

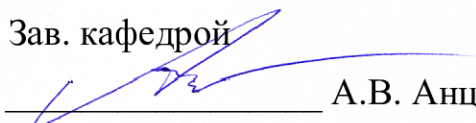
МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тульский государственный университет»

Институт *политехнический*
Кафедра «*Машиностроение и материаловедение*»

Утверждено на заседании кафедры
«Машиностроение и материаловедение»
«30» января 2023 г., протокол № 6

Зав. кафедрой

 А.В. Анцев

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
по выполнению лабораторных работ
по дисциплине (модулю)
«Металловедение и термическая обработка металлов (спецглавы)»

основной профессиональной образовательной программы
высшего образования – программы магистратуры

по направлению подготовки
22.04.02. Металлургия

с направленностью (профилем)
Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Форма обучения: *очная*

Идентификационный номер образовательной программы: 220402-01-22

Тула 2023 год

Разработчик методических указаний

Тихонова Ирина Васильевна, доцент, канд.техн.наук, доцент
(ФИО, должность, ученая степень, ученое звание)



ОГЛАВЛЕНИЕ

	СТР
1. Влияние легирующих элементов на превращения при закалке стали	4
2 Влияние легирующих элементов на превращения при отпуске стали	9
3. Дисперсионнотвердеющие стали	14
4. Термическая обработка жаропрочных сталей	20
5. Титан и сплавы на его основе	28
6. Алюминий и деформируемые сплавы на его основе	38

**Методические указания
К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ № 1**

**ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ПРЕВРАЩЕНИЯ
ПРИ ЗАКАЛКЕ СТАЛЕЙ**

(4 часа)

по дисциплине

Металловедение и термическая обработка (спецглавы)

Уровень профессионального образования: высшее образование - магистратура

Направление подготовки: 22.04.02 Metallургия

Профиль подготовки: Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Квалификация выпускника: - магистр

Форма обучения: очная

Тула 2021 г.

ВВЕДЕНИЕ

Температура начала мартенситного превращения не зависит от скорости охлаждения, но определяется составом сплава. Углерод и большинство легирующих элементов (ЛЭ) сдвигают точки начала и конца превращения к более низким температурам.

1. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

При нагреве под закалку большинство ЛЭ растворяются в аустените. Карбиды TiC, NbC, ZrC, частично (Fe,V)₃C, не растворяются в аустените, даже когда их количество в стали мало. Эти карбиды тормозят рост аустенитного зерна при нагреве и обеспечивают получение мелкоигльчатого мартенсита при закалке. Остальные карбидообразующие элементы при не слишком большом количестве их в составе стали, а также не карбидообразующие элементы, при нагреве растворяются в аустените и при закалке образуют легированный мартенсит.

Распределение легирующих элементов в фазах конструкционной стали приводится в таблице:

Характер термообработки	Легирующий элемент находится	
	в твердом растворе	в карбидной фазе
Отжиг.	Si, Ni, Al, Си, (Mn), Cr, Mo, W	Mn, (Cr), (Mo), W, Nb, V, Zr, Ti
Закалка.	Si, Ni, Al, Си, Mn, Cr, Mo, (V)	Nb, V, Zr, Ti
Отпуск 600 °C.	Si, Ni, Al, Си, (Mn), Cr Mo, V	Mn, (Cr), (Mo), (W), Nb, (V), Zr, Ti

Примечание. Если легирующий элемент может присутствовать в разных фазах, предпочтительная форма его содержания в стали включена в скобки.

Легирование стали сопровождается повышением однородности структуры мартенсита, благодаря чему повышается пластичность и возрастает сопротивление вязкому разрушению. Этим же определяется повышение сопротивления хрупкому разрушению легированных сталей в закаленном состоянии.

2. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Цель работы — изучить влияние способа охлаждения на твердость и микроструктуру инструментальных сталей.

Задачи исследования:

- изучить структуру стали после охлаждения;
- исследовать механические свойства стали после охлаждения.

3. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ, ОБОРУДОВАНИЕ, ИНСТРУМЕНТ, МАТЕРИАЛЫ

1. Образцы из сталей У10, ХВГ диаметром 20х15 мм.
2. Фильтровальная бумага, пинцет, струбцины, плоскогубцы.
3. Лабораторные печи для закалки и отпуска.
4. Шлифовально-полировальные станки.
5. Твердомер ТК-2М.

6. Набор шлифовальной бумаги для приготовления микрошлифов.
7. Раствор травления микрошлифов: 50 мл $\text{HCl} + 50\text{H}_2\text{O} + 5\text{г FeCl}_3$.
8. Спирт этиловый ректификованный для обезвоживания и сушки микрошлифов.

4. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Ознакомиться с краткими сведениями из теории и законспектировать их.
2. Получить задание преподавателя на выполнение одного из режимов термической обработки.
3. Термическая обработка образцов проводится по общепринятым правилам с соблюдением норм техники безопасности при работе на электрических печах.
4. Изучение структуры на металлографическом микроскопе следует начинать с малых увеличений, просматривая большие площади, чтобы выявить общие закономерности строения. Для изучения деталей структуры постепенно повышать увеличение.

5. ЗАДАНИЕ НА ИССЛЕДОВАНИЕ

1. Получить образцы.
2. Измерить твердость в исходном состоянии.
3. Нагреть образцы стали до температуры 740 °С, выдержать в печи 15 минут и закалить в масле.
4. Зачистить поверхность образцов на наждачной бумаге. Измерить твердость закаленных образцов.
5. Измерить твердость стали.
6. Проанализировать полученные результаты. По результатам присвоить стали структурный класс.
7. Составить подробный отчет.

6. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЗАНЯТИЯ

Отчет должен содержать:

1. Краткие сведения из теории.
2. Режимы термической обработки.
3. Структуры и свойства стали после термической обработки с описаниями. Результаты отразить в таблице.
4. Обсуждение результатов исследования.
5. Выводы по работе.

Марка стали	НВ до закалки	$V_{кр}$, град/с	T_z , °С	Твердость после закалки			Примечание
				HRC	HRB	НВ	

7. ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА И ОЦЕНКА РАБОТЫ

Отчет должен содержать:

1. Краткие сведения из теории.
2. Режимы термической обработки.
3. Свойства стали после термической обработки.
4. Рисунки или фотографии структур с описаниями.

5. Обсуждение результатов исследования.

6. Выводы по работе.

8. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

8.1 Основная литература

1. Материаловедение: Учебник для вузов. / Б.Н. Арзамасов, В.И. Макарова, Г.Г. Мухин и др.; под общ. ред. Б.Н. Арзамасова, Г.Г. Мухина. 6-е изд., стер., – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2004. – 648 с.

2. Материаловедение и технология металлов: Учебник. / Г.П.Фетисов, М.Г.Карпман, В.М.Матюнин и др. – М.: ФГУП Изд-во «Высшая школа», 2007. – 638 с.

3. Золотухин И.В., Калинин Ю.Е., Стогней О.В. Новые направления физического материаловедения: Учебное пособие. – Воронеж: Изд-во Воронежского госуниверс., 2000. – 360 с.

4. Технология конструкционных материалов: Учебник для машиностроит. вузов, 5-е изд., испр./ А.М. Дальский, Т.М. Барсукова, Л.Н. Бухаркин и др. – М.: Машиностроение, 2005.– 512 с.

8.2. Дополнительная литература

1. Бернштейн, М.Л. Металловедение и термическая обработка стали и чугуна. Справочник :в 3 т. Т.2, Строение стали и чугуна/М.Л.Бернштейн [и др.] : / под ред.:А.Г.Рахштадта, Л.М.Капуткиной, С.Д.Прокошкина, А.В.Супова .— М. : Интермет Инжиниринг, 2005 .— 528с. .

2. Бокштейн, Б.С. Металловедение и термическая обработка стали и чугуна. Справочник :в 3 т. Т.1, Методы испытаний и исследования/Б.С.Бокштейн [и др.] : справочник:в 3 т. / под ред.:А.Г.Рахштадта, Л.М.Капуткиной, С.Д.Прокошкина, А.В.Супова .— М. : Интермет Инжиниринг, 2004 .— 688с.

3. Материаловедение в машиностроении и промышленных технологиях : учеб.-справ. руководство / В. А. Струк [и др.] .— Долгопрудный : Интеллект, 2010 .— 536 с. : ил.

9. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое закалка?
2. Что такое мартенсит?
3. Где находятся легирующих элементов в аустените при нагреве под закалку?
4. Пути повышения однородности структуры мартенсита?
5. Объясните причину более высокой твердости легированной стали по сравнению с углеродистой?

**Методические указания
К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ № 2**

**ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ПРЕВРАЩЕНИЯ
ПРИ ОТПУСКЕ СТАЛЕЙ**

(4 часа)

по дисциплине

Металловедение и термическая обработка (спецглавы)

Направление подготовки: 22.04.02 Металлургия

Профиль подготовки: Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Квалификация выпускника: - магистр

Форма обучения: очная

Тула 2021 г.

ВВЕДЕНИЕ

Введение легирующих элементов в сталь преследует цель придать ей определенный комплекс механических, физических, свойств. При отпуске легирующие элементы тормозят распад мартенсита (М) и образуют сложные карбиды.

С ростом температуры отпуска пределы прочности, текучести непрерывно уменьшаются, а показатели пластичности (вязкость, относительное сужение и удлинение) непрерывно повышаются.

1. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

При отпуске легирующие элементы (Cr, W, Mo, V, Co и Si) влияют на распад мартенсита, сдвигая температурные интервалы стадий превращений к более высоким температурам, замедляя рост карбидных частиц, и сохраняют структуру $M_{отп}$ до температур 450-500 °С. Это объясняется двумя причинами:

1 – карбидообразующие легирующие элементы уменьшают скорость диффузии углерода, вследствие химического сродства с ним;

2 – большинство легирующих элементов увеличивают силы межатомной связи в твердом растворе.

Многие легирующие элементы повышают температурный интервал распада $A_{ост}$ до 400-580 °С. Все карбидообразующие легирующие элементы замедляют коагуляцию карбидов. Их заметное укрупнение происходит при температуре выше 550-600 °С.

В процессе отпуска легированных сталей образуют специальные карбиды типа MeC , $Me_{23}C_6$. Для их формирования требуется взаимное перемещение не только атомов углерода, но и легирующих элементов. Последние, образуя в стали твердые растворы замещения, обладают на порядки меньшей подвижностью, чем атомы углерода. Поэтому для образования спецкарбидов требуются более высокие температуры и большие продолжительности отпуска.

2. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель работы – оценить влияние легирующих элементов на превращения при отпуске закаленных сталей.

Задача - исследовать механические свойства стали после охлаждения.

3. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ, ОБОРУДОВАНИЕ, ИНСТРУМЕНТ, МАТЕРИАЛЫ

1. Образцы из стали У10 и ХВГ диаметром 20х15 мм.
2. Лабораторные печи для отпуска.
3. Твердомер ТК-2М.
4. Шлифовальная бумага.
5. Клещи.

3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Ознакомиться с краткими сведениями из теории и законспектировать их.
2. Получить задание преподавателя на выполнение режима термической обработки.
3. Термическую обработку образцов проводить по общепринятым правилам с соблюдением норм техники безопасности при работе на электрических печах.

4 Твёрдость измеряется на приборе ТК-2М алмазным конусом. Для получения достоверных результатов необходимо на каждом образце сделать не менее 5 замеров и определить среднее значение.

5. ЗАДАНИЕ НА ИССЛЕДОВАНИЕ

5.1. Измерить твердость образцов, изготовленных из сталей У10 и ХВГ в закаленном состоянии. Полученные результаты занести в таблицу.

5.2. Провести отпуск в течение 1 ч. при различных температурах (200, 300, 400, 500, 600, 700 °C) с последующим охлаждением на воздухе.

5.3. Измерить твердость образцов после отпуска, результаты измерений занести в таблицу.

Марка стали	Микроструктура и твердость после закалки, HRC ₃	Температура отпуска, °C	Твердость после отпуска HRC ₃	Предполагаемая микроструктура
		200		
		300		
		400		
		500		
		600		
		700		
		200		
		300		
		400		
		500		
		600		
		700		

5.4 Построить зависимости HRC₃ от температуры отпуска стали.

5.5 Проанализировать изменения твердости сталей в зависимости от температуры нагрева и марочного химического состава исследуемых образцов.

5.6 Сделать выводы по работе.

В выводах по работе указать:

- как влияет температура отпуска на твердость закаленной стали;
- как влияет содержание углерода и легирование на превращения при отпуске.

6. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЗАНЯТИЯ

1. Перед измерением твердости зачистить образцы.
2. Проверить температуру в печи. Рассчитать режимы обработки.
3. После термической обработки образцы зачистить с двух сторон, измерить твердость методом Роквелла.
4. Проанализировать изменения твердости стали в зависимости от температуры отпуска.

Пользуясь полученными значениями твердости определить предполагаемую микроструктуру.

7. ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА И ОЦЕНКА РАБОТЫ

Отчет должен содержать:

1. Краткие сведения из теории.
2. Режимы термической обработки.

3. Структуры и свойства стали после различных видов отпуска.
4. Рисунки или фотографии структур с описаниями.
5. Обсуждение результатов исследования.
6. Выводы по работе.

8. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

8.1 Основная литература

1. Материаловедение: Учебник для вузов. / Б.Н. Арзамасов, В.И. Макарова, Г.Г. Мухин и др.; под общ. ред. Б.Н. Арзамасова, Г.Г. Мухина. 6-е изд., стер., – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2004. – 648 с.
2. Материаловедение и технология металлов: Учебник. / Г.П.Фетисов, М.Г. Карпман, В.М. Матюнин и др. – М.: ФГУП Изд-во «Высшая школа», 2007. – 638 с.
3. Золотухин И.В., Калинин Ю.Е., Стогней О.В. Новые направления физического материаловедения: Учебное пособие. – Воронеж: Изд-во Воронежского госуниверс., 2000. – 360 с.
4. Технология конструкционных материалов: Учебник для машиностроит. вузов, 5-е изд., испр./ А.М. Дальский, Т.М. Барсукова, Л.Н. Бухаркин и др. – М.: Машиностроение, 2005.– 512 с.

8.2. Дополнительная литература

1. Бернштейн, М.Л. Металловедение и термическая обработка стали и чугуна. Справочник: в 3 т. Т.2, Строение стали и чугуна/М.Л.Бернштейн [и др.]: / под ред.:А.Г. Рахштадта, Л.М. Капуткиной, С.Д. Прокошкина, А.В. Супова .— М.: Интермет Инжиниринг, 2005 .— 528 с.
2. Бокштейн, Б.С. Металловедение и термическая обработка стали и чугуна. Справочник: в 3 т. Т.1, Методы испытаний и исследования/Б.С.Бокштейн [и др.]: справочник: в 3 т. / под ред.:А.Г. Рахштадта, Л.М. Капуткиной, С.Д. Прокошкина, А.В. Супова .— М.: Интермет Инжиниринг, 2004 .— 688 с.
3. Материаловедение в машиностроении и промышленных технологиях : учеб. - справ. руководство/В. А. Струк [и др.].— Долгопрудный: Интеллект, 2010 .— 536 с.: ил.

9. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какую структуру имеет сталь после закалки?
2. Какие превращения происходят при нагреве закаленной стали?
3. Какие виды отпуска Вы знаете?
4. Как изменится структура закаленной стали в зависимости от температуры отпуска?
5. Как влияет температура отпуска на твердость закаленной стали?
6. Как влияют легирующие элементы на фазовые превращения при отпуске?
7. Как влияют легирующие элементы на фазовые превращения при отпуске?

**Методические указания
К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ № 3**

ДИСПЕРСИОННО-ТВЕРДЕЮЩИЕ СТАЛИ

(4 часа)

по дисциплине

Металловедение и термическая обработка (спецглавы)

Направление подготовки: 22.04.02 Metallургия

Профиль подготовки: Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Квалификация выпускника: - магистр

Форма обучения: очная

Тула 2021 г.

ВВЕДЕНИЕ

При штамповке нагретых заготовок рабочие поверхности штампа нагреваются до 700 °С. Поэтому, для изготовления инструмента применяют высоколегированные стали и используют различные способы охлаждения.

1. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

Существенного упрочнения при одновременном повышении вязкости стали можно посредством измельчения зерна. Наиболее сильно упрочнение проявляется при уменьшении размеров частиц ниже 20 нм. Таковыми могут быть интерметаллидные фазы, выделяющиеся из пересыщенного твердого раствора при его нагреве.

Мелкое зерно в этих сталях получают посредством закалки на структуру пакетного /безуглеродистого/ мартенсита, который одновременно является пересыщенным твердым раствором, способным претерпевать распад с выделением интерметаллидов.

Наиболее благоприятной системой для получения необходимой структуры и свойств матрицы сталей являются сплавы железа с никелем. При содержании никеля от 4 до 8 % в процессе закалки из аустенитной области образуются двухфазные структуры мартенсита и феррита. Полиэдрические зерна феррита, имеющие низкую плотность дислокаций, снижают прочность стали. При содержании никеля от 10 до 25 % после закалки в масле аустенит полностью превращается в пакетный мартенсит. Дальнейшее повышение содержания никеля вызывает появление в закаленной стали остаточного аустенита.

Добавки никеля в железо уменьшают в нем растворимость многих других элементов, таких как титан, молибден, алюминий, вольфрам и др. Это явление позволяет создавать тройные и многокомпонентные системы, склонные к дисперсионному упрочнению посредством старения. Выяснено, что присутствие кобальта в твердом растворе уменьшает растворимость третьего элемента при низких температурах и создает предпосылки для выделения более дисперсных вторичных фаз.

Конструкционные мартенситно-старяющие стали применяемые в промышленности: H18K9M5T, H18K9M5T2 и др. Упрочняющими фазами в этих сталях в зависимости от третьего и четвертого элементов являются: Ni, Al, Fe₂Mo, Ni₃Ti, FeTi, (Fe, Ni,Co)₂Mo.

Содержание элементов, вызывающих дисперсионное твердение, ограничено их растворимостью в аустените и неблагоприятным влиянием на вязкость при повышенных их концентрациях.

Молибден вводят до 6 %, так как при больших концентрациях он склонен к значительным ликвациям. Оптимальное содержание титана 0,8 - 1,0 %. При большем введении он образует с углеродом карбиды, которые, располагаясь по границам зерен, охрупчивают сталь. В сталях, выплавленных на особо чистой шихте по углероду и азоту, содержание Ti может достигать 1,4 – 1,8 % при сохранении удовлетворительной ударной вязкости.

Алюминий, являясь эффективным упрочнителем, вызывает резкое снижение вязкости при концентрациях более 0,2 - 0,3 %.

Углерод, азот, фосфор и сера являются вредными примесями в любых концентрациях, так как их присутствие снижает пластические свойства.

Мартенситно-старяющие стали, имея в своем составе высокое содержание никеля, обладают низкой склонностью к перегреву. Поэтому нагрев под закалку в районе температур 850...1200 °С слабо влияет на их механические свойства.

Наибольшее влияние на физико-механические свойства оказывают температура и время старения стали после закалки. Для большинства мартенситно-старяющих сталей оптимальной температурной областью старения является район 400...520 °С. Причем с понижением температуры возрастает прочность, но требуется увеличение времени до достижения ее максимального значения.

Добавки хрома более 8 % в мартенситно-старяющие стали резко повышают их коррозионную стойкость.

При изготовлении штампового инструмента нашли применение нержавеющие / жаростойкие / мартенситно-старяющие стали: X11H10M2T, X13H8D2TM, X12H8K4M2T, 05X12H6D2CTTMФ и др.

2. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель работы - ознакомиться с особенностями структурообразования и свойствами мартенситно-стареющей стали.

Задачи исследования – изучить влияние температуры старения на структуру и твердость стали.

3. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ, ОБОРУДОВАНИЕ, ИНСТРУМЕНТ, МАТЕРИАЛЫ

1. Образцы из стали H18K9M5T размером 15x10x3 мм.
2. Металлографические микроскопы.
3. Лабораторные печи для закалки и отпуска.
4. Шлифовально-полировальные станки.
5. Твердомер ТК-2М.
6. Набор шлифовальной бумаги для приготовления микрошлифов.
7. Раствор травления микрошлифов: 50 мл HCl + 50H₂O + 5г FeCl₃.
8. Спирт этиловый ректификованный для обезживания и сушки микрошлифов.
9. Фильтровальная бумага, пинцет, струбцины, плоскогубцы.

3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Ознакомиться с краткими сведениями из теории и законспектировать их.
2. Получить задание преподавателя на выполнение одного из режимов термической обработки.
3. Термическая обработка образцов проводится по общепринятым правилам с соблюдением норм техники безопасности при работе на электрических печах.
4. При приготовлении металлографических шлифов механическим способом следует помнить, что закаленная мартенситно-стареющая сталь имеет высокую вязкость и легко наклепывается при обработке поверхности на станках при высоких оборотах шлифовального круга. Лучшие результаты получаются при ручной шлифовке и полировке при малых оборотах круга / 200...400 об/мин / с обильным поливом водной суспензией окиси хрома.
5. Изучение структуры на металлографическом микроскопе следует начинать с малых увеличений, просматривая большие площади, чтобы выявить общие закономерности строения. Для изучения структуры постепенно повышать увеличение.

5. ЗАДАНИЕ НА ИССЛЕДОВАНИЕ

1. Изучить влияние температуры нагрева при старении на твердость термоупрочненной стали.
2. Изучить строение пакетного мартенсита.
3. Произвести измерение твердости стали в различном структурном состоянии.
4. На основании экспериментальных данных найти отличия от конструкционных углеродистых сталей.
5. Приготовить шлифы, Исследовать структуру.
6. Дать сравнительную оценку механических свойств закаленной стали после старения.

6. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЗАНЯТИЯ

Отчет должен содержать:

1. Краткие сведения из теории.
2. Режимы термической обработки.
3. Структуры и свойства стали после термической обработки с описаниями.

Результаты отразить в таблице.

4. Обсуждение результатов исследования.

5. Выводы по работе.

№ п/п	Марка стали	Свойства стали после цементации, закалки и низкого отпуска					Структура отпуска	после
		Карбю- ризатор	Режим цементации	Твердость отпуска	после			
			T, °C	T _{выд} , час.	HRB	HRC	HB	

8. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

8.1 Основная литература

1. Материаловедение: Учебник для вузов. / Б.Н. Арзамасов, В.И. Макарова, Г.Г. Мухин и др.; под общ. ред. Б.Н. Арзамасова, Г.Г. Мухина. 6-е изд., стер., – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2004. – 648 с.

2. Материаловедение и технология металлов: Учебник. / Г.П.Фетисов, М.Г.Карпман, В.М.Матюнин и др. – М.: ФГУП Изд-во «Высшая школа», 2007. – 638 с.

3. Золотухин И.В., Калинин Ю.Е., Стогней О.В. Новые направления физического материаловедения: Учебное пособие. – Воронеж: Изд-во Воронежского госуниверс., 2000. – 360 с.

4. Технология конструкционных материалов: Учебник для машиностроит. вузов, 5-е изд., испр./ А.М. Дальский, Т.М. Барсукова, Л.Н. Бухаркин и др. – М.: Машиностроение, 2005.– 512 с.

8.2. Дополнительная литература

1. Бернштейн, М.Л. Металловедение и термическая обработка стали и чугуна. Справочник :в 3 т. Т.2, Строение стали и чугуна/М.Л.Бернштейн [и др.] : / под ред.:А.Г.Рахштадта, Л.М.Капуткиной, С.Д.Прокошкина, А.В.Супова. — М. : Интермет Инжиниринг, 2005. — 528с. .

2. Бокштейн, Б.С. Металловедение и термическая обработка стали и чугуна. Справочник :в 3 т. Т.1, Методы испытаний и исследования/Б.С.Бокштейн [и др.] : справочник:в 3 т. / под ред.:А.Г.Рахштадта, Л.М.Капуткиной, С.Д.Прокошкина, А.В.Супова. — М. : Интермет Инжиниринг, 2004. — 688с.

3. Материаловедение в машиностроении и промышленных технологиях : учеб.-справ. руководство / В. А. Струк [и др.] .— Долгопрудный : Интеллект, 2010. — 536 с. : ил.

9. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Содержание углерода мартенситно-сталях?
2. Механические характеристики мартенситно-сталях?
3. Механизмы упрочнения мартенситно-сталях?
4. Размер зерна мартенситно-сталях?
5. Что такое интерметаллиды?
6. Какие ЛЭ образуют интерметаллиды?
7. Структура закалки мартенситно-сталях?
8. Свойства мартенсита?
9. Назовите интерметаллидные фазы мартенситно-сталях?
10. Какую растворимость в Fe–Ni-матрице имеют Ti, Be, Al, W, Cu?
11. Влияние кобальта в мартенситно-сталях?
12. Влияние хрома на свойства мартенситно-сталях?

13. Как Вы оцениваете сопротивление хрупкому разрушению мартенситно-старящихся сталей?
14. Какая температура порога хладноломкости мартенситно-старящихся сталей?
15. Область применения мартенситно-старящихся сталей?

**Методические указания
К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ № 4**

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЖАРОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ

(4 часа)

по дисциплине

Металловедение и термическая обработка (спецглавы)

Направление подготовки: 22.04.02 Металлургия
Профиль подготовки: Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Квалификация выпускника: - магистр

Форма обучения: очная

Тула 2021 г.

1. Цель работы

1. Знакомство с составами и режимами термической обработки сталей, предназначенных для эксплуатации при повышенных температурах.
2. Приобретение навыков выбора марки стали для изделий, эксплуатируемых длительное время при повышенных температурах, и разработки режима ее термической обработки в зависимости от конкретных условий эксплуатации.

2. Краткие сведения из теории

Техника второй половины XX века - техника высоких потенциалов, высоких и сверхвысоких температур, скоростей и напряжений. Для изготовления изделий, эксплуатируемых в таких условиях, необходимы соответствующие материалы. Материалы, используемые для работы при высоких температурах, относятся к категории жаропрочных. Эти материалы способны длительное время работать при высоких температурах в сложнапряженном состоянии при одновременном воздействии агрессивной внешней среды.

Жаропрочные материалы применяются преимущественно в конструкциях авиационных, морских и наземных энергетических систем. Они используются также при изготовлении матриц и прессового инструмента для горячей обработки металлов давлением. В химической промышленности рабочие температуры жаропрочных сплавов, эксплуатируемых при очень высоких давлениях, умеренные, а при пониженных давлениях - высокие (1000-1100 °C) и в отдельных случаях предельно высокие (до 1500 °C). Рабочие температуры в нефтеперерабатывающей промышленности достигают 700-800 °C, при этом длительность службы различной аппаратуры и установок из жаропрочных сплавов измеряется месяцами, а иногда годами.

Материалы, предназначенные для эксплуатации при повышенных температурах, должны обладать определенными свойствами:

жаростойкость (окалиностойкость) характеризует сопротивление материала газовой коррозии при высоких температурах. Для сплавов на основе железа, например, скорость окисления резко возрастает при $t > 570$ °C, когда вместо плотных оксидов Fe_2O_3 и Fe_3O_4 образуется рыхлый оксид FeO . Для повышения окалиностойкости сталь легируют Cr, Al или Si, обладающими большим сродством к кислороду, чем железо, и образующими более плотные оксидные пленки, диффузия кислорода сквозь которые затруднена. Чем больше содержание в стали этих элементов, тем выше ее окалиностойкость;

жаропрочностью называется способность сталей и сплавов выдерживать механические нагрузки при высоких температурах в течение определенного времени (при температурах до 600 °C обычно применяют термин *теплоустойчивость*). Стали и сплавы, предназначенные для работы при повышенных и высоких температурах, должны обладать не только требуемой жаропрочностью, но и иметь достаточное сопротивление химическому воздействию газовой среды в течение заданного ресурса времени, т.е. необходимо, чтобы жаропрочные сплавы были одновременно и жаростойкими, хотя жаростойкие сплавы не обязательно должны быть жаропрочными.

Напряжение, которое вызывает разрушение металла при повышенных температурах, сильно зависит от продолжительности приложения нагрузки. Вместе с тем, чем выше температура, тем ниже и разрушающие напряжения при данной продолжительности воздействия нагрузки. Следовательно, в общем случае при повышенных температурах прочность металла определяется двумя факторами - температурой и временем. Выше некоторых температур прочность так быстро снижается с увеличением продолжительности испытания, что указание одного значения прочности без одновременного указания продолжительности воздействия нагрузки уже лишено технического смысла.

Сроки службы условно делят на: кратковременный - до 100 ч (например, ракеты ~1 ч); ограниченный - от 100 до 1000 ч (военные самолеты); длительный - от 1000 до 10000 ч (гражданские самолеты); весьма длительный - от 10000 до 100000 ч (газовые турбины для локомотивов и судов, стационарные газовые турбины) и выше.

Решающими факторами при разработке жаропрочных материалов являются рабочие температуры и напряжения. Однако важно отметить, что жаропрочные материалы работают при различных схемах нагружения: статических растягивающих, изгибающих или скручивающих нагрузках, динамических переменных нагрузках различной частоты и амплитуды, термических нагрузках вследствие изменений температуры, динамических воздействиях скоростных газовых потоков на поверхность и пр.

При наличии теплосмен материалы подвергаются термической усталости, что может резко (в несколько раз) увеличить скорость ползучести или привести к разрушению детали даже при отсутствии внешних нагрузок вследствие только термических напряжений. Столь же сильно может влиять на жаропрочность и жаростойкость воздействие переменных напряжений, которое обуславливает развитие высокотемпературной усталости.

Состав газовой среды также может существенно влиять на жаростойкость и жаропрочность сплавов. Наличие в среде агрессивных компонентов (например, соединений, содержащих S, V, галогены, щелочные металлы) вызывает образование легкоплавких или летучих соединений, разрушает защитные окисные пленки, способствует развитию локальной газовой коррозии. Еще сильнее воздействие на материал газовых потоков, скорость которых может составлять сотни и тысячи м/с. В таких условиях работают, например, лопатки газовых турбин, обшивки скоростных самолетов и ракет.

Следовательно, при оценке пригодности сплава к работе в нагруженном состоянии при высоких температурах необходимо учитывать не только результаты стандартных испытаний на ползучесть и длительную прочность, но и возможное изменение этих характеристик в условиях эксплуатации.

Установлено, что при высоких температурах металл ведет себя во многих отношениях иначе, чем при нормальных, или даже при 300-350 °С. Стали и сплавы, предназначенные для работы при повышенных и высоких температурах, подразделяют на:

- 1) *теплоустойчивые*, работающие в нагруженном состоянии при $t < 600$ °С в течение длительного времени;
- 2) *жаростойкие* (окалиностойкие), работающие в ненагруженном или слабонагруженном состоянии при $t > 550$ °С и обладающие стойкостью против химического разрушения поверхности в газовых средах;
- 3) *жаропрочные*, работающие в нагруженном состоянии при высоких температурах в течение определенного времени и обладающие при этом достаточной жаростойкостью.

В группу теплоустойчивых сталей входят углеродистые, низколегированные и хромистые стали.

Жаростойкие стали и сплавы подразделяются на хромистые и хромоалюминиевые стали ферритного класса, хромокремнистые стали мартенситного класса, а также хромоникелевые аустенитные стали и сплавы на хромоникелевой основе.

К жаропрочным относят стали аустенитного класса на хромоникелевой и хромоникельмарганцевой основах с различным дополнительным легированием.

Состав и обработка жаропрочных сплавов должны обеспечивать высокий уровень сил межатомной связи; тонкую субмикроскопическую неоднородность строения сплавов; условия для выделения оптимального количества упрочняющих фаз в наиболее эффективных для упрочнения форме и состоянии; препятствия для развития

межзеренной деформации и диффузии, особенно, при высокотемпературной ползучести; стабильность структуры сплавов в течение заданного срока эксплуатации; нейтрализацию вредных примесей посредством создания тугоплавких соединений и рафинирования сплавов.

Многообразие современных жаропрочных сплавов связано с различными уровнями рабочих температур и требованиями, предъявляемыми к свойствам сплавов при этих температурах. Естественно, что для этих материалов сформировались свои приемы легирования и термической обработки, которые существенно отличаются от таковых для обычных сталей и сплавов, работающих в интервале климатических изменений температур.

Теплоустойчивые стали

Рабочие температуры теплоустойчивых сталей достигают 600-650 °С, а давление газовых или жидких сред 20-30 МПа. Изделия из этих сталей должны работать длительное время (100 000-200 000 ч) без замены, поэтому основным требованием является заданное значение длительной прочности и сопротивление ползучести за весь ресурс эксплуатации.

Для работы при температурах до 120 °С и давлениях до 0,8 МПа обычно применяют стали Ст.2 или Ст.3. При давлениях до 6 МПа и температурах до 400 °С - углеродистые котельные стали 12К, 16К, 18К, 20К. Эти стали отличаются содержанием углерода (номер марки соответствует среднему содержанию углерода). С ростом содержания углерода прочность повышается, а пластичность падает. Состав и свойства этих сталей регламентируются ГОСТ 5520-79.

Цель термической обработки этих сталей - получить стабильную структуру, которая сохранялась бы практически неизменной в течение всего срока эксплуатации. Обычно их подвергают нормализации, а при повышенном содержании углерода (0,22-0,24 %) - закалке и высокому отпуску, при этом температура отпуска должна быть не менее чем на 100-120 °С выше рабочей температуры.

Для более ответственных деталей энергетических блоков, работающих при температурах до 585 °С и давлении 25,5 МПа применяют низколегированные стали (12МХ, 12Х1МФ, 20Х1М1Ф1БР, 25Х1МФ, 18Х3МВ, 20Х3МВФ - перлитного класса; 15Х5, 15Х5М, 15Х5ВФ, 12Х8ВФ – мартенситного класса), регламентируемые ГОСТ 20072-74. В стандарте приведены также рекомендации по конкретному применению сталей и рекомендуемые режимы их термической обработки.

Основными легирующими элементами теплоустойчивых сталей являются Cr, W, Mo, V, Nb. Содержание каждого из них, кроме Cr, не превышает 1 %. В эти стали входит до 0,08-0,2 %С. Содержание Cr в сталях этого типа может быть до 3 %, что связано с необходимостью обеспечения повышенного сопротивления окислению. С повышением температуры и ростом требований по жаропрочности состав сталей усложняется. Эти стали, в зависимости от режима термической обработки, могут иметь феррито-перлитную, феррито-бейнитную, бейнитную или мартенситную структуру.

Стали 12МХ и 12Х1МФ чаще всего применяется в отожженном состоянии или после нормализации и высокого отпуска (670...690 °С), т.е. в сравнительно стабильном, но разупрочненном состоянии. Более легированная сталь 20Х1М1Ф1БР имеет феррито-перлитную структуру только при очень малых скоростях охлаждения (<1...5 °С/мин). При более высоких скоростях охлаждения она приобретает бейнитную или мартенситную структуру. При длительности испытаний $10^4...10^5$ ч более высокую жаропрочность должны иметь стали со структурой отпущенного (680...720 °С) мартенсита.

В группу хромистых теплостойких сталей входят стали, содержащие от 5 до 13 %Cr и дополнительно легированные карбидообразующими элементами Mo, W, Nb, V, при содержании 0,08-0,22 %С (15Х5, 15Х5М, 15Х5ВФ, 12Х8ВФ). В структуре этих сталей

могут присутствовать следующие составляющие: мартенсит, δ -феррит, карбиды (Me_{23}C_6 , Me_7C_3 , MeC) и интерметаллиды, в основном, фазы Лавеса Fe_2Mo , Fe_2W , $\text{Fe}_2(\text{Mo}, \text{W})$.

По основным структурным составляющим эти стали подразделяют на мартенситные и мартенситно-ферритные, что определяется содержанием хрома, углерода и сочетанием дополнительных легирующих элементов. Они более теплоустойчивы и жаростойки, чем низколегированные стали. Они также более жаростойки в продуктах сгорания жидкого и твердого топлива, чем хромоникелевые аустенитные стали. Их применяют для различных деталей энергетического машиностроения (лопатки, трубы, крепежные детали, детали турбин и др.), работающих длительное время при 600-650 °С.

Для длительной работы при повышенных температурах эти стали применяют после отжига при 840-860 °С или нормализации с последующим высокотемпературным отпуском, что обеспечивает получение стабильной структуры, состоящей из ферритной основы, легированной Mo и W, и сравнительно дисперсных карбидов, в основном специальных карбидов V.

Повышение рабочих температур паросиловых установок потребовало применения в качестве теплоустойчивых сталей с 12 %Cr (15X11МФ, 14X12В2МФ, 12X8ВМ1БФР), регламентируемые ГОСТ 5632-72. Эти стали в зависимости от содержания углерода и режима термической обработки могут иметь феррито-мартенситную или чисто мартенситную структуру. Усложнение состава сталей благодаря введению дополнительных легирующих элементов в оптимальных количествах способствует существенному повышению их теплоустойчивости.

Основной вклад в повышение жаропрочных свойств высокохромистых сталей вносит мартенсит отпуска, который и при рабочих температурах способен длительное время сохранять упрочнение, полученное в результате фазового наклепа при мартенситном превращении. Во многих сталях этой группы присутствует структурно-свободный феррит (до 10-15 %), который при закалке не испытывает полиморфного превращения и может подвергаться старению при последующем нагреве.

Стали используются обычно в термически упрочненном состоянии после закалки (или нормализации) и высокотемпературного отпуска. При этом отпуск сталей, предназначенных для длительной службы, обычно проводят на 100-150 °С выше рабочих температур, чтобы обеспечить стабильность структуры на весь период эксплуатации.

Важное значение в упрочнении этих сталей играют интерметаллидные фазы Лавеса типа A_2B , выделяющиеся в интервале 550-600 °С в основном в участках δ -феррита. Во всех сталях этого типа с увеличением длительности выдержки при отпуске (~620 °С) наблюдается постепенное снижение прочностных свойств, ударной вязкости и повышение пластичности вследствие коагуляции карбидных и интерметаллидных частиц.

Аустенитные жаропрочные стали

Условно эти стали подразделяются по преимущественному типу упрочнения на три подгруппы: гомогенные (однофазные) аустенитные стали, жаропрочность которых обеспечивается в основном легированием твердого раствора; стали с карбидным упрочнением; стали с интерметаллидным упрочнением.

Составы и свойства деформируемых сталей и сплавов на железоникелевой и никелевой основах, предназначенных для работы в коррозионно-активных средах и при высоких температурах, регламентируются ГОСТ 5632-72. Согласно этому стандарту к высоколегированным *сталям* условно отнесены сплавы, массовая доля железа в которых более 45 %, а суммарная массовая доля легирующих элементов не менее 10 %, считая по верхнему пределу, при массовой доле одного из элементов не менее 8 % по нижнему пределу. Стандарт содержит также рекомендации по применению рассматриваемых в нем сталей и сплавов.

(Внимание: используемые ранее обозначения марок стали, не включенных в стандарты (типа ЭИ, ЭП, К, ДИ и др.), данным стандартом запрещены к использованию во вновь создаваемой документации и могут указываться (при необходимости) только в скобках после нового обозначения.)

Рекомендации по применению сортовой и калиброванной коррозионностойкой, жаростойкой и жаропрочной стали, а также по режимам ее термической обработки приведены в ГОСТ 5949-75.

К группе гомогенных относятся, главным образом, низкоуглеродистые хромоникелевые стали, дополнительно легированные элементами, упрочняющими γ -твердый раствор (например, 12X18H12T, 08X15H24B4TP). Их жаропрочность обеспечивается в основном растворенными легирующими элементами. Термин "гомогенные стали" следует понимать условно, так как в структуре этих сталей обычно присутствует некоторое количество карбидов и карбонитридов Ti или Nb. Используют эти стали, преимущественно, в энергомашиностроении для изготовления труб пароперегревателей и паропроводов, арматуры установок сверхвысоких параметров и рассчитаны они на длительную (до 10^5 ч) службу при 650-700 °С.

Термическая обработка сталей состоит из закалки от высоких температур (1100-1200 °С) или аустенитизации и стабилизирующего отпуска (700-750 °С) и преследует цель получить как можно более однородный γ -твердый раствор, заданную величину зерна (балл 3-6) и стабильную структуру, а также снять напряжения, которые могут возникнуть в процессе изготовления деталей.

Стали с карбидным упрочнением (например, 37X12H8Г8МФБ (ЭИ481), 40X15H7Г7Ф2МС (ЭП388)) предназначены для работы при температурах 650-750 °С и довольно высоких уровнях напряжений. Их используют для изготовления ответственных деталей энергомашиностроения (диски и лопатки турбин, крепежные детали и пр.). Основу сталей составляют Cr-Ni- или Cr-Ni-Mn-аустенит, содержащий 0,25-0,5 %С. Упрочняющими фазами в основном являются карбиды V и Nb, а также карбиды Cr (типа $Me_{23}C_6$ и Me_7C_3).

Уровень жаропрочности и термическая стабильность сталей данного класса зависят от температуры старения. При низких температурах (500-600 °С) выделение карбидных фаз протекает медленно, образуются высокодисперсные частицы, прочностные свойства при изотермической выдержке непрерывно возрастают. С повышением температуры старения (или испытания) скорость процессов выделения и коагуляции возрастает, достигается определенный максимум упрочнения, положение которого зависит от состава сплава.

Чем сложнее карбидные фазы по составу, чем легированнее аустенит, тем больше эффект упрочнения при старении и медленнее развиваются процессы разупрочнения. Следует, однако, иметь в виду, что при низкотемпературном старении легированного аустенита с выделением дисперсных фаз одновременно с сильным упрочнением падает пластичность и возрастает склонность к хрупкому разрушению.

Для стали 37X12H8Г8МФБ рекомендованная термическая обработка заключается в закалке от 1140 °С в воде и старении при 660...790 °С. Более легированная сталь 40X15H7Г7Ф2МС подвергается закалке от 1180...1220 °С и старению при 800 °С в течение 16 ч.

Жаропрочные хромоникелевые стали с интерметаллидным упрочнением (например, 10X11H20T3P (ЭП686), 08X11H35MTЮP), а также сплавы на хромоникелевой основе с высоким содержанием никеля (до 38 %) нашли применение при изготовлении компрессоров, турбин, дисков, сварных и крепежных изделий и других деталей, работающих при температурах до 750-850 °С.

Легирование сталей этого типа преследует цель создания высоколегированного железоникелевого аустенита, обладающего склонностью к распаду при старении, и

образования фаз-упрочнителей - интерметаллидных фаз типа $\gamma'-(\text{Ni}, \text{Fe})_3(\text{Ti}, \text{Al})$ и фаз Лавеса (Fe_2Mo , Fe_2W , $\text{Fe}_2(\text{W}, \text{Mo})$).

Аустенитные стали с интерметаллидным упрочнением содержат повышенные количества Ni, Ti и Al. Замена никеля марганцем в сталях этого типа не производится, так как он не образует благоприятных для упрочнения интерметаллидных фаз и понижает жаростойкость сталей. Содержание углерода в этих сталях ограничивают обычно $<0,1\%$. Во многие стали дополнительно вводят Mo и W (до $3,5\%$) с целью повышения длительной прочности.

Аустенитные стали с интерметаллидным упрочнением, как и с карбидным упрочнением, относятся к дисперсионнотвердеющим, и поэтому их термическая обработка имеет аналогичный характер и состоит из закалки от $1100...1180^\circ\text{C}$ и последующего высокотемпературного отпуска (старения) при $740...780^\circ\text{C}$ в течение $16...25$ ч.

3. Порядок выполнения и оформления работы

1. Ознакомиться с краткими сведениями из теории, законспектировав основные положения.
2. Получить у преподавателя задание по выбору материала для конкретного изделия.
3. Пользуясь справочной литературой и стандартами, выбрать марку стали для заданного изделия и предложить режим ее термической обработки. Обосновать свои рекомендации.
4. Оформить отчет по лабораторной работе.

4. Контрольные вопросы

1. Что такое жаропрочность?
2. Что такое жаростойкость?
3. Как влияет наличие скоростных газовых потоков на жаропрочность?
4. Как влияет наличие теплосмен на жаропрочность?
5. Что понимается под длительной эксплуатацией?
6. Что понимается под кратковременной эксплуатацией?
7. В чем различие между понятиями теплостойкость и жаростойкость?
8. Что такое дисперсионно стареющие стали?
9. На какие группы делятся теплостойкие стали?
10. На какие группы делятся аустенитные жаропрочные стали?
11. Какова схема термической обработки аустенитных жаропрочных сталей?

Литература

1. Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Г. Специальные стали: Учебник для вузов / М.: МИСИС, 1999. – 408 с.
2. Конструкционные материалы: Справочник / Под ред. Б.Н.Арзамасова // М.: Машиностроение, 1990. – 688 с.
3. Гуляев А.П. Металловедение: Учебник для вузов / М.: Металлургия, 1986. – 544с.
4. Материаловедение: Учебник для вузов / Б.Н.Арзамасов, И.И.Сидорин, Г.Ф.Косолапов и др.; Под ред. Б.Н.Арзамасова // М.: Машиностроение, 1986. – 384 с.
5. ГОСТ 5520-79 "Прокат листовой из углеродистой, низколегированной и легированной стали для котлов и сосудов, работающих под давлением. Технические условия".
6. ГОСТ 20072-74 "Сталь теплоустойчивая. Технические условия."
7. ГОСТ 5632-72 "Стали высоколегированные и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки".

8. ГОСТ 5949-75 "Сталь сортовая и калиброванная коррозионностойкая, жаростойкая и жаропрочная. Технические условия".

**Методические указания
К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ № 5**

ТИТАН И ЕГО СПЛАВЫ

(4 часа)

по дисциплине

Металловедение и термическая обработка (спецглавы)

Направление подготовки: 22.04.02 Metallургия

Профиль подготовки: Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Квалификация выпускника: - магистр

Форма обучения: очная

Тула 2021 г.

1. Цель работы

1. Ознакомиться с классификацией, назначением и свойствами титана и титановых сплавов.
2. Изучить микроструктуры титановых сплавов и установить связь между микроструктурой сплавов и диаграммой состояния "Ti – легирующий элемент".
3. Изучить влияние условий охлаждения на структурообразование и свойства титановых сплавов.

2. Краткие теоретические сведения

Символ Ti, порядковый номер 22, атомный вес 47,90, плотность 4,51 г/см³, температура плавления 1668 °С, температура кипения 3280 °С, твердость в отожженном состоянии 71,5 НВ.

Известны две аллотропические модификации титана. Низкотемпературная ГПУ α -модификация существует до 882,5 °С, выше этой температуры β -титан имеет ОЦК решетку. При переходе $\alpha \rightarrow \beta$ и при плавлении удельный объем металла несколько уменьшается. Чистейший иодидный титан обладает высокими пластическими свойствами при сравнительно низкой прочности (при 20 °С $\sigma_b = 200...250$ МПа, $\sigma_{0,2} = 100...150$ МПа, $\delta = 50...60$ %, $\psi = 70...80$ %).

Титан - химически активный металл. В то же время во многих агрессивных средах он обладает исключительно высоким сопротивлением коррозии, в большинстве случаев превышающим коррозионную стойкость нержавеющей сталей. Это объясняется образованием на поверхности металла плотной защитной пленки TiO₂. Титан стоек в тех средах, которые не разрушают защитную окисную пленку. Титан отличается чрезвычайно высокой стойкостью в морской воде. Его коррозионную стойкость можно значительно повысить легированием.

Титан склонен к коррозии под напряжением в присутствии хлористого натрия и других галоидов: он растрескивается при небольших напряжениях в интервале температур 215...550 °С. Это явление получило название *солевой коррозии*. Коррозии способствуют наличие острых надразов и, особенно, усталостных трещин.

При достаточно высоких температурах титан активно взаимодействует с газами (Н, N, O₂, CO₂, NH₃ и др.), а в расплавленном состоянии со всеми известными огнеупорными материалами. При сравнительно низких температурах титан поглощает чрезвычайно большие количества водорода (в десятки тысяч раз больше, чем железо и алюминий). Основным источником наводороживания - пары воды, которые разлагаются при взаимодействии с титаном.

Взаимодействие титана с легирующими элементами и примесями

Титан образует непрерывные твердые растворы с цирконием и гафнием, а β -модификация титана - с V, Nb, Ta, Cr, Mo, W. Остальные элементы ограниченно растворяются в титане.

Для металловедения титана наибольшее значение имеет низкотемпературная часть диаграмм состояния, поскольку характер невариантных реакций с участием жидкости оказывает малое влияние на структуру и свойства титановых сплавов. В соответствии с этим все легирующие элементы по влиянию на полиморфизм титана можно разделить на три группы:

1. α -стабилизаторы - элементы (из металлов - Al, Ga, In; из неметаллов - C, N, O), стабилизирующие α -фазу, т.е. повышающие температуру полиморфного превращения титана (рис.1,а).
2. β -стабилизаторы - элементы, понижающие температуру полиморфного превращения и расширяющие область существования β -модификации. Все β -стабилизирующие элементы можно разделить на три подгруппы:

- элементы, ограниченно растворимые как в β -, так и в α -модификациях титана и при содержании сверх предела растворимости, образующие с титаном интерметаллидные соединения. При охлаждении из β -области распад β -твердого раствора на α -твердый раствор и интерметаллид происходит по эвтектоидной реакции (рис.1,б), в связи с чем элементы такого типа получили название эвтектоидообразующих β -стабилизаторов. К ним относятся Cr, Mn, Fe, Ni, Co, Si, Cu;

- элементы, изоморфные β -модификации титана, образующие с ней непрерывный ряд твердых растворов и ограничено растворяющиеся в α -модификации: Ta, Nb, V, Mo. При их достаточно высокой концентрации β -структура сохраняется до комнатных температур (рис.1,в). К этой же подгруппе следует отнести и вольфрам, хотя он и дает с титаном монотектоидное превращение; в этой системе β -Ti и W образуют непрерывные твердые растворы, а α -фаза при всех температурах находится в равновесии с β -фазой (рис.1,г). Элементы этой подгруппы называют изоморфными β -стабилизаторами;

- элементы, стабилизирующие равновесную β -фазу при комнатной температуре, но не образующие непрерывных β -твердых растворов из-за отсутствия изоморфности в кристаллическом строении β -Ti и легирующего элемента (хотя критерии непрерывной растворимости, связанные с объемным и температурным факторами выполняются). К элементам этой подгруппы относятся Re, Ru, Rh, Os, Ir, которые можно назвать изоморфными квази- β -стабилизаторами.

3. "Нейтральные" упрочнители - элементы, мало влияющие на температуру полиморфного превращения титана. К таким элементам относятся Sn, Zr, Ge, Hf, Th.

Азот и кислород в области малых концентраций, являясь в титане примесями внедрения, сильно упрочняют титан, при этом азот оказывается более сильным упрочнителем, чем кислород. Пластичность титана при легировании азотом и кислородом сильно падает.

Углерод меньше влияет на свойства титана, чем азот и кислород. Если концентрация углерода превышает предел растворимости, то пластичность титана сильно снижается из-за выделения карбида TiC.

Водород - весьма вредная примесь в титане и его сплавах, он резко снижает ударную вязкость даже при очень небольших его концентрациях из-за выделения гидридов TiH₂. Водород сравнительно мало влияет на механические свойства металлов при испытаниях на разрыв со стандартными скоростями деформации. Водородная хрупкость в титановых сплавах в наиболее опасной форме проявляется при замедленном разрушении, под которым понимают зарождение и развитие в металле, находящемся под постоянным или мало изменяющимся по величине напряжением, трещин, ведущих в конечном итоге к разрушению образца или изделия. О склонности титана и его сплавов к водородной хрупкости обычно судят по результатам испытаний на ударную вязкость и замедленное разрушение.

Железо образует с α - и β -титаном твердые растворы замещения и стабилизирует β -фазу. Максимальная растворимость железа в α -титане составляет менее 0,2 % и уменьшается с понижением температуры, так что при 500 °C она становится меньше 0,01 %. Железо значительно меньше влияет на механические свойства титана, чем примеси внедрения.

В системе Ti-Si образуется несколько силицидов, из которых самый близкий по составу к титану Ti₅Si₃. На механические свойства титана кремний влияет примерно так же, как и железо; Si повышает сопротивление ползучести и увеличивает прочность при всех температурах. При малых концентрациях железо и кремний почти не влияют на пластичность титана.

Технический титан

С увеличением содержания примесей прочностные свойства титана повышаются, а пластические падают. Технический титан маркируют в зависимости от содержания примесей: ВТ1-0 (сумма примесей $\leq 0,55$ %), ВТ1-00 (сумма примесей $\leq 0,398$ %). Методом зонной плавки или методом термической диссоциации четырехиодидного титана получают чистейший иодидный титан (сумма примесей $\leq 0,1$ %).

Технический титан в литом состоянии имеет игольчатую структуру α' -мартенсита, который образуется при охлаждении из β -фазы. После отжига α' -фаза заменяется равноосной, полиэдрической структурой α -фазы. Литую крупнозернистую структуру можно измельчить деформацией с последующим рекристаллизационным отжигом.

Технический титан обладает высокими технологическими свойствами. Из него выпускают практически все виды полуфабрикатов, получаемых обработкой давлением.

Общая характеристика титановых сплавов

В настоящее время известно довольно большое число серийных титановых сплавов, отличающихся по химическому составу, механическим и технологическим свойствам. Наиболее распространенные легирующие элементы в титановых сплавах: Al, Mo, Sn, Zr, Mn, Cr, Si, Fe и в меньшей степени Nb и W.

Почти все промышленные титановые сплавы содержат алюминий. С понижением температуры растворимость алюминия в α -Ti уменьшается с $\sim 11,6$ % при 1080 °C до ~ 6 % при 550 °C. В системе "титан-алюминий" в богатой титаном области обнаружены два интерметаллида Ti_3Al и $TiAl$. Алюминий повышает удельную прочность сплава, жаропрочность, модуль упругости, уменьшает склонность к водородной хрупкости. Содержание алюминия в титановых сплавах ограничено до 7 % из-за уменьшения технологической пластичности.

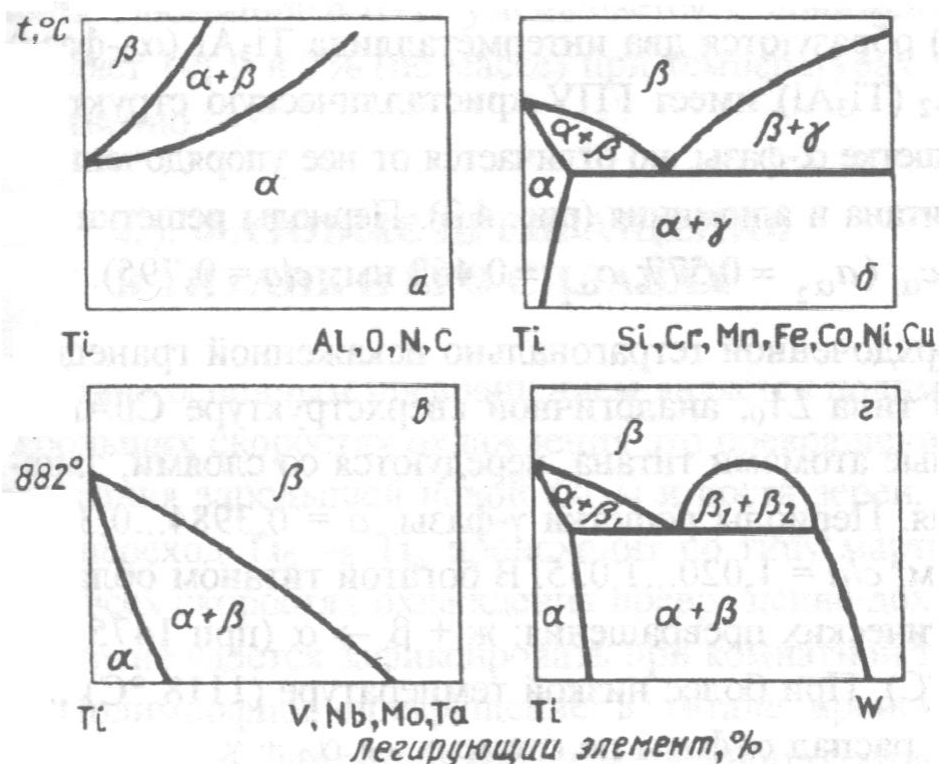


Рис.1. Схема влияния легирующих элементов и примесей на температуру полиморфного превращения титана

Помимо алюминия, титановые α -сплавы легируют оловом и цирконием. Sn и Zr - нейтральные упрочнители, повышающие термическую стабильность, предел ползучести, прочность при низких и средних температурах. Сплавы этого класса отличаются повышенной жаропрочностью, отсутствием хладноломкости. Весьма ценным свойством этих сплавов является их хорошая свариваемость; даже при значительном содержании алюминия они остаются однофазными, поэтому не возникает охрупчивания шва и околошовной зоны.

Mo и W при введении наряду с алюминием способствуют повышению жаропрочности сплавов.

В зависимости от добавленных легирующих элементов сплавы титана делятся на группы в соответствии со структурой, которая формируется в них по принятым в промышленности режимам термической обработки. Согласно этой классификации следует различать:

- 1) α -сплавы, структура которых представлена α -фазой;
- 2) псевдо- α -сплавы, структура которых представлена в основном α -фазой и небольшим количеством β -фазы (не более 5 %);
- 3) $(\alpha+\beta)$ -сплавы, структура которых представлена в основном α - и β -фазами;
- 4) псевдо- β -сплавы со структурой в отожженном состоянии, представленной α -фазой и большим количеством β -фазы; в этих сплавах закалкой или нормализацией с температур β -области можно легко получить однофазную β -структуру;
- 5) β -сплавы, структура которых представлена термодинамически стабильной β -фазой.

По назначению титановые сплавы разделяют на конструкционные общего назначения, жаропрочные, коррозионностойкие и криогенные. В связи с тем, что в последнее время в промышленности стали применять фасонные отливки из титана и его сплавов, имеет смысл различать деформируемые и литейные титановые сплавы.

При небольших скоростях охлаждения превращение $Ti_{\beta} \rightarrow Ti_{\alpha}$ происходит по диффузионному механизму, т.е. путем образования и роста зародышей новой фазы. В соответствии с принципом структурного и размерного соответствия при $\beta \rightarrow \alpha$ превращении α -фаза обычно растет в форме пластин. В сплавах титана полиморфное $\beta \leftrightarrow \alpha$ -превращение в отличие от титана протекает в интервале температур.

При быстром охлаждении это превращение протекает по типу мартенситного. При этом происходит образование α' -мартенсита, являющегося промежуточной фазой при превращении $\beta \rightarrow (\alpha') \rightarrow \alpha$. В сплавах с концентрацией β -стабилизаторов, большей критической, мартенситное превращение не происходит и в них после закалки сохраняется метастабильная β -фаза. При последующем старении из нее выделяются дисперсные частицы α -фазы.

Для титана и его сплавов применяют в основном следующие виды термической обработки: отжиг, закалку и старение, в меньшей степени химико-термическую и термомеханическую обработку. Упрочнение титановых сплавов при закалке и старении определяется их фазовым составом после закалки и количеством метастабильных фаз. По способности к упрочнению при старении титановые сплавы можно разделить на термически не упрочняемые сплавы и сплавы, термически упрочняемые за счет дисперсионного твердения.

Деформируемые титановые сплавы

В таблице представлены составы промышленных деформируемых титановых сплавов различных структурных классов.

Титановые α -сплавы, помимо алюминия, легируют оловом и цирконием. Сплавы этого класса отличаются повышенной жаропрочностью, отсутствием хладноломкости.

Весьма ценным свойством этих сплавов является их хорошая свариваемость; даже при значительном содержании алюминия они остаются однофазными, поэтому не возникает охрупчивания шва и околошовной зоны.

Из сплавов двойной системы Ti-Al в промышленном масштабе применяется только сплав BT5. Дополнительное легирование нейтральными упрочнителями (Sn или Zr) способствует повышению технологичности титановых α -сплавов.

Псевдо- α -сплавы титана можно подразделить на четыре группы. К первой группе относятся сплавы, в которые, помимо алюминия, введены эвтектоидообразующие стабилизаторы в количествах, близких к их предельной растворимости (OT4-0, OT4-1, OT4). Эту группу представляют сплавы системы Ti-Al-Mn, образующие своеобразную цепочку составов. При близком оптимальном содержании марганца в этих сплавах меняется концентрация алюминия, что позволяет получить широкий диапазон свойств.

Вторую группу составляют сплавы, легированные алюминием и небольшими добавками β -стабилизаторов, в частности ПТЗВ и сплавы серии OT4У-OT4В, отличающиеся от сплавов первой группы (типа OT4) заменой марганца на ванадий в эквивалентных количествах.

Сплавы системы Ti-Al-V отличаются от сплавов Ti-Al-Mn меньшей склонностью к водородной хрупкости и вместе с тем обладают такой же высокой технологичностью при обработке давлением, как и сплавы серии OT4.

Таблица

Химический состав промышленных деформируемых титановых сплавов

Сплав	Содержание легирующих элементов, % (по массе), остальное Ti					
	Al	Zr	V	Mo	Cr	Другие элементы
1	2	3	4	5	6	7
α-сплавы						
BT5	5	-	-	-	-	-
BT5-1	4,0...6,0	-	-	-	-	(2,0...3,0)Sn
ПТ7М	1,8...2,5	2,0...3,0	-	-	-	-
Псевдо-α-сплавы						
OT4-0	0,4...1,4	-	-	-	-	(0,5...1,3)Mn
OT4-1	1,5...2,5	-	-	-	-	(0,7...2,0)Mn
OT4	3,5...5,0	-	-	-	-	(0,8...2,0)Mn
ПТЗВ	3,5...5,5	-	1,2...2,5	-	-	-
OT4-1В	2,5...3,5	-	2,0...3,0	-	-	-
OT4В	4,0...5,5	-	2,0...3,0	-	-	-
AT3	2,5...3,5	-	-	-	0,4...0,9	0,4Fe; 0,4Si
AT6	5,0...7,0	-	-	-	0,4...0,9	0,4Fe; 0,4Si
BT18У	6,2...7,3	3,5...4,5	-	0,4...1,0	-	2,5Sn; 1Nb; 0,2Si
BT20	5,5...7,0	1,5...2,5	0,8...2,5	0,5...2,0	-	-
1	2	3	4	5	6	7
(α+β)-сплавы						
BT6	5,5...6,8	-	3,5...4,5	-	-	-
BT14	3,5...6,3	-	0,9...1,9	2,5...3,8	-	-
BT16	1,8...3,8	-	4,0...5,0	4,5...5,5	-	-
BT3-1	5,5...7,0	-	-	2,0...3,0	0,8...2,3	0,3Si; 0,5Fe
BT8	5,8...7,0	-	-	2,5...3,8	-	(0,2...0,4)Si
BT8М	5	1	-	4	-	0,2Si; 1Sn
1	2	3	4	5	6	7
BT9	5,8...7,0	1,0...2,0	-	2,8...3,8	-	(0,2...0,35)Si

BT25Y	6,0...7,0	3,0...4,5	-	3,5...4,5	-	1Sn; 1W; 0,2Si
BT22	4,0...5,9	-	4,0...5,5	4,0...5,5	0,5...2,0	(0,5...1,5)Fe
BT23	4,0...6,3	-	4,0...5,0	1,5...2,5	0,8...1,4	(0,4...1,0)Fe
Псевдо-β-сплавы						
BT19	2,5...3,5	0,5...1,5	3,0...4,0	5,0...6,0	5,0...6,0	-
BT30	-	5,5	-	11	-	4,5Sn
BT35	3	1	15	1	3	3Sn
BT32	3	-	8	8	1,3	1,3Fe
β-сплавы						
4201	-	-	33	-	-	-
42014	-	0,1...0,7	29...35	-	-	0,15Si

К третьей группе можно отнести комплексно легированные сплавы, содержащие алюминий, β-стабилизаторы и нейтральные упрочнители (BT20 и BT18Y). Сплав BT18Y относится к наиболее жаропрочным титановым сплавам; он может длительно работать при температурах 550...600 °С.

К четвертой группе относятся сплавы, легированные нейтральными упрочнителями (обычно цирконием) и β-стабилизаторами (Nb, V, Mo) в количествах, близких к их предельной растворимости в α-фазе. К сплавам этой группы принадлежат AT2 (2 %Zr, 1 %Mo), AT2-1, AT2-2, AT2-3). Их структура представлена при комнатной температуре или α-фазой, или этой же фазой с небольшими добавками β-фазы.

(α+β)-сплавы – сплавы, структура которых после отжига состоит из α- и β-фаз; сплавы этого типа могут содержать также интерметаллиды. По типу легирующих элементов эти сплавы можно разделить на 4 группы.

1. Сплавы, легированные алюминием и изоморфными β-стабилизаторами; классическим примером таких сплавов является BT6 системы Ti-Al-V. Сплав BT6 применяют в отожженном и термически упрочненном состояниях. По структуре в закаленном состоянии сплав BT6 относится к мартенситному классу.

Сплавы этой группы могут содержать не один, а несколько изоморфных стабилизаторов (BT14, BT16).

2. Сплавы, легированные алюминием, изоморфными и эвтектоидообразующими β-стабилизаторами, представленными переходными элементами. В частности, сплав BT22 легирован Al, Mo, V и небольшими количествами Cr и Fe. По структуре в закаленном состоянии - это сплав переходного класса (или β-фаза, или β+мартенсит). В отожженном состоянии структура этого сплава представлена примерно равными количествами α- и β-фаз, поэтому он относится к самым прочным титановым сплавам в отожженном состоянии.

К этой же системе принадлежит новый среднелегированный сплав BT23, содержащий несколько меньшие концентрации легирующих элементов по сравнению со сплавом BT22. Этот сплав отличается высокой технологической пластичностью, хорошо сваривается.

3. Сплавы, легированные алюминием, изоморфными β-стабилизаторами, эвтектоидообразующими β-стабилизаторами, представленными непереходными элементами (обычно кремнием) и иногда нейтральными упрочнителями (BT8, BT9). Ввиду благоприятного влияния циркония и высокого содержания алюминия сплав BT9 более жаропрочен, чем другие титановые (α+β)-сплавы, и может работать до 500...550 °С.

4. Сплавы, легированные алюминием, изоморфными β-стабилизаторами, эвтектоидообразующими β-стабилизаторами, представленными переходными и непереходными элементами. Отличие сплавов этой группы от предыдущей заключается в том, что при повышенных температурах β-фаза в них может распадаться по эвтектоидной реакции, что вызывает их охрупчивание. Поэтому сплавы четвертой группы сохраняют

жаропрочность до меньших температур, чем сплавы третьей группы. Типичный представитель сплавов этой группы - сплав ВТЗ-1, относящийся к системе Ti-Al-Cr-Mo-Fe-Si.

Двухфазная ($\alpha+\beta$)-смесь в отожженных сплавах может быть равноосной, мелко- "корзиночного плетения" или грубоигольчатой, видманштеттовой. Первая структура получается в результате того, что внутри зерен β -фазы в разных направлениях растут α -пластины. Находясь на разных "горизонтах", направленно выросшие пластинки создают впечатление переплетенных кристаллов. Вторая структура свойственна перегретому сплаву, когда по границам крупных β -зерен выделяются грубые α -пластины.

К *псевдо- β -сплавам* относятся сплавы со структурой в отожженном состоянии, представленной α -фазой и большим количеством β -фазы. В этих сплавах закалкой или нормализацией из β -области можно легко получить однофазную β -структуру. Разработанные к настоящему времени псевдо- β -сплавы можно разделить на две группы: а) сплавы, легированные β -стабилизаторами и нейтральными упрочнителями (ВТ30); б) сплавы, легированные алюминием, β -стабилизаторами, а в некоторых случаях нейтральными упрочнителями (ВТ19, ВТ32, ВТ35).

β -сплавы имеют в отожженном состоянии термически стабильную β -структуру. В полупромышленном масштабе в нашей стране производится лишь два β -сплава (4201 и 42014), отличающиеся высокой коррозионной стойкостью. В ряде областей применения они могут заменять тантал, коррозионностойкие никелевые сплавы и даже золото и платину.

3. Порядок выполнения и оформления работы

1. Ознакомиться с краткими сведениями из теории, законспектировав основные положения.
2. Нарисовать диаграмму состояния "титан-алюминий", указать фазовый состав во всех областях диаграммы, дать характеристику всех фаз системы. Получить комплект микрошлифов, в который входят образцы технического титана ВТ1-0 и титановых сплавов (ОТ4, ВТЗ-1, ВТ5, ВТ14, ВТ15 в различных состояниях).
3. Изучить микроструктуры всех образцов с использованием оптического металлографического микроскопа, зарисовать микроструктуры, указать структурные составляющие, сравнив их с атласом микроструктур, описать характерные особенности структурообразования всех сплавов.
4. Определить по микроструктуре принадлежность сплавов к тому или иному классу по структуре и способности к упрочнению термической обработкой.
5. Проанализировать изменение структуры и свойств титановых сплавов с изменением качественного и количественного содержания легирующих элементов и условий охлаждения.
6. Сделать выводы по работе.

4. Контрольные вопросы

1. Назовите основные характеристики физических, механических, технологических, и др. свойств титана.
2. В каких отраслях промышленности особенно перспективно применение титана?
3. Как классифицируются и как влияют на свойства и структуру примеси в титане?
4. На какие группы по характеру влияния на полиморфное превращение титана делятся легирующие элементы? Приведите примеры и вид диаграмм состояния с α - и β -стабилизаторами.
5. Какие сплавы титана можно подвергнуть термической обработке (обосновать анализом обобщенной диаграммы состояния "титан-легирующий элемент")?

6. Какие сплавы титана по составу и структуре являются оптимальными в качестве конструкционных материалов?
7. Какие возможны неравновесные фазы у закаленных титановых сплавов?
8. Опираясь на особенности строения закаленных титановых сплавов, сформулировать отличительные черты процесса старения (отпуска) этих сплавов и формирующихся при этом структур?
9. Как классифицируются титановые сплавы по структуре в нормализованном и закаленном состояниях?
10. Как классифицируются титановые сплавы по способу производства?
11. Что такое - удельная прочность и каково значение этой характеристики для титана, стали, алюминия?

Литература

1. Колачев Б.А., Елагин В.И., Ливанов В.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. Учебник для вузов / М.: *МИСИС*, 1999.- 416 с.
2. Материаловедение. Учебник для вузов / Б.Н. Арзамасов, И.И. Сидорин, Г.Ф. Косолапов и др.; Под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. - М.: Машиностроение, 1986.- 384 с.
3. Мальцев М.В., Барсукова Т.Я., Боряк Ф.А. Металлография цветных металлов и сплавов (с атласом микроструктур).- М.: ГНТИЛ по черной и цветной металлургии, 1960. - 372 с.
4. ГОСТ 19807 –91 «Титан и сплавы титановые деформируемые. Марки».

**Методические указания
К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ № 6**

АЛЮМИНИЙ И ДЕФОРМИРУЕМЫЕ СПЛАВЫ НА ЕГО ОСНОВЕ

(4 часа)

по дисциплине

Металловедение и термическая обработка (спецглавы)

Направление подготовки: 22.04.02 Металлургия

Профиль подготовки: Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Квалификация выпускника: - магистр

Форма обучения: очная

Тула 2021 г.

1. Цель работы

1. Ознакомиться с классификацией, назначением и свойствами алюминия и деформируемых сплавов на его основе.
2. Изучить микроструктуры деформируемых алюминиевых сплавов в различных состояниях и установить связь между микроструктурой сплавов и диаграммой состояния "Al – легирующий элемент".

2. Краткие теоретические сведения

Символ Al, порядковый номер 13, атомный вес 26,97, плотность 2,7 г/см³, температура плавления 660 °С, температура кипения 2450 °С, твердость в отожженном состоянии 24,5 НВ.

Чистый алюминий - металл серебристого цвета, имеет ГЦК решетку и не претерпевает полиморфных превращений. Он - один из самых легких металлов: примерно втрое легче меди или железа. По теплопроводности и электропроводности он уступает лишь серебру, золоту и меди.

Алюминий - химически активный металл. Однако он легко покрывается с поверхности окисной пленкой, которая защищает его от дальнейшего взаимодействия с окружающей средой. Окисная пленка плотная, обладает очень хорошим сцеплением с металлом и малопроницаема для всех газов. В обычных условиях этот металл обладает достаточной химической стойкостью и не взаимодействует с водой, ее парами, СО, СО₂. При нагревании алюминий восстанавливает большинство окислов, что положено в основу алюмотермии.

Отожженный алюминий технической чистоты при комнатной температуре имеет $\sigma_b = 80$ МПа, $\delta = 40$ %, $\psi = 90$ % и НВ 25. С повышением чистоты прочность его уменьшается, а пластичность увеличивается. Из алюминиевых сплавов изготавливают практически все известные в технике деформированные полуфабрикаты: фольгу, листы, плиты, прутки, различные профили, трубы, ребристые панели, поковки и штамповки, проволоку. При их производстве широко используют различные способы горячей и холодной обработки давлением.

Пластическая деформация металла при обработке давлением не только является средством получения изделий определенной формы, но она также кардинально изменяет структуру металла и тем самым эффективно влияет на его свойства. Алюминий и его сплавы, будучи весьма пластичными материалами, существенно упрочняются при холодной деформации. Этот эффект широко используют на практике.

По чистоте первичный алюминий делится на три класса: особой чистоты А999 (99,999 %Al); высокой чистоты А995, А99, А97, А95 (99,995...99,95 %Al) и технической чистоты А85, А8, А7, А6, А5, А0 (99,85...99,0 %Al). Технический алюминий очень пластичен, он выдерживает холодную деформацию до 99 %. Из него изготавливают листы, прутки и проволоку. Листы толщиной 1...10 мм из алюминия марок АД00, АД0, АД, АД1 выпускают в горячекатанном, отожженном и нагартованном состояниях.

Взаимодействие алюминия с легирующими элементами и примесями

С большинством легирующих элементов алюминий образует диаграммы состояния эвтектического типа с ограниченной растворимостью элементов в алюминии. Фазами в сплавах являются α -твердый раствор легирующих элементов в алюминии и химические соединения между ними (интерметаллиды) или почти чистые кристаллы легирующих элементов (примесей).

Основные примеси в алюминии - железо и кремний. Железо - практически нерастворимый в алюминии элемент (рис.1,а). При ничтожно малых его содержаниях в структуре алюминия появляется эвтектика Al+Al₃Fe. Соединение Al₃Fe выделяется в литом алюминии в виде темных игол, располагающихся по границам зерен и являющихся

готовыми надрезами в металле. Поэтому железо снижает пластические свойства алюминия. Оно уменьшает также коррозионную стойкость алюминия.

Кремний не образует с алюминием химических соединений и присутствует в сплавах алюминия в элементарном виде (рис.1,б). По своим физическим свойствам кремний близок к химическим соединениям, обладая высокой твердостью и хрупкостью. Несмотря на заметную растворимость, кремний не сообщает алюминию способность к упрочнению термической обработкой. Растворяясь в алюминии, кремний несколько упрочняет его, незначительно снижая при этом пластические свойства. Алюминиевый сплав, содержащий даже 10...12 %Si, остается достаточно пластичным.

В техническом алюминии обе примеси присутствуют одновременно и при определенном соотношении между ними образуются тройные химические соединения сложного состава, условно обозначаемые α (Fe-Si-Al) и β (Fe-Si-Al). Эти соединения нерастворимы в алюминии и кристаллизуются либо прямо из жидкости в виде первичных кристаллов, либо в виде эвтектики Al+ α (Fe-Si-Al). Располагаясь по границам дендритов алюминия в виде хрупких игольчатых выделений или в виде характерных китайских иероглифов, эти соединения охрупчивают металл и снижают его коррозионную стойкость. После деформации при температурах выше 500 °С и длительного отжига происходит раздробление и частичное стягивание пластинок и иголок в округленные зернышки, которые видны уже на нетравленном шлифе в форме темных разрозненных включений. Такая структура обеспечивает сплаву высокую пластичность, необходимую для последующей деформации. Алюминий высокой чистоты, в котором сумма примесей железа и кремния не превышает 0,010 %, имеет чистые границы.

Классификация алюминиевых сплавов

Наиболее широко в качестве легирующих элементов в алюминиевых сплавах применяют медь, магний, марганец, цинк, кремний, а в последнее время и литий. Кроме основных шести, известно еще около двух десятков легирующих добавок. В промышленности используют около 55 марок алюминиевых сплавов. Алюминиевые сплавы классифицируют по технологии изготовления, способности к термической обработке и свойствам.

В зависимости от способа получения полуфабрикатов и изделий алюминиевые сплавы можно разделить на деформируемые и литейные. Помимо этого, методами порошковой металлургии изготавливают САПы (спеченные алюминиевые порошки) и САСы (спеченные алюминиевые сплавы). Заготовки, полученные методами порошковой металлургии, затем подвергают обработке давлением, поэтому порошковые алюминиевые сплавы следует рассматривать как разновидность деформируемых.

Деформируемые и литейные сплавы можно разделить на термически упрочняемые и термически неупрочняемые. Термическое упрочнение, в свою очередь, может достигаться закалкой с последующим естественным или искусственным старением.

Границей между деформируемыми и литейными сплавами является предел насыщения алюминиевого твердого раствора при эвтектической температуре, а границей между сплавами, упрочняемыми и неупрочняемыми термообработкой, является предел насыщения того же раствора при комнатной температуре. Таким образом, способность сплава деформироваться и упрочняться термической обработкой определяется положением его состава на диаграмме состояния Al-легирующий элемент (рис.2).

Все применяемые в промышленности сплавы можно также разбить по системам, в которых основные легирующие компоненты будут определять типичные для данной системы физические и химические свойства, поскольку свойства сплавов определяются, прежде всего, их фазовым составом. Три легирующих компонента (Cu, Mg и Si) входят (порознь или совместно) в большинство промышленных сплавов.

Термически неупрочняемые деформируемые сплавы

К этой группе относятся сплавы алюминия с марганцем и магнием. Они имеют невысокую прочность, хорошую пластичность, свариваемость и коррозионную стойкость. Сплавы могут упрочняться только холодной пластической деформацией.

Сплавы системы Al-Mn (АМц). Для алюминиевой части диаграммы состояния Al-Mn (рис.3) характерны следующие особенности:

а) очень небольшой ($0,5...1$ °С) температурный интервал кристаллизации первичного твердого раствора на основе алюминия (α -фаза);

б) довольно высокая растворимость марганца в алюминии при эвтектической температуре ($1,4$ %Mn) и резкое ее падение в интервале $550...450$ °С, охватывающем весь диапазон температур нагрева под закалку промышленных алюминиевых сплавов.

Ввиду малой скорости диффузии марганца в алюминии сплавы этой системы весьма склонны к образованию аномально пересыщенных твердых растворов.

Промышленный сплав АМц содержит от 1 до $1,6$ %Mn. В действительности сплав является многокомпонентным, а не двойным, вследствие наличия неизбежных в алюминии примесей железа и кремния. Эти примеси, особенно кремний, сильно уменьшают растворимость марганца в алюминии. Так, в чистом алюминии при 500 °С растворяется $0,4$ %Mn, а в алюминии с $0,1$ %Fe и $0,65$ %Si - всего $0,05$ %Mn.

Соединение Al_6Mn может растворять в себе значительные количества железа, атомы которого замещают атомы марганца. При этом фаза $Al_6(Mn,Fe)$ кристаллизуется в форме крупных пластинчатых кристаллов, которые резко ухудшают литейные и механические свойства сплавов, затрудняют их обработку давлением.

В сплавах Al-Mn с добавками кремния наряду с кристаллами Al_6Mn и Si может быть тройная Т-фаза, представляющая собой твердый раствор на основе соединения $Al_{10}Mn_2Si$. Фаза Т образует скелетообразные кристаллы. При одновременном содержании железа и кремния в сплавах Al-Mn могут также образовываться фазы $\alpha(AlFeSi)$, $AlMnSiFe$.

Сплавы системы Al-Mg (АМг). В системе Al-Mg образуется несколько химических соединений. Наиболее близкое к алюминию соединение $\beta(Al_3Mg_2)$ образует с твердым раствором на основе алюминия эвтектическую систему (рис.4). Эвтектическая точка соответствует 33 %Mg. Растворимость магния в алюминии довольно высока и составляет $17,4$ %Mg при 450 °С и около $1,4$ %Mg при комнатной температуре. Хотя растворимость магния в алюминии велика, из-за неравновесных условий кристаллизации в сплавах, содержащих более $1...2$ %Mg, могут появляться эвтектические включения β -фазы. При гомогенизации слитков эти выделения растворяются, и после охлаждения на воздухе при практически встречающихся концентрациях магния в сплавах фиксируются гомогенные твердые растворы. Наиболее прочный из промышленных сплавов этой системы - сплав АМгб.

Сплавы системы Al-Mg, за исключением АМг1, дополнительно легируют марганцем, который может давать с алюминием соединение Al_6Mn . Промышленные сплавы обязательно содержат примесь кремния, вследствие чего в их структуре может присутствовать силицид магния Mg_2Si . При содержании в сплавах железа, марганца и кремния возможно образование соединения $AlFeSiMn$.

Деформируемые сплавы, упрочняемые термической обработкой

Основными в этой группе являются сплавы систем алюминия с медью, магнием, марганцем, кремнием, литием и бериллием. Указанные легирующие элементы определяют типичные для данной системы физические, химические и механические свойства. В основе общности свойств сплавов каждой системы лежит общность их фазового состава. Помимо главных элементов, в сплавы одной системы могут добавляться другие элементы, которые придают сплавам дополнительные свойства без изменения основных.

Сплавы на основе системы Al-Cu-Mg (дуралюмины). Составы промышленных дуралюминов представлены в табл.1.

Дуралюмины, всегда содержащие неизбежные примеси железа и кремния (десятиые доли процента), являются многокомпонентными сплавами с весьма сложным составом, однако для суждения об основных фазах, определяющих природу и свойства сплавов, можно использовать диаграмму состояния тройной системы Al-Cu-Mg. Стабильными фазами в этой системе являются: α -твердый раствор на основе алюминия; θ (Al_2Cu); S (Al_2CuMg); T ($\text{Al}_{12}\text{Mn}_2\text{Cu}$). По мере повышения содержания магния в дуралюминах и увеличения отношения Mg/Cu их фазовый состав изменяется: $\alpha + \theta$ (В65), $\alpha + \theta + S$ (Д1, Д16), $\alpha + S$ (ВД17, Д19) (рис.5). При высоких температурах, близких к солидусу, фигуративные точки сплавов В65, Д18 и Д1 попадают в однофазную область (α), а сплавов Д16, Д19, ВАД1 остаются в двухфазной области ($\alpha + S$), но у самой границы с однофазной. Это означает, что растворимость фаз θ и S с повышением температуры увеличивается и нагрев дуралюминов до 500 °С приводит к полному или почти полному растворению интерметаллидных фаз в алюминии.

Таблица 1

Средний состав промышленных дуралюминов (основа - алюминий)

Сплав	Содержание компонентов, %				
	Cu	Mg	Mn	Ti	Zr
Д1	4,3	0,6	0,6	-	-
Д16, Д16ч	4,3	1,5	0,6	-	-
Д19	4,0	2,0	0,75	-	-
ВАД1	4,1	2,5	0,60	0,06	0,15
ВД17	3,0	2,2	0,55	-	-
ВД18	2,6	0,35	-	-	-
В65	4,2	0,25	0,4	-	-

В зависимости от фазового состава θ или S или обе эти фазы служат упрочняющими фазами при термообработке, которая позволяет значительно повысить прочность сплавов. Именно поэтому медь и магний в дуралюминах, образующие с алюминием упрочняющие фазы, являются главными легирующими компонентами, определяющими природу сплавов.

В сплаве Д1 из-за неравновесной кристаллизации в литой структуре, кроме α -твердого раствора, обнаруживается "лишняя" структурная составляющая – эвтектика ($\alpha + \text{CuAl}_2$), вырожденная в CuAl_2 (серого цвета), окаймляющая границы светлых дендритных ячеек α -фазы. Структура литого Д16 подобна структуре сплава Д1, но, кроме CuAl_2 , по границам α -ячеек располагаются выделения Mg_2Si и фазы S (темного цвета).

Все дуралюмины, за исключением низколегированного Д18, интенсивно упрочняются (после закалки) при естественном старении. Время достижения максимальных прочностных характеристик зависит от соотношения Mg/Cu; чем больше это отношение, тем медленнее идет старение. Структура закаленных и естественно состаренных дуралюминов состоит из светлых зерен α -фазы и небольшого количества включений интерметаллидов (темного цвета), нерастворившихся при нагреве под закалку. Микроструктура искусственно состаренного Д16 представляет собой зерна α -фазы, по границам и внутри которых располагаются дисперсные выделения CuAl_2 (серого цвета) и фазы S (темные), различимые только при увеличении более 1000 раз.

Сплавы на основе системы Al-Mg-Si. Эти сплавы широко известны под названием *авиали* (авиационный алюминий). Деформируемые сплавы системы Al-Mg-Si (табл.2) легированы в меньшей степени, чем дуралюмины; суммарное содержание легирующих компонентов в этих сплавах обычно колеблется в интервале 1...2 %. Они менее прочны, чем дуралюмины, но более пластичны и обладают лучшей коррозионной стойкостью.

Таблица 2

Средний состав промышленных сплавов системы Al-Mg-Si

Сплав	Содержание компонентов, %				
	Mg	Si	Cu	Mn	Cr
АВ	0,7	0,9	0,4	0,25	-
АД31	0,7	0,5	-	-	-
АД33	1,0	0,6	0,3	-	0,25
АД35	1,1	1,0	-	0,7	-

Как следует из диаграммы состояния системы Al-Mg-Si, магний и кремний характеризуются переменной растворимостью в твердом алюминии. В связи с очень малой растворимостью кремния в алюминии при низких температурах (200 °С) все сплавы этой системы имеют в равновесных условиях гетерогенную структуру. Фазовый состав сплавов АВ и АД35 (без учета примесей) α + Mg_2Si + Si, а сплавов АД31 и АД33 - α + Mg_2Si . При 550 °С все сплавы, за исключением АД35, гомогенны, т.е. фазы Mg_2Si и Si при нагреве полностью растворяются, что служит предпосылкой для упрочнения сплавов термической обработкой. Упрочняющей фазой во всех сплавах является Mg_2Si .

Подобно дуралюминам в литой структуре авиалей по границам дендритных ячеек α -твердого раствора легирующих элементов в алюминии располагаются включения интерметаллидов Mg_2Si и $CuAl_2$ эвтектического происхождения. В закаленном и естественно состаренном состояниях в АВ имеется одна структурная составляющая – зерна α -фазы. После искусственного старения по границам и внутри зерен α -фазы располагаются дисперсные выделения Mg_2Si . Избыток кремния, не связанный в Mg_2Si , располагается по границам зерен α -фазы.

Сплав АВ, обладающий максимальной прочностью среди сплавов этой системы благодаря довольно значительному избытку кремния по сравнению с необходимым для образования Mg_2Si , характеризуется наличием выделений кремния по границам зерен после искусственного старения и связанной с этим склонностью к межкристаллитной коррозии. Разработанные позднее сплавы АД31 и АД33 уступают сплаву АВ по прочности, но отличаются более высокой коррозионной стойкостью. Структуры этих сплавов подобны структуре АВ.

Сплавы на основе системы Al-Mg-Si-Cu. Сплавы на основе системы Al-Mg-Si-Cu широко распространены в качестве специальных сплавов, предназначенных для изготовления поковок и штамповок. В нашей стране используют два таких сплава АК6 и АК8. Эти сплавы имеют нечто общее с дуралюминами и с авиалами, они занимают как бы промежуточное положение между ними. Их можно рассматривать как авиали с повышенным содержанием меди (табл.3). В то же время сплав АК8 очень близок по составу к дуралюмину Д1 (его иногда называют супердуралюмином) и отличается от него только тем, что содержит кремний в качестве специального компонента.

Упрочняющими фазами в сплава АК6 и АК8 служат фазы W(Al-Mg-Si-Cu) и θ , а иногда может быть также Mg_2Si . Максимальный эффект упрочнения сплавов с этими фазами наблюдается после искусственного старения, поэтому оба сплава подвергают закалке и искусственному старению.

Таблица 3

Средний состав промышленных сплавов системы Al-Mg-Si-Cu

Сплав	Содержание компонентов, %			
	Mg	Si	Cu	Mn
АК6	0,65	0,9	2,2	0,6
АК8	0,6	0,9	4,3	0,7

В литом и термически обработанном состояниях структура этих сплавов подобна структуре дуралюминов, однако по границам дендритных ячеек α -фазы наблюдается больше, чем в дуралюминах, выделений интерметаллидов эвтектического происхождения.

Сплавы на основе систем Al-Zn-Mg и Al-Zn-Mg-Cu. В результате обширных исследований сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu с добавками марганца и хрома был разработан высокопрочный сплав В95. В дальнейшем для удовлетворения конкретных запросов промышленности были разработаны другие сплавы этой системы (табл.4).

Таблица 4

Средний состав промышленных сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu
(основа - алюминий)

Сплав	Содержание компонентов, %						
	Zn	Mg	Cu	Mn	Cr	Zr	Fe
В95, В95п.ч.	6	2,3	1,7	0,4	1,18	-	-
В96Ц	8,5	2,7	2,3	-	-	0,15	-
В93, В93п.ч.	7,0	1,9	1,0	-	-	-	0,3

Помимо алюминиевого твердого раствора, сплавы В95, В96Ц содержат фазы $\eta(\text{MgZn}_2)$, $T(\text{Al}_2\text{Mg}_3\text{Zn}_3)$, $S(\text{Al}_2\text{CuMg})$, а сплав В93 - первые две. В фазе Т растворяется определенное количество меди. Все три фазы могут быть упрочняющими при термообработке. Нагрев до 480 °С приводит к полному растворению интерметаллидных фаз в сплаве В93, а в сплавах В95 и В96Ц остается относительно небольшое количество фазы S. Однако, поскольку медь, повышая прочность сплавов в закаленном состоянии, мало влияет на эффект старения, основными упрочняющими фазами являются η и Т, т.е. те же фазы, что и в тройной системе Al-Zn-Mg, а фаза S играет значительно меньшую роль. Все сплавы системы Al-Zn-Mg-Cu подвергают закалке и искусственному старению.

Структура литых сплавов систем Al-Zn-Mg и Al-Zn-Mg-Cu представляет собой зерна α -фазы, по границам которых располагаются выделения интерметаллидных фаз $S(\text{Al}_2\text{CuMg})$, $T(\text{Al}_2\text{Mg}_3\text{Zn}_3)$ и $\eta(\text{MgZn}_2)$. В искусственно состаренном состоянии на фоне зерен α -фазы видны дисперсные частицы фаз-упрочнителей.

Сплавы на основе системы Al-Cu-Mn. Деформируемые алюминиевые сплавы с медью и добавками марганца (титана, циркония, ванадия) разработаны сравнительно недавно (табл.5). Они имеют высокие механические свойства в широком интервале температур (от -250 до +250 °С), технологичны и отличаются хорошей свариваемостью.

Таблица 5

Средний состав промышленных сплавов системы Al-Cu-Mn

Сплав	Содержание компонентов, %				
	Cu	Mn	Ti	Zr	V
Д20	6,5	0,6	0,15	-	-
1201	6,3	0,3	0,06	0,17	0,1

Сплавы Д20 и 1201 относятся к числу жаропрочных алюминиевых сплавов и предназначены для работы при 250...300 °С. Прочность сплава при этих температурах определяется в основном количеством, величиной и распределением частиц марганцевой и титановой фаз, а также скоростью их коагуляции при этих температурах. При этом, если при температурах до 250 °С сплавы Д20 и 1201 уступают по прочности сплаву Д16, то при температурах 250...300 °С их длительная прочность выше.

Сплавы на основе системы Al-Cu-Mg с добавками железа и никеля. По своей природе сплавы этой группы близки к дуралюминам. Основные легирующие компоненты, обуславливающие возможность упрочнения термообработкой, в них, так же как и в дуралюминах, - медь и магний. Кроме меди и магния, сплавы содержат специальные добавки практически нерастворимых в алюминии железа и никеля. Эти добавки не

улучшают механических свойств при нормальных температурах, но способствуют их увеличению при повышенных температурах. Наиболее типичный представитель этой группы сплав АК4-1 содержит (в мас. %): 2,2 Cu; 1,6 Mg; 1,1 Fe; 1,1 Ni; 0,06 Ti. Роль упрочняющей фазы при термообработке играет фаза S. Железо и никель находятся в сплаве в виде включений фазы Al_9FeNi . Титан в сплаве служит модифицирующей добавкой.

В литом состоянии структура жаропрочных сплавов подобна структуре дуралюминов. В закаленном и состаренном состояниях в зернах α -фазы наблюдается множество дисперсных выделений интерметаллидов, не растворившихся при нагреве под закалку.

3. Порядок выполнения и оформления работы

1. Ознакомиться с краткими сведениями из теории, законспектировав основные положения.
2. Зарисовать диаграмму состояния "Al – Cu", указать фазовый состав во всех областях диаграммы, дать характеристику всех фаз системы.
3. Получить комплект микрошлифов, в который входят образцы технического алюминия А-85 и алюминиевых сплавов Д16, В95 и др. в различных состояниях.
4. Изучить микроструктуры всех образцов с использованием оптического металлографического микроскопа. Зарисовать микроструктуры, указать структурные составляющие, сравнив их с атласом микроструктур, описать характерные особенности структурообразования всех сплавов.
5. Определить по микроструктуре принадлежность сплавов к тому или иному классу по структуре, способу производства и способности к упрочнению термической обработкой..
6. Проанализировать изменение структуры и свойств алюминиевых сплавов с изменением качественного и количественного содержания легирующих элементов и условий охлаждения.
7. Сделать выводы по работе.

4. Контрольные вопросы

1. Назовите характеристики основных физических, механических, технологических, свойств алюминия.
2. Какие элементы являются постоянными примесями алюминия и как они влияют на свойства алюминия?
3. В каких отраслях промышленности особенно перспективно применение алюминия и его сплавов, почему?
4. На какие группы по технологическим свойствам подразделяются сплавы "Al - легирующий элемент"? Укажите эти группы на обобщенной диаграмме состояния Al - легирующий элемент.
5. Какие элементы наиболее широко применяются в качестве легирующих в деформируемых алюминиевых сплавах?
6. Укажите группу деформируемых сплавов на обобщенной диаграмме состояния "Al - легирующий элемент".
7. Какие сплавы относятся к деформируемым алюминиевым сплавам, не упрочняемым термической обработкой и как можно повысить их прочность?
8. Как классифицируются по назначению и способу деформирования деформируемые, термически упрочняемые алюминиевые сплавы?
9. Какие по химическому составу сплавы системы Al –Cu можно подвергнуть упрочнению термической обработкой?

10. Как изменяется твердость, прочность и пластичность алюминиевых сплавов после закалки и при последующем старении? Чем можно объяснить такое изменение свойств?
11. Какие сплавы называются дуралюминами?
12. На каких фазовых и структурных превращениях основана упрочняющая термическая обработка алюминиевых сплавов?
13. Назовите упрочняющие фазы в алюминиевых сплавах различного химического состава.
14. Какие алюминиевые сплавы являются самыми жаропрочными?
15. Как маркируются деформируемые алюминиевые сплавы?

Литература

1. Колачев Б.А., Елагин В.И., Ливанов В.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. Учебник для вузов / М.: *МИСИС*, 1999.- 416 с.
2. Материаловедение. Учебник для вузов / Б.Н. Арзамасов, И.И. Сидорин, Г.Ф. Косолапов и др.; Под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. - М.: Машиностроение, 1986.- 384 с.
3. Мальцев М.В., Барсукова Т.Я., Боряк Ф.А. Металлография цветных металлов и сплавов (с атласом микроструктур).- М.: ГНТИЛ по черной и цветной металлургии, 1960. - 372 с.
4. ГОСТ 11069 –74 «Алюминий первичный Марки».
5. ГОСТ 4784-97 «Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки».
6. ГОСТ 1583 – 93 «Сплавы алюминиевые литейные. Технические условия»