: ознакомиться с особенностями структуры металлических образцов, полученных послойным нанесением материалов, различных по химическому составу.

Оборудование и материалы: образцы, полученные многослойной наплавкой разнородных материалов, микроскоп металлографический, реактивы для травления микрошлифов.

Общие сведения

Композиционные материалы являются наиболее передовым видом материалов. Они состоят из двух или более компонентов со значительно отличающимися физическими и химическими свойствами. Это позволяет получать различные комбинации свойств, обеспечивая, к примеру, твердую, износостойкую поверхность и мягкую сердцевину. Материалы этой группы отличаются высоким отношением прочности к жесткости, большой устойчивостью к усталости, износу и коррозии, высокой надежностью и т. д., что отражает преимущества композитов перед чистыми металлами и сплавами. Существенным недостатком композиционных материалов является резкое изменение свойств на границе раздела отдельных слоев, что

может привести к выходу из строя (расслоению) в процессе эксплуатации.

Одним из путей устранения этого недостатка является создание модифицированной формы композитов, называемых функционально-градиентными материалами (ФГМ). Эти материалы позволяют сгладить резкий переход по свойствам от одного слоя к другому, обеспечивая плавное изменение химического состава, что в итоге увеличивает эксплуатационные характеристики изделий.

В этом случае механические свойства, такие как модуль упругости Юнга, коэффициент Пуассона, модуль сдвига, пластичность, плотность материала и коэффициент теплового расширения, плавно и непрерывно изменяются в требуемом направлении.

Использование функционально-градиентных материалов было впервые предложено японскими исследователями. Они разработали функционально градиентный тепловой барьер с наружной рабочей температурой 2000 °С и внутренней температурой 1000 °С при толщине слоя 10 мм. С того времени использование функционально-градиентных материалов было значительно расширено в различных областях, включая аэрокосмическую, горнодобывающую, энергетическую и медицину. Градиентные материалы имеют множество преимуществ, включая высокую трещиностойкость, снижение продольных и поперечных напряжений по толщине, улучшение эффективности тепловых барьеров и т. д.

Способы изготовления градиентных материалов.

1 Метод осаждения из паровой фазы.

Методы осаждения из паровой фазы базируются на вакуумных технологиях получения тонких пленок на основном материале. Все эти методы можно использовать только для изготовления тонких градиентных материалов. Основными типами осаждения из паровой фазы являются физическое осаждение из паровой фазы (PVD) и химическое осаждение из паровой фазы (CVD). Все методы данной группы не экономичны, технологически сложны, низкопроизводительны и неэффективны для получения трехмерных изделий.

2 Порошковая металлургия.

Метод порошковой металлургии может быть использован для производства ФГМ объемного типа с прерывистой (ступенчатой) структурой. Процесс осуществляется с использованием этапов, включая взвешивание и смешивание порошков согласно с предварительно разработанным пространственным распределением в соответствии с функциональными требованиями, засыпкой предварительно смешанных порошков и, наконец, спекание.

3 Методы аддитивного производства.

Большинство используемых в настоящее время аддитивных технологий способны производить функционально-градиентные материалы от толстых покрытий до сложных объемных деталей.

Преимуществами методов АТ являются более высокий коэффициент использования материала, скорость производства, свободный дизайн изделия, возможность изготовления сложных деталей и меньшая энергоемкость.

Селективное лазерное сплавление и электронно-лучевая наплавка – наиболее распространенные методы изготовления сложных деталей с градиентными свой-

ствами, что связано с их высокой точностью и чистотой поверхности по сравнению с технологиями, основанными на непосредственной подаче материала в зону плавления.

Однако первые менее гибки, чем вторые, при производстве градиентных материалов. Методы АТ, основанные на направленном депонировании энергии, являются наиболее удобными методами для получения градиентных материалов, поскольку они позволяют получать материалы от толстых покрытий до объемных деталей, имеющих непрерывный или прерывистый градиент.

Лазерное наплавление металла.

В этом процессе лазерный луч высокой мощности используется для создания ванны расплава на основном материале, в которую подается порошок. Порошок, доставленный в пятно лазерного луча, погружается в ванну расплава, увеличивая ее объем. Металлический порошок подается с помощью специального сопла с каналами и распределяется по окружности наплавочной головки под действием силы тяжести или с помощью инертного газа-носителя.

Весь процесс проводится в контролируемой атмосфере аргона.

Предварительно легированные порошки могут использоваться для производства градиентных материалов прерывистого типа. В то же время несколько элементарных порошков могут быть доставлены в требуемом количестве в область плавления с использованием отдельных питателей, что позволяет получать различные сплавы и композиционные материалы с непрерывно меняющимся составом и свойствами.

Данная технология может использоваться для получения различных типов функционально-дифференцированных материалов с помощью нескольких сопел. Два или более потока разных металлических сплавов можно независимо контролировать и одновременно подавать в единую ванну расплава для образования материала заданного состава. Как двумерные, так и объемные ФГМ могут формироваться непрерывно или прерывисто.

Функционально-градиентные материалы по технологии дуговой наплавки.

Широкий спектр аддитивного производства на базе дуговых способов сварки и наплавки, в которых дуга (плазменная, электрическая) используется в качестве источника энергии, а материалы применяются в виде порошка или проволоки. Чаще используют сварку в среде защитного газа (TIG) или (MIG) с материалом в виде проволоки.

Дуговые способы наплавки обеспечивают возможность изготовления оборудования для АТ разнообразной конфигурации путем интеграции обычных сварочных систем с роботами, манипуляторами или портальными устройствами для автоматизации. Все эти устройства обладают большим потенциалом для изготовления деталей среднего и большого размера с минимальным объемом постобработки при гораздо более низкой стоимости по сравнению с лазерным и электронно-лучевым способами.

Функционально-градиентные материалы отличаются многочисленными преимуществами перед композитными материалами. Из-за изменяющегося состава свойства непрерывно изменяются от одного слоя к другому, таким образом устраняя проблемы на границе раздела, такие как концентрация напряжений и плохая

адгезия.

ФГМ в основном используются в тех случаях, когда требуется комбинация двух противоположных свойств для отдельных компонентов, например, твердость и вязкость.

Распространение ФГМ получили в аэрокосмической, оборонной, ядерной, электронной отраслях, биомедицине. Металлокерамика ФГМ используется при изготовлении брони, где передняя поверхность из твердой керамики приостанавливает снаряд, а металлическая задняя поверхность улавливает осколки и препятствует их проникновению. Похожие ФГМ также находят применение в качестве термостойких клапанов двигателей внутреннего сгорания.

Популярны функционально дифференцированные термобарьерные покрытия (ФТВС) с использованием различных методов напыления.

Еще одна развивающаяся область применения ФГМ – это биомедицинский сектор, где создают искусственные суставы с переменным составом, что позволяет увеличить его функциональность, обеспечивая высокую прочность металлической основы и хорошую приживаемость к живым тканям благодаря керамическому верхнему слою.

Также ФГМ используют в пьезоэлектрических приводах, функционально ступенчатых системах тепловой защиты гиперзвуковых и сверхзвуковых самолетов.

Контрольные вопросы

- 1 Что такое ФГМ?
- 2 В чем особенность градиентных материалов?
- 3 Какими преимуществами обладают градиентные материалы?
- 4 Перечислите способы получения градиентных материалов.
- 5 В каких отраслях промышленности функционально-градиентные материалы считаются наиболее перспективными?

Ход работы

- 1 Получить у преподавателя образцы, изготовленные послойным синтезом разнородных материалов.
- 2 Изучить микроструктуру образцов.
- 3 Зарисовать структуру образцов.

Содержание отчета

- 1 Цель работы.
- 2 Общие сведения о градиентных материалах и области их использования.
- 3 Вывод об особенностях структуры градиентных материалов.

11 Лабораторная работа № 11. Структура изделий, полученных послойной наплавкой материала в виде проволоки

Цель работы: ознакомиться с особенностями структуры изделий, полученных многослойной дуговой наплавкой проволоки.

Оборудование и материалы: образцы, полученные многослойной дуговой наплавкой, микроскоп металлографический.

Общие сведения

Аддитивное производство с использованием дуговых способов наплавки значительно выигрывает от передового компьютерного управления, позволяющего изготавливать компоненты более высокой точности и сложности, по сравнению с классическим процессом сварки. При этом многие физические процессы в АТ практически идентичны таковым при сварке.

Большинство проволок, используемых для сварки или аддитивной наплавки, имеют диаметр около 1,0 мм или больше, поэтому количество материала, которое может быть осаждено в единицу времени, заметно больше, чем может быть достигнуто с помощью порошков. Стоимость проволоки гораздо ниже.

По мере увеличения скорости осаждения в любом процессе увеличивается неравномерность поверхности, высота слоя при АМ или высота валика при сварке. Для многих сварочных работ это не проблема, т. к. сварные швы могут быть механически обработаны. В то же время в аддитивном производстве характеристики наплавленного слоя имеют важное значение. В случае использования дуговых способов наплавки с применением проволоки на периферии шва образуются частицы-спутники (сварочные брызги), которые создают шероховатость такого же масштаба, как у порошков (рисунок 11.1). При этом следует учитывать, что для сложных деталей с внутренними поверхностями финишная обработка либо дорога, либо невозможна.

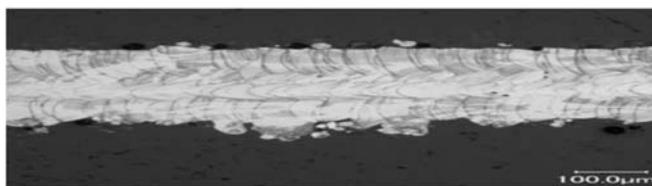


Рисунок 11.1 – Образец из нержавеющей стали 316L, изготовленный лазерной наплавкой, с элементами размером менее миллиметра и частицами порошка, связанными с поверхностью, называемыми сателлитами

Локальный разогрев металла.

При сравнении основ процесса аддитивной наплавки и сварки существует одна общая концепция, которая связывает их вместе – они оба требуют или используют локализованный источник тепла для создания небольшой ванны расплава для осуществления процесса.

Сварочная ванна расплава является основой получения сварного шва или наплавленного слоя. Плавление происходит в передней части сварочной ванны, а затвердевание – на задней стороне сварочной ванны, где также протекает твердофазное охлаждение в зоне плавления и зоне термического влияния вокруг нерасплавленного основного металла. Бассейн расплава достигает температур, превышающих температуру ликвидуса сплава, что приводит к резкому температурному градиенту между ним и окружающим его основным металлом. Аналогичные механизмы имеют место во время металлического аддитивного процесса, за исключением того, что порошок или проволока добавляются в ванну расплава для создания необходимого слоя.

Локальный разогрев материала и связанные с ним температурные градиенты создают ситуацию, при которой происходит пластическая деформация материала, связанная с ограниченным тепловым расширением и пластичностью металла при высоких температурах. Возникающее остаточное напряжение является растягивающим вблизи осевой линии сварного шва и сжимающим в основном металле после охлаждения сварного шва. Напряжения, которые накапливаются вблизи сварного шва приводят к деформациям, вызывающим изгиб конструкции или ее частей, волнообразность, скручивание по оси и т. д.

Следует отметить, что детали АТ всегда начинаются с подложки или рабочей пластины, которая обеспечивает некоторую степень механического сопротивления (сдерживания).

Чем жестче рабочая пластина, тем меньше деформаций будет происходить, однако остаточные напряжения при этом возрастают.

Предпочтительный кристаллографический рост зерен в сварных швах направлен параллельно градиенту температуры. Это создает столбчатую зернистую структуру в пределах шва. Поскольку столбчатые зерна выровнены по градиенту температуры, они растут нормально к поверхности затвердевания ванны расплава и изгибаются к верхнему центру ванны расплава по мере движения, как показано на рисунке 11.2. Внешний вид столбчатых зерен будет значительно различаться в зависимости от геометрии поперечного сечения сварочной ванны. Это справедливо как для процессов сварки, так и для дуговых способов АТ.

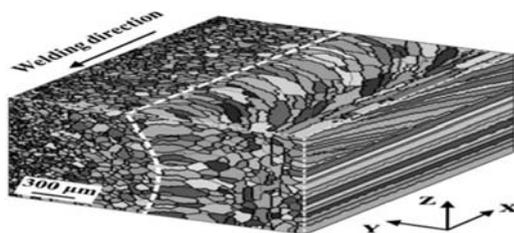


Рисунок 11.2 – Структура металла в наплавленном слое и ЗТВ

Макроскопическая текстура возникает как в многопроходных швах, так и в АТ-деталях, когда зерна, образовавшиеся в одном слое, продолжают расти и новый слой берет продолжение от предыдущего. На рисунке 11.3 показана микроструктура изделия, полученного аддитивной дуговой наплавкой с использованием проволоки титанового сплава Ti-6Al-4V.

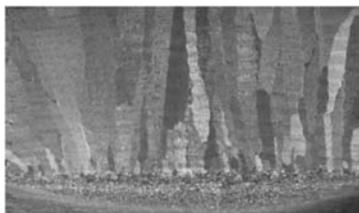


Рисунок 11.3 – Макроскопическая текстура изделия, полученного дуговой наплавкой проволоки из титанового сплава Ti-6Al-4V

Зерна, идущие вертикально, образуются благодаря эпитаксиальному росту из предыдущего слоя с предпочтительным дендритным затвердеванием в направлении, совпадающем с температурным градиентом. В случае вертикальных аддитивных изделий, где поток тепла в основном уходит в нижние прогретые слои изделия, градиент температуры существенно снижается, создавая макроскопические текстуры.

Пригодность для печати как термин, используемый в контексте аддитивной обработки металлов, оценивает способность исходного материала успешно перерабатываться, образуя изделие, отвечающее требованиям к механическим, металлургическим и функциональным характеристикам конкретного случая. Это зависит как от сплава, так и от процесса АТ.

К настоящему времени уже получен большой опыт в области многослойной сварки и наплавки, подробно изучен процесс формирования фазового состава и структуры сварных швов, их механические свойства. В области аддитивных технологий объем исследований гораздо меньше.

Преимущества способов аддитивного производства, использующих в качестве конструкционного материала проволоку:

- высокая скорость изготовления деталей (до 900 см³/ч);
- возможность создания крупных изделий (до 3 м³) (рисунок 11.4);
- длина изготавливаемых деталей может составлять до 1,6 м в компоновке фрезерного станка (предел технологически преодолим);
- коэффициент использованного материала 1,4...2;
- лучшие в отрасли механические свойства конечных изделий: отсутствие пористости и термических трещин, дендритная структура;
- большой выбор (более 100) и низкая стоимость (в 10 раз меньше порошков) металлов и сплавов за счет использования доступной на рынке сварочной проволоки: алюминий, низколегированные и легированные стали, нержавеющие стали, титан и его сплавы, никелевые и медные сплавы и другие;
- использование реактивных и неактивных материалов (включая тугоплавкие) при атмосферном давлении (не требуется вакуумирование камеры);
- открытая платформа для работы с любыми локализованными и стандартизированными материалами;
- сокращение складских запасов, отходов производства, инструмента и оснастки;
- до 60 % сокращение затрат на производство благодаря упрощению общего технологического процесса изготовления;

- изготовление изделий для ответственных применений (ремонтные мастерские, авиация, космос, кораблестроение, энергетика, машиностроение и многие другие);
- менее требовательная технология к производственному помещению, высокая безопасность технологического процесса;
- многоматериальная печать;
- возможность гибридного производства на одном станке (печать + фрезерование).



Рисунок 11.4 – Изделия, полученные послойной наплавкой материала в виде проволоки

Контрольные вопросы

- 1 Что общего между сваркой и дуговыми способами аддитивного производства?
- 2 В чем причина больших внутренних напряжений при дуговых способах формирования изделий?
- 3 К чему приводят значительные внутренние напряжения?
- 4 Чем отличаются зерна металла у изделий, полученных послойной наплавкой, от изделий, полученных классическими металлургическими способами?
- 5 В каких случаях целесообразно использовать дуговые способы наплавки?

Ход работы

- 1 Получить у преподавателя образцы, изготовленные послойной наплавкой материала в виде проволоки.
- 2 Проанализировать микроструктуру и определить наличие дефектов в ней.
- 3 Описать микроструктуру образцов.

Содержание отчета

- 1 Цель работы.
- 2 Общие сведения о применении проволоки в области АТ.
- 3 Описание макро- и микродефектов изученных образцов.

12 Лабораторная работа № 12. Влияние химического состава композиции на структуру и свойства механически легированных порошков

Цель работы: ознакомиться с влиянием химического состава композиции на характеристики и структуру механически легированных порошков.

Оборудование и материалы: образцы механически легированных порошков, микроскоп металлографический, стереомикроскоп.

Общие сведения

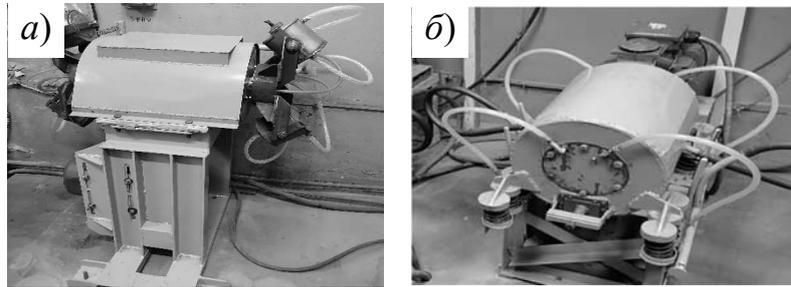
Реакционное механическое легирование заключается в обработке порошковой многокомпонентной шихты в специальных высокоэнергетических установках (мельницах), получивших название механореакторов. Под механореактором понимается аппарат, в котором в результате протекания механически активируемых химических превращений формируется порошковый сплав, имеющий определенный фазовый состав, структуру и свойства. Механическая активация химических взаимодействий в твердых телах требует большой плотности энергии в рабочем пространстве установки, и механохимические превращения реализуются при значениях энергонапряженности выше пороговой. Наряду с высокоэнергетическим воздействием на обрабатываемую композицию, основными условиями реализации механохимических процессов являются наличие интенсивного массопереноса и возможность протекания взаимодействия между компонентами по бездиффузионной кинетике, что достигается в случае постоянного образования «свежей» поверхности, появляющейся при разрушении частиц композиции.

Наиболее перспективными в качестве механореакторов для композиций на основе металлических систем являются *аттриторы* и *вибромельницы*.

Аттриторами называют аппараты, в которых измельчение материала осуществляется рабочими телами, приводимыми в движение импеллерами, закрепленными на валу, при вращении которого в движение приводится вся масса шаров, находящихся в рабочей камере. К недостаткам аттриторов относятся интенсивный износ лопастей-импеллеров, низкая надежность и долговечность, малая энергонапряженность, значительный намол продуктов разрушения рабочих поверхностей аттритора и рабочих тел, низкий механический коэффициент полезного действия.

Вышеуказанных недостатков лишены механореакторы-вибромельницы с ускорением рабочих тел до 30 г (рисунок 12.1). Основными достоинствами их являются надежность, долговечность, простота конструкции в сочетании с высокими предельными значениями параметров процесса реакционного механического легирования. В сравнении с аттриторами производительность вибромельниц в 1,3–1,6 раза выше, а затраты энергии на единицу продукции в 1,4–1,7 раза ниже. При одной и той же энергонапряженности вибромельницы по надежности и долговечности в 3–5 раз превосходят аттриторы. Механореакторы-вибромель-

ницы имеют низкую стоимость. При этом обработка исходной шихты в герметичном пространстве обеспечивает высокую точность химического состава получаемого продукта и однородное распределение компонентов или продуктов механоактивируемого их взаимодействия.



а – лабораторный механореактор; *б* – промышленный механореактор

Рисунок 12.1 – Общий вид механореакторов-вибромельниц

Технология РМЛ отличается относительно невысокими энергетическими затратами на единицу продукции. Эксплуатация аппарата в течение рабочей смены позволяет производить, в зависимости от состава шихты, 10...25 кг порошкового материала. При этом затраты электроэнергии составляют 3...7 кВт/кг.

Процесс обработки материала в механореакторе включает **три этапа**. На **первом** преимущественное развитие получает разрушение исходных частиц и измельчение компонентов шихты (рисунок 12.2). По истечении определенного времени обработки измельчение замедляется, и начинается объединение осколков (**второй этап**). Этот процесс происходит посредством схватывания отдельных элементов по образовавшимся ювенильным поверхностям и приводит к формированию композиционных частиц (гранул) и их росту. **Третий этап** обработки характеризуется наступлением динамического равновесия между процессами разрушения и сварки.

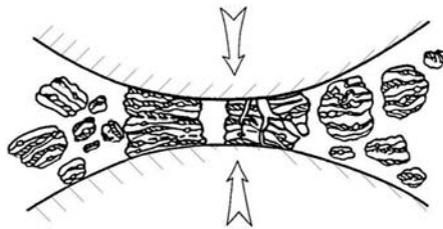


Рисунок 12.2 – Схематическое изображение процесса формирования частицы в ходе механического легирования

Продолжительность механического легирования для большинства систем на основе металлов составляет не менее 4 ч. Увеличение времени обработки приводит к повышению гомогенизации композиции по химическому составу, завершающейся в интервале 6...8 ч, а также взаимодействию между исходными компонентами, направленному на уменьшение свободной энергии системы.

Основными факторами, оказывающими влияние на интенсивность процессов

взаимодействия, протекающих в обрабатываемом материале, являются энергонапряженность режима обработки, рабочая температура в помольной камере, состав обрабатываемой композиции.

При оптимальных условиях реализации процесса и составе исходной шихты, синтезируемый продукт, как правило, является гомогенным по химическому составу, имеет субмикроструктурный тип структуры основы, стабилизированной наноразмерными включениями термодинамически стабильных упрочняющих фаз, и обладают комплексным упрочнением. Данная структура, как правило, наследуется компактными материалами, что приводит к существенному повышению их физико-механических свойств. Это объясняется тем, что, распределяясь по границам зерен или субзерен, синтезируемые дисперсные частицы стабилизируют их, позволяя сохранять основные свойства материала до температур, достигающих $0,95 T_{пл}$.

Внешней стороной, отражающей сложные физико-химические процессы, протекающие при механическом легировании, является изменение морфологии и размера частиц обрабатываемой композиции. Для определения гранулометрического состава порошков, получаемых механическим легированием, используют ситовый анализ, на основании которого строят дифференциальные кривые распределения частиц по размерам (рисунок 12.3).

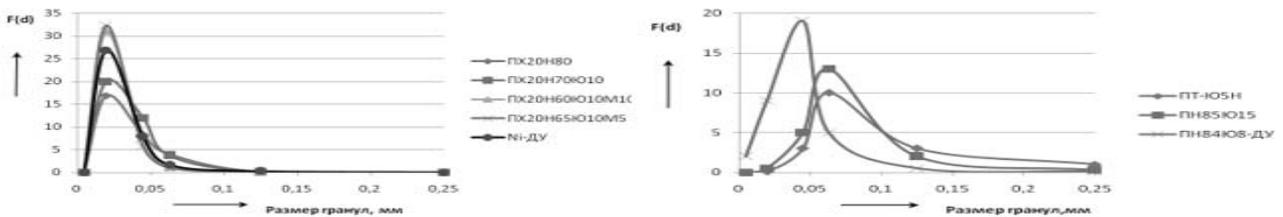


Рисунок 12.3 – Распределение по размеру гранул механически легированных порошков на основе никеля

Функцией может служить величина $F(d)$, определяемая из выражения

$$F(d) = \frac{\Delta m}{(m \cdot \Delta d)}, \quad (12.1)$$

где m – общая масса анализируемого порошка;

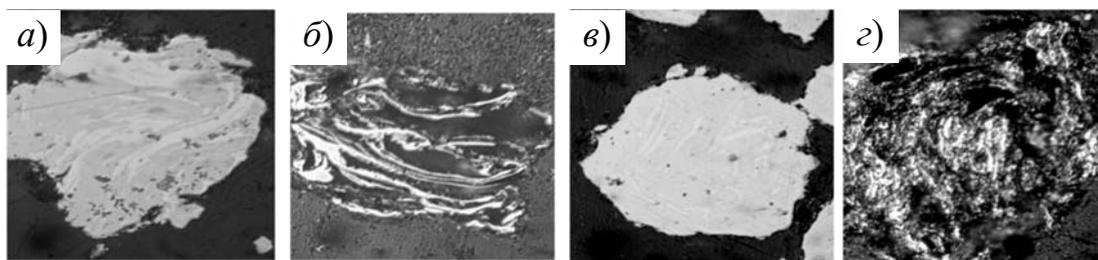
Δm – масса порошка на сите;

Δd – разность размера ячеек сит, следующих друг за другом.

Выше приведены примеры распределения частиц по фракциям в зависимости от химического состава.

Форма и размер частиц механически легированных порошков существенно зависит от химического состава обрабатываемой композиции. Здесь общей тенденцией является формирование более мелкого порошка при использовании компонентов, склонных к упрочнению (наклепу) в процессе механического легирования. Сильно наклепанные мелкие фрагменты, образующиеся на первом этапе процесса обработки, с трудом объединяются в крупные конгломераты. В то же время

мягкие пластичные компоненты, плохо поддающиеся упрочнению холодной пластической деформацией, склонны к образованию достаточно крупных частиц (рисунок 12.4).



a, в – нетравленные; *б, з* – травленные

Рисунок 12.4 – Форма и микроструктура гранул механически легированных (*a, б* – 4 ч; *в, з* – 8 ч) композиций на основе никеля ПХ20Н80

При этом следует отметить, что с увеличением склонности порошков к конгломерации химическая и структурная неоднородность увеличивается.

Крупный порошок образуется, например, при обработке композиций на основе меди, алюминия, системы «железо – алюминий». Образование мелкого порошка характерно материалам на основе железа систем «железо – хром – углерод», «железо – хром – никель – углерод» и др. Керамические материалы на основе оксидов, карбидов и т. д. в процессе обработки в механореакторе не образуют крупных частиц.

Контрольные вопросы

- 1 В чем заключается способ реакционного механического легирования?
- 2 Перечислите основные преимущества шаровых вибромельниц.
- 3 Опишите три стадии, обработки порошка в механореакторе.
- 4 Какими преимуществами обладают порошки, полученные по технологии механического легирования?
- 5 Как влияет химический состав исходных композиций на характеристики синтезируемых порошков?

Ход работы

- 1 Получить у преподавателя образцы порошков и микрошлифов механически легированных порошков.
- 2 Изучить микроструктуру, а также морфологию поверхности частиц.
- 3 Описать особенности структуры частиц исследованных порошков.

Содержание отчета

- 1 Цель работы.
- 2 Общие сведения о технологии РМЛ и получаемых материалах.
- 3 Заключение о недостатках МЛ порошков, применительно к АТ.

13 Лабораторная работа № 13. Влияние режимов механосинтеза на технологические характеристики синтезируемых порошков

Цель работы: изучить влияние основных технологических параметров процесса механического легирования на свойства получаемых порошков.

Оборудование и материалы: образцы механически легированных порошков, микроскоп металлографический, стереомикроскоп.

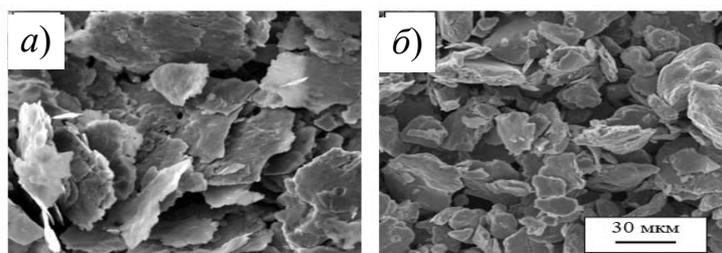
Общие сведения

После механического легирования в механореакторе формируется порошковый материал с определенным набором характеристик. К основным из них можно отнести морфологию поверхности частиц порошка, форму частиц и их размер, распределение частиц по размеру. Набор данных характеристик в определенном сочетании может существенно повлиять на технологические свойства порошка.

Решающее влияние на характеристики формируемых порошков оказывает природа и свойства исходных компонентов. Также влияние оказывают и условия механосинтеза.

Влияние длительности механического легирования.

На каждой из стадий формирования частиц механически легированного порошка его частицы имеют определенный размер и форму. На первой стадии, продолжительность которой обычно не превышает 2,5 ч, протекает процесс пластической деформации частиц исходного материала. В результате этого они приобретают пластинчатую форму (рисунок 13.1), что приводит к резкому снижению значения насыпной плотности (объемной массы) порошковых материалов (рисунок 13.2). Это, в свою очередь, сопровождается и резким снижением сыпучести материалов.



a – Ni – 10 % Al; *б* – 12X18H10

Рисунок 13.1 – Форма и размер частиц порошков, прошедших обработку в механореакторе в течение 2 ч

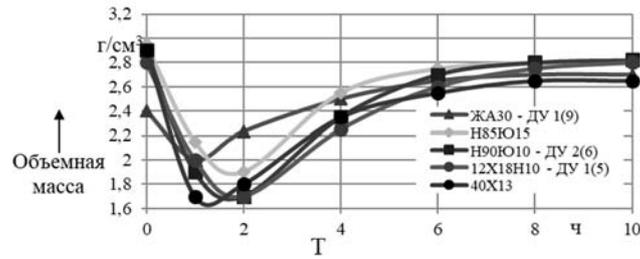


Рисунок 13.2 – График зависимости объемной массы композиции от продолжительности обработки в механореакторе

В дальнейшем образовавшиеся частицы пластинчатой формы начинают разрушаться, образуя фрагменты более правильной формы. Насыпная плотность увеличивается, хотя частицы имеют по-прежнему неправильную форму и небольшой размер. С увеличением длительности обработки фрагменты объединяются в более крупные конгломераты, что способствует образованию частиц более правильной округлой формы.

Энергонапряженность процесса механосинтеза.

Энергонапряженность или количество энергии, приходящейся на единицу объема обрабатываемого порошка в единицу времени, может оказывать различное влияние. В этом случае заметное влияние на процесс механического легирования оказывает природа исходных компонентов.

В случае обработки порошковой композиции, не склонной к упрочнению и измельчению в результате пластической деформации, повышение энергонапряженности в большинстве случаев приводит к формированию порошка с крупным размером частиц, что обусловлено более активным протеканием процессов образования конгломератов.

Если обработке подвергаются материалы, склонные к охрупчиванию, повышение энергонапряженности сопровождается более интенсивным упрочнением частиц и, как следствие, их измельчением. Здесь можно отметить образование более развитой поверхности частиц, что связано с формированием крупных гранул путем схватывания нескольких фрагментов неправильной формы. В процессе воздействия рабочих тел (шаров) на частицы данного типа пластическая деформация и округление слабо выражены. Это обусловлено высокой степенью упрочнения и, как следствие, значительной твердостью. В последнем случае порошки имеют более низкую сыпучесть.

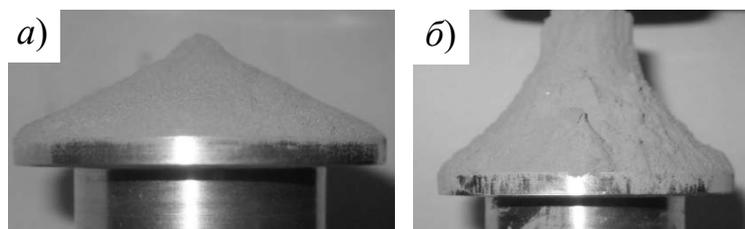
Влияние температуры.

Как показывают исследования, температура, при которой проводится процесс механосинтеза, может оказывать принципиальное влияние на характеристики порошка. Основной зависимостью для большинства синтезируемых материалов является увеличение среднего размера частиц с повышением температуры в рабочей камере. Благодаря подогреву камеры хотя бы до 80 °С может принципиально повлиять на характеристики материала. В первую очередь это относится к пластичным композициям. В случае обработки при температуре не более 20 °С продуктом механического легирования чаще всего является мелкодисперсный порошок с размером частиц не более 100 мкм. При этом, увеличение температуры

до 60 °С способно не только увеличить размер частиц на порядок (до 2 мм и более), но также вызвать налипание обрабатываемого материала на стенки камеры и рабочие тела, что связано с чрезмерным увеличением его пластичности.

Размер частиц порошка (гранулометрический состав).

Общей зависимостью для всех порошкообразных материалов является снижение сыпучести с уменьшением среднего размера частиц (рисунок 13.3). Это справедливо и для механически легированных композиций.



a – угол естественного откоса порошка с размером частиц 45...125 мкм; *б* – угол откоса порошка с размером частиц менее 25 мкм

Рисунок 13.3 – Влияние размера частиц на угол естественного откоса порошка

Снижение сыпучести обусловлено рядом причин. Основными из них являются увеличение электростатических сил взаимодействия между частицами, влажность, а также поверхностное трение между частицами. Как видно из рисунка 13.3, уменьшение среднего размера частиц с 80 до 15 мкм принципиально изменяет сыпучесть порошка.

Наряду со снижением сыпучести порошков, уменьшение среднего размера частиц сопровождается падением насыпной плотности материала.

В то же время следует отметить, что на композиции порошков, отличающихся заметным упрочнением в процессе механосинтеза, увеличение температуры не оказывает столь заметного влияния, хотя и сопровождается ростом среднего размера частиц.

Контрольные вопросы

- 1 Как влияет длительность механосинтеза на насыпную плотность порошков?
- 2 Опишите влияние энергонапряженности процесса на характеристики порошков.
- 3 Укажите, как влияет температура камеры механореактора на размер частиц порошков.
- 4 Как влияет средний размер частиц механически легированных порошков на их сыпучесть?

Ход работы

- 1 Получить у преподавателя образцы порошков, изготовленных на различных режимах механического легирования.

2 Изучить микроструктуру и морфологию порошков.

3 Отметить в отчете, как влияют режимы механосинтеза на характеристики порошков.

Содержание отчета

1 Цель работы.

2 Общие сведения о влиянии условий механосинтеза на характеристики порошков.

3 Вывод о положительном влиянии режимов механического легирования на характеристики порошков.

Список литературы

1 **Материаловедение: учебное пособие / И. М. Жарский [и др.].** – Минск : Вышэйшая школа, 2015. – 557 с.

2 **Лахтин, Ю. М.** **Материаловедение: учебник для вузов / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева.** – 6-е изд., стер. – Москва : Альянс, 2011. – 528 с.

3 **Волков, Г. М.** **Материаловедение: учебник для вузов / Г. М. Волков, В. М. Зуев.** – Минск: Минфин, 2008. – 519 с.

4 **Сироткин, О. С.** **Основы современного материаловедения: учебник / О. С. Сироткин.** – Москва : ИНФРА-М, 2015. – 364 с.

5 **Гаршин, А. П.** **Материаловедение. Техническая керамика в машиностроении: учебник для академического бакалавриата / А. П. Гаршин.** – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: Юрайт, 2016. – 296 с.

6 **Каменев, С. В.** **Технологии аддитивного производства : учебное пособие / С. В. Каменев, К. С. Романенко.** – Оренбург: Оренбург. гос. ун-т, 2017. – 145 с.

7 **Материаловедение: учебник для вузов / Б. Н. Арзамасов [и др.].** – 8-е изд., стер. – Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – 468 с.: ил.

8 **Конструкционные материалы: справочник / под ред. Б. Н. Арзамасова.** – Москва : Машиностроение, 1990. – 688 с.

9 **Материаловедение: справочные материалы / авт.-сост. В. А. Брагин, Э. А. Бубнов, В. С. Крохалев.** – Екатеринбург, 2018. – 194 с.