

ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

КАФЕДРА ФИЗИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к лабораторным работам по курсу

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ СОВРЕМЕННЫХ И  
ПЕРСПЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Для студентов направления подготовки 22.04.01 "Материаловедение и  
технологии материалов"

Специализации (профили) "Прикладное материаловедение",  
"Металловедение и термическая обработка металлов»

УТВЕРЖДЕНЫ  
на заседании кафедры  
"Физическое материаловедение"  
31.08.2018 г. Протокол №1

Зав. кафедрой                      Н.Т. Егоров

г. Донецк, 2016 г.

УДК669.01.7+621.785

Горбатенко В.П. Методические указания к лабораторным работам по курсу "Материаловедение и технологии современных и перспективных материалов». - Донецк: ДонНТУ, 2016.

Методические указания содержат данные относительно цели, методики и порядка выполнения лабораторных работ по курсу "Материаловедение и технологии современных и перспективных материалов". Предназначены для студентов, обучающихся по направлению подготовки 22.04.01 "Материаловедение и технологии материалов".

Рецензент: В.Н. Крымов, доц.

## СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Лабораторная работа № 1 Влияние режимов термической обработки на структуру и свойства теплоустойчивых сталей	4
Лабораторная работа № 2 Влияние режимов термической обработки на структуру и свойства хромистых жаропрочных сталей	6
Лабораторная работа № 3 Влияние режимов термической обработки на структуру и свойства жаропрочного никелевого сплава	8
Лабораторная работа № 4 Изучение структуры и свойств жаростойких сталей	10
Рекомендованная литература	14

## Лабораторная работа № 1

## ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ТЕПЛОУСТОЙЧИВЫХ СТАЛЕЙ

Цель работы: Изучение возможности получения структуры различного типа в легированных теплоустойчивых сталях и анализ ее влияния на изменение твердости стали при увеличении длительности выдержки при повышенных температурах.

## 1.1. Методика выполнения работы

К теплоустойчивым легированным сталям относятся стали перлитного класса, применяемые для изготовления крепежных изделий, труб, паропроводов, пароперегревателей и других изделий, работающих при температурах до 585...600 °С и давлениях до 25,5 МПа, например, стали 12Х1МФ, 25Х2М1Ф, состав и жаропрочные свойства которых приведены в таблице 1.1. Содержание углерода в таких сталях 0,08...0,25 %. Это преимущественно низколегированные, а также среднелегированные стали. Основные легирующие элементы – Cr (0,5...3 %), W (до 0,5 %), Mo (до 1 %), V (0,15...0,8 %), Nb (до 0,1 %). Основными целями легирования являются повышение сил межатомной связи и образование высокодисперсных карбидов. Карбидная фаза представлена легированным цементитом, карбидами хрома, ванадия, молибдена, а также ниобия (при его вводе в сталь). В зависимости от химического состава и режимов термической обработки в таких сталях может формироваться структура различного типа: феррито-перлитная, феррито-бейнитная, бейнитная, мартенситная.

Таблица 1.1 – Состав и жаропрочные свойства некоторых теплоустойчивых сталей перлитного класса

Марка стали	Среднее содержание углерода и основных легирующих элементов	Максимальная рабочая температура. °С	Жаропрочные свойства		
			Температура испытаний	$\sigma_{10000}$ ( $\sigma_{100}$ ), Н/мм <sup>2</sup>	$\sigma_{1/100000}$ , Н/мм <sup>2</sup>
Теплоустойчивые легированные стали перлитного класса					
12Х1МФ	0,12 С, 1,1 Cr, 0,3 Мо, 0,2 V	585	560	140	84
25Х2М1Ф	0,25 С, 2,3 Cr, 1 Мо, 0,4 V	550	550	160...220	70

Студенты получают у преподавателя образцы 1 – 2 марок теплоустойчивой легированной стали. С использованием рекомендованной учебной и справочной литературы студенты определяют рекомендуемые режимы нагрева под закалку (нормализацию) стали соответствующей марки, а также режимы отпуска закаленной стали.

Изменяя условия охлаждения нагретой стали, студенты должны получить ее исходную структуру различного типа:

- 1) мартенситную - в результате закалки с охлаждением в масле;
- 2) бейнитную - в результате охлаждения образцов небольшого размера на металлической плите;
- 3) феррито-бейнитную - в результате охлаждения образцов на воздухе;
- 4) феррито-перлитную - в результате охлаждения образцов вместе с печью до 550...600 °С, а далее – на воздухе.

Образцы, закаленные на мартенсит, подвергают также высокотемпературному отпуску (550...600 °С, выдержка 10...15 минут).

На каждом образце производится измерение твердости стали на твердоме́ре Роквелла по шкале С (конусом) для сталей с мартенситной, бейнитной и феррито-бейнитной структурой и по шкале В (шариком) для сталей с феррито-перлитной структурой и структурой сорбита отпуска.

После приготовления микрошлифов студенты изучают микроструктуру стали после различных режимов термической обработки.

Последним этапом экспериментальной работы является измерение твердости на образцах стали с разной исходной структурой после их дополнительной выдержки в печи с температурой, соответствующей рекомендуемому верхнему пределу их применения (585...600 °С) в течении 2 и 4 часов.

Результаты измерений и исследования структуры заносятся в таблицу 1.2.

Таблица 1.2 – Результаты исследований структуры и твердости теплоустойчивой стали после различных режимов ее обработки

Марка стали	Режим термической обработки	Тип структуры	Твердость после термической обработки, HRC (HRB)	Твердость, HRB, после дополнительного нагрева до 600 °С с выдержкой $\tau$	
				$\tau = 2$ часа	$\tau = 4$ часа

По завершении экспериментов студент выполняет сравнительный анализ изменения твердости стали в зависимости от ее исходной структуры и условий ее дополнительного нагрева.

### 1.2 Порядок выполнения работы

Получение исходных образцов и конкретного задания у преподавателя.

Определение параметров термической обработки образцов для получения заданных 5 типов структур стали.

Выполнение режимов термической обработки.

Измерение твердости стали после разных режимов обработки; занесение результатов измерений в таблицу 1.2.

Изготовление микрошлифов.

Изучение структуры стали после различных режимов термической обработки; занесение результатов изучения структуры в таблицу 1.2.

Выполнение дополнительного нагрева образцов до 600 °С с длительностью выдержки 2 часа и 4 часа (выдержка длительностью 2 и 4 часа последовательно может быть выполнена на одних и тех же образцах); занесение результатов измерений твердости в таблицу 1.2.

Анализ полученных результатов.

### 1.3.Содержание отчета

Порядковый номер и название работы.

Цель работы.

Краткие сведения относительно основных свойств и рекомендаций по применению изученных сталей и режимов их термической обработки.

Реализованные режимы термической обработки образцов.

Описание характера структуры стали после соответствующей термической обработки.

Таблица 1.2 с полученными экспериментальными результатами.

Результаты анализа полученных результатов.

Выводы.

#### 1.4. Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятиям «жаропрочность» и «жаростойкость».
2. Какие стали называют теплоустойчивыми и какие их группы выделяют?
3. Цели легирования жаропрочных сталей.
4. Температурные интервалы использования котельных сталей.
5. Температурные интервалы использования легированных теплоустойчивых сталей.
6. Какие типы структур могут быть получены в теплоустойчивых сталях?

#### Лабораторная работа № 2

### ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ХРОМИСТЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ

Цель работы: Изучение структуры и свойств хромистых жаропрочных сталей в зависимости от режимов их термической обработки.

#### 2.1. Методика выполнения работы

Хромистые жаропрочные стали относятся к сталям мартенситного и мартенситно-ферритного классов. Они содержат от 5 до 13 % Cr (табл. 2.1), их применяют для изготовления деталей энергетического оборудования (типа лопаток, крепежных изделий, труб, турбинных дисков, роторов и др.), длительно работающих при температурах 585...650 °С. Содержание углерода в таких сталях – 0,08...0,22 %. Эти стали, кроме Cr, дополнительно легируют W (до 2,2 %), Mo (до 1 %), V (0,15...0,6 %). В некоторые марки стали вводят Ni (до 1 %), Nb (до 1 %), B (0,005...0,01 %). Примеры таких сталей: 15X5M, 14X12B2MФ, 12X8BM1БФР, 15X11MФ, 15X12BHMФ. Примеры состава и свойств жаропрочных хромистых сталей приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Состав и жаропрочные свойства ряда хромистых жаропрочных сталей мартенситного класса

Марка стали	Среднее содержание основных легирующих элементов	Максимальная рабочая температура. °С	Жаропрочные свойства		
			Температура испытаний	$\sigma_{10000}$ ( $\sigma_{100}$ ), Н/мм <sup>2</sup>	$\sigma_{1/100000}$ , Н/мм <sup>2</sup>
15X5M	До 0,15 С, 5,2 Cr, 0,5 Мо	600	540	100	40
15X11MФ	0,15 С, 11 Cr, 0,7 Мо, 0,3 V	580	550	200	90
11X11H2B2MФ	0,11 С, 11 Cr, 1,7 Ni, 1,8 W, 0,4 Мо, 0,25 V	600	550	(400)	-
40X10C2M	0,4 С, 10 Cr, 2,2 Si	650	550	100	40

Основными видами термической обработки таких сталей являются закалка (как правило, на мартенсит) от 1000...1050 °С с последующим низкотемпературным отпуском. В структуре сталей будут присутствовать мартенсит отпуска, специальные карбиды типа MC (VC, NbC, WC), M<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, M<sub>23</sub>C<sub>6</sub>, M<sub>2</sub>C (Mo<sub>2</sub>C, W<sub>2</sub>C), а также интерметаллиды типа фаз Лавеса (Fe<sub>2</sub>W, Fe<sub>2</sub>Mo) и в ряде случаев δ-феррит. В участках δ-феррита могут также выделяться частицы интерметаллидных фаз Лавеса. Считают, что присутствие в структуре более 10...15 % δ-феррита снижает жаропрочность стали.

Студенты получают у преподавателя образцы 1 – 2 марок жаропрочной хромистой стали. С использованием рекомендованной учебной и справочной литературы студенты определяют рекомендуемые режимы нагрева под закалку стали соответствующей марки, а также режимы отпуска закаленной стали.

Используя термическое оборудование лаборатории термической обработки, студенты выполняют закалку образцов: после нагрева до выбранной температуры образцы охлаждают в масле. На каждом образце после закалки выполняется измерение твердости стали на

твердомере Роквелла по шкале С (конусом). Результаты измерений заносятся в таблицу 2.2. Закалке подвергают по 4 образца каждой марки стали. Один из закаленных образцов сохраняется без отпуска, а 3 других подвергают отпуску при температурах 200, 400 и 600 °С с выдержкой 1 час. На каждом образце после отпуска выполняется измерение твердости стали на твердомере Роквелла по шкале С (конусом). Результаты измерений заносятся в таблицу 2.2.

На приготовленных микрошлифах изучается структура стали.

Последним этапом экспериментальной работы является измерение твердости на образцах стали после закалки и закалки с отпуском при разных температурах после их дополнительной выдержки в печи с температурой, соответствующей рекомендуемому верхнему пределу их применения - 650 °С в течении 2 и 4 часов.

Результаты измерений и исследования структуры заносятся в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Результаты исследований структуры и твердости жаропрочной хромистой стали после различных режимов ее обработки

Марка стали	Режим термической обработки	Тип структуры	Твердость после термической обработки, HRC	Твердость после дополнительного нагрева до 650 °С с выдержкой $\tau$	
				$\tau = 2$ часа	$\tau = 4$ часа
	Закалка				
	Закалка + отпуск 200 °С				
	Закалка + отпуск 200 °С				
	Закалка + отпуск 200 °С				

По завершении экспериментов студент выполняет сравнительный анализ изменения твердости стали в зависимости от ее исходной структуры и условий ее дополнительного нагрева.

## 2.2 Порядок выполнения работы

Получение исходных образцов и конкретного задания у преподавателя.

Определение параметров термической обработки образцов для получения заданных 5 типов структур стали.

Выполнение режимов термической обработки.

Измерение твердости стали после разных режимов обработки; занесение результатов измерений в таблицу 2.2.

Изготовление микрошлифов.

Изучение структуры стали после различных режимов термической обработки; занесение результатов изучения структуры в таблицу 2.2.

Выполнение дополнительного нагрева образцов до 600 °С с длительностью выдержки 2 часа и 4 часа (выдержка длительностью 2 и 4 часа последовательно может быть выполнена на одних и тех же образцах); занесение результатов измерений твердости в таблицу 2.2.

Анализ полученных результатов.

## 2.3.Содержание отчета

Порядковый номер и название работы.

Цель работы.

Краткие сведения относительно основных свойств и рекомендаций по применению хромистых жаропрочных сталей и режимов их термической обработки.

Реализованные режимы термической обработки образцов.

Описание характера структуры стали после соответствующей термической обработки.

Таблица 2.2 с полученными экспериментальными результатами.

Результаты анализа полученных результатов.

Выводы.

## 2.4. Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятиям «жаропрочность» и «жаростойкость».
2. Какие стали называют жаропрочными и какие их группы выделяют?
3. Цели легирования жаропрочных сталей.
4. Температурные интервалы использования хромистых жаропрочных сталей.
5. К какому структурному классу относятся хромистые жаропрочные стали?

### Лабораторная работа № 3

## ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

Цель работы: изучение структуры и свойств жаропрочных никелевых сплавов после термической обработки с разной длительностью старения.

### 3.1 Методика выполнения работы

Жаропрочные сплавы на никелевой основе имеют сложный химический состав и обычно содержат не менее 7 легирующих элементов, а иногда – и до 10 -12 элементов. Такие сплавы предназначены для работы при температурах в интервале 700...1100 °. По технологии производства сплавы делят на: а) деформируемые, б) литейные и в) литейно-деформируемые, полуфабрикаты и изделия из которых могут производить как путем деформации, так и путем литья. В таблице 3.1 приведены примеры составов и жаропрочных свойств ряда марок деформируемых жаропрочных сплавов на основе никеля, называемых нимониками.

Таблица 3.1 - Химический состав и предел длительной прочности на базе 100 часов ( $\sigma_{100}$ ) при заданной температуре испытаний (Тисп.) некоторых деформируемых жаропрочных сплавов на основе никеля

Марка сплава	Содержание основных легирующих элементов, %								Тисп., °С	$\sigma_{100}$ , Н/мм <sup>2</sup>	
	C	Cr	Ti	Al	Mo	W	Co	V			B
ХН77ТЮР	≤ 0,07	19-22	2,4-2,8	0,6-1,0	-	-	-	-	≤ 0,01	650 700	610 420
ХН62ВМКЮ	≤ 0,1	8,5-10	-	4,2-4,9	9-11,5	4,3-6	4-6	-	≤ 0,02	800 1000	500 50
ХН60ВМТКЮ	≤ 0,12	9-12	1,4-2	3,6-4,5	4-6	4,5-6	12-16	-	≤ 0,02	700 950	850 100
ХН70ВМТЮ	≤ 0,1	13-16	1,8-2,3	1,7-2,3	2-4	5-7	-	0,1-0,5	≤ 0,02	800	230-270
ХН55ВМТКЮ	≤ 0,1	9-12	1,4-2	3,6-4,5	4-6	4,5-6,5	-	0,2-0,8	≤ 0,02	800	450
ХН65ВМТЮ	≤ 0,1	15-17	2-2,8	1-1,5	3,5-4,5	8,5-10	-	-	≤ 0,01	800	300

Никелевые жаропрочные сплавы легируют хромом (10...20 %), кобальтом (0...15 %), тугоплавкими элементами-упрочнителями (обычно комплексно), повышающими силы межуатомной связи в кристаллической решетке: Мо (3...11 %), W (до 6 %), Nb (до 2 %), а также в сумме до 8...10 % таких элементов, как Al (1...6 %), Ti (до 6 %) и Nb.

Хром и алюминий обеспечивают сопротивление сплава окислению и газовой коррозии вследствие образования защитных пленок. Алюминий, титан и ниобий обеспечивают образование упрочняющей  $\gamma'$ -фазы. Хром, молибден и вольфрам упрочняют твердый раствор, Мо, W и Nb повышают силы связи в кристаллической решетке и участвуют в образовании карбидов. Углерод содержится в небольшом количестве (0,08...0,12 %), обеспечивая образование карбидов и карбонитридов, также оказывающих определенное влияние на жаропрочные свойства. Кобальт вводят в никелевые сплавы для понижения энергии дефектов упаковки и интенсификации выделения  $\gamma'$ -фазы. Бор (0,005...0,015 %) оказывает влияние на

состояние границ зерен и образует бориды, также оказывающие положительное влияние на жаропрочность сплава.

Основой сплава является  $\gamma$ -твердый раствор с ГЦК-структурой на хромоникелевой основе, легированный Со и тугоплавкими элементами-упрочнителями, повышающими силы междоатомной связи в кристаллической решетке (Мо, W, Nb). Основным упрочнителем таких сплавов является  $\gamma'$ -фаза  $Ni_3(Al, Ti, Nb)$ . Наиболее эффективное упрочнение достигается при содержании 30...40 %  $\gamma'$ -фазы и при расстоянии между частицами  $\gamma'$ -фазы до 50 мкм. Специфической положительной особенностью  $\gamma'$ -фазы является повышение ее прочности с ростом температуры до 900 °С.

Никелевые суперсплавы часто применяют после закалки (1100...1300°С) и последующего старения (700...950°С). В случае литейных сплавов термическая обработка может не проводиться, либо выполняют нормализацию. Термическая обработка жаропрочных сплавов никеля может включать как одинарную, так и двойную закалку (нормализацию) с последующим старением при повышенных температурах. В случае двойной закалки первая выполняется от температуры 1200 °С, а вторая – от 1040...1100 °С. В процессе охлаждения с высокотемпературного нагрева может происходить выделение определенного количества  $\gamma'$ -фазы, а также карбидов типа  $M_{23}C_6$  в виде пленки по границам зерен. Вторая закалка имеет целью повторное растворение  $\gamma'$ -фазы, что позволяет ее получить в более дисперсном виде, а также растворение сплошной карбидной пленки с образованием зернистых карбидов типа MC или  $M_7C_3$ . Старение также проводят либо одинарное, либо двойное. Старение при повышенных температурах (обычно выше рабочих температур сплава) проводят для выделения  $\gamma'$ -фазы и стабилизации структуры сплава, а окончательное низкотемпературное старение – для дополнительного выделения  $\gamma'$ -фазы в мелкодисперсном виде.

При выполнении данной лабораторной работы студенты используют образцы из жаропрочного никелевого сплава марки ХН58МБЮ (или сплава ВЖ-159), содержащего (остальное – Ni) 26...28 % Cr, 1,25...1,55 % Al, 7,0...7,8 % Мо, 2,7...3,4 % Nb, 0,04...0,08 % С (Fe  $\leq$  3 %, Mn  $\leq$  0,5 %, Si  $\leq$  0,8 %, La  $\leq$  0,03 %, S  $\leq$  0,013 %, P  $\leq$  0,013 %, В  $\leq$  0,005 %, Y  $\leq$  0,03 %, Mg  $\leq$  0,03 %). Кроме этого сплава могут использоваться образцы из сплавов других марок, например, приведенных в таблице 3.1.

Образцы из жаропрочного сплава подвергают закалке с нагревом до 1100, 1150 или 1200 °С и охлаждением в масле с последующим старением. Старение выполняют при температуре 700...800 °С с выдержкой длительностью 1...7 часов.

Твердость (твердомер ТК-2М, шкала С) измеряют на образцах после закалки, а также в процессе старения через каждый 1 час выдержки. Результаты измерений студенты заносят в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты проведения экспериментальных исследований по термической обработке никелевого жаропрочного сплава марки \_\_\_\_\_

Температура нагрева под закалку, °С	Твердость после закалки, HRC	Температура старения, °С	Твердость сплава после старения, HRC, в результате выдержки длительностью, часов							
			1 ч.	2 ч.	3 ч.	4 ч.	5 ч.	...	...	...

Микроструктуру сплава студенты изучают непосредственно после закалки и после старения с максимальной реализованной выдержкой при старении. Схемы структур приводятся в отчете.

### 3.2 Порядок выполнения работы

- Получение исходных образцов и конкретного задания у преподавателя.
- Определение параметров термической обработки образцов.

Выполнение закалки образцов с нагревом до выбранной температуры.

Измерение твердости сплава на всех образцах, подвергнутых закалке и занесение полученных результатов в таблицу 3.2.

Изготовление микрошлифа на закаленном образце, его травление и изучение микроструктуры закаленного сплава.

Выполнение старения при температуре 700 °С с выдержкой длительностью 1, 2, 3, 4, 5, 6 и 7 часов с измерением твердости после каждого времени выдержки. Результаты измерения твердости заносятся в таблицу 3.2.

Изготовление микрошлифа и изучение структуры сплава после старения.

При наличии необходимого аудиторного времени целесообразно также выполнить дополнительный нагрев образца после его закалки и старения до 900 °С с длительностью выдержки 2 часа, его охлаждение на воздухе. На образце следует измерить твердость и сравнить ее с исходными значениями после термической обработки. Анализ полученных результатов.

### 3.3 Содержание отчета

Порядковый номер и название работы.

Цель работы.

Краткие сведения относительно основных свойств и рекомендаций по применению жаропрочных никелевых сплавов.

Реализованные режимы термической обработки образцов.

Описание характера структуры сплава после закалки и старения (с изображением схемы таких структур).

Таблица 3.2 с полученными экспериментальными результатами.

Результаты анализа полученных результатов.

Выводы.

### 3.4 Контрольные вопросы

1. Области применения никелевых жаропрочных сплавов.
2. Почему никелевые жаропрочные сплавы часто называют суперсплавами?
3. Основные принципы легирования никелевых жаропрочных сплавов.
4. Основные цели легирования никелевых жаропрочных сплавов.
4. Температурные интервалы использования никелевых жаропрочных сплавов.
5. Какая фаза является основным упрочнителем никелевых жаропрочных сплавов?

## Лабораторная работа № 4

### ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ЖАРОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ

Цель работы: изучение структуры и свойств жаростойких сталей ферритного и аустенитного классов.

#### 4.1 Методика выполнения работы

Жаростойкими называют стали, работающие при повышенных температурах (выше 550 °С) в отсутствие заметных механических нагрузок. Основным требованием к таким сталям является высокая жаростойкость – высокое сопротивление газовой коррозии (окислению при повышенных температурах).

Основными легирующими элементами, повышающими жаростойкость, являются Cr, Si, Al. Принцип повышения жаростойкости этих сплавов связан с созданием защитных пленок.

При содержании более 10 % Ni также оказывает положительное влияние на жаростойкость. Кроме того, легирование никелем в соответствующем количестве способствует изменению структурного класса сталей на аустенитный.

В качестве жаростойких сталей чаще всего применяют хромистые и хромоалюминиевые ферритные стали, хромокремниевые стали мартенситного класса (сильхромы), а также аустениные жаростойкие стали.

*Хромистые жаростойкие ферритные стали* содержат от 13 до 28 % при низком (до 0,15 %) содержании углерода. Ряд сталей дополнительно легируют алюминием (3...5 %). Иногда дополнительно вводят более сильные карбидообразующие элементы (Ti, Nb, Mo) с целью воспрепятствовать обеднению твердого раствора хромом и предотвратить рост зерна феррита при нагреве. Примеры марок сталей: 08X17T, 15X25T, 05X23Ю5, 05X27Ю5. Недостатком таких сталей является возможное охрупчивание при нагревах: «хрупкость 475 °С», хрупкость вследствие образования  $\sigma$ -фазы, хрупкость вследствие роста зерна.

Такие стали используют при изготовлении окалиностойких труб и арматуры, в виде ленты и проволоки для изготовления нагревательных элементов термических печей и бытовых приборов (в основном, Cr-Al-стали), обмоток реостатов.

*Жаростойкие стали мартенситного класса* (сильхромы) – это стали, имеющие повышенное содержание углерода (до 0,5...0,8 %) и легированные совместно хромом (5...14 %, а иногда – до 21 %) и кремнием (1...3 %), которые после закалки или нормализации приобретают мартенситную структуру. Сильхромы обладают хорошим сопротивлением газовой коррозии в продуктах сгорания различных топлив и высокой износостойкостью при трении и ударных нагрузках. Примеры марок сильхромов: стали 15X6СЮ, 40X9С2, 40X10С2М, 30X13Н7С2, 70X20Н2С2В. Основным недостатком сильхромов является их относительно невысокая технологическая пластичность и склонность к охрупчиванию, в том числе и к отпускной хрупкости 11 рода.

Основное назначение сталей этой группы – клапаны автомобильных, тракторных и авиационных двигателей средней мощности, регуляторы, теплообменники и колосниковые решетки в котельном и химическом машиностроении.

*Аустениные жаростойкие стали* – это в основном Cr-Ni-стали. Эти стали не имеют больших преимуществ по жаростойкости перед высокохромистыми сталями ферритного класса, но превосходят их по уровню механических свойств, в том числе жаропрочных, технологичности (способности к глубокой вытяжке, штамповке, сварке). Они также менее склонны к охрупчиванию после длительных выдержек при высоких температурах. Аустенитные стали типа 18-9 (стали 08X18Н9Т, 12X18Н9, 12X18Н9Т и др.) и 18-10 (стали 08X18Н10Т, 10X18Н10Т и др.) используют в качестве жаростойкого материала для изготовления выхлопных систем, труб, изделий из листового и сортового проката, работающих при температурах 600...800 °С и невысоких нагрузках. Недостатками таких сталей являются их сравнительно высокая стоимость, использование в больших количествах дорогого и дефицитного никеля, низкие теплопроводность и сопротивление газовой коррозии в средах, содержащих серу.

Повышение жаростойкости аустенитных сталей достигается увеличением содержания хрома и никеля, а также дополнительным легированием кремнием. Повышение содержания ферритообразующих элементов – Cr и Si требует значительного увеличения концентрации в стали Ni для сохранения аустенитной структуры. Так, в сталях с 22...25 % Cr должно содержаться не менее 17...20 % Ni при содержании углерода 0,1...0,2 % (пример – сталь 10X23Н18). При увеличении содержания Cr до 24...27 % и введении 2...3 % Si необходимо иметь в стали 19...21 % Ni (сталь типа 20X25Н20С2, используемая, например, для изготовления поддонов термических печей). Следует учитывать, что эти стали более склонны к охрупчиванию вследствие образования  $\sigma$ -фазы в интервале 600...800 °С.

Иногда для частичной замены никеля в такие стали вводят Mn (6...10 %), а для стабилизации аустенитной структуры, кроме Mn, вводят еще и азот (0,3...0,4 %). Примеры – стали 12X25Н16Г7АР, 55X20Г9АН4.

Термическая обработка аустенитных жаростойких сталей заключается обычно в закалке от температур 1000...1050 °С.

В ряде случаев стали аустенитного класса типа 18-9 и 18-10, а также хромистые ферритные стали рекомендуются к применению в качестве не только жаростойких, но и жаропрочных сплавов, способных длительно работать под нагрузкой при температурах до 650...700 °С, но жаропрочность таких сталей ниже, чем у классических жаропрочных сталей.

Объектом исследований при выполнении данной лабораторной работы являются хромистая сталь ферритного класса марки 08X17 и хромоникелевая сталь аустенитного класса марки 10X18N10T.

На исходных образцах сталей обеих марок студенты должны измерить исходную твердость и изучить их структуру. Результаты измерений и исследований заносятся в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты исследования свойств жаростойких сталей

Марка стали	Структурный класс стали	Исходная твердость, HRB	Температура нагрева, °С	Длительность выдержки, ч.	Исходная масса образца, $m_0$ , г	Общая масса образца и тигля, г		Прирост массы образца, $\Delta m = m_3 - m_2$ , г	Относительный массовый показатель $(\Delta m / m_0) \cdot 100$ , %
						Исходная, $m_2$	Конечная, $m_3$		

Сравнительный анализ способности сталей сопротивляться газовой коррозии оценивается по изменению массы образцов, нагретых до температур 900 °С и 1000 °С с выдержкой при этих температурах длительностью 2 и 4 часа. Для упрощения методики оценка жаростойкости сталей будет выполняться путем измерения прироста массы образца в результате образования окалины.

Для таких измерений студенты выполняют следующее:

- предварительно подготавливают специальные алундовые тигли или «лодочки», в которые будут помещены образцы (для каждого образца используется свой собственный тигель);
- производят предварительное взвешивание (для каждого образца): а) взвешивают тигель («лодочку») без образца, определяя  $m_1$ ; б) взвешивают тигель («лодочку») вместе с образцом, определяя  $m_2$ ;
- определяют исходную массу образца  $m_0$ :  $m_0 = m_2 - m_1$ ; исходная масса образца может быть определена и прямым его взвешиванием;
- после взвешивания образец, помещенный в тигель, загружается в печь, нагретую до заданной температуры и выдерживается в печи в течении требуемого времени, после чего извлекается из печи и охлаждается вместе с тиглем на воздухе;
- после охлаждения образец вместе с тиглем повторно взвешивается на тех же весах с определением их общей массы  $m_3$ ;
- определяются а) абсолютный прирост массы образца,  $\Delta m$ :  $\Delta m = m_3 - m_2$ , г, и б) относительное изменение массы образца  $(\Delta m / m_0) \cdot 100$ , %.

Результаты измерений заносятся в таблицу 4.1.

После выполнения нагревов по соответствующим режимам и проведения операций взвешивания на образцах измеряют твердость (твердомер ТК-2М, шкала В) и оценивают степень ее изменения в сравнении с исходными значениями в зависимости от марки стали и режима нагрева.

На приготовленных микрошлифах выполняется оценка изменения структуры сталей в результате нагрева образцов до высоких температур в сравнении со структурой сталей в исходном состоянии. Изображаются схемы структур обеих марок сталей.

Выполняется анализ полученных результатов и сравнение показателей жаростойкости и степени изменения твердости двух марок сталей.

## 2.2 Порядок выполнения работы

Получение исходных образцов и конкретного задания у преподавателя.

Измерение исходной твердости образцов.

Проведение взвешивания исходных образцов и тиглей с определением  $m_0$ ,  $m_2$ ,  $m_1$ .

Загрузка тиглей с образцами в печи и выполнение заданных режимов нагрева и выдержки.

Изготовление микрошлифов и изучение структуры исходных образцов.

Выгрузка тиглей с образцами по окончании заданной выдержки и их охлаждение.

Проведение взвешивания образцов вместе с тиглями (после каждого режима обработки) с определением значений  $m_3$ .

Определение показателей абсолютного ( $\Delta m$ ) и относительного ( $(\Delta m / m_0) \cdot 100$ , %) изменения массы образца.

Измерение твердости сталей на всех образцах, подвергнутых нагреву, и занесение полученных результатов в таблицу 4.1.

Изготовление микрошлифов и изучение микроструктуры сталей после нагрева.

Анализ изменения структуры, твердости в результате реализации нагревов с различной выдержкой. Сравнительный анализ изменения прироста массы образцов из разных сталей в зависимости от условий нагрева.

## 4.4 Содержание отчета

Порядковый номер и название работы.

Цель работы.

Краткие сведения относительно основных свойств и рекомендаций по применению жаростойких сталей.

Марки исследованных сталей и их структурный класс.

Реализованные режимы нагрева образцов.

Описание характера структуры сталей в исходном состоянии.

Методика взвешивания образцов.

Таблица 4.1 с полученными экспериментальными результатами.

Описание структуры и изменения твердости образцов в зависимости от режимов нагрева.

Результаты анализа полученных результатов.

Выводы.

## 4.4. Контрольные вопросы

1. Что такое жаростойкость и какими показателями ее характеризуют?
2. Основные группы жаростойких сталей и сплавов.
3. Сравнительная характеристика жаростойких сталей ферритного и аустенитного классов.
4. Области применения жаростойких сталей ферритного класса.
5. Области применения жаростойких сталей аустенитного класса.
6. Основные принципы и цели легирования жаростойких сталей.

**Рекомендованная литература:**

1. Арзамасов Б.Н. 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.
2. Горбатенко В.П. Материаловедение и технология современных и перспективных материалов (курс лекций) / В.П. Горбатенко. – Донецк: ДонНТУ. – 2016. – 129 с.
6. Куцова В.З. Леговані сталі та сплави з особливими властивостями. Підручник / В.З. Куцова, М.А. Ковзель, О.А. Носко. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2008. - 350 с.
8. Солнцев Ю.П. Материаловедение / Ю.П. Солнцев, Е.И. Пряхин, Ф. Войткун. – М.: МИСиС, 1999. – 600 с.
9. Суперсплавы: жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок. В 2-х кн. / Под ред. Ч.Г. Симса, Н.С. Столоффа, У.А. Хагеля / Пер. С англ. – М.: Металлургия, 1995.
16. Масленков С.Б. Стали и сплавы для высоких температур: Справочное изд. в 2-х кн./ С.Б. Масленков, Е.А. Масленкова. – М.: Металлургия, 1991. – 832 с.