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

Могилев 2021

УДК 669.01
ББК 30.3
М34

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Технологии металлов» «21» марта 2021 г., протокол № 9

Составитель канд. техн. наук, доц. А. С. Федосенко

Рецензент С. Н. Емельянов

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, 2021

Содержание

1 Лабораторная работа № 1. Рассев порошковых материалов на фракции……..... 4
2 Лабораторная работа № 2. Определение текучести металлических порошков……... 7
3 Лабораторная работа № 3. Определение насыпной плотности порошкообразных материалов…… 9
4 Лабораторная работа № 4. Методы изучения структуры металлов и сплавов…… 11
5 Лабораторная работа № 5. Построение диаграммы состояния методом термического анализа…….. 14
6 Лабораторная работа № 6. Виды термической обработки, применяемые для изделий из металлов, получаемых методами аддитивных технологий…….. 17
7 Лабораторная работа № 7. Порошки на основе металлов, применяемые в области аддитивных технологий……. 20
8 Лабораторная работа № 8. Титан и его сплавы……. 22
9 Лабораторная работа № 9. Сплавы на основе алюминия…… 24
10 Лабораторная работа № 10. Сплавы на основе никеля……... 27
11 Лабораторная работа № 11. Материалы на основе системы кобальт – хром……..……... 30
12 Лабораторная работа № 12. Высокохромистые нержавеющие стали ферритного и мартенситного классов…… 33
13 Лабораторная работа № 13. Высокохромистые нержавеющие стали аустенитного класса…….. 35
14 Лабораторная работа № 14. Медь и ее сплавы…… 38
15 Лабораторная работа № 15. Инструментальные материалы на основе твердых сплавов……..……... 41
16 Лабораторная работа № 16. Инструментальные стали……... 43
17 Лабораторная работа № 17. Исследование свойств керамических материалов…… 45
Список литературы…….. 48

1 Лабораторная работа № 1. Рассев порошковых материалов на фракции

Цель работы: ознакомиться с устройством и функциональными возможностями машины для рассева порошков Retsch AS 300 control; получить практические навыки по механическому рассеву металлических порошков по фракциям.

Оборудование и инструмент: машины для рассева порошков Retsch AS 300 control, образцы металлических порошков, весы электронные.

Общие сведения

Распределение частиц по фракциям (гранулометрический состав) определяется условиями получения порошков. Размер частиц и их распределение по фракциям оказывают большое влияние на процессы подачи, транспортировки и равномерности распределения в ходе изготовления изделий методами аддитивных технологий.

Наиболее широкое применение в практике порошковой металлургии получил метод рассева на ситах или ситовой анализ. Ситовой анализ сводится к рассеву порошка через ряд сит, из которых каждое установленное ниже имеет меньший размер ячеек, чем установленное выше. Рассев проводится на стандартных ситах. Длительность рассева может составлять от нескольких секунд до десятков минут. Количество просеваемого порошка может достигать оставляет 10 кг. По окончании рассева порошки на каждом сите и в поддоне взвешиваются.

Для осуществлеия ситового анализа, как правило, используют тканые проволочные сетки с квадратными отверстиями (ячейками), а также металлические решетные сетки с пробивными круглыми, продолговатыми и треугольными отверстиями. Ситовой анализ применим для материалов с размерами частиц 10…0,025 мм. Ситовая ткань натягивается на круглую или квадратную обечайку.

Ситовой анализ можно проводить ручным и механическими (машинными) способами. В зависимости от свойств исследуемого материала применяются сухой или мокрый метод анализа.

При машинном просеивании навеска анализируемой пробы помещается на сито с наибольшими отверстиями в используемом наборе стандартных сит. Проход из этого сита падает на следующее, с меньшими размерами ячеек.

Такая последовательность позволяет сита всего набора поставить друг на друга и разделить пробу по размерам частиц на фракции (классы) в одну рабочую операцию.

При ручном просеивании пробу чаще всего помещают на наиболее тонкое сито, а полученный остаток переносят на следующее по крупности ячеек сито.

Сухой способ. При ручном сухом просеве на круглых ситах сито с поддоном и крышкой берут одной рукой, наклонив полотно к горизонтальной плоскости на 10°…20°, и ударяют другой рукой примерно 120 раз в минуту. Около 4 раз в минуту сито располагают горизонтально и сильно ударяют по обечайке.

При тонких ситах и трудно просеивающемся материале рекомендуется через каждые 5 мин нижнюю поверхность сита очищать мягкой кисточкой и опадающие частицы присоединять к проходу.

В случае использования тонких сит время просева может достигать 120 мин.

Мокрый способ. Для определения гранулометрического состава материалов, которые могут приобретать высокие электрические заряды, склонных к агрегированию при встряхивании или содержащих большое количество самых мелких фракций, применяется мокрый способ ситового анализа. Для этого используют жидкость, хорошо смачивающую частицы просеиваемого материала и не образующую с ним растворов или химических соединений (вода, керосин и др.).

В анализируемую пробу вводят минимальное количество промывной жидкости и перетирают до образования густой кашицы. Полученную кашицу переносят на самое грубое сито комплекта, и затем слабой струей жидкости она промывается через сита.

Механический рассев осуществляют при помощи приборов, создающих вращательное и колебательное движение сит в горизонтальной плоскости, качание плоскости сит, вибрацию и постукивание сит. Механический рассев может осуществляться как при сухом, так и мокром методе ситового анализа. Он требует значительно меньше времени, чем ручной, меньше материала и исключает индивидуальные ошибки. Однако при анализе мелкодисперсных материалов на тонких ситах рассев затруднен из-за отсутствия в пробе грубых частиц.

При механическом рассеве набором сит время просева должно быть установлено экспериментально для отдельных сит. Например, время просева хорошо просеивающегося материала при размере отверстий сит 0,04…0,053 мм составляет 20…30 мин, а при 0,071…0,16 мм – 10…20 мин.

Обработка результатов ситового анализа

Для рядовых ситовых анализов результаты рассева пробы рекомендуется, в частности, записывать в следующей форме (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Форма для записи результатов ситогового анализа

Номер сита	Размер отверстия ячейки, мм	Масса фракции (остатка), г	Остаток на данном сите R_1, % (масс.)	Суммарный остаток R_2, % (масс.)

Учитывая, что потери при выполнении анализа обычно не должны превышать 2 % от общей массы навески пробы, можно при обработке полученных результатов принять суммарную массу всех фракций за 100 %.

Содержание остатка R_1 на каждом сите вычисляют по формуле

$$R_1 = m_1 \cdot 100 / \sum m, \qquad (1.1)$$

где m_1 – масса остатка на данном сите, г;

$\sum m$ – суммарная масса остатков всех фракций после рассева, г.

Суммарный остаток R_2 для каждого сита рассчитывают, прибавляя к остатку на данном сите суммарное содержание остатков, полученных для всех предыдущих сит с большими отверстиями. По данным таблицы строят график зависимости задержанного на каждом сите суммарного содержания вещества от размера ячейки сита, откладывая на оси ординат размер ячейки сита в миллиметрах, а на оси абсцисс – суммарное содержание анализируемого вещества и проводя прямую через точки, соответствующие наибольшим процентам. По построенной прямой определяют в миллиметрах отверстия сит, задерживающих определенный суммарный процент вещества, например, 40 % и 90 %. Размер отверстия сита, задерживающего 90 % вещества, называется эффективным размером зерна и обозначается $d_{90эфф}$. Отношение размера ячейки сита, задерживающего 40 % вещества d_{40}, к эффективному размеру $d_{90эфф}$ называется коэффициентом однородности K:

$$K = d_{40} / d_{90\,эфф}\,. \qquad (1.2)$$

Эффективный размер зерна обычно определяют с погрешностью не более 4 %, а коэффициент однородности – с погрешностью не более 5 %.

Контрольные вопросы

1 В чем заключается рассев порошков на фракции?
2 Какие способы рассева Вы знаете?
3 В чем сущность процесса механического рассева порошков?
4 Что позволяет определить рассев порошков на фракции?

Ход работы

1 Взять образцы порошковых материалов.
2 Загрузить выбранный образец порошка на верхнее сито.
3 Установить параметры рассева: время рассева 1 мин; амплитуда 1,2 мм.
4 Включить машину, нажав кнопку «пуск».
5 После завершения цикла рассева снять фиксирующее устройство и взвесить массу порошка, содержащегося на каждом из сит.
6 Построить график распределения по фракциям для исследованного материала, согласно расчетам, выполненным по формуле (1.1).

Содержание отчета

1 Цель работы.
2 Основные теоретические положения.
3 Результаты расчетов.

2 Лабораторная работа № 2. Определение текучести металлических порошков

Цель работы: ознакомиться с существующими способами измерения текучести порошковых материалов и изучить методику определения текучести по времени истечения порошка.

Оборудование и инструмент: стеклянная воронка с отверстием 4…6 мм, штатив, стальная емкость, образцы металлических порошков, весы электронные с точностью до 0,01 г, секундомер.

Общие сведения

Одним из наиболее широко используемых методов определения сыпучести (текучести) металлических порошков, является определение данной характеристики с помощью прибора Холла, представляющего собой калиброванную воронку (прибор Холла). Данный метод распространяется только на порошки, которые свободно протекают при испытании через установленное отверстие, а также пригоден для определения текучести металлических порошков и их смесей, содержащих неметаллические компоненты.

Сущность метода заключается в измерении времени, необходимого для истечения 50 г металлического порошка через отверстие калиброванной воронки стандартизированных размеров.

Все размеры воронки являются обязательными. Она должна быть изготовлена из немагнитного коррозионно-стойкого металла, иметь достаточную толщину и твердость, чтобы противостоять деформации и чрезмерному изнашиванию.

Воронка устанавливается на стойку с горизонтальным виброустойчивым основанием для жесткого ее закрепления (рисунок 2.1).

Пробу порошка взвешивают на весах с точностью ±0,05 г. Время измеряется с точностью ±0,2 с.

Данный метод допускает использование автоматического прибора для определения текучести порошков при условии, что она будет обеспечивать заданную точность измерения. В данном случае датчики обеспечивают возможность фиксации времени истечения в автоматическом режиме.

Отбор проб. Непосредственно перед испытанием взвешивают испытываемую порцию (*навеску*) массой (50 ± 0,1) г.

Определение следует проводить на трех испытываемых порциях.

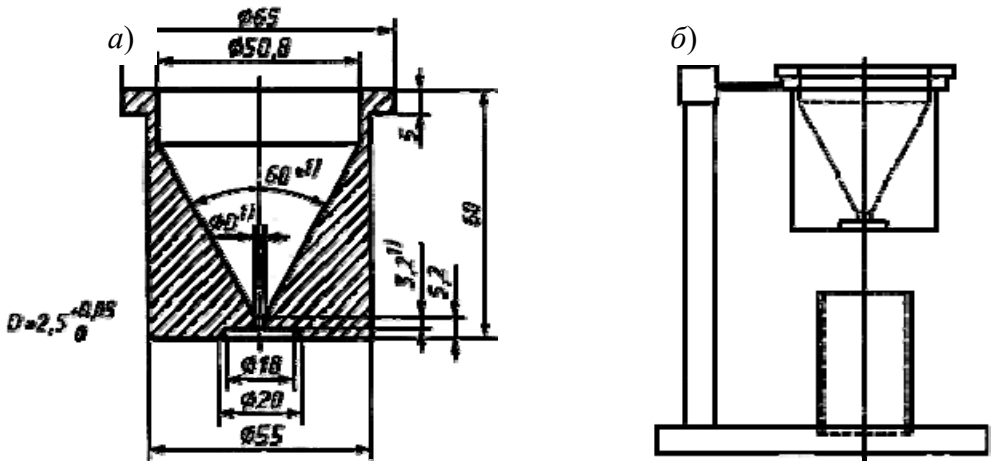


Рисунок 2.1 – Калиброванная воронка (прибор Холла) (*а*), схема калиброванной воронки и стойки (*б*)

Масса пробы для испытания должна быть не менее 200 г. Масса порции (навески) для одного испытания должна составлять (50 ± 0,1) г.

Порошок испытывают в состоянии поставки. В определенных случаях по согласованию поставщика с потребителем порошок может быть высушен. Если порошок имеет склонность к окислению, то сушку следует проводить в вакууме или в инертном газе. Если порошок содержит летучие вещества, то его не следует сушить.

Порядок испытания

Рабочую поверхность воронки обезжиривают, протирая ватой, смоченной в бензине. Допускается использование других растворителей. Когда воронка высохнет, через ее выходное отверстие протягивают тонкий жгутик сухой, не смоченной бензином (растворителем) ваты. Операцию повторяют 2–3 раза. При этом следят, чтобы в отверстии не остались ворсинки ваты.

Для определения текучести высыпают испытываемую порцию порошка в воронку, закрыв выходное отверстие сухим пальцем. Следят, чтобы отверстие воронки было заполнено порошком. Запускают секундомер, одновременно открыв отверстие, и останавливают его в момент истечения с точностью 0,2 с.

Примечание – Если порошок не течет при открытии отверстия, допускается одно легкое постукивание по воронке для начала его истечения.

Умножают среднее арифметическое значение результатов трех определений времени истечения для 50 г порошка на поправочный коэффициент воронки и записывают результат в секундах, округленный до ближайших 0,5 с.

Контрольные вопросы

1 Опишите методику проведения анализа текучести порошка с помощь прибора Холлла.

2 Для каких материалов может использоваться рассмотренный способ определения текучести порошков?

3 Как проводится отбор проб для исследования?

Ход работы

1 Ознакомиться с устройством прибора Холла.

2 Взвесить пробы порошков для исследования.

3 Измерить время истечения проб порошков через отверстие.

4 Полученные данные занести в отчет.

5 Сделать заключение о влиянии формы и размера частиц порошков на их текучесть.

Содержание отчета

1 Цель работы.

2 Основные теоретические положения.

3 Результаты проведения экспериментов.

3 Лабораторная работа № 3. Определение насыпной плотности порошкообразных материалов

Цель работы: ознакомиться со способом измерения насыпной плотности порошкообразных материалов.

Оборудование и инструмент: установка для определения насыпной плотности, лабораторные весы с точностью измерения до 0,01 г, плоскопараллельная плитка-калибр с установочным размером 25 мм, линейка металлическая 100 мм, стакан емкостью 25 см^3, образцы порошков.

Общие сведения

Порядок проведения измерения насыпной плотности выполняется в соответствии с ГОСТ 19440.

Вначале взвешивают пустую сухую мерку (стакан), изготовленную из полированной нержавеющей стали. Мерку подставляют под отверстие в воронке *2*, закрепленной в держателе *1*, зафиксированном на основании *4*, и устанавливают расстояние между нижним краем воронки и верхним обрезом мерки равным 25 мм при помощи контрольной плоскопараллельной плитки (рисунок 3.1). Затем сухим пальцем снизу закрывают отверстие D = 5 мм воронки, заполняют её сухим порошком, открывают отверстие и дают порошку истечь в мерную калиброванную емкость *3* (рисунок 3.2). Ребром линейки одноразовым движением, не оказывая давления на поверхность порошка и не встряхивая его,

снимают «верх». Для удобства переноски мерки с порошком на весы после выравнивания поверхности порошка слегка постукивают по внешней поверхности мерки, чтобы порошок слегка осел и не рассыпался при перемещении.

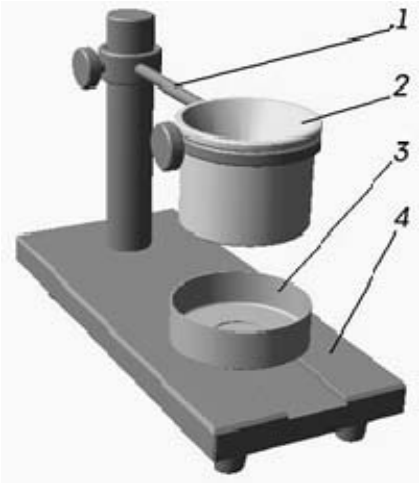
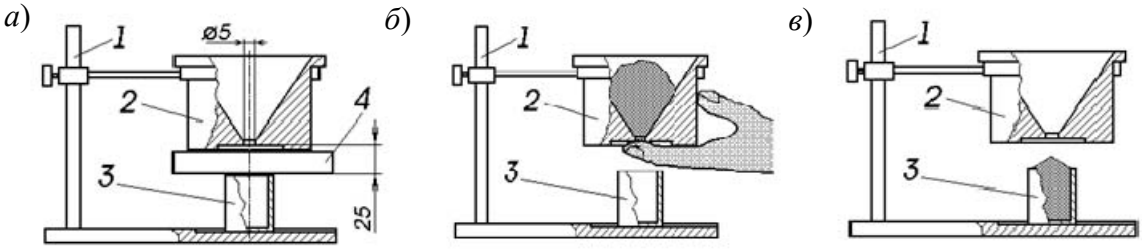


Рисунок 3.1 – Установка для определения насыпной плотности



а – установка воронки на требуемой высоте над меркой; *б* – засыпка порошка в воронку; *в* – мерка, заполненная порошком «с верхом»; *1* – штатив; *2* – воронка; *3* – стакан емкостью 25 см^3; *4* – мерная плитка.

Рисунок 3.2 – Порядок определения насыпной плотности материала

Мерку с порошком взвешивают с точностью до 0,05 г, от веса заполненной порошком мерки вычитают вес мерки, определённый ранее, и чистый вес порошка делят на объем калиброванной емкости 25 см^3. Определение выполняют на трёх испытуемых порциях.

Насыпную плотность $\gamma_{нас}$, г/см^3, определяют по формуле

$$\gamma_{нас} = G_2 - G_1/V,$$

где G_1 – масса мерки, г;

G_2 – масса мерки с порошком, г;

V – объем мерки, $V = 25$ см^3.

Испытания проводят 3 раза и берут среднее арифметическое.

Результаты заносят в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты измерений

Номер измерения	Масса порошка, г	Насыпная плотность, г/см^3	Среднее значение насыпной плотности, г/см^3

Контрольные вопросы

1 Какие методы измерения насыпной плотности Вы знаете?

2 Опишите метод измерения насыпной плотности порошка с использованием мерной емкости и воронки.

3 Как рассчитывают насыпную плотность материала?

Ход работы

Исследовать насыпную плотность металлических и керамических порошков согласно описанной методике.

Содержание отчета

1 Цель работы.

2 Основные теоретические положения.

3 Результаты проведения экспериментов.

4 Лабораторная работа № 4. Методы изучения структуры металлов и сплавов

Цель работы: ознакомиться с подготовкой образцов для исследования; получить представление о микроструктуре материалов; приобрести практические навыки изучения структуры материалов.

Оборудование и инструмент: микроскоп металлографический ЛабоМет-1, видеокамера TOUPCAM^{TM}, ПЭВМ ITEX^{TM} MAXIMA, шлифовально-полировальная машина FORCIPOL IV, объект-микрометр.

Общие сведения

На практике наибольшее распространение получили макроскопический и микроскопический методы исследования структуры материалов в твердом состоянии. Данные методы позволяют изучать структуру металлов и сплавов, полимеров и прочих неметаллических материалов, включая композиционные.

Изучение структуры металла позволяет получить представление об общем строении материалов, оценить их качество после различных видов обработки:

сварки, наплавки, литья, обработки давлением и пр. С помощью анализа структуры металла можно установить наличие дефектов, форму и размер зерна, фазовый состав, распределение компонентов в композиционных материалах, химическую и структурную неоднородности и др. [1].

Макроанализ проводится при визуальном осмотре образца либо с небольшим увеличением – с использованием увеличительно стекла (лупы).

Микроанализ проводится с применением специального оборудования, в качестве которого чаще всего используют оптические микроскопы с увеличением до 1000 крат. Как правило, для изучения микроструктуры достаточно увеличения в 300…500 крат.

Подготовка образцов для исследования при макро- и микроскопическом методах исследования не имеет значительных отличий и включает ряд последовательных операций.

Приготовление шлифа для исследования состоит в вырезании образца, шлифовке и полировке до зеркального блеска его поверхности.

Образец вырезается с помощью специального отрезного станка алмазным кругом с постоянным интенсивным охлаждением. Это исключает перегрев образца, который может вызвать изменения в структуре исследуемой поверхности. Образцы устанавливаются (в количестве от 1 до 6) в держатель автоматической головки (рисунок 4.1) и шлифуются шлифовальными алмазными кругами с постоянным уменьшением номера. После этого с помощью фетра и алмазной суспензии на водной основе проводится полирование для удаления остаточных мельчайших царапин на поверхности образца.

Рисунок 4.1 – Шлифовально-полировальная машина FORCIPOL IV с автоматической головкой FORCIMAT

При исследовании поверхности металла под микроскопом непосредственно после полировки можно обнаружить на общем светлом поле отдельные темные или серые точки и линии, которые могут представлять собой как неметаллические включения (оксиды, сульфиды, шлаки, силикаты, графит, нитриды), так и не устраненные полировкой дефекты поверхности образца (раковины, микротрещины, следы обработки).

Для получения полной информации о структуре металла проводят травление поверхности образца специальными химическими растворами, позволяющими выявить особенности микроструктуры исследуемой поверхности. Для

каждого материала основы (железо, никель, медь и т. д.) используются свои травители.

При изучении полимеров травление образцов не проводится.

Травление позволяет определить число, размеры, форму, взаимное расположение и количественное соотношение фаз и структурных составляющих. Перед травлением поверхность микрошлифа, подготовленного для исследования, обезжиривается спиртом, а затем погружается в реактив на необходимое для выявления микроструктуры время. Травление заключается во взаимодействии металла поверхности микрошлифа с химически активными растворами щелочей, солей, кислот в спирте или в воде. После травления поверхность микрошлифа будет иметь сложный микрорельеф, характеризующий строение металла.

При микроскопическом методе исследования используют следующие понятия.

Окуляр – это система линз, обращенных к глазу наблюдателя. Окуляры дают мнимое увеличенное изображение, полученное объективом.

Объект-микрометр – стеклянная или металлическая пластинка, на которую нанесена шкала длиной в 1 мм с ценой деления 10 мкм (0,01 мм).

Окуляр-микрометр отличается от окуляра лишь наличием шкалы, имеющей 100 делений.

Для определения цены деления окуляра-микрометра объект-микрометр устанавливается вместо шлифа на предметный столик и шкалы обоих микрометров совмещаются.

После совмещения некоторых участков шкал проводится вычисление цены деления окуляра по формуле

$$Ц_{ок} = (Ц_{об} \cdot T_{об}) / A_{ок},$$

где $Ц_{об}$ – цена деления объект-микрометра, равная 0,01 мм;

$T_{об}$ – число делений объект-микрометра, совпавших с числом делений окуляра-микрометра $A_{ок}$.

Контрольные вопросы

1 Чем отличается микроскопический метод исследования от макроскопического?

2 Изложить методику приготовления и травления шлифов.

3 Какова цель процесса травления?

4 Как определяется цена деления окуляр-микрометра?

Ход работы

1 Изучить процесс приготовления микрошлифов.

2 Изучить процесс травления микрошлифов.

3 Исследовать микрошлиф после травления и зарисовать структуру.

Содержание отчета

1 Цель работы.
2 Основные теоретические положения.
3 Результаты проведения экспериментов.

5 Лабораторная работа № 5. Построение диаграммы состояния методом термического анализа

Цель работы: изучить методики проведения термического анализа и построение диаграмм состояния; проанализировать полученные данные.

Оборудование и инструмент: печь SNOL 05/1250, тигель, термопара «хромель – алюмель», цифровой мультиметр.

Общие сведения

Термический анализ является одним из методов определения температур фазовых превращений вещества, сопровождающихся тепловыми эффектами. Метод основан на построении кривых охлаждения (нагрева) в координатах «температура вещества – время охлаждения (нагрева)» [1, 2]. Если при охлаждении (нагревании) в веществе не происходят фазовые превращения, кривая охлаждения имеет вид плавной нисходящей линии. При фазовых превращениях на кривой появляются горизонтальные (изотермические) участки или изгибы, обусловленные выделением (поглощением) тепла, вызывающим изменение скорости охлаждения (нагрева).

Процесс кристаллизации металлических сплавов и некоторые закономерности в их строении описываются с помощью *диаграмм состояния* или *диаграмм фазового равновесия*. Эти диаграммы в графической форме показывают фазовый состав и структуру в зависимости от температуры и концентрации.

Для рассмотрения диаграмм состояния необходимо ознакомиться с некоторыми понятиями, которыми придется оперировать.

Фаза *– это однородная часть системы отделенная от других частей системы* (*фаз*) *поверхностью раздела*, *при переходе через которую химический состав*, *структура и свойства вещества изменяются скачком.*

Компонентами *называются вещества*, *образующие систему*. Чистый металл – это однокомпонентная система, сплав двух металлов – двухкомпонентная.

Под ***числом степеней свободы*** *системы понимается число внешних и внутренних факторов*, *которое можно изменять без изменения числа фаз в системе.* К внешним факторам, влияющим на состояние сплава, относятся температура и давление, к внутренним – концентрация.

Общие закономерности существования устойчивых фаз, отвечающих теоретическим условиям равновесия, могут быть выражены в математической

форме, именуемой правилом фаз или законом Гиббса. Для металлов он имеет следующий вид:

$$C = K + 1 - Ф,$$

где C – число степеней свободы (или вариантность);

K – число компонентов, образующих систему;

$Ф$ – число фаз, находящихся в равновесии;

1 – число внешних факторов.

Число степеней свободы системы не может быть меньше нуля и не может быть дробным числом.

$$K - Ф + 1 \geq 0.$$

Тогда $Ф \leq K + 1$, т. е. число фаз в сплаве, находящемся в равновесии, не может быть больше, чем число компонентов плюс единица.

Диаграмма состояния строится в координатных осях, по которым откладывают температуру (в градусах Цельсия) и массовую долю компонентов (от 100 % одного до 100 % другого). Линии на диаграмме являются геометрическим местом критических температур, под которыми понимаются температуры фазовых превращений. Для их определения строят кривые охлаждения для сплавов различного состава и по остановкам и перегибам на этих кривых определяют температуры превращений – *критические точки*.

Схема установки для термического анализа приведена на рисунке 5.1.

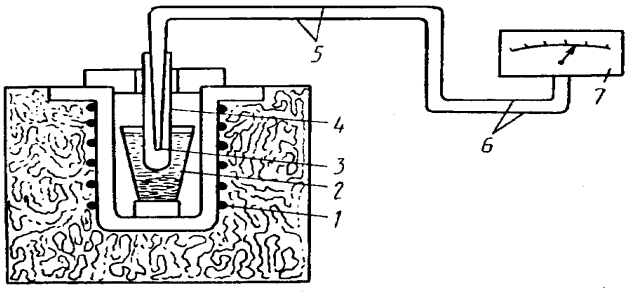


Рисунок 5.1 – Схема установки для исследования процесса кристаллизации сплавов методом термического анализа

В печь *1* помещают тигель *2* с исследуемым сплавом. Сплав расплавляют и опускают в него горячий спай термопары *3*, защищенной фарфоровым или кварцевым чехлом *4*. Печь выключают, и начинается охлаждение сплава. К холодным концам *5* термопары протекает электрический ток, возникающий из-за разности потенциалов в горячем спае. Ток по проводам *6* идет к гальванометру *7*, шкала которого проградуирована в градусах Цельсия. Сила тока в термопаре пропорциональна температуре сплава. Через определенные короткие равные отрезки времени фиксируют температуру и записывают в таблицу. После полного охлаждения сплава строят график «температура – время» (кривая

охлаждения). Затем по полученным точкам перегиба строится диаграмма состояния сплава. Полученную диаграмму подвергают анализу. Его алгоритм следующий.

1 Выделить линию солидус.

2 Под наклонным участком линии солидус находится одна фаза – твердый раствор.

3 Под горизонтальной прямой линии солидус находится механическая смесь фаз. Состав этой смеси смотрим на «боковых стенках», ограничивающих эту область.

4 Если имеется эвтектика, необходимо из точки ε опустить перпендикуляр и указать состав эвтектики (ее состав смотрим на концах прямой эвтектического превращения).

5 Если имеется линия понижения растворимости, то необходимо из ее вершины опустить перпендикуляр и указать состав выделяющейся вторичной фазы. Состав выделяющейся вторичной фазы смотрим на противоположном конце прямой эвтектического (эвтектоидного) превращения.

Линия ликвидус – совокупность критических точек, определяющих температуру начала кристаллизации сплавов.

Линия солидус – совокупность критических точек, определяющих температуру окончания кристаллизации сплавов. Линия *ликвидус* показывает температуру начала кристаллизации при охлаждении или окончания плавления при нагреве сплавов, линия *солидус* – температуру окончания кристаллизации сплавов. Ниже линии солидус сплавы находятся в твердом состоянии. Она показывает окончание их кристаллизации и начало плавления (соответственно).

Контрольные вопросы

1 Дайте определение понятиям «фаза», «компоненты сплава» и «степень свободы системы».

2 Изложите порядок построения диаграмм состояния методом термического анализа.

3 Изложите последовательность анализа диаграмм состояния сплавов.

Ход работы

1 Изучить установку для исследования процесса кристаллизации сплава термическим методом и зарисовать ее схему.

2 Исследовать процесс кристаллизации заданного преподавателем сплава, внести данные по изменению температуры во времени в таблицу, построить кривую охлаждения.

3 После сведения результатов в таблицу по каждому исследованному сплаву построить диаграмму состояния изучаемой системы.

Содержание отчета

1 Цель работы.
2 Основные теоретические положения.
3 Результаты проведения экспериментов.

6 Лабораторная работа № 6. Виды термической обработки, применяемые для изделий из металлов, получаемых методами аддитивных технологий

Цель работы: изучить методику назначения режимов термической обработки и основных фазовых превращений, протекающих в сталях при отжиге, нормализации, закалке и отпуске.

Оборудование и инструмент: микроскоп металлографический ЛабоМет-1, видеокамера TOUPCAM™, ПЭВМ ITEX ™ MAXIMA.

Общие сведения

Термической обработкой называют технологические процессы, *состоящие из нагрева и охлаждения металлических изделий с целью изменения их структуры и свойств.* При термической обработке стали протекают фазовые превращения. Они вызваны тем, что вследствие изменившихся условий (температуры) новое состояние оказывается более устойчивым, чем старое, т. к. обладает меньшим запасом свободной энергии. Характер фазовых превращений зависит от скорости охлаждения. Превращения, протекающие при медленном охлаждении, близкие к равновесным, описываются диаграммой «железо – цементит». Диаграмма является также основой для изучения термической обработки. Она указывает, каким видам термической обработки может быть подвергнут сплав и до каких температур требуется производить нагрев.

Основными видами термической обработки стали являются *отжиг первого рода*, *отжиг второго рода*, *закалка, отпуск* [1–4].

Отжиг первого рода. Отличительная особенность отжига первого рода состоит в том, что его проведение не обусловлено фазовыми превращениями. Основными параметрами отжига первого рода являются температура нагрева и время выдержки при этой температуре. Скорости нагрева и охлаждения при этом имеют второстепенное значение. Отжиг первого рода частично или полностью устраняет отклонения от равновесного состояния, имеющиеся в стали после литья, обработки давлением, сварки и других технологических операциях. В зависимости от того, какие отклонения от равновесного состояния устраняются, различают *гомогенизационный*, *рекристаллизационный и отжиг для снятия внутренних напряжений*.

Гомогенизационный отжиг предназначен для устранения дендритной ликвации в литой стали. При этом сталь подвергается длительной выдержке (до 48 ч) при 1000 °С.

Рекристаллизационный отжиг проводится для снятия эффекта упрочнения, вызванного холодной пластической деформацией. Температура отжига на 100 °С…200 °С выше температуры рекристаллизации, определяемой из выражения $T_{рек} = 0{,}4 \cdot T_{пл.}$

Отжиг для снятия внутренних напряжений. Внутренние напряжения в металле могут возникать в результате различных видов обработки. Это могут быть термические напряжения, образовавшиеся в результате неравномерного нагрева, различной скорости охлаждения отдельных частей детали после горячей деформации, литья, сварки, шлифовки и резания.

Отжиг второго рода. При отжиге второго рода сталь нагревается на 30 °С…50 °С выше критических точек Ac_1 или Ac_3 с последующим медленным охлаждением, как правило, вместе с печью.

В зависимости от температуры нагрева стали различают ***полный*** и ***неполный*** отжиг. При полном отжиге нагрев ведется на 30 °С…50 °С выше точки Ac_3, при неполном – в область меж критических температур ($Ac_1 < t_{нагрева} < Ac_3$). Полный отжиг приводит к полной перекристаллизации (все составляющие исходной структуры при температуре нагрева переходят в аустенит). При неполном отжиге перекристаллизацию испытывает только перлит; феррит (в доэвтектоидной стали) и цементит вторичный (в заэвтектоидной стали) перекристаллизовываются частично.

Отжиг приводит к снижению твердости, повышению пластичности и получению однородной мелкозернистой структуры. Для доэвтектоидных сталей, как правило, проводится *полный отжиг*, для заэвтектоидных – *неполный*.

При неполном отжиге заэвтектоидных сталей нагрев проводится на 30 °С…50 °С выше Ac_1.

В заводской практике с целью экономии времени и получения более стабильных результатов все большее распространение получает так называемый *изотермический отжиг*. В этом случае сталь, нагретая выше критических точек Ac_1 или Ac_3, охлаждается с любой скоростью до температуры, лежащей на 50 °С…100 °С ниже равновесной точки A_1, и при этой температуре выдерживается в течение времени, необходимого для полного распада аустенита.

Разновидностью отжига является *нормализация*. Особенностью нормализации является то, что охлаждение проводится на воздухе.

Закалка. Закалкой называется такой вид термической обработки, который заключается в нагреве на 30 °С…50 °С выше точки Ac_3 или Ac_1, выдержке для завершения фазовых превращений и последующем охлаждении со скоростью, как правило, выше критической $V_к$. При охлаждении со скоростью, выше критической, аустенит переохлаждается ниже температуры точки $M_н$, при которой атомы железа и углерода практически теряют диффузионную подвижность, и происходит бездиффузионная перестройка гранецентрированной решетки аустенита в тетрагональную объёмно-центрированную решетку мартенсита. При этом весь углерод остается в твердом раство-

ре $Fe_{\gamma}(C) \rightarrow Fe_{\alpha}(C)$. Таким образом, ***мартенсит является пересыщенным твердым раствором углерода в α-железе.*** Мартенсит имеет игольчатое строение. Размер игл мартенсита определяется величиной исходного зерна аустенита. Чем больше зерно аустенита, тем крупнее размер игл образовавшегося мартенсита.

В зависимости от температуры нагрева различают полную и неполную закалку. В случае нагрева под неполную закалку (выше Ac_1, но ниже Ac_3) доэвтектоидная сталь имеет структуру аустенита и феррита, а заэвтектоидная – аустенита и цементита вторичного.

Отпуск. После закалки сталь подвергают отпуску. ***Под отпуском понимается совокупность операций, заключающихся в нагреве закаленной стали до температуры ниже критической точки Ac_1, выдержке и охлаждении до комнатной температуры.***

Отпуск приводит к снижению твердости, прочности и повышению пластичности. Причем влияние на указанные свойства тем больше, чем выше температура отпуска.

В зависимости от температуры нагрева различают три разновидности отпуска: *низкий*, *средний* и *высокий*.

Низкий отпуск проводят путем нагрева закаленной стали до 200 °С. При этом образуется структура мартенсита отпущенного. Низкий отпуск частично снимает внутренние напряжения и несколько повышает вязкость. Твердость при низком отпуске практически не снижается.

При ***среднем отпуске*** нагрев закаленной стали производится до температур 350 °С…450 °С, при этом образуется структура троостита отпуска.

При ***высоком отпуске*** нагрев закаленной стали производится до температур 500 °С…650 °С; образуется структура – сорбит отпуска, представляющий собой смесь укрупненных частиц феррита и цементита округлой формы.

Контрольные вопросы

1 Дать определения термической обработке, отжигу первого рода, отжигу второго рода, закалке, отпуску.

2 Описать разновидности отжига первого и второго рода, указать их режимы и назначение.

3 Указать преимущества нормализации и изотермического отжига.

Ход работы

1 Изучить влияние отпуска на фазовые превращения и характер образующихся микроструктур.

2 Изучить структуру предложенных шлифов, зарисовать ее и указать структурные составляющие и фазы.

Содержание отчета

1 Цель работы.
2 Основные теоретические положения.
3 Результаты проведения экспериментов.

7 Лабораторная работа № 7. Порошки на основе металлов, применяемые в области аддитивных технологий

Цель работы: получение представлений о классификации, видах и химическом составе порошковых материалов, применяемых в области аддитивных технологий.

Оборудование и материалы: образцы порошкообразных материалов, микроскоп металлографический ЛабоМет-1, видеокамера TOUPCAM™.

Общие сведения

Порошками называют сыпучие материалы, размер частиц которых не превышает 1,0 мм. В зависимости от размера частиц, порошки разделяют на: нанодисперсные с $d < 0{,}001$ мкм; ультрадисперсные $d = 0{,}01…0{,}1$ мкм; высокодисперсные $d = 0{,}1…10$ мкм; мелкие $d = 10…40$ мкм; средние $d = 40…250$ мкм; крупные $d = 250…1000$ мкм.

Одним из параметров, характеризующих металлический порошок, является величина d_{50} – «средний диаметр частиц». Это значит, что, например, при $d_{50} = 40$ мкм 50 % частиц порошка имеют размер меньше или равный 40 мкм. В порошках, применяемых для изготовления изделий в области аддитивных технологий, данное значение может изменяться в широком интервале. Как правило, каждый производитель ориентирует свое оборудование на определенный размер частиц. В зависимости от применяемой модели и технологии изготовления изделия диаметр частиц может изменяться от 10 мкм до 100 мкм.

В технологиях селективного лазерного спекания и селективного лазерного сплавления чем меньше величина d_{50}, тем тоньше слой образующегося порошка и более точная проработка мелких деталей изделия, а также ниже шероховатость его поверхности, однако с уменьшением слоя снижается и производительность процесса изготовления изделия, которая в упомянутых способах и так весьма низкая.

Размер частиц используемых материалов определяет и мощность энергетического луча (лазерного, электронного). При использовании более мелких порошков мощность лазера должна снижаться. В противном случае слишком большое тепловложение будет способствовать бурному плавлению, вскипанию

и разбрызгиванию оплавляемого материала, что повлечет за собой снижение качества формируемого изделия [6].

В качестве нержавеющих сталей находят применение материалы марок 17-4PH (09Х17Н7Ю1), AISI 410 (12Х13), AISI 304L (03Х18Н11), AISI 316L (03Х17Н14М3), AISI 904L (06ХН28МДТ). В эту категорию входят сложнолегированные стали с содержанием хрома не менее 13 %.

Инструментальные стали для горячей штамповки 4Х5МФС, 4Х5М3Ф, 5ХНВ, 6ХВ и др. используют для изготовления различных видов инструмента как для работы при нормальных температурах, так и при повышенных (режущий и измерительный инструмент, штамповая оснастка и др.).

Никелевые сплавы ХН75МБТЮ (Inconel 625), ХН45МВТЮБР (Inconel 718), легированные хромом, широко используются в авиационных двигателях, где из них изготовляют рабочие лопатки, диски ротора турбин, детали камеры сгорания и т. п.

Кобальт-хромовые сплавы Co-Cr используют для модельного литья. Они обладают хорошими механическими свойствами, благодаря чему их используют для изготовления деталей сложной формы в различных отраслях, включая авиа-, ракето- и машиностроение, а также при изготовлении зубных протезов.

Медные сплавы и, в частности, оловянистые бронзы (БрОФ6,5-0,15) обладают высокими теплопроводящими свойствами и коррозионной стойкостью и хорошо подходят для создания специальных систем охлаждения.

Алюминиевые сплавы, среди которых следует отметить силумины, отличаются хорошей коррозионной стойкостью, жидкотекучестью, электро- и теплопроводностью.

Титановые сплавы отличаются комплексом уникальных свойств, благодаря чему находят широкое применение в различных отраслях промышленности, а также медицине и других областях. В настоящее время к одним из лучших сплавов на основе титана относят марки Ti6Al4V (ВТ6), Ti6Al7Nb, Ti6Al4V. Эти материалы отличаются высокой прочностью при относительно небольшой плотности в 4,5 г/см³. Сплавы получили наиболее широкое распространение в судостроении, аэрокосмической промышленности, медицине. Они способны работать при температурах, достигающих 1100 °С.

Помимо перечисленных, в области аддитивных технологий находят применение материалы на основе и других систем, часть из которых представлена в таблице 7.1.

Таблица 7.1 – Применение материалов в области аддитивных технологий

Состав материала	Область применения
Al-Sn-Cu	Подшипники скольжения
Cr-Al	Защитные покрытия
Fe-Mn	Износостойкие опоры прокатных станов
Ni-алюмиды	Структурные компоненты и покрытия
Ni-Cr-Fe-Si-B	Порошки для плазменного напыления
Ni-Cr-Mo-B	Антикоррозионные покрытия
Cu-Ba, Cu-Y	Суперпроводники

Контрольные вопросы

1 Какие материалы называются порошками и на какие фракции они разделяются?

2 Укажите виды сплавов, применяющихся в аддитивном производстве.

3 Опишите свойства и области применения сплавов на основе никеля, хрома, титана, меди и алюминия.

Ход работы

1 Получить у преподавателя образцы порошков.

2 При помощи микроскопа определить размер и форму частиц исследуемых порошков.

3 Оформить отчет с описанием изображений исследованных материалов.

4 Сделать вывод о морфологии частиц, полученных различными способами.

Содержание отчета

1 Цель работы.

2 Основные теоретические положения.

8 Лабораторная работа № 8. Титан и его сплавы

Цель работы: изучить структуру, свойства, маркировку и область применения титана и сплавов на его основе.

Приборы и материалы: лабораторные электропечи, образцы сплавов титана, емкость с водой для закалки, щипцы, твердомер по методу Роквелла.

Общие положения

Титан – лёгкий прочный металл серебристо-белого цвета. Обладает высокой коррозионной стойкостью.

Как правило, применяют легированные титановые сплавы. Основными легирующими элементами являются алюминий, молибден, хром. Алюминий – важнейший легирующий элемент в титановых сплавах, стабилизирует α-фазу. Он содержится в большинстве промышленных титановых сплавов в количестве 1,5 %...6,5 %. При более высоком содержании алюминия возможно образование фазы Ti_3Al, которая приводит к росту хрупкости и вызывает потерю термической стабильности при содержании алюминия более 6 %.

Молибден также часто вводят в состав титановых сплавов. Растворимость его в α-Ti не превышает 1 %, а β-стабилизирующий эффект является максимальным. Для фиксации однофазной β-структуры закалкой достаточно иметь в сплаве 11 % Mo. Его введение эффективно повышает температуру рекристал-

лизации, прочность сплавов при комнатной и повышенных температурах, обеспечивает интенсивное растворное упрочнение – заметно повышает модули упругости α-Ti, что означает повышение сил межатомной связи.

Легирование хромом обеспечивает в сплавах высокую прочность при хорошей пластичности и эффективность упрочняющей термической обработки, но только при добавке молибдена [2, 9]. Это связано с тем, что в системе Ti–Cr при температуре 667 °C проходит нонвариантное эвтектоидное превращение $\beta \rightarrow \alpha + TiCr_2$ и образующееся соединение $TiCr_2$ снижает пластичность сплава, а вводимый молибден может затормозить эвтектоидное превращение.

Наиболее широко используют сплав ВТ5Л, что обусловлено его высокими литейными свойствами, простотой технологии получения из него отливок, распространенностью и недефицитностью единственного легирующего элемента – алюминия.

Сплав ВТ6Л отличается более высокими прочностными характеристиками по сравнению со сплавом ВТ5Л при почти такой же пластичности. Сплав ВТ6Л хорошо сваривается. Сплав ВТ9Л является литейным вариантом жаропрочного сплава ВТ9 и предназначен для изготовления литых деталей, работающих при температурах 500 °C…550 °C.

Титановый сплав Ti6Al4V и его улучшенная версия Ti6Al4V ELI, отличающаяся высокой степенью чистоты, являются наиболее широко используемыми в мире сплавами на основе титана. Благодаря высокой прочности, низкой плотности и хорошей коррозионной стойкости сплав Ti6Al4V хорошо подходит для производства деталей в аэрокосмической и автомобильной промышленности, энергетике, а также в медицине. Титановый сплав TiGdII – еще один материал, отличающийся хорошей биосовместимостью и механическими свойствами. Помимо медицины, его используют в энергетике, химической и нефтехимической промышленности, аэрокосмической индустрии.

Rematitan – один из немногих титановых порошковых сплавов, сертифицированный для использования для 3D-печати, разработанный компанией Concept Laser GmbH. Основная область применения – стоматология.

Нитинол представляет собой интерметаллическое соединение титана и никеля, в процентном соотношении 45 % титана и 55 % никеля и с равным количеством атомов каждого вещества (сплав относится к материалам с эффектом памяти). Получение интерметаллида включает стадии плавки, переплавки, литьё, придание необходимой формы.

Материал применяется в медицине, в частности, для лечения пациентов с заболеваниями и травмами опорно-двигательного аппарата, а также в стоматологии для ортодонтического лечения.

В области медицины биосовместимость титана делает металл незаменимым для применения в медицине, особенно когда присутствует контакт металла с тканью или костью. Модуль упругости титана (около 80…110 ГПа) является самым близким к твердым тканям человека.

Поскольку алюминий и ванадий способны оказывать вредное воздействие на человека, были разработаны новые сплавы, не содержащие данных элементов, такие как TiZrNbSn, Ti24Nb4Zr7,6Sn и др.

Контрольные вопросы

1 Охарактеризуйте титан и сплавы на его основе.
2 Каково влияние легирующих элементов на свойства титановых сплавов?
3 Дайте характеристику сплаву ВТ6.
4 Что такое нитинол?

Ход работы

1 Выбрать режимы термической обработки титанового сплава.
2 Измерить твердость HRB сплава в исходном состоянии.
3 Выполнить закалку и искусственное старение.
4 После каждого вида термообработки измерить твердость по методу Роквелла по шкале В.

Содержание отчета

1 Цель работы.
2 Основные теоретические положения.
3 Результаты проведения экспериментов.

9 Лабораторная работа № 9. Сплавы на основе алюминия

Цель работы: изучить маркировку, применение и влияние термической обработки на структуру и свойства алюминиевых сплавов.

Приборы и материалы: лабораторные камерные электропечи, образцы сплавов алюминия, закалочный бак с водой, щипцы, прибор для измерения твердости по методу Бринелля.

Общие сведения

Алюминий имеет температуру плавления 660,37 °С, плотность – 2,699 г/см^3 (при 20 °С). Значения теплопроводности и электропроводности составляют примерно 2/3 от соответствующих значений для меди. В чистом виде алюминий мягкий и пластичный. В промышленности, как правило, используют сплавы на основе алюминия [1, 2, 8, 9]. Они подразделяются на деформируемые, литейные и порошковые, а также на термически упрочняемые и термически неупрочняемые.

Промышленные литейные алюминиевые сплавы маркируют буквой А, за которой следуют буквы, обозначающие легирующий элемент: К – Si, М – Cu, Мг – Mg, Ц – Zn, Н – Ni, Кд – Cd. Цифры после обозначения элемента указывают среднее его содержание. Если концентрация элемента не превышает 1,5 %, то после его обозначения цифры не проставляют.

Наиболее распространенными алюминиевыми сплавами для получения изделий с помощью аддитивных технологий являются AlSi10Mg, AlSi12-A, AlSi7Mg0,6, AlSi9Cu3 и др.

Сплав AlSi10Mg-0403 является аналогом алюминиевого сплава (аналог АК9ч). Он состоит из алюминиевой основы, легированной кремнием с массовой долей до 10 %, небольшим количеством магния и железа и другими незначительными элементами. Наличие в составе кремния делает сплав тверже и прочнее, чем чистый алюминий благодаря формированию соединения Mg2Si.

Алюминиевый сплав AlSi12-A – это легированный порошок (аналог российского силумина марки АК12) на основе алюминия AlSi12-A LMF. Разработан и протестирован специально для использования в системах TruPrint. Детали, выполненные из данного порошка, по своему составу соответствуют устойчивому к коррозии алюминиевому сплаву 3.2582 (АМг4.5). Данный сплав не является термически упрочняемым.

AlSi7Mg0,6 (российский аналог АК7ч или АЛ9) часто используется в тех случаях, когда в число требований входят отличная теплопроводность, хорошая коррозионная стойкость и устойчивость к деформации. Применяется в автомобильной и аэрокосмической отрасли, для прототипирования, а также в научных исследованиях. Сплав обладает неплохой прочностью 225МПа, малой усадкой (1 %), но низкой пластичностью (1 %…4 %).

AlSi9Cu3 (российский аналог АК8М3) отличается низкой плотностью, хорошей высокотемпературной прочностью и коррозионной стойкостью. Хорошо подходит для технологии SLM. Сплав применяется для изготовления силовых и герметичных деталей, работающих при температурах до +250 °С. По сравнению со сплавом AlSi7Mg0,6 он имеет повышенный предел прочности около 390 МПа и относительное удлинение достигает 5 %.

Термическая обработка алюминиевых сплавов.

Для алюминиевых сплавов широкое распространение в металлургическом производстве получили три основных вида термообработки: отжиг, закалка и старение.

Отжиг полуфабрикатов применяется в тех случаях, когда возникшее по тем или иным причинам неравновесное состояние сплава обусловливает появление нежелательных свойств, чаше всего пониженной пластичности.

В соответствии с разновидностями неравновесных состояний в алюминиевых сплавах различают три разновидности отжига.

Гомогенизация – разновидность отжига, которая применяется при производстве деформированных полуфабрикатов. Гомогенизация слитка – первая термическая обработка в технологическом процессе.

Рекристаллизационный отжиг наиболее распространен в качестве промежуточной термической обработки между операциями холодной деформации или между горячей и холодной деформацией.

Дорекристаллизационным отжигом является неполный отжиг, который используют в качестве окончательной термообработки с целью получения полуфабрикатов (обычно листов) с промежуточными свойствами.

Гетерогенизационный отжиг термически упрочненных полуфабрикатов с целью их разупрочнения применяют только для сплавов, упрочняемых термообработкой.

Цель закалки – получить в сплаве предельно неравновесное фазовое состояние (пересыщенный твердый раствор с максимальным содержанием легирующих элементов). Такое состояние обеспечивает, с одной стороны, непосредственное повышение (по сравнению с равновесным состоянием) твердости и прочности, а с другой – возможность дальнейшего упрочнения при последующем старении.

Закалку применяют для сплавов, претерпевающих фазовые превращения в твердом состоянии. В алюминиевых сплавах, используемых в промышленности, наблюдается лишь один вид фазовых превращений; при нагреве интерметаллидные фазы растворяются в алюминии, а при охлаждении вновь выделяются из твердого раствора. Таким образом, закалка возможна только для алюминиевых сплавов, содержащих компоненты, растворимость которых в твердом алюминии возрастает с температурой (Cu, Mn, Si, Zn, Li), причем в количествах, превышающих растворимость при комнатной температуре.

При закалке алюминиевых сплавов нагрев выполняют до температуры, при которой избыточные интерметаллидные фазы полностью или большей частью растворяются в твердом растворе, затем дают выдержку при данной температуре и быстром охлаждении до комнатной температуры для получения перенасыщенного твердого раствора.

Время выдержки в печи, необходимое для растворения интерметаллидных фаз, составляет от 10 мин до 3,5 ч. Охлаждение обычно проводят в холодной воде, а фасонных отливок – в подогретой до 50 °С …100 °С. После закалки изделия подвергают старению естественному или искусственному.

Старение представляет собой выдержку закаленного сплава при некоторых (относительно низких) температурах, при которых начинается распад пересыщенного твердого раствора или в твердом растворе происходят структурные изменения, являющиеся подготовкой к распаду. Цель старения – дополнительное повышение прочности закаленных сплавов.

В результате распада из одной фазы (пересыщенный твердый раствор) образуются две фазы: твердый раствор, обедненный легирующими компонентами, и выделения интерметаллидов, отличающиеся от твердого раствора по составу и кристаллической решетке и отделенные от твердого раствора поверхностью раздела.

Естественное старение протекает без специального нагрева, при вылеживании в естественных условиях.

Искусственное старение заключается в нагреве закаленных алюминиевых сплавов до относительно невысоких температур (обычно в интервале 100 °С...200 °С) и выдержке при этих температурах (в пределах от нескольких часов до нескольких десятков часов).

При выборе режима старения (температура и продолжительность), как правило, исходят из условия обеспечения максимальной прочности. Темпера-

тура старения на максимальною прочность для различных алюминиевых сплавов колеблется от 20 °С (комнатная) до 200 °С.

Контрольные вопросы

1 Дайте характеристику сплавам AlSi10Mg, AlSi7Mg0,6, AlSi9Cu3.
2 Перечислите виды термообработки для алюминиевых сплавов.
3 Какова цель проведения закалки для алюминиевых сплавов?
4 Что происходит с закаленными алюминиевыми сплавами при старении?

Ход работы

1 Измерить твердость сплава Д16 в исходном состоянии в единицах HRB.
2 Выполнить закалку с 500 ºС.
3 Измерить твердость по шкале HRB.
4 Выполнить искусственное старение при 150 ºС в течение 30 мин.
5 Измерить твердость образцов после искусственного старения.
6 Полученные данные занести в отчет.

Содержание отчета

1 Цель работы.
2 Основные теоретические положения.
3 Результаты проведения экспериментов.

10 Лабораторная работа № 10. Сплавы на основе никеля

Цель работы: ознакомиться с классификацией, свойствами и применением никеля и его сплавов.

Оборудование и материалы: образцы никелевых сплавов, полученные плазменной наплавкой на оборудовании Castolin Eutectic, полировально-шлифовальная машина, микроскоп металлографический, реактивы для травления микрошлифов.

Общие сведения

Никель – металл серебристого цвета. Температура плавления – 1455 °С. Плотность – 8,9 г/см^3.

Никель в атмосферных условиях – коррозионно-стойкий металл, он почти не корродирует в пресной воде и достаточно устойчив в морской, поэтому широко используется для защитных покрытий. Коррозионная стойкость никеля в атмосфере воздуха объясняется возникновением на его поверхности тонкой и прочной пленки оксида. Растворы кислых солей и особенно неорганические

кислоты, такие как азотная, соляная, фосфорная, вызывают сильное коррозионное разрушение никеля. Органические кислоты, а также щелочные и нейтральные растворы незначительно влияют на никель.

Сплав НМЖМц28-2,5-1,5 называют монель-металлом, он прочен и коррозионностоек, технологичен при обработке давлением, из него получают разнообразные полуфабрикаты: листы, ленты, трубки, проволоку, прутки. Монель-металл применяют в химическом машиностроении, приборостроении и для изготовления медицинского инструмента.

Нихром Х20Н80 имеет удельное электрическое сопротивление почти в 70 раз выше, чем у меди, и может длительно поддерживать в печи температуру до 1000 °С благодаря высокой жаростойкости, при этом следует учесть, что обычно температура на нагревателе на 100 °С выше, чем в печи. Ферронихром Х15Н60 соответствует максимуму удельного электросопротивления в системе Ni–Fe–Cr. Он дешевле, чем Х20Н80, т. к. содержит меньше никеля, но уступает по жаростойкости, используется до 800 °С…900 °С. Сплавы на основе последней системы – представители многочисленной группы магнитомягких материалов на основе никеля, используемые в электротехнике и электронике в качестве сердечников прецизионных трансформаторов, дросселей, устройств магнитной памяти и т. п.

Жаропрочные сплавы на основе никеля – это вторая многочисленная группа никелевых сплавов, получившая развитие с появления газотурбинных авиационных двигателей. Рабочие температуры даннных сплавов – от 700 °С до 1050 °С (0,7…0,85 $T_{пл}$), а время службы в деталях такого двигателя – от сотен часов форсированного режима в военной авиации и тысяч часов в гражданской авиации до десятков и сотен тысяч часов в стационарных турбинах теплоэлектроэнергетики.

Они отличаются высоким пределом прочности и пределом текучести при комнатной температуре с высокотемпературными свойствами – пределом ползучести и пределом длительной прочности, жаростойкостью, сопротивлением усталости при удовлетворительной технологичности. Жаропрочность составляет σ_{100}^{1000} = 80…120 МПа для деформируемых сплавов и σ_{100}^{1000} = 150…200 МПа для литейных. Из деформируемых жаропрочных никелевых сплавов (ЖНС) производят диски турбин, рабочие и направляющие лопатки, камеры сгорания, крепежные элементы. Литейные сплавы используют для рабочих и сопловых лопаток, цельнолитых роторов в форсированных двигателях. С целью увеличения рабочих температур до 1100 °С и выше разрабатываются дисперсноупрочненные композиционные материалы на никелевой основе, в том числе механически легированные, сплавы на основе интерметаллидов или на основе Cr, Nb и других тугоплавких металлов.

В современных газотурбинных двигателях до 55 %…65 % массы – детали из и до 30 % – из титановых сплавов.

Деформируемые жаропрочные никелевых сплавов под названием нимоники появились в результате легирования нихромов Ti и A1. Чаще используют условные обозначения сплавов, начинающихся с букв «ЭИ», «ЭП» и т. д.

Первый нимоник в Советском Союзе ЭИ437 (ХН77ТЮ, содержащий 2,5 % Ti и 0,75 % A1) до сих пор применяется, как и его модификации с более узкими интервалами по содержанию добавок ЭИ437А и с добавкой бора (до 0,008 %) ЭИ437Б. Эти нимоники пластичные, вязкие, хорошо обрабатываются давлением, но имеют невысокую жаропрочность. Используют их для изготовления рабочих лопаток, колец и других деталей газовых турбин с рабочей температурой до 750 °С.

Первый литейный сплав в советском союзе ЖС3 имел довольно сложный состав – Ni–Cr–Mo–W–Ti–Al. Следующий сплав – ЖС6 – отличался повышенным содержанием легирующих компонентов, но, чтобы сохранить высокий солидус, в нем понижено содержание Cr. Затем был добавлен кобальт – сплав ЖС6К, что повысило пластичность, поэтому в сочетании с улучшенной технологией выплавки сплав с кобальтом используется и как деформируемый под маркой ЖС6КП (П – для прессования). Следующим был разработан сплав ЖС6У. В нем больше W (9 %...11 %) и меньше Mo (1,2 %…2,4 %), в результате повысилась жаропрочность. Самый жаропрочный сплав – ЖС6Ф с добавкой гафния. Он пластичнее, чем ЖС6У, имеет сфероидальную форму карбидов, а первичная γ'-фаза мельче, поэтому в интервале температур 900 °С…1050 °С его характеристики жаропрочности выше, чем у ЖС6У.

Среди зарубежных аналогов никелевых сплавов известны марки Inconel 600, Inconel 625, Inconel 690, Inconel 718, Inconel X-750, Inconel 751, Inconel MA758, Inconel 939. Однако для 3D-печати на данный момент применяют только Inconel 625 и Inconel 718.

Inconel 625 (российский аналог ХН75МБТЮ) входит в группу никель-хромовых сплавов с введением добавок – ниобия и молибдена. Такой сложный конструкционный состав способствует существенному повышению прочности сплава без необходимости его упрочнения термическим способом.

Inconel 625 используется в современном производстве нефтегазовой, химической отрасли, авиа-, судо-, приборостроении, при создании частей реакторов в атомной индустрии.

Nicrofer® 6020 hMo проявляет чрезвычайную коррозийную стойкость против большого количества сред, отличную стойкость против точечной и щелевой коррозии в содержащих хлорид средах, отличную стойкость против вызываемого хлоридами коррозионного растрескивания. Он имеет хорошую стойкость против науглероживания и образования окалины в статичных и переменчивых условиях, пригоден для использования на воздухе до 1000 °С. Его можно сваривать всеми традиционными способами сварки: сварка неплавящимся, плавящимся электродом и др.

Inconel Alloy 718 (российский аналог ХН45МВТЮБР) – жаропрочный высококачественный сплав, был разработан и создан конкретно для эксплуатации при температурных режимах, достигающих 980 °С. Он может быть использован в условиях воздействия разных комбинаций хлоридов, сероводорода с различными концентрациями (но при пределе текучести в 1034 МПа). В современном производстве сплав активно применяют для изготовления частей газовых турбин, элементов и узлов ракетных и авиационных двигателей (компрессор-

ные лопатки), космических аппаратов. Он незаменим при создании атомных реакторов, активно востребован в нефтехимической и газонефтяной отрасли.

Контрольные вопросы

1 Назовите основной легирующий элемент в никеле. Как он влияет на его свойства?
2 Как примеси влияют на свойства никеля и его сплавов?
3 Расскажите про сплав супермаллой.
4 Приведите примеры жаропрочных никелевых сплавов.

Ход работы

1 Получить у преподавателя образцы никелевых сплавов.
2 Выполнить полирование исследуемой поверхности.
3 Провести травление микрошлифов.
4 Изучить структуру металла. Определить форму и размер зерна.

Содержание отчета

1 Цель работы.
2 Основные теоретические положения.
3 Результаты проведения экспериментов.

11 Лабораторная работа № 11. Материалы на основе системы кобальт – хром

Цель работы: изучить химический состав, свойства и области применения материалов на основе системы Co–Cr.

Приборы и материалы: образцы порошковых материалов на основе Co–Cr, микроскоп металлографический, объект-микрометр.

Общие сведения

Кобальт – твердый, вязкий, блестящий голубовато-серый металл. Относится к тяжелым металлам. Плотность равна 8,9 г/см^3, $t_{пл}$ = 1493 °С. Его выпускают в виде слитков, катодных листов, полос, пластин, а также порошка.

К достоинствам кобальта следует отнести высокие значения жаропрочности, износостойкость и твердость, в том числе и при высоких температурах, высокую стойкость к размагничиванию (добавление кобальта в стали позволяет им сохранять магнитные свойства при высоких температурах и вибрациях,

а также увеличивает сопротивление размагничиванию) [1–4, 8]. Единственный недостаток кобальта – его высокая стоимость.

Кобальт в виде порошка используют в основном в качестве добавки к сталям. При этом повышается жаропрочность стали, улучшаются ее механические свойства (твердость и износоустойчивость при повышенных температурах). Данный металл входит в состав твердых сплавов, в которых он является связующим, надежно удерживающим частицы карбидной фазы.

Находит данный металл применение в авиационной и космической промышленности. Сплавы на основе кобальта успешно конкурируют с никелевыми. Их используют в двигателях, где достигается достаточно высокая температура, в конструкциях авиационных турбин.

Важное место среди кобальтовых сплавов занимает система кобальт – хром, сплавы на основе которой массово применяются в медицине при изготовлении зубных и суставных протезов.

Эти сплавы обычно содержат кобальт (55 %…65 %) и хром (до 30 %). Другие основные легирующие элементы – молибден (4 %…5 %) и реже титан (5 %). Кобальт и хром формируют твердый раствор с содержанием хрома до 30 %, что является пределом растворимости хрома в кобальте; избыток хрома образует вторую хрупкую фазу. В целом чем выше содержание хрома, тем устойчивее сплав к коррозии.

Молибден вводят для образования мелкозернистой структуры материала путем создания большего количества центров кристаллизации во время процесса затвердевания. Это имеет дополнительное преимущество, т. к. молибден вместе с железом дают существенное упрочнение твердого раствора. Углерод, присутствующий только в небольших количествах, является чрезвычайно важным компонентом сплава, поскольку незначительные изменения в его количественном содержании могут существенно изменить прочность, твердость и пластичность сплава.

Углерод может сочетаться с любым другим легирующим элементом с образованием карбидов. Тонкий слой карбидов в структуре может значительно повысить прочность и твердость сплава.

Температура литья этих сплавов составляет 1500 °С…1550 °С, а связанная с ней литейная усадка равна примерно 2 %. Эти сплавы склонны к образованию пор при литье. Их трудно полировать обычным механическим способом из-за их высокой твердости.

Модуль упругости Co–Cr сплава равен 250 ГПа. Такой высокий модуль упругости позволяет изготовить протезы с более тонким поперечным сечением, сохраняя при этом необходимую жесткость.

Добавление хрома обеспечивает получение коррозионно-стойких сплавов, которые применяют для изготовления многих имплантатов, включая бедренные и коленные суставы. Сплавы обладают высокой степенью биосовместимости.

CobaltChrome MP1 – это металлический порошок, из которой при помощи металлической 3D-печати производятся детали из высоколегированного сплава кобальта, хрома и молибдена. Применяют в биомедицинской сфере для созда-

ния имплантов, а также в аэрокосмической отрасли, когда детали должны выдерживать очень высокие температуры.

Детали отличаются мелкой равномерной кристаллической зернистостью поверхности. При 3D-печати изделия обладают изотропностью механических свойств. Сплав можно подвергать механической и электроэрозийной обработке, сварке, полировать.

Применение CobaltChrome MP1: биомедицинские импланты, например, коленных, тазовых костей, пальцев, зубные импланты; лопатки турбореактивных и газотурбинных двигателей; изделия с тонкими частями, такими как тонкие стенки, шпильки и т. д., которые требуют особо высокой прочности и жесткости.

Сплав UDIMET L-605 отличается хорошей формоизменяемостью, высокой прочностью до 816 °С и хорошей стойкостью к окислению при температурах до 1093 °С. Сплав также обладает высокой стойкостью к сульфидированию и износостойкостью. Используется для изготовления термостойких элементов авиационных и газовых турбин, гильз двигателя внутреннего сгорания, в промышленных муфельных печах, печах для обжига и сушки, а также для других изделий, которые работают при средних нагрузках в условиях окисления при высоких температурах.

Контрольные вопросы

1 Основные сведения о кобальте.
2 Какими основными свойствами обладает кобальт?
3 Какие легирующие элементы и зачем добавляют в кобальтовые сплавы?
4 Какими свойствами обладает сплав CobaltChrome MP1?
5 Дайте характеристику сплаву UDIMET L-605.

Ход работы

1 Получить у преподавателя образцы порошков на основе системы Co–Cr.
2 Используя микроскоп, установить форму и размер частиц порошков.
3 Описать полученные снимки.

Содержание отчета

1 Цель работы.
2 Основные теоретические положения.
3 Результаты проведения экспериментов.

12 Лабораторная работа № 12. Высокохромистые нержавеющие стали ферритного и мартенситного классов

Цель работы: ознакомиться с составом, термической обработкой, структурой и свойствами высокохромистых сплавов.

Оборудование и материалы: образцы высоколегированных сталей, лабораторная печь, закалочная ванна, микроскоп металлографический, реактивы для травления микрошлифов, твердомер по методу Бринелля и Роквелла.

Общие сведения

Хром является основным легирующим элементом для получения сталей с особыми химическими свойствами, т. к. под влиянием хрома повышается устойчивость стали против окисления и разъедания различными химическими веществами [1–4].

Хром легко пассивируется. В первые моменты окисления на его поверхности образуется тончайшая прозрачная плотная пленка окислов, котроя изолирует металл от коррозионной среды и предохраняет его от дальнейшего химического разрушения. При окислении стали, содержащей более 13 % Cr, на ее поверхности вместо рыхлой пленки окисла железа появляется «плотная» – пассивная пленка окислов хрома. Такая сталь получила название «нержавеющей». Хромистые нержавеющие стали, содержащие 0,1 %…1,0 % C и более 13 % Cr (таблица 12.1), не поддаются коррозии при воздействии влажного воздуха, воды, некоторых кислот, щелочей и многих других реагентов. Однако, находясь в таких кислотах, как фтористая, соляная и тому подобных, эти стали реагируют со средой как обычные углеродистые стали.

Таблица 12.1 – Химический состав хромистых нержавеющих сталей

Марка стали	Массовая доля элементов, %				
	C	Si	Mn	Cr	Ni
08Х13	0,08	0,6	0,6	11…13	0,6
40Х13	0,35…0,44	0,6	0,6	12…14	0,6
95Х18	0,90…1,0	0,9…1	0,6	17…19	0,6

Структура и свойства сталей зависят от содержания углерода и хрома. Стали с низким содержанием углерода (менее 0,1 %) и повышенным содержанием хрома (более 15 %) являются ферритными и не закаливаются. Стали с меньшим количеством хрома и таким же содержанием углерода попадают при нагреве в аустенитную область, а при охлаждении претерпевают $\gamma \rightarrow \alpha$-превращение с образованием мартенсита.

Хромистые стали отличаются повышенной прокаливаемостью. Полную способность к закалке стали приобретают только после нагрева до более высо-

ких температур, что связано с медленным растворением карбидов хрома при высоких температурах.

Нагрев до температур выше 900 °С вызывает более быстрое и полное растворение карбидов в твердом растворе, и при закалке получают сталь высокой твердости.

Структура стали после закалки на воздухе или в масле полностью мартенситная, твердость и прочность этих сталей увеличивается с повышением содержания углерода. Однако при высоком содержании углерода в структуре стали после закалки могут присутствовать карбиды.

Образцы после закалки рекомендуют сразу подвергать отпуску. Низкотемпературный отпуск способствует снятию внутренних напряжений. Повышение температуры отпуска может принести к снижению твердости (особенно при температуре 500 °С…550 °С) и падению ударной вязкости, а также ухудшению коррозионной стойкости. Отпуск в интервале температур 400 °С…600 °С и 450 °С…550 °С не рекомендуется.

Сталь марки 20Х13 применяется для деталей, подвергающихся ударным нагрузкам, от которых требуется повышенная пластичность (лопатки паровых турбин, клапаны гидравлических прессов, арматура крекинг-установок, работающих при повышенных температурах) [8, 9]. Для данной стали применяют термическую обработку, состоящую из закалки при температуре 1000 °С…1020 °С на воздухе или в масле и высокого отпуска (температуре 720 °С…750 °С с охлаждением на воздухе).

Стали марок 30Х13 и 40Х13 обладают свойствами, близкими к инструментальным сталям, и их применяют в тех случаях, когда от материала требуется высокая твердость и коррозионная стойкость (режущий и хирургический инструмент, пружины, шариковые подшипники).

Сталь марки 30Х13 используют для валов, крекинг-насосов, пружин, болтов, гаек и других деталей, работающих до температуры 400 °С…450 °С в условиях высоких напряжений и агрессивной среды.

Из сталей марок 40Х13 и 95Х18 изготовляют пружины, подшипники, режущий и мерительный инструмент.

StainlessSteel GP1 – это легированная нержавеющая сталь в виде порошка. Используют для прототипов, мелких серий изделий, изготовления изделий с высокой устойчивостью к коррозии, изготовления деталей с повышенной жесткостью и пластичностью и т. д.

Нержавеющая сталь StainlessSteel PH1 характеризуется хорошей коррозионной стойкостью и отличными механическими характеристиками. Более того, путем дополнительной термической обработки достигается еще более высокая прочность (термическое старение при 1038 °С). Материал находит применение в медицине, самолетостроении, прототипировании деталей.

Контрольные вопросы

1 Какие стали называются нержавеющими?

2 Почему сталь становится нержавеющей?

3 Охарактеризуйте стали StainlessSteel PH1и StainlessSteel GP1.

4 Какая термическая обработка применяется для сталей мартенситного класса?

Ход работы

1 Определить режим термической обработки для стали 40Х13 (вид термической обработки, охлаждающую среду, температуру, время выдержки).

2 Выбрать режим и провести закалку стали 40Х13.

3 Изучить структуру стали под микроскопом.

4 Измерить твердость стали по методу Роквелла.

5 Изучить влияние температуры отпуска (200, 500 и 700 °С) на твердость стали.

Содержание отчета

1 Цель работы.

2 Основные теоретические положения.

3 Результаты проведения экспериментов.

13 Лабораторная работа № 13. Высокохромистые нержавеющие стали аустенитного класса

Цель работы: ознакомиться с составом, термической обработкой, структурой и свойствами высокохромистых сталей аустенитного класса.

Оборудование и материалы: образцы высоколегированных сталей, полученные плазменной наплавкой на оборудовании Castolin Eutectic, лабораторная печь, закалочная ванна, микроскоп металлографический, реактивы для травления микрошлифов, твердомер по методу Роквелла.

Общие сведения

Хромоникелевые нержавеющие стали относятся преимущественно к аустенитному классу. Основные легирующие элементы, придающие хромоникелевой стали коррозионную стойкость в окислительных средах, – это Cr (хром) и Ni (никель). Хром способствует образованию на поверхности нержавеющей стали защитной плотной пассивной пленки окисла Cr_2O_3. Необходимая для придания коррозионной стойкости нержавеющей стали концентрация хрома в сталях этой группы составляет 18 %.

Благодаря аустенитной структуре хромоникелевые нержавеющие стали отличаются высокой технологичностью при горячей и холодной деформациях и стойкостью при низких температурах.

Широкое распространение получили марки хромоникелевых нержавеющих сталей 00Х18Н10, 04Х18Н10, 12Х18Н10Т, 08Х18Н10Т (ЭИ914), 08Х18Н10, 12Х18Н9Т, 03Х18Н11,12Х18Н12Т, 08Х18Н12Б (ЭИ402), 02Х18Н11, 03Х19АГ3Н10 – они содержат около 18 % Cr, 8 %…10 % Ni и различаются содержанием С (≤ 0,04 %, ≤ 0,08 %, ≤ 0,12 % и ≤ 0,13 %…0,21 % соответственно). Для предохранения от интеркристаллитной коррозии в хромоникелевые стали также вводят Ti (04Х18Н10Т, 08Х18Н10Т, 04Х18Н9Т, 12Х18Н9Т, 17Х18Н9Т и т. д.) [1–4, 8, 9].

Эти нержавеющие стали обладают коррозионной стойкостью во многих окисляющих средах при различной концентрации и в широком диапазоне температур. Они также обладают жаростойкостью и жаропрочностью, но при умеренных температурах.

Термическая обработка этих сталей заключается в закалке с 1050 °С…1150 °С в воде для получения однородной структуры аустенита. Их существенное упрочнение может быть получено холодной пластической деформацией.

При некотором уменьшении содержания Cr и Ni получаются аустенитно-ферритная или аустенитно-мартенситная структуры. Аустенитно-ферритные стали могут дополнительно легироваться Mo (08Х21Н6М2Т), аустенитно-мартенситные – Al (09Х15Н9Ю, 09Х17Н7Ю, 09Х17Н7Ю).

Назначение нержавеющих сталей зависит от характера агрессивной среды, которой определяется степень легированности.

Кислостойкие стали и сплавы.

Аппараты, установки и машины работают в агрессивных кислотных средах, чаще в серной, соляной и азотной или фосфорной кислотах и их смесях при разной концентрации и температурах. Для эксплуатации в этих средах следует применять кислотостойкие стали и сплавы.

Увеличение стойкости в кислотах дает введение в аустенитные стали Mo и особенно Mo с Cu при одновременном увеличении Ni – стали типа Cr-Ni-Mo (10Х17Н13М2Т, 10Х17Н13М3Т, 10Х17Н13М2Т, 10Х17Н13М3Т) и типа Cr-Ni-Mo-Cu (06Х23Н28М3Д3Т, 06Х23Н28М3Д3Т).

При необходимости одновременно иметь высокую кислостойкость и высокие механические свойства рекомендуется к применению сплав Cr-Ni-Mo-Cu-Ti-Al. Последние два элемента вызывают интерметаллидное упрочнение.

Более высокую коррозионную стойкость имеют никелевые сплавы, так называемый Хастеллой типа 80 % Ni + 20 % Mo с дополнительным легированием.

Для улучшения коррозионной стойкости сталей необходимо в первую очередь стабилизировать ее карбиды. Если карбиды будут стойкими, т. е. в меньшей степени будут растворяться и выделяться из раствора в процессе термической обработки, то тем самым будет стабилизирован весь состав стали, т. к. обеднение твердого раствора хромом происходит главным образом за счет образования его карбидов. Кроме этого, стабильные карбиды будут располагаться по всему объему зерна, а не только по границам. С этой целью сталь дополнительно легируют ниобием, титаном, вольфрамом. Промышленность выпускает кислостойкую сталь 12Х18Н10Т с добавлением 0,5 %…0,7 % титана.

Титан образует инертные карбиды, располагающиеся по всему объему зерна и мало влияющие на механические свойства стали. Стойкость против межкристаллитной коррозии значительно повышается. Остаточный титан входит в твердый раствор и упрочняет его.

При больших содержаниях титана (более 3 %) в аустенитных нержавеющих сталях после закалки и отпуска при 500 °С эффект дисперсионного твердения увеличивается и твердость стали достигает более 500 НВ, что дает возможность использовать ее для режущего инструмента, например, хирургического.

В области аддитивных технологий получили распространение следующие стали аустенитного класса.

EOS MaragingSteel MS1 – это легированная высокопрочная сталь в виде порошка. Она обладает хорошими механическими свойствами и поддается упрочнению при помощи старения. Этот материал применяют для изготовления инструментальной оснастки. Например, для литья под давлением, литья из легких металлических сплавов, штамповки, экструзии и т. д. Она также подходит для создания изделий с высокими прочностными характеристиками, например, для аэрокосмической промышленности и других изделий, работающих при температурах до 400 °С. Детали легко поддаются механической обработке, их прочность может быть увеличена путем упрочнения при старении в течение 6 ч при температуре 490 °С.

StainlessSteel 316L (российский аналог 03Х16Н15М3) применяется в автотранспортной и отраслевой промышленности, аэрокосмической промышленности, при создании турбин. Изделия, выращенные при помощи 3D-печати из материала StainlessSteel 316L, могут подвергаться всем видам финишной обработки.

Контрольные вопросы

1 Какие из коррозионно-стойких сталей относятся к сталям аустенитного класса?

2 Дайте характеристику сталям MaragingSteel MS1 StainlessSteel 316L?

3 В чем сущность термообработки для сталей аустенитного класса?

4 Расскажите о кислотостойких сталях и сплавах.

Ход работы

1 Определить режим термической обработки для стали 12Х18Н10Т.

2 Провести термическую обработку по выбранному режиму.

3 Сделать шлифы и изучить структуру стали под микроскопом.

4 Замерить твердость образцов до и после термической обработки.

Содержание отчета

1 Цель работы.

2 Основные теоретические положения.

3 Результаты проведения экспериментов.

14 Лабораторная работа № 14. Медь и ее сплавы

Цель работы: изучить микроструктуру и свойства сплавов на основе меди.

Оборудование и материалы: образцы медных сплавов, микроскоп металлографический, реактивы для травления микрошлифов, твердомер по методу Бринелля.

Общие сведения

Медь имеет удельный вес 8,9 г/см^3, температуру плавления 1083 °С. Она обладает высокой теплопроводностью, электропроводностью, пластичностью в горячем и холодном состояниях и широко применяется в различных областях техники. Медь – немагнитный металл. Она хорошо обрабатывается давлением, резанием, легко полируется, хорошо паяется и сваривается, имеет высокую коррозионную стойкость. Основная область применения – электротехническая промышленность. Кроме того, медь является основой важнейших сплавов – латуней и бронз [1–4].

Для маркировки медных сплавов используют следующее буквенное обозначение легирующих элементов: О – олово; Ц – цинк; Х – хром; Ж – железо; Н – никель; С – свинец; К – кремний; А – алюминий; Ф – фосфор; Мц – марганец; Мг – магний; Б – бериллий.

Сплавы меди с цинком (латуни).

По структуре латуни делятся на две группы:

– сплавы с содержанием цинка до 39 % (Л96…Л75) являются однофазными со структурой твердого раствора цинка и меди (α);

– сплавы с содержанием цинка более 39 % (Л60, Л55) имеют двухфазную структуру ($\alpha+\beta$); β-твердый раствор на базе соединения CuZn с электронным типом связи имеет кубическую объемно-центрированную решетку.

Максимальной пластичностью обладают материалы со структурой однофазного твердого раствора. Переход через границу однофазной области (39 % Zn) приводит к резкому снижению пластичности, повышению прочностных и литейных свойств. Максимальной прочностью обладает β-латунь при содержании цинка 45 %.

Из однофазных латуней изготовляют листы, ленты, профили. Причем для прокатки в холодном состоянии применяют латуни с содержанием цинка до 30 % (α-латуни), а для прокатки в горячем состоянии наиболее пригодны латуни со структурой $\alpha + \beta$ (при нагреве α-фаза растворяется и во время горячей обработки давлением их структура состоит из одной β-фазы).

Алюминиевые латуни используют для изготовления конденсаторных трубок, цистерн, втулок, а также коррозионно-стойких деталей, работающих в морской воде. Марки латуней: ЛА77-2, ЛАЖ60-1-1, ЛАН59-3-2 (в электрических машинах, в химическом машиностроении).

Марганцевые латуни, кроме хороших механических и технологических свойств, обладают высокой коррозионной стойкостью в морской воде, хлоридах и перегретом паре. Латуни ЛМц 58-2 и ЛМцА 57-3-1 применяются в основном для изготовления крепежных изделий арматуры.

Кремнистые латуни характеризуются высокой прочностью ($s_в$ до 640 МПа), пластичностью и вязкостью до минус 183 °С. Латунь ЛК80-3 применяют для изготовления арматуры, деталей приборов в судостроении и общем машиностроении.

Свинцовистые латуни отлично обрабатываются резанием и обладают высокими антифрикционными свойствами. Латуни ЛС60-1, ЛС59-1 применяют для изготовления крепежных деталей, зубчатых колес, втулок.

Никелевая латунь обладает повышенными механическими ($\upsilon_в$ до 780 МПа) и коррозионными свойствами, обрабатывается давлением в холодном и горячем состоянии. Латунь ЛН65-5 применяется для изготовления манометрических и конденсаторных трубок, различного вида проката.

Литейные латуни содержат те же элементы, что и латуни, обрабатываемые давлением; от последних литейные отличает, как правило, большее легирование цинком и другими металлами. Вследствие этого они обладают хорошими литейными характеристиками.

Бронзы. Бронзами называются сплавы меди с другими элементами (за исключением цинка). В зависимости от основного легирующего элемента бронзы разделяются на оловянистые, алюминиевые, бериллиевые, марганцовистые и т. д. Марки бронз начинаются с букв Бр. Далее следуют буквы, показывающие наличие определенных легирующих элементов, и цифры, указывающие их содержание.

Оловянные бронзы. Наибольшее практическое значение имеют сплавы, содержащие до 10 %…12 % Sn. Оловянные бронзы обычно легируют Zn, Pb, Ni, P. Для увеличения пластичности проводится гомогенизация сплавов при температурах 700 °С…750 °С с с быстрым охлаждением.

Оловянные деформируемые бронзы Бр0Ф7-0.2, БрОЦС4-4-4, БрОЦ4-3 и другие имеют более высокую прочность, упругость, сопротивление усталости, чем литейные. Их используют для изготовления подшипников скольжения, шестерен, трубок контрольно – измерительных и других приборов, манометрических пружин и т. д.

Литейные оловянные бронзы. По сравнению с деформируемыми содержат большее количество легирующих элементов, имеют малую линейную усадку. Бронзы БрО3Ц7С5Н, БрО10Ф1, БрО6Ц6С3, БрО5С25 и другие применяются для изготовления арматуры, работающей в воде и водяном паре, подшипников, шестерен, втулок.

Алюминиевые бронзы отличаются высокими механическими антикоррозионными свойствами, жидкотекучестью, малой склонностью к дендритной ликвации. Они морозостойки, немагнитны, не дают искры при ударах. По коррозионной стойкости превосходят латуни и оловянистые бронзы.

Однофазные бронзы БрА5, БрА7 имеют хорошую пластичность и относятся к деформируемым. Обладают наилучшим сочетанием прочности и пластичности: $s_в$ = 400…450 МПа; d = 60 %.

Двухфазные бронзы имеют повышенную прочность до 600 МПа, но пластичность заметно ниже. Эти сплавы упрочняются термообработкой и дополнительно легируются Fe, Ni, Mn.

Железо измельчает зерно и повышает механические и антифрикционные свойства алюминиевых бронз. Никель улучшает механические свойства и износостойкость, температуру рекристаллизации и коррозионную стойкость. Марганец повышает технологические и коррозионные свойства.

Бронзы БрАЖН10-4-4, БрАЖМц10-3-1-5 и другие применяются для изготовления зубчатых колес, деталей турбин, седел клапанов и других деталей, работающих в тяжелых условиях износа при повышенных температурах до 400 °С, корпусов насосов, клапанных коробок и др.

Закалка проводится с температуры 950 °С, после чего бронзы подвергают старению при 250 °С…300 °С в течение 2…3 ч.

Кремнистые бронзы применяются в качестве заменителей оловянистых бронз. Их используют для деталей, работающих до 500 °С, а также в агрессивных средах (пресная, морская вода). Бронзы БрКН1-3, БрКМц3-1 применяют для изготовления пружин, антифрикционных деталей, испарителей и др.

Бериллиевые бронзы. Содержат 2 %…2,5 % Be. Эти сплавы упрочняются термической обработкой. Закалка проводится при 760 °С…800 °С в воде и старение при 300 °С в течение 3 ч. Сплав упрочняется за счет выделения дисперсных частиц γ-фазы $CuBe_{II}$, что приводит к резкому повышению прочности до 1250 МПа. Бронзы БрБ2, БрБНТ1,9 и БрБНТ1,7 имеют высокую упругость, коррозионную стойкость, жаропрочность, немагнитны, искробезопасны (искра не образуется при размыкании электрических контактов). Применяются для изготовления мембран, пружин, электрических контактов.

Свинцовые бронзы. Обладают высокими антифрикционными свойствами. Бронза БрС30 применяется для изготовления вкладышей подшипников скольжения, работающих при повышенных давлениях и с большими скоростями.

Существенным недостатком использования материалов на основе меди в АТ является высокая теплопроводность и теплоемкость меди, что требует более мощных источников тепла по сравнению с другими материалами. В связи с этим зачастую исследования проводятся на медных сплавах и композициях, отличающихся более низкой температурой плавления. В этом отношении большое внимание уделяется оловянистой бронзе. Микроструктура таких сплавов отличается меньшим размером зерна по сравнению с литой бронзой. Материалы имеют гомогенную структуру, олово почти полностью растворяется в матрице, а размер зерна α-фазы меди составляет около 5 мкм.

Контрольные вопросы

1 Назовите основные типы сплавов на основе меди.

2 На какие группы по структуре подразделяются латуни?

3 Укажите область применения медно-никелевых сплавов.

4 Изложите особенности сплава БрБ2.
5 Какими свойствами обладают алюминиевые бронзы?

Ход работы

1 Получить у преподавателя микрошлифы медных сплавов.
2 Изучить микроструктуру сплавов, измерить их твердость

Содержание отчета

1 Цель работы.
2 Виды медных сплавов, их свойства, маркировка.
3 Изучить и зарисовать микроструктуры предложенных медных сплавов.

15 Лабораторная работа № 15. Инструментальные материалы на основе твердых сплавов

Цель работы: изучить маркировку, свойства и область применения композиционных материалов на основе твердых сплавов.

Оборудование и материалы: образцы твердых сплавов, металлографический микроскоп

Общие сведения

Твердые (металлокерамические) сплавы – это инструментальные сплавы, относящиеся к композиционным материалам. В качестве матрицы (основы) в этих материалах выступают мелкодисперсные частицы карбидов вольфрама, титана и тантала, которые удерживаются между собой связующим металлом, в качестве которого, как правило, выступает кобальт.

Различают три основные группы твердых сплавов: однокарбидные, или вольфрамокобальтовые (группа ВК), длительное время называемые «победитами», двухкарбидные (группа ТК), или титано-вольфрамовые, и трехкарбидные, или вольфрамотитанотанталокобальтовые (группаТТК) [1–3]. Карбиды, т. е. химические соединения с углеродом WC, TiC, TaC, придают твердость, износо- и теплостойкость сплаву, но повышают хрупкость, а кобальт уменьшает твердость, износостойкость и допускаемую температуру резания, однако делает сплав более прочным и противостоящим ударным нагрузкам. Твердость этих сплавов выше твердости быстрорежущей стали на 11 %…12 % и составляет 87…92 HRA. Теплостойкость однокарбидных сплавов равна 900 °С…927 °С, двухкарбидных – 1000 °С…1027 ºС, трехкарбидных – 750 °С. Кратковременно двухкарбидные сплавы могут работать при нагреве до 1250 °С и обрабатывать даже закаленные стали.

Предел прочности при сжатии у твердых сплавов примерно того же уровня, что и у быстрорежущей стали, но на изгиб они работают хуже в 1,5–2 раза.

Наиболее распространенными марками твердых сплавов **группы ВК** являются ВК3, ВК3М, ВК4, ВК4В, ВК6, ВК6-ОМ, ВК6М, ВК6В, ВК8, ВК8В, ВК8К, ВК10, ВК10М, ВК10-ОМ.

Сплав ВК3 содержит 3 % Co и 97 % карбидов вольфрама (WC). Индексы в конце марок сплавов указывают на зернистость порошков вольфрама: В – крупнозернистые с величиной зерна 3…5 мкм; М – мелкозернистые (1,5 мкм); ОМ – особомелкозернистые (менее 1 мкм); при отсутствии индекса – 1…2 мкм.

Эта группа обладает значительной вязкостью и высокой износостойкостью. Сплавы с малым содержанием кобальта ВК2 и ВК3, ВК3М предназначены для чистовых работ, ВК6, ВК8 – для черновых работ при переменных нагрузках, мелкозернистые сплавы ВК3М, ВК6М – для обработки хрупких материалов значительной твердости (отбеленных чугунов, бронзы, стекла, фарфора), т. к. хорошо точатся и имеют острую кромку.

Сплавы **группы ТК** характеризуются меньшим сопротивлением изгибу, но высокой износостойкостью. При понижении в твердом сплаве содержания карбидов титана и повышении в нем кобальта снижается твердость инструментального материала, но возрастает сопротивление изгибу ($\sigma_и$).

Сплавы группы ТК имеют низкую теплопроводность. Это приводит к образованию трещин при быстром нагреве.

Сплавы **группы ТТК** по своим физико-механическим свойствам являются промежуточными между вольфрамовыми и титановольфрамовыми сплавами. Они имеют более высокую прочность и вязкость, чем сплавы группы ТК, но уступают им по твердости и теплостойкости.

Нашли применение следующие марки твердого сплава группы ТТК: ТТ8К6, ТТ21К9 и ТТ20К9А. Стойкость сплава ТТ8К6 в 2–2,5 раза выше стойкости сплава ВК6М при чистовой и получистовой обработке легированных сталей. Теплостойкость сплавов группы ТТК составляет 800 °С.

Безфольфрамовые твердые сплавы (БВТС) – это сплавы на основе карбида (TiC) и карбонитрида (TiN) титана, связанных никелемолибденовой связкой (Ni + Mo). Они по сравнению с вольфрамовыми сплавами имеют меньшую прочность на изгиб, но отличаются повышенной температуростойкостью (до 1000 °С). Износостойкость БВТС в 1,2–1,5 раза выше износостойкости сплавов группы ТК.

Минералокерамические материалы (ГОСТ 26630–85) обладают высокой твердостью (92…94 HRA) и теплостойкостью (1100 °С…1400 °С), а также износостойкостью. Они делятся на два основных вида: оксидную белую керамику, содержащую до 99,7 % окиси алюминия (Al_2O_3) и оксидно-карбидную черную керамику, состоящую из окиси алюминия и одинарного карбида титана (Al_2O_3+TiC) или сложных карбидов титана, вольфрама, молибдена (до 40 %).

Стойкость инструмента с минералокерамикой в 5–10 раз выше стойкости инструмента, оснащенного сплавами групп ВК и ТК, при увеличении производительности в 2 раза.

Контрольные вопросы

1 На какие группы подразделяются твердые сплавы?

2 Дайте характеристику однокарбидным и двухкарбидным сплавам.

3 Перечислите достоинства и область применения безвольфрамовых твердых сплавов.

Ход работы

1 Ознакомиться с химическим составом, свойствами и применением твердых сплавов.

2 Изучить микроструктуру твердых сплавов.

3 Зарисовать полученные микроструктуры.

4 Оформить отчет с описанием фаз, присутствующих в микроструктурах твердых сплавов.

Содержание отчета

1 Цель работы.

2 Основные теоретические положения.

3 Результаты проведения экспериментов.

16 Лабораторная работа № 16. Инструментальные стали

Цель работы: изучить маркировку, свойства и область применения основных групп инструментальных сталей.

Оборудование и материалы: образцы инструментальных сталей, металлографический микроскоп.

Основные сведения

Легированные инструментальные стали. Они содержат один или несколько специальных легирующих элементов: хром (Х), вольфрам (В), ванадий (Ф), молибден (М), кремний (С), марганец (Г).

Быстрорежущие стали. Количество вольфрама, который входит в состав многих марок быстрорежущих сталей, колеблется от 5,5 % до 19,5 %, углерода – от 0,6 % до 1,55 %, хрома – от 3,0 % до 4,6 %.

Вольфрам, взаимодействуя с углеродом, образует карбиды вольфрама, благодаря этому сталь приобретает высокую твердость, температуростойкость и износостойкость, при этом теплопроводность стали несколько уменьшается.

Хром – обязательный легирующий элемент быстрорежущей стали, обеспечивает повышенную ее закаливаемость и прокаливаемость. Его количество во

всех вольфрамсодержащих быстрорежущих сталях содержится около 4 %, поэтому он не отображается в маркировке стали.

Ванадий повышает твердость, сопротивление пластической деформации и теплостойкость. В процессе термообработки ванадий способствует образованию мелкозернистой мартенситной структуры и несколько снижает хрупкость.

Молибден повышает прочность и вязкость быстрорежущей стали, что позволяет уменьшить содержание в ней дефицитного вольфрама (1 % W = 1,5 % Mo).

Кобальт повышает теплостойкость, твердость, шлифуемость и теплопроводность быстрорежущей стали, снижая прочность и вязкость.

Наиболее распространенные получилибыстрорежущие стали – Р6М5, Р6М5К5, Р9, Р12, Р18, Р8М3, Р9Ф5, Р12Ф3, Р14Ф4, Р18Ф2 и др. [1–4, 9].

Порошковые быстрорежущие стали характеризуются повышенной шлифуемостью и пластичностью при холодной и горячей деформации, обладают повышенной (на 500…700 МПа) прочностью при изгибе и в 1,5–2,5 раза более высокой стойкостью по сравнению с быстрорежущими сталями аналогичного состава обычного производства. Высокая прочность сталей при изгибе позволяет работать на повышенных подачах с сохранением заданных характеристик.

Порошковые быстрорежущие стали Р6М5Ф3-МП, Р6М5К5-МП, Р6М5Ф2К8-МП и 13Р6М5Ф3-МП при обработке труднообрабатываемых материалов обеспечивают по сравнению со сталями обычного производства аналогичного состава повышение стойкости до 4 раз, хорошо подаются шлифованию.

В настоящее время в области аддитивного производства используют следующие сплавы.

Сталь 4Х5МФС применяется для производства поковок, различных деталей общего машиностроения; пресс-форм для литья под давлением алюминиевых, а также цинковых и магниевых сплавов; мелких молотовых штампов; крупных (толщиной или диаметром более 200 мм) молотовых и прессовых вставок при горячем деформировании конструкционных сталей и цветных сплавов в условиях крупносерийного массового производства.

Стали 4Х5М3Ф, 3Х3М3Ф. Повышенное содержание молибдена приводит к увеличению её вязкости и повышения прокаливаемости, но снижает окалиностойкость. Из этих сплавов изготовляют инструмент, подвергающийся в процессе работы интенсивному охлаждению (как правило, для мелкого инструмента), пресс-формы литья под давлением медных сплавов, ножи для горячей резки, охлаждаемые водой.

Стали 5ХНВ, 5ХНМ применяются для изготовления поковок деталей общего машиностроения, молотовых штампов паровоздушных и пневматических молотов массой падающих частей свыше 3 т, прессовых штампов и штампов машинной скоростной штамповки при горячем деформировании легких цветных сплавов, блоков матриц для вставок горизонтальных ковочных машин.

Контрольные вопросы

1 Перечислите основные легирующие компоненты в инструментальных сталях и их влияние на свойства материалов.

2 В чем особенность быстрорежущих сталей?
3 Какие стали изготовляются методами порошковой металлургии?

Ход работы

1 Ознакомиться с химическим составом, свойствами, термической обработкой и применением инструментальных сплавов.
2 Изучить структуру образцов инструментальных сталей.
3 Зарисовать полученные микроструктуры.
4 Оформить отчет с описанием микроструктуры сталей

Содержание отчета

1 Цель работы.
2 Основные теоретические положения.
3 Изображения микроструктуры инструментальных сталей.

17 Лабораторная работа № 17. Исследование свойств керамических материалов

Цель работы: изучить состав, свойства и области применения различных видов керамических материалов.

Приборы и материалы: набор образцов керамических порошковых материалов, оптический микроскоп.

Общие сведения

Под керамикой понимаются поликристаллические материалы, получаемые спеканием неметаллических порошков природного или искусственного происхождения. Керамические материалы отличаются высокой коррозионной стойкостью и устойчивостью к радиационному воздействию, биологической совместимостью, возможностью регулирования свойств материала в широких пределах за счет изменения структуры, низкой плотностью. Они перспективны для инструментов, деталей двигателей внутреннего сгорания, фильтров, мембран с различной пропускной способностью, элементов искусственных органов, износостойких покрытий, нагревательных элементов, элементов источников питания и др. Однако керамике присущ и ряд существенных недостатков: чувствительность к термоударам (особенно переохлаждению), хрупкость, низкое временное сопротивление, сложность механической обработки.

По составу керамику можно подразделить на кислородную, состоящую из оксидов металлов и неметаллических элементов (бериллия, магния, алюминия, кремния, титана, циркония), и бескислородную – нитридную, карбидную, боридную и др. [5].

По структуре она может быть аморфная, кристаллическая или представлять собой композиционный материал с различными армирующими элементами, например, волокнами.

В промышленности широкое распространение получили материалы на основе оксидной керамики.

Керамические материалы на основе оксида алюминия (корундовая керамика). Основой является оксид алюминия α-$A1_2O_3$. Название получила благодаря природному минералу корунду. Условно принято называть керамику корундовой, если она содержит 95 % и более $A1_2O_3$.

Твердость корунда по шкале Мооса – 9, по шкале А Роквелла – около 90. Плотность корунда в зависимости от наличия в нем примесей колеблется от 3,98 до 4,01 г/см^3. Температура плавления α- $A1_2O_3$ составляет 2050 °С, температура кипения 2707 °С.

Второй кристаллической модификацией глинозема является его γ-форма. При нагревании γ-$A1_2O_3$ переходит необратимо в α-форму. Переход из γ в α-форму сопровождается объемным сжатием на 14,3 %.

Третья кристаллическая форма оксида алюминия – β-глинозем. Она содержит до 8 %…10 % щелочных и щелочно-земельных оксидов.

Одна из общих особенностей оксидной керамики – сохранение достаточно высоких прочностных свойств при нагреве до температур, составляющих примерно 0,8…0,9 температуры ее плавления.

Корунд отличается исключительно высокой химической стойкостью как в отношении кислых, так и щелочных реагентов. При нормальной температуре на него практически не действует плавиковая кислота. Корунд устойчив к действию большинства даже щелочных металлов при температуре их плавления. Электрофизические свойства позволяют использовать его в радиоэлектронной и электровакуумной технике для изготовления многих видов изделий.

Керамические материалы на основе оксида циркония (циркониевая керамика). В производстве технической керамики применяют только искусственный ZrO_2. Сырьем для его получения служат природные цирконийсодержащие минералы. Всем им сопутствует трудноотделяемая примесь HfO_2, являющаяся химическим аналогом ZrO_2.

Промышленность выпускает ZrO_2 трех видов:

1) технический диоксид циркония, содержание ZrO_2 (вместе с HfO_2) не менее 97,5 %;

2) чистый диоксид циркония, содержание основного вещества 99,5 % (включая 1,5 %…2 % HfO_2);

3) особо чистый диоксид циркония (очищенный от гафния), содержание ZrO_2 – 99,5 %.

Основными примесями, кроме HfO_2, являются SiO_2, Fe_2O_3, CaO, MgO, P_2O_5. От чистоты ZrO_2 в значительной мере зависят свойства изготовляемых изделий.

Диоксид циркония обладает большой химической инертностью по отношению к кислотам и щелочам, а также к расплавам щелочей, стекол и к расплавленным металлам. Исключение составляют H_2SO_4 и HF, с которыми ZrO_2

взаимодействует.

Диоксид циркония обладает полиморфизмом. ZrO_2 существует в трех модификациях – моноклинной, тетрагональной и кубической. Моноклинная модификация, устойчивая при низких температурах, при нагреве до температуры около 1200 °С переходит в тетрагональную форму, устойчивую лишь при высоких температурах. Этот переход сопровождается объемным сжатием на 7,7 %. При охлаждении до температуры ниже 1000 °С происходит обратный переход в моноклинную модификацию, а также, соответственно, увеличение объема и снижение плотности.

Диоксид циркония широко используют с целью изготовления тиглей для плавки платины, титана, родия, палладия, рутения, металлического циркония и др.

Стабилизированный диоксид циркония успешно применяют для высокотемпературной (до 2500 °С) теплоизоляции. Его используют для защиты от коррозии и эрозии деталей ракетных и реактивных двигателей. Некоторое применение ZrO_2 нашел в атомном реакторостроении. Свойство ZrO_2 сохранять большую прочность при высоких температурах позволяет применять его как конструкционный материал.

Циркониевая керамика является одним из наиболее перспективных керамических материалов конструкционного и инструментального назначения и используется в технологии получения деталей газотурбинных и дизельных двигателей, узлов трения, уплотнительных колец насосов, элементов запорной арматуры, форсунок распылительных камер, фильер для протяжки проволоки, режущего инструмента. Также керамика на основе ZrO_2 находит применение в медицине для изготовления имплантантов в костные ткани.

Бескислородная керамика представляет собой соединения металлов с углеродом – карбиды, с бором – бориды, с азотом – нитриды, с кремнием – силициды.

Наибольшее применение получила керамика из карбида кремния SiC (карборунд). В качестве инструментального материала карборунд применяется для изготовления абразивных инструментов (шлифовальных кругов, брусков и др.). Теплостойкость карбидов кремния составляет 1300 °С …1400 °С.

Бориды обладают высокой твердостью, износостойкостью, стойкостью к окислению и высокой электропроводностью. Керамику из боридов TiB_2, ZrB_2 используют в качестве покрытий, повышающих твердость, химическую стойкость и износостойкость изделий.

Нитриды имеют низкую электропроводность, более низкую твердость и прочность, чем карбиды и бориды. Нитрид бора α-BN с гексагональной графитоподобной структурой («белый графит») является хорошим диэлектриком при 1800 °С в бескислородной среде.

Нитрид бора β-BN с кубической структурой (эльбор), по твердости близкий к алмазу, широко применяется в качестве инструментального материала. На основе кубического нитрида бора получают композиционные сверхтвердые материалы.

Силициды отличаются окалиностойкостью и стойкостью к действию кислот и щелочей. Из керамики на основе дисилицида молибдена ($MoSi_2$) изготовляют лопатки газовых турбин.

Контрольные вопросы

1 Какими достоинствами и недостатками обладает керамика перед иными материалами?

2 Что такое корундовая керамика и где она применяется?

3 Какие виды циркониевой керамики выпускает промышленность и какие изделия из нее изготовляют?

4 Перечислите свойства кардибной, боридной, нитридной и силицидной керамики.

Ход работы

1 Ознакомиться с химическим составом, свойствами, применяемых керамических материалов.

2 Получить у преподавателя образцы керамических порошков и изучить морфологию и размер частиц.

3 Оформить отчет с описанием результатов наблюдений.

Содержание отчета

1 Цель работы.

2 Основные теоретические положения.

3 Результаты изучения морфологии и размера частиц.

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 Материаловедение: учебник для вузов / В. А. Струк [и др.]. – 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., 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: УрГАХУ, 2018. – 194 с.