



тольяттинский
государственный
университет

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ СВАРКИ



Тольятти
2025

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Тольяттинский государственный университет

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ СВАРКИ

Практикум

Составитель **А.И. Ковтунов**

Тольятти
Издательство ТГУ
2025

УДК 669.017(075.8)+621.791.011(075.8)
ББК 34.22я73+34.641я73
М341

Рецензенты:

д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой
«Сварочное, литейное производство и материаловедение»

Пензенского государственного университета *А.Е. Розен*;

д-р. техн. наук, доцент, профессор кафедры «Сварка,
обработка материалов давлением и родственные процессы»
Тольяттинского государственного университета *В.В. Ельцов*.

М341 Материаловедение сварки : практикум / сост. А.И. Ковтунов. —
Тольятти : Издательство ТГУ, 2025. — 72 с.
ISBN 978-5-8259-1715-3.

В практикуме приведены методические указания для выполнения практических работ по материаловедению сварки. Изложены цели работы, теоретические сведения, порядок выполнения работ и контрольные вопросы. Даются примеры выполнения практических работ.

Предназначен для студентов, обучающихся по направлению подготовки 15.03.01 «Машиностроение», профилю «Технологии сварочного производства и инженерия поверхностей» очной и заочной форм обучения.

УДК 669.017(075.8)+621.791.011(075.8)
ББК 34.22я73+34.641я73

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
Тольяттинского государственного университета.

© Ковтунов А.И., 2025

© ФГБОУ ВО «Тольяттинский

ISBN 978-5-8259-1715-3

государственный университет», 2025

Введение

Материаловедение сварки рассматривает закономерности изменения состава, структуры и свойств материалов сварных соединений в зависимости от условий сварки: температуры, давления, среды. Большинство способов сварки металлических материалов связано с нагревом свариваемых деталей при использовании различных видов сварочных источников теплоты. Особенности протекания процессов нагрева и охлаждения свариваемых деталей определяют условия формирования структуры, фазового состава в металле шва и зоне термического влияния и, следовательно, механические и эксплуатационные свойства сварных соединений.

Таким образом, целью изучения дисциплины является формирование у студентов необходимого уровня компетенций для решения профессиональных задач в области материаловедения сварки и термической обработки сварных соединений.

Задачей дисциплины является формирование знаний:

- об атомно-кристаллическом строении, физико-химических свойствах металлов и влиянии строения и свойств на их свариваемость;
- об особенностях процессов плавления и кристаллизации металлов при сварке;
- о структурных и фазовых превращениях в сталях при нагреве и охлаждении и особенностях этих превращений при сварке;
- о классификации, маркировке, физико-механических свойствах сталей и влиянии химического и фазового состава, структуры сталей на их свариваемость;
- о технологических особенностях сварки и термической обработке сталей различных структурных классов.

Практикум содержит работы, направленные на изучение химического состава и механических свойств углеродистых сталей, оценку вероятности образования холодных трещин при сварке легированных углеродистых сталей. Кроме того, в практикум включена работа по определению свариваемости разнородных металлов исходя из их атомно-кристаллического строения и особенностей взаимодействия компонентов.

Практикум содержит работы, направленные на изучение фазового состава, структуры, механических свойств и свариваемости высоколегированных хромистых и хромоникелевых сталей.

После выполнения заданий практикума студент должен

• *знать:*

- классификацию и маркировку металлов и сплавов на их основе, область применения, в том числе для изготовления сварных конструкций;
- характеристики механических свойств металлов и сварных соединений, а также методы их испытаний;
- атомно-кристаллическое строение, физико-химические свойства конструкционных металлов и их влияние на свариваемость разнородных металлов и сплавов;
- влияние химического, фазового состава, структуры на свойства сталей различных структурных классов и их свариваемость.

• *уметь:*

- определять химический состав, назначение, физико-механические свойства, свариваемость и область применения конструкционных сплавов различных марок;
- оценивать свариваемость разнородных металлов в зависимости от физико-химических особенностей их взаимодействия;
- пользоваться расчетными методами для оценки свариваемости и склонности сталей различных структурных классов к образованию холодных трещин при сварке;
- назначать режимы предварительного подогрева и последующей термической обработки сварных соединений из сталей различных структурных классов.

Практическое занятие 1

Классификация сталей и механические свойства сталей и сварных соединений

Цель занятия — познакомиться с классификацией сталей и основными характеристиками механических свойств сталей и сварных соединений.

Выполнив работу, студент должен:

- *знать* классификацию и маркировку сталей, области применения сталей различных классов, групп и марок, в том числе и для изготовления сварных конструкций, характеристики механических свойств сталей и сварных соединений и способы их испытаний;
- *уметь* по марке стали определять химический состав, назначение, область применения и свариваемость стали.

Задание

1. Определить химический состав стали, указанной в варианте задания (табл. 1). Номер варианта выбирается по первой букве фамилии студента (табл. 2).
2. Определить класс стали по основным признакам: химическому составу, качеству металла, назначению, структурно-фазовому составу и степени раскисления.
3. Указать значения основных механических характеристик стали.
4. Указать область применения стали, в том числе и для изготовления сварных конструкций.
5. Оценить свариваемость стали, указать применяемые способы сварки для данной стали.

Таблица 1

Варианты заданий

Вариант	Марка стали	Вариант	Марка стали
1	Ст3	9	14Х17Н2
2	15ХМ	10	12Г2АФ
3	12Х18Н9Т	11	25
4	15Х5М	12	10ХСНД
5	12Х17	13	Ст4
6	35ХГС	14	17ГС
7	15	15	20
8	08Х22Н6Т	16	35

Таблица 2

Выбор варианта задания

Первая буква фамилии студента	Номер варианта	Первая буква фамилии студента	Номер варианта
А – Б	1	П – Р	9
В – Г	2	С – Т	10
Д – Е	3	У – Ф	11
Ё – Ж	4	Х – Ц	12
З – И	5	Ч – Ш	13
Й – К	6	Щ – Э	14
Л – М	7	Ю	15
Н – О	8	Я	16

Краткие теоретические сведения

Классификация сталей

Классификация сталей проводится по ряду признаков: химический состав, качество металла, назначение, структурно-фазовый состав [1–3].

Химический состав стали регламентируют по содержанию углерода и суммарной концентрации легирующих элементов (кроме углерода). По содержанию углерода различают стали:

- малоуглеродистые – с содержанием углерода от 0,025 до 0,25 %;
- среднеуглеродистые – с содержанием углерода от 0,25 до 0,55 %;
- высокоуглеродистые – с содержанием углерода свыше 0,55 %.

В углеродистой стали отсутствуют специально введенные легирующие элементы, и механические свойства зависят главным образом от содержания углерода. С ростом его концентрации происходит возрастание прочностных свойств стали с одновременной потерей пластических свойств и снижением вязкости.

Формирование широкого комплекса механических, физических и химических свойств сталей, используемых в настоящее время промышленностью, становится возможным благодаря легированию сталей различными элементами, изменяющими ее структуру и свойства. По суммарному содержанию легирующих элементов различают стали:

- низколегированные – до 2,5 % легирующих элементов;
- легированные – от 2,5 до 10 % легирующих элементов;
- высоколегированные – свыше 10 % легирующих элементов.

Легированные стали и сплавы делятся также на классы по структурному составу:

- в отожженном состоянии – доэвтектоидный, заэвтектоидный, ледебуритный (карбидный), ферритный, аустенитный классы;
- в нормализованном состоянии – перлитный, мартенситный и аустенитный. К перлитному классу относят углеродистые и легированные стали с низким содержанием легирующих элементов, к мартенситному – с более высоким, к аустенитному – с высоким содержанием легирующих элементов.

По качеству, то есть по условиям производства (способу производства и содержанию вредных примесей), стали и сплавы делятся на следующие группы: обыкновенного качества, качественные, высококачественные и особовысококачественные (табл. 3).

Таблица 3

Классификация сталей по качеству

Группа	Содержание S, %	Содержание P, %
Обыкновенного качества (рядовые)	Менее 0,06	Менее 0,07
Качественные	Менее 0,04	Менее 0,035
Высококачественные	Менее 0,025	Менее 0,025
Особовысококачественные	Менее 0,015	Менее 0,015

Стали обыкновенного качества — это по химическому составу углеродистые стали, содержащие до 0,6 % углерода (ГОСТ 380—2005). Эти стали выплавляются в конвертерах с применением кислорода или в больших мартеновских печах.

Стали обыкновенного качества, являясь наиболее дешевыми, уступают по механическим свойствам сталям других классов, так как отличаются повышенными ликвацией (химической и структурной неоднородностью) и количеством неметаллических включений.

Стали качественные по химическому составу бывают углеродистыми (ГОСТ 1050—2013) или легированными. Они так же выплавляются в конвертерах или в основных мартеновских печах, но с соблюдением более строгих требований к составу шихты, процессам плавки и разливки.

Стали обыкновенного качества и качественные по степени раскисления и характеру затвердевания металла в изложнице делятся на спокойные (сп), полуспокойные (пс) и кипящие (кп). Каждый из этих сортов отличается содержанием кислорода, азота и водорода. Спокойные стали раскисляют марганцем, кремнием и алюминием. Они содержат мало кислорода и затвердевают спокойно, без газовыделения. Кипящие стали раскисляют только марганцем. Перед разливкой в них содержится повышенное количество кислорода,

который при затвердевании частично взаимодействует с углеродом и удаляется в виде СО. Выделение пузырей СО создает впечатление кипения стали, с чем и связано ее название. Кипящие стали дешевы, их производят низкоуглеродистыми и практически без кремния ($Si < 0,07 \%$), но с повышенным количеством газообразных примесей. Полуспокойные стали по степени раскисления занимают промежуточное положение между спокойными и кипящими.

Стали высококачественные выплавляются преимущественно в электропечах, а особо высококачественные — в электропечах с электрошлаковым переплавом, плазменным переплавом или другими совершенными методами, что гарантирует повышенную чистоту по неметаллическим включениям и содержанию газов, а следовательно, улучшение механических свойств.

В классификации сталей и сплавов по назначению выделяют конструкционные, инструментальные и стали с особыми физическими и химическими свойствами.

Конструкционные стали принято делить на строительные, для холодной штамповки, цементируемые, улучшаемые, высокопрочные, рессорно-пружинные, шарикоподшипниковые, автоматные, коррозионностойкие, жаростойкие, жаропрочные, износостойкие.

Инструментальные стали по назначению делят на стали для режущих, измерительных инструментов, штамповые стали.

К сталям и сплавам с особыми физическими свойствами относятся те, работоспособность которых оценивается не только по механическим, но и по ряду других (теплофизических, магнитных, электрических и др.) свойств требуемого уровня.

Стали и сплавы с особыми физическими свойствами часто называют прецизионными. Прецизионные сплавы — металлические сплавы с особыми физическими свойствами (магнитными, электрическими, тепловыми, упругими) или редким сочетанием свойств, уровень которых в значительной степени обусловлен точностью химического состава, отсутствием примесей, тщательностью изготовления и обработки.

Стали и сплавы с особыми физическими свойствами имеют очень широкий диапазон использования. Наибольшее распространение получили стали и сплавы:

- с заданным температурным коэффициентом линейного расширения;
- с высоким электросопротивлением (при повышенной жаростойкости);
- магнитные стали и сплавы.

Основные характеристики механических свойств сталей и сварных соединений [1]

Оценка механических характеристик сталей и сварных соединений проводится с целью определения их фактического состояния и соответствия его нормативным требованиям.

Твердость — это свойство поверхности материала сопротивляться внедрению индентора. Наиболее распространенными методами замера твердости являются методы:

- Виккерса (ГОСТ 2999–75) — метод, основанный на вдавливании в поверхность металла алмазного индентора в форме четырехгранной пирамиды с углом при вершине 136°;
- Бринелля (ГОСТ 9012–59) — метод, основанный на вдавливании в металл стального шарика определенного диаметра;
- Роквелла (ГОСТ 9013–59) — метод, основанный на использовании в качестве индентора алмазного конуса с углом при вершине 120° и радиусом закругления 0,2 мм или стального шарика диаметром 1,5875 мм.

Выбор метода определения твердости зависит от различных факторов: твердости материала, размеров и формы образца (детали), толщины измеряемого слоя. Значения твердости, получаемые различными методами, связаны между собой и с некоторым приближением могут быть переведены друг в друга.

При определении твердости структурных составляющих (зерен твердого раствора, карбидов, нитридов, неметаллических включений) пользуются понятием микротвердости (H_{μ}).

Предел прочности, или временное сопротивление, — напряжение (σ_b , МПа), отвечающее наибольшей нагрузке, предшествующей разрушению образцов. Определяется как отношение наибольшей нагрузки к начальной площади поперечного сечения рабочей части образца.

Условный предел текучести ($\sigma_{0,2}$, МПа) — напряжение, вызывающее остаточную деформацию образца, равную 0,2 %.

Прочностные характеристики металлов и сварных соединений определяют по результатам статических испытаний на растяжение (ГОСТ 1497—84 для основного металла и ГОСТ 6996—66 для сварных соединений). С достаточно большой степенью достоверности для определения прочностных характеристик углеродистых сталей перлитного класса можно использовать корреляционные соотношения между ними и результатами замеров твердости, которые приводятся в ГОСТ 22761—77.

Испытания основного металла и сварных соединений в лабораторных условиях производятся в соответствии с ГОСТ 1497—84, ГОСТ 14019—2013, ГОСТ 6996—66. Образцы вырезают таким образом, чтобы их продольная ось совпадала с направлением проката.

Временное сопротивление разрыву сварного соединения, определенное на разрывных образцах со снятым усилением, должно быть не менее нормативного значения временного сопротивления разрыву основного металла труб.

Усиление шва должно быть снято механическим способом до уровня основного металла. При удалении усиления разрешается снимать основной металл по всей поверхности образца на глубину до 15 % толщины образца, но не более 4 мм. Удаление производится только с той стороны, с которой снимают усиление шва. Острые кромки плоских образцов должны быть закруглены (радиус закругления не более 1 мм) с помощью напильника, сглаживание которым производится вдоль кромок.

Кроме того, при испытании на растяжение определяют характеристики пластичности. В качестве основных характеристик пластичности используют относительное удлинение и относительное сужение (ГОСТ 1497—84).

Относительное удлинение δ , %, характеризует увеличение длины образца в результате деформации при растяжении:

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100 \%,$$

где l_k , l_0 — конечная и начальная длины рабочей части образца.

Относительное сужение ψ , %, характеризует предельную работоспособность материала к пластическому деформированию до разрыва:

$$\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \cdot 100 \%,$$

где F_k , F_0 — конечная и начальная площади поперечного сечения образца.

Ударная вязкость — один из показателей сопротивления металла разрушению, определяемый при динамических испытаниях на ударный изгиб. Призматические образцы с концентратором (надрезом) посередине разрушают одним ударом маятникового копра, наносимым со стороны, противоположной надрезу. Значения ударной вязкости определяют как отношение работы, затраченной на разрушение образца, к площади поперечного сечения образца в месте концентратора.

Действующий ГОСТ 9454—78 предусматривает образцы с концентраторами трех видов:

- КСУ — образец с U-образным надрезом и радиусом концентратора $R = \pm 0,07$ мм;

- KCV — образец с V-образным надрезом и радиусом надреза $R = 0,25 \pm 0,025$ мм;

- КСТ — образец с V-образным надрезом, который продолжен трещиной длиной не более 1 мм.

Испытания на ударный изгиб проводятся согласно ГОСТ 9454—78 для основного металла и ГОСТ 6996—66 — для сварных соединений.

Большинство промышленных конструкций работает в условиях циклических нагружений, в результате чего происходит до 80 % всех эксплуатационных разрушений. Процесс постепенного накопления повреждений в материале под действием циклических нагрузок, приводящий к изменению его свойств, образованию трещин и разрушений, называется усталостью. Свойство противостоять усталости называется выносливостью.

Предел выносливости (σ_{-1} , МПа) — основная характеристика усталостной прочности материала. Это наибольшее значение максимального напряжения цикла, которое выдерживает металл без

разрушения при повторении заданного числа циклов нагружения. Оценка предела выносливости производится по ГОСТ 25.502–79 и ГОСТ 25.504–82.

Пример выполнения задания

1. Химический состав стали 10 приведен в табл. 4.

Таблица 4

Химический состав стали 10, % (ГОСТ 1050–2013)

Мар- ка стали	Массовая доля элементов, %							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
				Не более				
10	0,07–0,14	0,17–0,37	0,35–0,65	0,030	0,035	0,15	0,30	0,30

2. Сталь 10 является малоуглеродистой, конструкционной, качественной сталью. Это доэвтектоидная феррито-перлитная сталь. По степени раскисления сталь 10 – спокойная сталь.

3. Механические свойства стали приведены в табл. 5–7.

Таблица 5

Механические свойства стали 10

ГОСТ	Состояние поставки, режим термообработки	σ_b , МПа	δ_5 , %	Ψ , %	НВ, не более
1050–88	Сталь горячекатаная, кованая калиброванная и серебрянка 2-й категории после нормализации	335	31	55	
10702–78	Сталь калиброванная и калиброванная со специальной отделкой:				
	– после отжига или отпуска;	335–450	8	55	143
	– после сфероидизирующего отпуска;	315–410		55	143
	– нагартованная без термообработки	390		50	187
1577–93	Полосы нормализованные или горячекатаные	335	8	55	

Окончание табл. 5

ГОСТ	Состояние поставки, режим термообработки	σ_b , МПа	δ_5 , %	Ψ , %	НВ, не более
16523—70	Лист горячекатаный (образцы поперечные).	295—410	24		
	Лист холоднокатаный (образцы поперечные)	295—410	25		
4041—71	Лист термически обработанный 1—2 категории	295—420	32		117
8731—87	Трубы горячедеформированные термообработанные	355	24		137
8733—87	Трубы холодно- и теплodeформиро- ванные термообработанные	345	24		137
	Цементация 920—950 °С. Закалка 790—810 °С, вода. Отпуск 180—200 °С, воздух	390	25	55	Сердц. 137 по- верхн. 57—63

Таблица 6

Механические свойства стали 10
при повышенных температурах

Температура испытаний, °С	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ_5 , %	Ψ , %	KCU, кДж/м ²
Нормализация 900—920 °С					
20	260	420	32	69	221
200	220	485	20	55	176
300	175	515	23	55	142
400	170	355	24	70	98
500	160	255	19	63	78

Таблица 7

Ударная вязкость стали 10 КСУ, Дж/см²

$T = +20\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T = -20\text{ }(-30)\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T = -40\text{ }(-50)\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T = -60\text{ }^{\circ}\text{C}$	Термо- обработка (пруток 35 мм)
235	196	157	78	Отсутствует
73–265	203–216	179		Нормализация
59–245	49–174	45–83	19–42	Отжиг

4. Без термической обработки из стали 10 изготавливают шайбы, бачки, капоты тракторов, заклепки, кожухи, ленты тормозов, крышки, пальцы, трубки, муфты, шпильки и другие детали высокой пластичности. В химическом машиностроении применяют для изготовления сварных конструкций: патрубков, днищ, испарителей, конденсаторов, змеевиков, трубных решеток, трубных лучков теплообменных аппаратов и других деталей, работающих под давлением при диапазоне температур от -40 до $+425\text{ }^{\circ}\text{C}$, в том числе и с использованием сварочных процессов.

После цементации и цианирования используют ушки, втулки, коромысла, оси звеньев цепи и другие детали, в которых требуется высокая твердость поверхности и допускается невысокая прочность сердцевины.

5. Свариваемость стали 10 определяется небольшим содержанием в её составе углерода, благодаря чему сталь относится к хорошо свариваемым сталям. Низкоуглеродистые нелегированные стали, содержащие до 0,15–0,18 % С, имеют очень высокую критическую скорость охлаждения при закалке, и поэтому охлаждение после сварки не должно вызывать в зонах теплового влияния этих сталей повышения твердости. Микроструктура в различных участках ЗТВ может меняться от крупной ферритно-перлитной смеси в участках наибольшего перегрева до мелкой смеси в отдельных местах участков, нагревавшихся до температуры эвтектидного превращения.

Склонность к образованию горячих и холодных трещин у этих сталей практически отсутствует. В связи с этим изделия из указанных сталей свариваются без осложнения различными видами сварки, как при малых, так и при больших значениях погонной энергии,

которым соответствуют скорости нагрева и охлаждения в широком интервале значений. Только при сварке изделий очень больших толщин (35—40 мм и больше) в связи с увеличением уровня сварочных напряжений, особенно в условиях сварки при низких температурах — ниже минус 10 °С, когда и свариваемый металл остывает до той же температуры, прилегающие к свариваемым кромкам участки изделия следует подогреть до температуры 100 °С [4].

Вопросы для самоконтроля

1. По каким признакам классифицируются стали?
2. На какие группы делятся стали по химическому составу?
3. На какие группы делятся стали по назначению?
4. На какие группы делятся стали по качеству?
5. На какие группы делятся стали по степени раскисления?
6. Какие стали относятся к конструкционным?
7. Какие стали относятся к инструментальным?
8. Какие стали относятся к сталям с особыми физическими и химическими свойствами?
9. Какие характеристики относятся к механическим характеристикам стали?
10. Что понимается под твердостью стали?
11. Какие методы измерения твердости наиболее широко применяются?
12. Что понимается под пределом прочности стали?
13. Какие характеристики относятся к основным характеристикам пластичности стали?
14. Как определяются значения ударной вязкости стали?

Практическое занятие 2

Особенности взаимодействия компонентов в сплавах и их свариваемость

Цель занятия — познакомиться с особенностями взаимодействия металлов в жидкой и твердой фазах и оценкой их свариваемости исходя из этих особенностей.

Выполнив работу, студент должен:

знать:

- особенности взаимодействия компонентов в конструкционных сплавах, их влияние на свариваемость разнородных металлов;
- основные типы диаграмм состояния и их влияние на свариваемость металлов;

уметь:

- оценивать свариваемость разнородных металлов в зависимости от физико-химических особенностей их взаимодействия;
- выбирать оптимальные металлы и сплавы для изготовления сварных соединений в зависимости от их физико-химических свойств.

Задание

1. Определить температуру плавления и температуру полиморфного превращения металлов, указанных в варианте задания (табл. 8). Номер варианта выбирается по первой букве фамилии студента (табл. 2).
2. Указать типы кристаллических решеток металлов, их атомный радиус и параметр решетки.
3. Указать, как взаимодействуют металлы в жидкой и твердой фазах.
4. Показать диаграмму состояния сплавов, образуемую этими металлами.
5. Указать линии ликвидус и солидус на диаграмме состояния.
6. Указать химические соединения, образуемые металлами, температуры и концентрации их образования.
7. Указать типы невариантных равновесий в рассматриваемой системе.
8. Указать температуры и концентрации критических точек в рассматриваемой системе.
9. Оценить свариваемость указанных металлов.

Варианты заданий

Вариант	Свариваемые металлы	Вариант	Свариваемые металлы
1	Fe, Cu	9	Fe, Al
2	Ni, Cu	10	Fe, Ni
3	Al, Cu	11	Fe, Mg
4	Au, Cu	12	Ni, Au
5	Pb, Cu	13	Ni, Cr
6	Fe, Mn	14	Ni, Pt
7	Fe, Cu	15	Al, Mg
8	Zn, Al	16	Zn, Mg

Краткие теоретические сведения**Взаимодействие компонентов в сплавах**

В промышленности чаще всего применяют не чистые металлы, а сплавы двух или нескольких элементов на основе (то есть преимущественном содержании) какого-либо одного металла. Так, стали — сплавы на основе железа — содержат углерод, марганец, кремний, а в специальных случаях — никель, хром, молибден и другие элементы [4; 5].

Большое значение в промышленности имеют сплавы на основе алюминия, содержащие магний, медь, цинк, кремний и другие элементы, сплавы на основе меди с добавлением цинка, олова, алюминия, кремния, марганца и др., сплавы на основе титана, содержащие алюминий, молибден, олово, цирконий, марганец, хром, железо и др.

Механические свойства большинства промышленных сплавов можно улучшить, применяя различные виды термической обработки. Возможность изменения свойств сплавов путем термообработки, их свариваемость, структура и свойства сварных соединений и, что очень важно, возможность получения надежного соединения

при сварке сплавов на основе разных металлов определяются природой сплавов, их строением, фазовым состоянием и составом, изменениями, происходящими при нагреве и охлаждении, как в процессе термообработки, так и в процессе сварки.

Как правило, элементы, образующие металлический сплав, в жидком состоянии полностью взаиморастворимы, то есть образуют однородный материал со статистически равномерно распределенными в объеме атомами элементов. Однако имеется ряд металлов, не смешивающихся друг с другом даже в жидком состоянии. Такие элементы не могут образовывать сплавов, свариваемых методами сварки плавлением, а их сварка давлением в твердом состоянии — сложная задача.

Сплавы двух или нескольких элементов после перехода из жидкого состояния в твердое в зависимости от физико-химического взаимодействия компонентов могут находиться в виде:

- 1) твердых растворов;
- 2) механической смеси отдельных составляющих;
- 3) химических соединений (табл. 9).

Кроме того, могут быть и промежуточные состояния, а также сочетания в одном сплаве указанных состояний.

Твердыми растворами называют фазы, в которых один из компонентов сплава сохраняет свою кристаллическую решетку, а атомы других компонентов располагаются в решетке первого компонента, изменяя ее размеры. Таким образом, твердый раствор, состоящий из двух или более компонентов, имеет один тип решетки и представляет собой одну фазу.

Различают твердые растворы замещения и твердые растворы внедрения. При образовании твердых растворов замещения атомы растворенного компонента замещают часть атомов растворителя в его кристаллической решетке. При образовании твердых растворов внедрения атомы растворенного компонента располагаются в междоузлиях кристаллической решетки растворителя. Твердые растворы внедрения образуются только в тех случаях, когда диаметр атома растворенного компонента невелик. Это атомы углерода, азота, водорода.

Твердые растворы замещения в зависимости от количества возможного растворения растворенного компонента могут быть ограниченными и неограниченными. Для образования твердых растворов с неограниченной растворимостью необходимо соблюдение следующих условий:

- компоненты должны обладать одинаковыми по типу кристаллическими решетками;
- различие в атомных размерах компонентов должно быть незначительным и не превышать 8–15 %;
- компоненты должны принадлежать к одной и той же группе в периодической системе элементов или к смежным родственным группам и в связи с этим иметь близкое строение валентной оболочки электронов в атомах.

В ряде случаев составляющие сплава образуют механические смеси либо самих компонентов сплава, либо ограниченных по концентрации твердых растворов. Составляющие сплава могут образовывать химические соединения, которые, в свою очередь, могут оставаться свободными, а могут взаимодействовать с основой, в частности, растворяться в ней (табл. 9). Могут быть и другие формы взаимодействия составляющих сплавов в твердом состоянии. Важно то, что каждая из них по-своему влияет на свойства сплава и особенно на поведение сплавов при соединении сваркой, а после образования сварного соединения — на его свойства.

Характер взаимодействия элементов, образующих сплав, имеет большое значение для сварки. Лучше всего должны свариваться элементы, дающие непрерывный ряд твердых растворов, хуже — образующие ограниченные твердые растворы, еще хуже — образующие химические соединения и не взаимодействующие.

Таблица 9

Характер взаимодействия между собой металлов и других элементов в твердом состоянии

Элемент	Температура, °С		Тип решетки	Атомный радиус, Å	Параметры решетки, Å	Твердые растворы		Химические соединения	Эвтектические смеси	Элементы не взаимодействуют
	Плавления	Полиморфных превращений				непрерывные	ограниченные			
Fe	1536	910	α-ОЦК γ-ГЦК	1,241	2,8608 3,564	(α) V, (α) Cr, (γ) Mn, (γ) Co, (γ) Ni, (γ) Pd, (γ) Pt	Cu, Au, Al, C, Si, Ti, Zr, (γ) V, Nb, Ta, (γ) Cr, Mo, W, (α, δ) Mn, (α, δ) Co, (α) Ni, (α) Pd, (α) Pt	Ti, Zr, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, Mn, Co, Ni, Pd, Pt, Al, C, Si, Ge	C	Mg, Ag, Pb
Co	1485	417	α-текс β-ГЦК	1,248	2,501 4,066 3,548	Mn γ, Fe γ, Ni, Pd, Pt	Mg, Ti, Zr, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, Mn α-β, Fe α, Cu, Au, Al, C, Si, Ge	Mg, Ti, Zr, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, Mn, Fe, Ni, Pt, Al, Ge	Ag	Pb
Ni	1453	—	ГЦК	1,245	3,517	Mn γ, Fe γ, Co, Pd, Pt, Cu, Au	Mg, Ti, Zr, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, Mn α-β, Fe α, Al, Si, C	Mg, Ti, Zr, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, Mn, Fe, Co, Pt, Cu, Al, Si, C, Ge	—	Ag, Pb
Al	660	—	ГЦК	1,431	4,0414	—	Ti, Zr, Nb, Mn, Cu, Ni, Mg, V, Ta, Cr, Mo, W, Fe, Co, Pd, Pt, Ag, Au, Si, Ge	Mg, Ti, Zr, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, Mn, Fe, Co, Ni, Pd, Pt, Cu, Ag, Au, C	Sn	Pb
Mg	650	—	Гекс	1,598	a = 3,203 c = 5,2002	—	Ti, Zr, Nb, Mn, Cu, Ni, Pd, Ag, Au, Al, Si, V	Cu, Ni, Pd, Pt, Ag, Au, Al, C, Si, Pb, Ge	—	Mo, W, Fe
Cu	1083	—	ГЦК	1,278	a = 3,6077	Mn, Ni, Pd, Pt	Mg, Ti, Zr, V, Nb, Cr, Fe, Co, Ag, Al, Si, Mn, Ge	Mg, Ti, Zr, Mn, Ni, Pd, Pt, Au, Al, Si, Ge	—	Ta, Mo, W, Pb
Cr	1875	—	ОЦК	1,249	2,885	Ti β, V, Mo, W, Fe α	Ti α, Zr, Nb, Ta, Mn, Fe γ, Co, Ni, Pd, Pt, Cu, Ag, Au, Al, Si	Ti, Zr, Ta, Nb, Mn, Fe, Co, Ni, Pd, Pt, Au, Al, C, Si	Th	Pb, Sn

Продолжение табл. 9

Элемент	Температура, °С		Тип решетки	Атомный радиус, Å	Параметры решетки, Å	Твердые растворы		Химические соединения	Эвтектические смеси	Элементы не взаимодействуют
	Плавления	Полиморфных превращений				непрерывные	ограниченные			
Mo	2620	—	ОЦК	1,36	3,1466	Ti β, V, Nb, Ta, Cr, W	Ti α, Zr, Mn, Fe, Co, Ni, Pd, Pt, Au, Al, C, Si	Zr, Mn, Fe, Co, Ni, Pd, Pt, Al, C, Si, Ge	—	Mg, Cu, Ag
W	3380	—	ОЦК	1,367	3,1648	V, Nb, Ta, Cr, Mo	Ti, Zr, Fe, Co, Ni, Pd, Pt, C, Si	Zr, Fe, Ni, Pt, Al, C, Si	Th	Mg, Mn, Cu, Ag, Zn, Pb
Ag	961	—	ГЦК	1,444	a = 4,0778	Pd, Au	Mg, Ti, Zr, Mn, Pt, Cu, Zn, Al, Pb, Ge	Mo, Ti, Zr, Pd, Al	Co, Si	V, Ta, Mo, W, Fe, C
Au	1063	—	ГЦК	1,441	a = 4,0704	Ni, Pd, Cu, Ag	Mg, Ti, Zr, V, Cr, Mo, Mn, Fe, Co, Pt, Al, C	Mg, Ti, Zr, V, Nb, Cr, Mn, Al, Pb, Cu, Ag	Si	Re, Ir
Pt	1760	—	ГЦК	1,3875	3,9158	Fe γ, Co, Ni, Pd, Cu	Ti, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, Mn, Fe α, Ag, Au, Al, C, Si	Ti, Zr, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, Mn, Co, Ni, Pd, Pt, Al, C, Si, Ge	—	—
Pd	1554	—	ГЦК	1,375	3,8824	Fe γ, Cu, Ni, Pt, Co, Ag, Au	Mg, Ti, Zr, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, Mn, Fe α, Al, C, Pb	Mg, Ti, Zr, V, Nb, Ta, Cr, Mo, Mn, Fe, Al, Si, Ge, Cu, Ag, Pb	—	—
Si	1412	—	Алмаз	1,175	5,4198	Ge	Ti, Zr, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, Mn, Fe, Co, Ni, Pt, Cu, Al	Mg, Ti, Zr, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, Mn, Fe, Co, Pt, Cu, Ni, Pd	Mg, Ag, C, Au	Zn
Mn	1245	α-β 742 β-γ 1095	α, β-куб. γ-ГЦК δ-ОЦК	1,12	6,3 3,774 3,533 3,72	(γ) Fe, (γ) Co, (γ) Ni, Cu	Mg, Ti, Zr, V, Nb, Ta, Cr, Mo, (α, δ), Fe, (α, β) Co, (α, β) Ni, Pd, Pt, Ag, Au, Al, C, Si	Mg, Ti, Zr, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, Mn, Fe, Co, Ni, Pd, Pt, Cu, Ag, Au, C	—	W, Pb

Окончание табл. 9

Элемент	Температура, °С		Тип решетки	Атомный радиус, Å	Параметры решетки, Å	Твердые растворы		Химические соединения	Эвтектические смеси	Элементы не взаимодействуют
	Плавления	Полиморфных превращений				непрерывные	ограниченные			
V	1919	—	ОЦК	1,316	3,0338	Ti β, Nb, Ta, Cr, Mo, W, Fe α	Zr, Mn, Fe γ, Cu, Ni, Pd, Pt, Cr, Al, Au, C, Si, Ge	Cu, Ni, Pd, Pt, Ag, Au, Al, C, Si, Ge, Pb	—	Ag, Hg
Ti	1668	882	α-текс	1,444	a = 2,9446 c = 4,6694	(α) Zr, (β) V, (β) Nb, (β) Ta, (β), Cr, (β) Mo	Mg, (α) V, (α) Nb, (α) Ta, (α) Cr, (α) Mo, W, Mn, Fe, Co, Ni, Pd, Pt, Cu, Ag, Au, Al, Ge, Si, C, Pb	Mg, Ti, Zr, Mn, Ni, Pd, Pt, Au, Al, Si, Ge	—	—
			β-ОЦК		a = 3,3132					
Nb	2468	—	ОЦК	1,426	3,2941	Ti β, Zr β, V, Mo, W, Ta	Mg, Ti α, Zr α, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Pd, Pt, Cu, Al, C, Si	Ti, Zr, Ta, Nb, Mn, Fe, Co, Ni, Pd, Au, Al, C, Si	—	—
Ta	2996	—	ОЦК	1,43	3,2959	Ti β, Zr β, V, Nb, Mo, W	Ti α, Zr α, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Pd, Pt, Al, C, Si	Zr, Mn, Fe, Co, Ni, Pd, Pt, Al, C, Si, Ge	—	Cu, Ag, Hg
Zr	1852	865	α-текс β-ОЦК	1,585	a = 3,223 c = 5,123 a = 3,61	(α, β) Ti, (β) Nb, (β) Ta	Mg, V, (α) Nb, Ta, Cr, Mo, W, Mn, Fe, Co, Ni, Pd, Pt, Cu, Ag, Au, Al, Si, C	V, Cr, Mo, W, Mn, Fe, Cr, Ni, Pd, Pt, Au, Al, Si, Pb, Ge	—	—
Ge	937	—	Алмаз			Si	Mg, Ti, Zr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Ag, Au, Al	Mg, Ti, Zr, V, Nb, T, Cr, Mo, Mn, Fe, Co, Ni, Pd, Pt, Cu	Zn, C, Pb	Hg, B
Pb	327	—	ГЦК	1,75	4,9495	—	Mg, Ti, Pd, Ag, Si	Mg, Ti, Zr, Pd, Pt, Au	Ge, S	Cr, Mo, W, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Al

Пример выполнения задания

1. В качестве свариваемых металлов выбираем Pb и Sn. Температура плавления свинца равна $327,46^{\circ}\text{C}$. Свинец не имеет полиморфных превращений.

Температура плавления олова равна $230,90^{\circ}\text{C}$. Различают две полиморфные модификации олова: α (серое олово) и β (белое олово). Температура полиморфного превращения равна $13,2^{\circ}\text{C}$.

2. Тип кристаллической решетки свинца — кубическая гранецентрированная с параметром $4,95 \text{ \AA}$. Радиус атома свинца — 175 пм .

Тип кристаллической решетки α полиморфной модификации олова — кубическая алмазного типа. Параметр кристаллической решетки $a = 6,491 \text{ \AA}$. β -модификация олова имеет тетрагональную кристаллическую решетку. Параметры решетки: $a = 5,831 \text{ \AA}$; $c = 3,181 \text{ \AA}$. Радиус атома — 162 пм .

3. В жидкой фазе олово и свинец неограниченно растворимы друг в друге.

В твердой фазе образуют ограниченные растворы. Максимальная растворимость олова в свинце — $19,5\%$ по массе. Максимальная растворимость свинца в олове — $2,6\%$ по массе.

4. Диаграмма состояния системы «свинец — олово» представлена на рис. 1.

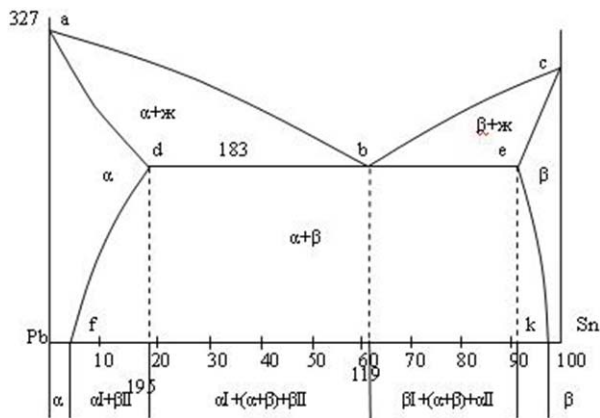


Рис. 1. Диаграмма состояния Pb – Sn

5. Линия ликвидус — abc . Линия солидус — $adbec$.

6. Олово и свинец не образуют химических соединений.

7. В рассматриваемой системе Pb — Sn наблюдается эвтектическое неинвариантное равновесие, в результате которого из жидкой фазы с содержанием олова 61,9 % при температуре 183 °C кристаллизуется смесь двух твердых фаз $\alpha_d + \beta_e$. Это равновесие наблюдается во всех сплавах между точками d, e (рис. 1).

8. Температуры и концентрации критических точек в системе Pb — Sn представлены в табл. 10.

Таблица 10

Критические точки в системе Pb — Sn

Обозначение точки	Температура, °C	Концентрация, Sn, %	Значение точки
a	327,46	0	Кристаллизация (плавление) свинца
b	183	61,9	Эвтектическое превращение
c	230,9	100	Кристаллизация (плавление) олова
d	183	19,5	Предельная растворимость олова в свинце
e	183	97,4	Предельная растворимость свинца в олове
f	20	≈1,9	Предельная растворимость олова в свинце при комнатной температуре
k	20	≈0,1	Предельная растворимость свинца в олове при комнатной температуре

9. Свинец с оловом образуют эвтектическую диаграмму с ограниченной растворимостью компонентов в твердой фазе. При сварке плавлением в сварочной ванне из жидкого расплава на кромках свариваемых металлов кристаллизуются не чистые металлы, а твердые растворы на основе соответствующих металлов. Атомное и кристаллическое соответствие твердых растворов свариваемым металлам создает хорошие условия для связи металла шва со свариваемым металлом. По мере удаления от кромок появляется и увеличивается количество эвтектики ($\alpha + \beta$) вплоть до чисто эвтектической зоны где-то в промежуточной области. Однако на сто-

роне кристаллов α могут встречаться отдельные зерна α -раствора с выделениями вторичной фазы β_{II} [4].

Такие кристаллы в определенных условиях обладают повышенной хрупкостью и твердостью. Эти условия — быстрое охлаждение и старение или быстрое охлаждение и небольшой нагрев, облегчающий выделение вторичной фазы [4].

Для металлов с рассматриваемым типом диаграммы состояния характерно также появление диффузионных зон на границе соединения. Наличие таких зон взаимодиффузии бесспорно улучшает связь в сварном соединении, так как изменение свойств при этом более плавное. Возможность даже ограниченной взаимодиффузии особенно важна при сварке давлением в твердом состоянии, когда она может стать дополнительным фактором улучшения свойств сварных соединений. Неблагоприятно в сварных соединениях рассмотренного типа проявление эффекта старения в отдельных участках сварного шва и примыкающей к шву зоне, где могли образоваться кристаллы пересыщенного твердого раствора [4].

Вопросы для самоконтроля

1. Какие вещества называют сплавами?
2. Какие компоненты образуют сплавы?
3. Какие компоненты входят в состав сталей?
4. Как взаимодействуют большинство компонентов в жидком состоянии?
5. Как называют диаграммы состояния, в которых компоненты не взаимодействуют в жидком состоянии?
6. Как классифицируются твердые растворы?
7. Как образованы твердые растворы внедрения?
8. Как образованы твердые растворы замещения?
9. Что понимается под ограниченными твердыми растворами?
10. Что понимается под неограниченными твердыми растворами?
11. В чем особенность химических соединений?

Практическое занятие 3

Оценка склонности сталей к образованию холодных трещин при сварке

Цель занятия — знакомство с расчетными методами оценки склонности сталей к образованию холодных трещин при сварке.

Выполнив работу, студент должен:

- знать понятия физической и технологической свариваемости, характеристики свариваемости металлов, влияние химического состава металла на склонность к образованию холодных трещин при сварке;
- уметь оценивать степень склонности к образованию холодных трещин при сварке по химическому составу стали;
- знать и уметь пользоваться основными расчетными методами оценки склонности сталей к образованию холодных трещин при сварке.

Задание

1. Указать химический состав и механические свойства стали, указанной в варианте задания (табл. 11). Номер варианта выбирается по первой букве фамилии студента (табл. 2).
2. Рассчитать углеродный эквивалент стали, используя формулу (1).
3. Рассчитать значения твердости металла в околошовном участке зоны термического влияния, используя формулу (2).
4. Используя выражения (4)–(6), рассчитать параметр трещинообразования с учетом указанной толщины стали для пробы «Тэккен». Оценить возможность образования трещин.
5. Рассчитать температуру предварительного подогрева при сварке указанной стали, исключающую образование холодных трещин. Для расчета рекомендуется использовать формулу (3).

Варианты заданий

Вариант	Марка стали	Толщина стали, мм	Вариант	Марка стали	Толщина стали, мм
1	15ГФ	5	9	17Г1С	40
2	15ГФД	10	10	16Г2АФД	5
3	15Г2СФ	15	11	16Г2АФ	10
4	15Г2СФД	20	12	10Г2БД	15
5	14Г2АФ	25	13	10Г2Б	20
6	14Г2АФД	30	14	12Г2Б	25
7	17ГС	35	15	18Г2АФпс	30
8	09Г2С	15	16	09Г2С	45

Краткие теоретические сведения

Свариваемость и оценка склонности сталей к образованию холодных трещин при сварке

Сварка и термическая обработка различных групп сталей имеет свои особенности, связанные с химическим составом, структурно-фазовым состоянием основного металла, его свариваемостью, назначением и условиями работы сварных соединений [1].

Свариваемость является одной из важнейших характеристик сталей, применяемых в сварных конструкциях. В ГОСТ 2601–84 «Сварка металлов. Термины и определения основных понятий» принято следующее определение: «*Свариваемость* — свойство металлов или сочетания металлов образовывать при установленной технологии сварки соединение, отвечающее требованиям, обусловленным конструкцией и эксплуатацией изделия».

В сварочной практике существуют понятия физической и технологической свариваемости. *Физическая свариваемость* подразумевает возможность получения монолитных сварных соединений с химической связью. Такой свариваемостью обладают практически все технические сплавы и чистые металлы, а также ряд сочетаний металлов с неметаллами. *Технологическая свариваемость* — это ха-

рактеристика металла, определяющая его реакцию на воздействие сварки и способность образовывать сварное соединение с заданными эксплуатационными свойствами. В этом случае свариваемость рассматривается как степень соответствия свойств сварных соединений одноименным свойствам основного металла или их нормативным значениям [1].

Поскольку количество показателей, характеризующих свойства основного металла, велико, свариваемость является комплексной характеристикой, включающей следующие факторы:

- реакция металла на термдеформационный цикл сварки, проявляющаяся в склонности к росту зерна, структурным и фазовым изменениям в металле шва и ЗТВ;
- сопротивляемость образованию горячих трещин;
- сопротивляемость образованию холодных трещин;
- соответствие свойств сварного соединения заданным эксплуатационным требованиям по прочности, пластичности, выносливости, ползучести, жаростойкости, жаропрочности, коррозионной стойкости и т. п.

Показатели свариваемости, как одиночные, так и представляющие собой сочетание нескольких показателей, служат основанием для выбора способа сварки, сварочных материалов, применения регулирования технологических параметров сварочных процессов. Общим для всех показателей свариваемости является их зависимость от химического состава стали и структурно-фазового состояния сварного соединения.

Холодные трещины (ХТ) — локальные хрупкие межкристаллические разрушения материала сварного соединения, возникающие под действием собственных сварочных напряжений. К холодным трещинам относят трещины, возникающие после охлаждения сварного соединения и имеющие блестящий кристаллический излом, без следов высокотемпературного окисления [1].

В большинстве случаев для возникновения ХТ характерным является наличие:

- инкубационного периода до образования очага трещины;
- напряжений, значения которых составляют менее 0,9 кратковременной прочности материалов после сварки.

Это позволяет отнести ХТ к процессам замедленного разрушения материала.

При образовании ХТ определяющими являются три фактора: наличие закалочных структур, повышенный уровень растягивающих сварочных напряжений первого рода и повышенная концентрация диффузионного водорода в зоне очага зарождения трещины.

Образование ХТ начинается с возникновения очага разрушения, как правило, на границах аустенитных зерен на околошовном участке ЗТВ, примыкающем к линии сплавления.

Протяженность очагов трещин составляет несколько диаметров аустенитных зерен. При этом разрушение не сопровождается заметной пластической деформацией и наблюдается как практически хрупкое, что позволяет отнести ХТ к межкристаллическим хрупким разрушениям. Дальнейшее развитие очага в микро- и макротрещину может носить смешанный или внутризеренный характер.

Механизмы образования ХТ в разных вариантах включают в себя два основных процесса: низкотемпературную ползучесть и диффузионное перераспределение водорода. Низкотемпературная ползучесть реализуется путем развития микропластической деформации в приграничных зонах зерен. Микропластическая деформация обусловлена наличием в структуре свежезакаленной стали незакрепленных, способных к скольжению краевых дислокаций при действии сравнительно невысоких напряжений. Особенно велика вероятность дислокаций в мартенсите непосредственно после действия термического цикла сварки. Воздействие водорода проявляется в снижении поверхностной энергии границ зерен, что способствует росту полостей и субмикротрещин.

Склонность к образованию холодных трещин при сварке может выявляться с применением сварочных технологических проб, методов специализированных механических испытаний сварных образцов («машинные» методы) и расчетных методик. Применение первых двух экспериментальных методов регламентируется ГОСТ 26388—84, определяющим виды, размеры образцов и испытательных приспособлений, режимы сварки.

Применение расчетных методов оценки склонности к возникновению холодных трещин основано на их взаимосвязи с закали-

ваемостью стали при сварке, которая возрастает с повышением степени легированности материала и насыщением металла шва и зоны термического влияния водородом. Поэтому в настоящее время широко используют следующие параметрические уравнения [1]:

1. Расчет значения эквивалента углерода $C_{\text{экв}}$, %, по формуле, рекомендованной Международным институтом сварки:

$$C_{\text{экв}} = C + \frac{\text{Si}}{24} + \frac{\text{Mn}}{6} + \frac{\text{Cr} + \text{Mo} + \text{V}}{5} + \frac{\text{Ni} + \text{Cu}}{15}. \quad (1)$$

Принято считать, что при $C_{\text{экв}} < 0,4$ % сталь не склонна к образованию холодных трещин [4]. При $C_{\text{экв}} > 0,45$ % при сварке становится возможным формирование закалочных структур в металле сварного соединения, что при условии насыщения металла водородом и высоких сварочных напряжениях может привести к образованию таких трещин.

2. Расчет значения твердости металла в околошовном участке зоны термического влияния можно вести по формуле

$$HV_{\text{max}} = 90 + 1050C + 47\text{Si} + 75\text{Mn} + 30\text{Ni} + 31\text{Cr}. \quad (2)$$

Для предотвращения образования ХТ эффективно применение подогрева при сварке. При этом снижается скорость охлаждения металла шва и ЗТВ, предотвращается возможность образования мартенсита, создаются благоприятные условия для удаления диффузионного водорода.

3. Расчет температуры предварительного подогрева $T_{\text{п}}$, °C, исключающей появление ХТ:

$$T_{\text{п}} = 1440P_{\text{w}} - 392. \quad (3)$$

Расчет производят с учетом параметра трещинообразования P_{w} [5].

4. Расчет параметра трещинообразования P_{w} :

$$P_{\text{w}} = P_{\text{см}} + \frac{H_{\text{гд}}}{60} + \frac{K}{40 \cdot 10^4}, \quad (4)$$

$$P_{\text{см}} = C + \text{Si} / 30 + \text{Mn} / 20 + \text{Cr} / 20 + \text{Cu} / 20 + \text{Ni} / 60 + \text{Mo} / 15 + \text{V} / 15 + 5B, \quad (5)$$

где $H_{\text{гд}}$ — количество диффузионного водорода в металле шва, установленное глицериновым методом, мл/100 г (соотношение с ртут-

ным методом МИС: $H_{\text{гл}} = 0,64$, $H_{\text{мис}} = 0,93$); K – коэффициент интенсивности жесткости, $H/(\text{мм} \cdot \text{мм})$:

$$K = K_0 \cdot \delta, \quad (6)$$

где K_0 – постоянная, имеющая значения в пределах 200–1000 $H/(\text{мм}^2 \cdot \text{мм})$ в зависимости от жесткости конструкции для пробы «Тэккен 685»; δ – толщина стали, мм.

При $P_w > 0,286$ возможно образование холодных трещин в зоне термического влияния в корне шва сварного соединения типа пробы «Тэккен». Уравнение применимо к низколегированным сталям с содержанием углерода 0,07–0,22 % с пределом прочности 500–700 МПа при сварке с погонной мощностью 17 кДж/см.

Пример выполнения задания

1. Для выполнения задания выбрана сталь 14Г2 толщиной 10 мм. Химический состав стали приведен в табл. 12. Механические свойства приведены в табл. 13.

Таблица 12

Химический состав стали 14Г2
(ГОСТ 19281–2014)

Марка стали	Массовая доля элементов, %							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
				Не более				
14Г2	0,12–0,18	0,17–0,37	1,2–1,6	0,030	0,035	0,30	0,30	0,30

2. Углеродный эквивалент стали 14Г2 рассчитываем по формуле:

$$C_{\text{экр}} = 0,15 + \frac{0,27}{24} + \frac{1,4}{6} + \frac{0,3}{5} + \frac{0,3 + 0,3}{15} = 0,49.$$

Значение $C_{\text{экр}} > 0,45$, поэтому возможно образование трещин при сварке.

Таблица 13

Механические свойства стали 14Г2

ГОСТ	Состояние поставки, режим термообработки	Сечение, мм	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %
19281–73	Сортовой и фасонный прокат	До 10	335	460	21
19282–73	Листы и полосы (образцы поперечные)	От 10 до 32 вкл.	325	450	21
	Листы поперечной закалки отпуска (образцы поперечные)	От 10 до 32 вкл.	390	530	18
17066–80	Листы горячекатаные	2–3,9	—	460	17

3. Для расчета твердости металла в околошовной зоне воспользуемся формулой:

$$HV_{\max} = 90 + 1050 \cdot 0,15 + 47 \cdot 0,27 + 75 \cdot 1,4 + \\ + 30 \cdot 0,3 + 31 \cdot 0,3 = 383,3.$$

4. Рассчитаем параметр трещинообразования с учетом указанной толщины стали для пробы «Тэккен», используя выражения (4)–(6):

$$P_{\text{см}} = 0,15 + 0,27 / 30 + 1,4 / 20 + 0,3 / 20 + 0,3 / 20 + 0,3 / 60 = 0,255, \\ K = 685 \cdot 10 = 6850.$$

Значение параметра трещинообразования составляет:

$$P_w = 0,255 + \frac{0,64}{60} + \frac{6850}{400000} = 0,297.$$

В связи с тем, что $P_w > 0,286$, возможно образование холодных трещин в зоне термического влияния в корне шва сварного соединения типа пробы «Тэккен».

5. Для расчета температуры предварительного подогрева при сварке стали, исключаяющей образование холодных трещин, используем формулу (3):

$$T_{\text{п}} = 1440 - 0,297 \cdot 392 = 36 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Вопросы для самоконтроля

1. Что понимается под свариваемостью металлов?
2. Что понимается под физической свариваемостью?
3. Что понимается под технологической свариваемостью?
4. Укажите показатели свариваемости металлов.
5. Для чего служат показатели свариваемости металлов?
6. Что понимается под холодными трещинами?
7. Какие факторы являются определяющими при образовании холодных трещин в сварных соединениях?
8. Какие процессы включают механизмы образования холодных трещин?
9. Какие методы применяются для оценки склонности стали к образованию холодных трещин?

Практическое занятие 4

Определение ферритной фазы в металле шва при сварке нержавеющей высоколегированных хромоникелевых сталей

Цель занятия – приобрести навыки определения содержания феррита в металле шва нержавеющей высоколегированных хромоникелевых сталей с использованием диаграммы Шеффлера.

Выполнив работу, студент должен:

- знать классификацию высоколегированных нержавеющей сталей, условия влияния легирующих элементов на феррито- и аустенитообразование, влияния фазового состава аустенитных сталей на их свариваемость и свойства сварных соединений;
- уметь рассчитывать химический состав металла шва и оценивать свариваемость высоколегированных сталей, а также пользоваться расчётными методами для определения фазового состава аустенитных сталей.

Задание

1. Определить химический состав и основные механические свойства стали, указанной в варианте задания (табл. 14). Номер варианта выбирается по первой букве фамилии студента (табл. 2).
2. Указать область применения этого вида стали и виды продукции, изготавливаемой из этого вида стали.
3. Указать, к какому структурному классу относится сталь.
4. Найти в справочной литературе сведения о химическом составе наплавленного металла, учитывая указанные в варианте задания марки электродов (табл. 14).
5. Рассчитать химический состав металла шва при помощи формулы:

$$R_{ши} = R_{oi} \cdot \gamma + R_{эi} \cdot (1 - \gamma), \quad (7)$$

где $R_{ши}$ – содержание элемента в шве; $R_{эi}$ – содержание этого элемента в электродном металле; R_{oi} – содержание данного элемента в основном металле; γ – коэффициент перехода элемента из основного металла, который рассчитывается из выражения: $\gamma = F_o / (F_o + F_n)$; F_o – площадь проплавленного металла; F_n – площадь наплавленного металла.

6. Рассчитать эквивалент никеля и хрома металла шва, используя формулы (8) и (9).

7. Определить фазовый состав металла шва и содержание ферритной фазы, пользуясь диаграммой Шеффлера.

Таблица 14

Варианты задания

Вариант	Марка стали	Марка электродов	Коэффициент перехода элемента из основного металла
1	03X18H12	ОЗЛ-22	0,2
2	10X17H13M3T	НЖ-13	0,3
3	08X18НБ	ОЗЛ-7	0,4
4	20X23H13	ОЗЛ-9А	0,5
5	06X21H21M4ГБ	ОЗЛ-17У	0,6
6	03X23H25M3ДЗБ	ОЗЛ-37-2	0,7
7	10X17H13M2T	НИАТ-1	0,8
8	25X20H35	КТИ-7А	0,1
9	03X18H11	ОЗЛ-22	0,2
10	08X18H10	ОЗЛ-36	0,3
11	08X18H10T	ОЗЛ-8	0,4
12	08X18H12T	ОЗЛ-36	0,5
13	12X18H9T	ЦЛ-9	0,6
14	12X18H9	ОЗЛ-8	0,7
15	12X18H12T	ЦЛ-11	0,8
16	45X25H20C2	КТИ-7а	0,1

Краткие теоретические сведения

Высоколегированные нержавеющие хромоникелевые стали

Классификация нержавеющих сталей и сплавов

Согласно ГОСТ 5632–2014, к высоколегированным нержавеющим сталям и сплавам условно отнесены:

- 1) нержавеющие стали — стали с минимальной массовой долей хрома 10,5 % и максимальной массовой долей углерода 1,2 %;
- 2) сплавы на железоникелевой основе — сплавы, основная структура которых является твердым раствором хрома и других легирующих элементов в железоникелевой основе (сумма никеля и железа — более 65 % при приблизительном отношении никеля к железу 1 : 1,5);
- 3) сплавы на никелевой основе — сплавы, основная структура которых является твердым раствором хрома и других легирующих элементов в никелевой основе (массовая доля никеля — не менее 50 %).

В зависимости от основных свойств такие стали делятся на три большие группы:

- 1) коррозионностойкие стали и сплавы, то есть стали и сплавы, обладающие стойкостью против электрохимической и химической коррозии (атмосферной, почвенной, щелочной, кислотной, солевой), межкристаллитной коррозии, коррозии под напряжением и др.;
- 2) жаростойкие (окалиностойкие) стали и сплавы, то есть стали и сплавы, обладающие стойкостью против химического разрушения поверхности в газовых средах при температурах выше 550 °С, работающие в ненагруженном или слабонагруженном состоянии;
- 3) жаропрочные стали и сплавы, то есть стали и сплавы, работающие в нагруженном состоянии при высоких температурах в течение определенного времени и обладающие при этом достаточной жаростойкостью.

Основными легирующими элементами нержавеющих сталей являются хром и никель. Остальные легирующие элементы подразделяются на две группы:

- 1) ферритностабилизирующие — Mo, W, V, Nb, Ti, Si и др., повышающие количество феррита в структуре стали аналогично хрому;

2) аустенитностабилизирующие — С, Со, Мп, N, которые наряду с никелем повышают устойчивость аустенита.

Нержавеющие стали в зависимости от структуры подразделяют на классы:

- 1) мартенситный: стали с основной структурой мартенсита (20X13, 20X17H2, A25X13H2П, 30X13, 30X13H7C2, 40X9C2, 11X11H-2B2MФ, 13X11 H2B2MФ, 13X14H3B2ФР);
- 2) мартенсито-ферритный: стали, содержащие в структуре, кроме мартенсита, не менее 10 % феррита (05X12H2M, 07X12HМФБР, 12X13, 14X17H2, 15X12ВНМФ, 18X12ВМБФР);
- 3) ферритный: стали, имеющие структуру феррита (без превращения) (08X13, 08X17Т, 12X17, 15X18СЮ, 15X25Т, 15X28);
- 4) аустенито-мартенситный: стали, имеющие структуру аустенита и мартенсита, количество которых можно изменять в широких пределах (07X16H6, 08X17H5M3, 08X17H6Т, 09X15H8Ю1, 20X13H4Г9);
- 5) аустенито-ферритный: стали, имеющие структуру аустенита и феррита (феррит более 10 %) (03X22H5AM3, 03X22H6M2, 08X18Г8H2Т, 08X22H6Т, 12X21H5Т, 15X18H12C4ТЮ, 20X20H14C2, 20X23H13);
- 6) аустенитный: стали, имеющие структуру устойчивого аустенита (02X25H22AM2, 03X17H9AM3, 03X18H10Т, 03X18H12, 03X21H-32M3Б, 08X17H15M3Т, 08X18H10, 08X18H10Т, 08X18H12Т, 12X18H9, 12X18H9Т, 12X18H10Т, 20X23H18, 20X25H20C2, 36X18H25C2).

Подразделение стали на классы по структурным признакам является условным, так как предполагает только одну термическую обработку, а именно — охлаждение на воздухе после высокотемпературного нагрева (свыше 900 °С) образцов небольших размеров.

Структурный класс стали зависит прежде всего от ее химического состава. Влияние состава на тип структуры высоколегированных сталей показывает диаграмма Шеффлера (рис. 2). Диаграмма выражает зависимость структуры сталей от эквивалентов никеля $Ni_{\text{экв}}$ и хрома $Cr_{\text{экв}}$, которые рассчитываются по следующим формулам:

$$Ni_{\text{экв}} = \% Ni + 30 \cdot \% C + 0,5 \cdot \% Mn + 12 \cdot \% N, \quad (8)$$

$$Cr_{\text{экв}} = \% Cr + \% Mo + 1,5 \cdot \% Si + 0,5 \cdot \% Nb + 4 \cdot \% Ti. \quad (9)$$

При отсутствии азота в составе стали в расчете $Ni_{\text{экв}}$ коэффициент перед марганцем будет равен не 0,5, а 1,5.

Никелевый эквивалент характеризует суммарное воздействие аустенитностабилизирующих элементов, хромовый — ферритностабилизирующих, содержащихся в стали. Рассчитанные значения $Ni_{\text{экв}}$ и $Cr_{\text{экв}}$ откладываются на оси ординат и оси абсцисс соответственно. Точки пересечения попадают в ту или иную фазовую область, позволяющую определить структурный класс стали. Диаграмму Шеффлера можно также использовать для определения структурного и фазового состояния металла в зоне сплавления при сварке сталей различными присадочными материалами.

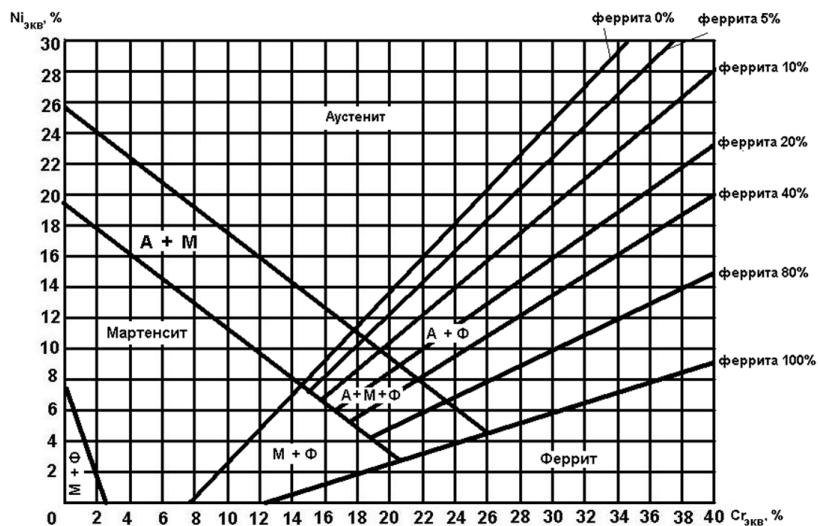


Рис. 2. Структурная диаграмма Шеффлера

Характеристика высоколегированных хромоникелевых сталей

Сплавы на основе железа с высоким содержанием хрома и никеля относятся к особой группе сталей с комплексом свойств, принципиально отличающихся от свойств обычных углеродистых низко- и среднелегированных сталей. Никель, существенно стабилизирующий γ -фазу, расширяет температурную и концентрационную область ее существования, снижает критическую скорость

охлаждения при закалке. При легировании стали одновременно большим количеством никеля (более 8 %) и хрома (более 18 %) критическая скорость охлаждения снижается настолько, что сталь даже при очень медленном охлаждении сохраняет переохлажденный аустенит. При этом снижение температуры начала мартенситного превращения ниже комнатной приводит к сохранению аустенитного состояния таких сталей до комнатной и при определенных условиях — ниже комнатной температур.

Однако в реальных высоколегированных хромоникелевых сталях, содержащих углерод и другие элементы, фазовое состояние как при нагреве, так и после охлаждения может быть более сложным. При этом во всех случаях основой обеспечения свойств является наличие полностью или преимущественно аустенитного состояния сплава в условиях эксплуатации.

Фазовое и структурное состояние металла шва высоколегированных хромоникелевых сталей

Тройные сплавы Fe — Ni — Cr при содержании 8 % Ni и до 20 % Cr при нагреве должны претерпевать $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращение. Однако для этих сплавов возможен перегрев до состояния $\gamma + \alpha$. Температура такого перегрева тем ниже, чем больше хрома содержится в стали. Для сплавов, содержащих более 22 % Cr, чистой γ -фазы при нагреве не образуется, может быть только смесь $\gamma + \alpha$. Максимальное содержание хрома, при котором можно осуществить нагрев до чистого γ -состояния, тем больше, чем больше содержание в стали никеля. Точно так же температура перегрева, при которой сплав переходит в область $\gamma + \alpha$, тем выше, чем больше в стали содержится никеля [4].

Естественно, что если при нагреве достигнуто полностью γ -состояние, при охлаждении с достаточной скоростью может быть зафиксирован аустенит и получена полностью аустенитная сталь, если температура M_n лежит ниже комнатной (температура конца охлаждения), либо мартенситная, если температура M_k лежит выше комнатной, либо аустенитно-мартенситная, если M_n находится выше комнатной, а M_k — ниже.

У хромоникелевых сталей температура мартенситного превращения лежит в области отрицательных значений ($0 \div -100^\circ\text{C}$) и даже ниже в зависимости от состава стали. Переохлажденный до $+20^\circ\text{C}$

аустенит может быть при определенном составе стали стабильным и нестабильным и претерпевать при определенных условиях мартенситное превращение. Этими условиями могут быть охлаждение при закалке до пониженных температур (температур мартенситного превращения) и холодная пластическая деформация при положительной температуре.

Большое значение для свойств рассматриваемых сталей имеют превращения, протекающие при нагреве и, соответственно, получаемое фазовое состояние после охлаждения. Хром сильно увеличивает устойчивость α -состояния стали. Настолько сильно, что даже при содержании в стали значительных количеств никеля область существования γ -состояния оказывается замкнутой и окруженной α -фазой. В сталях со значительным содержанием хрома при нагреве возможны две схемы фазовых превращений. Для сплавов, находящихся в концентрационной области замкнутой петли γ -фазы, нагрев в интервале температур существования одной γ -фазы должен привести к полной перекристаллизации, с получением после охлаждения аустенитного состояния, стабильного или нестабильного, с мартенситом или без мартенсита, или полностью мартенситного состояния в зависимости от условий охлаждения и состава стали. Однако при нагреве этих же сталей до более высоких температур можно достигнуть области $\alpha + \gamma$. По существу, эта α -фаза будет высокотемпературным δ -ферритом. При охлаждении таких сплавов должно произойти обратное превращение $\alpha \rightarrow \gamma$ при высокой температуре. Увеличение содержания хрома или других стабилизирующих феррит элементов приводит к тому, что сталь становится ферритно-аустенитной, отвечающей двухфазной области $\alpha + \gamma$. Количество феррита в такой стали зависит от соотношения содержания суммы аустенитообразующих (Ni, C, Mn, N) и ферритообразующих (Cr, Mo, W, V и др.) элементов и может быть приближенно оценено по диаграмме на рис. 1. Для таких сталей нагрев приводит к образованию фаз $\alpha + \gamma$, и охлаждение сохраняет в структуре наряду с аустенитом или продуктами его превращения и определенное, соответствующее составу, количество феррита.

Феррит в рассматриваемых сталях оказывает определенное влияние на свойства. Отличаясь более низкой пластичностью, чем

аустенит, он осложняет процессы обработки, способствуя появлению надрывов. В прокатанном металле феррит раскатывается в слоистые, обуславливающие анизотропию свойств вдоль и поперек направления проката металла. Феррит — заметно более хрупкая составляющая, чем аустенит, поэтому он ухудшает вязкость стали. Феррит отрицательно влияет на жаропрочность. В связи с отрицательным влиянием феррита на технологические и другие свойства аустенитных сталей его количество регламентируется. Обычно для сохранения удовлетворительной деформируемости допускают до 25 % феррита. Регулируют количество феррита в основном соотношением содержания в сталях хрома и никеля. Так, стали типа 18-8 в пределах содержания в них легирующих элементов и углерода могут содержать 0—30 % феррита. Стали типа 25-20 полностью аустенитные.

Феррит в литых сталях, в том числе и сварных швах, в определенных количествах играет положительную роль. В литом металле и в металле шва ферритные выделения обычно находятся по границам аустенитных зерен и тем самым ограничивают рост аустенитного зерна, способствуя получению мелкозернистой стали и повышению механических свойств.

Большое влияние на количество феррита и стабильность аустенита оказывает содержание и состояние углерода в стали. Углерод сильно расширяет γ -область и стабилизирует аустенит.

Однако если углерод в CrNi-сталях связан в карбиды (хрома или других элементов), а не растворен в аустените, он теряет свое значение как аустенитизатор. При этом понижается стабильность образующегося аустенита, и сталь из области аустенитных перейдет в область аустенитно-ферритных. Чтобы сохранить аустенитизирующее действие углерода, нагрев под закалку и условия охлаждения должны обеспечить растворение карбидов и фиксацию углерода в растворе.

Пример выполнения задания

1. Для выполнения задания выбрана сталь 07X21Г7АН5. Химический состав стали приведен в табл. 15. Механические свойства приведены в табл. 16.

Таблица 15

Химический состав стали 07X21Г7АН5 (ГОСТ 5632–2014)

Марка стали	Массовая доля элементов, %							
	C	Si	Mn	Cr	Ni	N	S	P
							Не более	
07X21Г7АН5	Не более 0,07	Не более 0,70	6,00–7,50	19,50–21,00	5,00–6,00	0,15–0,25	0,030	0,030

Таблица 16

Механические свойства стали 07X21Г7АН5 (ГОСТ 5949–75)

Марка стали	Сортовая				Ударная вязкость КСУ, Дж/см ²
	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ_3 , %	Ψ , %	
07X21Г7АН5	Не менее 690	Не менее 360	Не менее 40	Не менее 55	127

2. Область применения стали: для сварных изделий, работающих при криогенных температурах до минус 253 °С и в средах средней агрессивности.

Виды продукции, изготавливаемой из стали 07X21Г7АН5 (ГОСТ 27702–88):

- 1) сортовой прокат;
- 2) тонкий лист;
- 3) толстый лист;
- 4) калиброванный прутки;
- 5) сталь со специальной отделкой поверхности;
- 6) заготовка передельная;
- 7) поковки и кованные заготовки.

3. Сталь 07X21Г7АН5 в соответствии с ГОСТ 5632–2014 относится к сталям аустенитного класса.

4. В соответствии с вариантом задания: электроды ЦЛ-11; по ГОСТ10052–75: электроды типа Э-10Х25Н13Г2Б. Химический состав наплавленного металла представлен в табл. 17.

Таблица 17

Химический состав наплавленного металла для электродов типа Э-10Х25Н13Г2Б (ГОСТ 10052–75)

Марка стали	Массовая доля элементов, %							
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Nb	S	P
							Не более	
07X21Г7АН5	Не более 0,12	0,4–1,2	1,20–2,50	21,50–26,50	11,5–14,00	0,70–1,3	0,020	0,030

5. Для расчета химического состава металла шва используем формулу (7) с учетом указанного в варианте задания коэффициента перехода элементов из основного металла (0,4). Расчетный химический состав представлен в табл. 18.

Таблица 18

Расчетный химический состав металла шва, %

Марка стали	Средняя массовая доля элементов, %								
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Nb	N	S	P
								He более	
07X21Г7АН5	He более 0,075	0,76	3,8	22,8	9,85	0,6	0,08	0,024	0,030

6. Для расчета эквивалента никеля металла шва воспользуемся формулой (8):

$$Ni_{\text{экр}} = 9,85 + 30 \cdot 0,075 + 0,5 \cdot 3,8 + 12 \cdot 0,08 \approx 15.$$

Для расчета эквивалента хрома металла шва воспользуемся формулой (9):

$$Cr_{\text{экр}} = 22,8 + 0 + 1,5 \cdot 0,76 + 0,5 \cdot 0,6 + 0 \approx 24.$$

7. Пользуясь диаграммой Шеффлера (рис. 2), определяем фазовый состав металла шва и содержание ферритной фазы. Металл шва представлен фазами аустенита и феррита. Содержание феррита, исходя из диаграммы Шеффлера, составляет около 7,5 %.

Вопросы для самоконтроля

1. Укажите содержание железа в высоколегированных сталях.
2. Какое суммарное содержание легирующих элементов в высоколегированных сталях?
3. На какие три группы делятся высоколегированные стали в зависимости от их свойств?
4. Какие основные свойства характеризуют коррозионностойкие стали?
5. Какие основные свойства характеризуют жаростойкие стали?
6. Какие основные свойства характеризуют жаропрочные стали?
7. Назовите основные легирующие элементы высоколегированных сталей.
8. На какие две группы по влиянию на фазовый состав делятся легирующие элементы?
9. Какие легирующие элементы относятся к аустенитообразующим?
10. Какие легирующие элементы относятся к ферритообразующим?
11. Какую зависимость выражает диаграмма Шеффлера?
12. Укажите формулу для расчета эквивалента никеля.
13. Укажите формулу для расчета эквивалента углерода.
14. Как влияет феррит на свойства аустенитных сталей?

Практическое занятие 5

Свариваемость высокохромистых сталей

Цель работы — познакомиться с составом, структурой, свойствами и свариваемостью высокохромистых сталей мартенситного, мартенсито-ферритного и ферритного классов.

Выполнив работу, студент должен:

— *знать* классификацию, фазовый состав и свойства высоколегированных хромистых сталей; особенности влияния химического и фазового состава высоколегированных хромистых сталей на их свариваемость; основные сложности сварки высоколегированных хромистых сталей различных структурных классов и методы повышения свариваемости этих сталей;

— *уметь* оценивать свариваемость высоколегированных хромистых сталей, а также выбирать режимы предварительного подогрева и последующей термической обработки сварных соединений из высоколегированных хромистых сталей.

Задание

1. Укажите химический состав и основные механические свойства стали, указанной в варианте задания (табл. 19). Номер варианта выбирается по первой букве фамилии студента (табл. 2).
2. Укажите область применения стали и состояние поставки.
3. Укажите, к какому структурному классу относится сталь.
4. Укажите рекомендуемые способы сварки заданной марки стали.
5. Определите необходимость предварительного подогрева при сварке листов стали с указанной в варианте задания толщиной и температуру предварительного подогрева.
6. Определите необходимость термической обработки сварных соединений из указанной стали, вид и режимы термической обработки.

Варианты задания

Вариант	Марка стали	Толщина стали, мм	Вариант	Марка стали	Толщина стали, мм
1	11X11H2B2MФ	5	9	12X13	5
2	13X11 H2B2MФ	10	10	14X17H2	10
3	13X14H3B2ФР	15	11	65 X13	15
4	15X11MФ	20	12	12X17	20
5	20X12BHMФ	4	13	08X13	4
6	20X13	8	14	08X17T	8
7	30X13	12	15	15X25T	12
8	40X13	6	16	15X28	6

Краткие теоретические сведения**Высокохромистые стали и их свариваемость****Фазовый состав, структура и свойства высокохромистых сталей**

Хром — основной легирующий элемент, используемый в коррозионностойких и жаропрочных сталях, — широко применяется и для легирования жаростойких, окалиностойких сталей [4].

В коррозионностойких кислотостойких сталях при содержании более 12 % Cr смещается в положительную сторону электрохимический потенциал стали, сталь становится более устойчивой в растворах электролитов. В то же время хром способствует образованию на поверхности металла плотной и достаточно прочной окисной пленки, защищающей металл от воздействия коррозионно-активной среды. Эта же стойкая окисная пленка хрома защищает сталь от окисления при высоких температурах, повышает ее жаростойкость.

Наряду с высокой коррозионной стойкостью стали, содержащие около 12 % Cr, имеют высокую прочность и жаропрочность значительно выше, чем у низко- и среднелегированных хромистых и хромомолибденовых сталей. В связи с указанным сочетанием свойств высокохромистые стали находят широкое применение

в различных областях народного хозяйства. При высоких механических и антикоррозионных свойствах высокохромистые стали имеют пониженные технологические свойства, в том числе пониженную свариваемость. Это связано с особенностями фазового состояния высокохромистых сталей и особенностями структурных и фазовых превращений, происходящих при нагреве и охлаждении.

Хром относится к легирующим элементам, стабилизирующим в железных сплавах α -фазу и уменьшающим область существования γ -фазы (рис. 3). Введение в железохромистые сплавы других ферритостабилизирующих элементов (Mo, W, V, Ti, Si и др.) еще больше сужает γ -область. В то же время аустенитостабилизирующие (C, Mn, Ni, Cu) ее расширяют. Углерод, кроме того, приводит к образованию карбидов хрома, обедняя хромом твердый раствор.

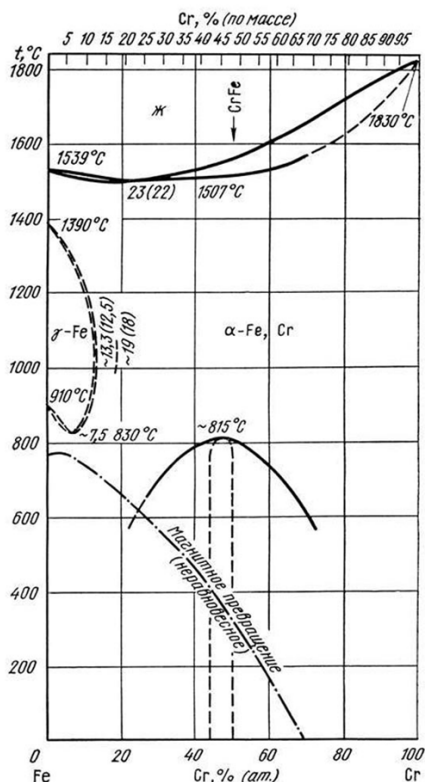


Рис. 3. Диаграмма состояния железо — хром

Хромистые стали, претерпевающие превращение $\gamma \leftrightarrow \alpha$, то есть находящиеся в пределах концентраций существования γ -фазы, относятся к мартенситным в связи с очень небольшой критической скоростью охлаждения у сталей, содержащих более 5 % Cr, даже при небольшом содержании углерода. Мартенситные высокохромистые стали — это основная группа высоколегированных хромистых сталей. Эти стали содержат 8–14 % Cr и 0,06–0,4 % C, а также другие легирующие элементы для придания специальных свойств. В табл. 20 представлены основные марки мартенситных высокохромистых сталей в соответствии с ГОСТ 5632–2014.

Наличие в сталях углерода при высоком содержании хрома позволяет получать сочетание коррозионной стойкости и различной степени упрочнения при мартенситном превращении. В связи с наличием полиморфного превращения стали эти термически обрабатываемы. Чем выше в стали содержание углерода, тем более высокую прочность можно получить как после закалки, так и после нормализации.

Хромистые стали рассматриваемой группы помимо высокой коррозионной стойкости обладают и другими важными свойствами — повышенной жаропрочностью и жаростойкостью. Повышенная жаропрочность высокохромистых сталей даже без дополнительного легирования связана с высоким содержанием хрома в твердом растворе; отношение Cr/C в этих сталях значительно выше критического.

Дополнительное повышение жаропрочности высокохромистых мартенситных сталей достигается введением карбидообразующих — вольфрама, молибдена, ванадия, ниобия.

Наряду с такого рода положительным влиянием на жаропрочность Mo, W, V необходимо считаться с тем, что эти элементы стабилизируют α -фазу, способствуя сужению γ -области. В связи с этим они могут способствовать увеличению количества феррита в стали, делая ее не полностью мартенситной, а мартенситно-ферритной. Появление в таких сталях феррита естественно способствует снижению прочности и жаропрочности.

Таблица 20

Химический состав высокохромистых сталей мартенситного класса

Номер марки	Марка стали или сплава		Массовая доля элементов, %												Назначение стали или сплава						
	Обозначение	Условное обозначение	Углерод	Кремний	Марганец	Хром	Никель	Титан	Алюминий	Вольфрам	Молибден	Нибий	Ванадий	Железо	Не более	Фос-фор	Сера	Прочие	Коррозионно-стойкая(ий)	Жаростойкая(ий)	Жаропрочная(ый)
1-1	05X16H5AB	ЭК172	Не более 0,05	0,20–0,50	0,20–0,60	15,00–16,50	4,00–5,50	–	–	–	–	0,04–0,10	–	Осн.	0,010	0,010	0,010	Азот 0,10–0,18	+	–	–
1-2	07X16H4Б	–	0,05–0,10	Не более 0,60	0,20–0,50	15,00–16,50	3,50–4,50	–	–	–	–	0,20–0,40	–	Осн.	0,020	0,025	–	–	++	–	–
1-3	09X16H4Б	ЭП56	0,08–0,12	Не более 0,60	Не более 0,50	15,00–16,50	4,00–4,50	–	–	–	–	0,05–0,15	–	Осн.	0,015	0,030	–	–	++	–	–
1-4	11X11H2B2MФ	ЭИ 962	0,09–0,13	Не более 0,60	Не более 0,60	10,50–12,00	1,50–1,80	–	–	1,60–2,20	0,35–0,50	–	0,18–0,30	Осн.	0,025	0,030	–	–	–	–	+

Продолжение табл. 20

Номер марки	Марка стали или сплава		Массовая доля элементов, %														Назначение стали или сплава			
	Обозначение	Условное обозначение	Углерод	Кремний	Марганец	Хром	Никель	Титан	Алюминий	Вольфрам	Молибден	Ниобий	Ванадий	Железо	Сера	Фос- фор	Про- чие	Коррозионно- стойкая(ий)	Жаростойкая(ий)	Жаропрочная(ий)
1-5	13X11 H2B2MФ	ЭИ961	0,10— 0,16	Не более 0,60	Не более 0,60	10,50— 12,00	1,50— 1,80	—	—	1,60— 2,20	0,35— 0,50	—	0,18— 0,30	Осн.	0,025	0,030	—	—	—	+
1-6	13X14H3B2ФР	ЭИ736	0,10— 0,16	Не более 0,60	Не более 0,60	13,00— 15,00	2,80— 3,40	—	—	1,60— 2,20	—	—	0,18— 0,28	Осн.	0,025	0,030	Бор не более 0,004	—	—	+
1-7	15X11MФ	—	0,12— 0,19	Не более 0,50	Не более 0,70	10,00— 11,50	—	—	—	—	0,60— 0,80	—	0,25— 0,40	Осн.	0,025	0,030	—	—	—	+
1-8	16X11H2B2MФ	ЭИ962A	0,14— 0,18	Не более 0,60	Не более 0,60	10,50— 12,00	1,40— 1,80	—	—	1,60— 2,00	0,35— 0,50	—	0,18— 0,30	Осн.	0,025	0,030	—	—	—	+
1-9	18X11MНФБ	ЭП291	0,15— 0,21	Не более 0,60	0,60— 1,00	10,00— 11,50	0,50— 1,00	—	—	—	0,80— 1,10	0,20— 0,45	0,20— 0,40	Осн.	0,025	0,030	—	—	—	+
1-10	20X12BHMФ	ЭП428	0,17— 0,23	Не более 0,60	0,50— 0,90	10,50— 12,50	0,50— 0,90	—	—	0,70— 1,10	0,50— 0,70	—	0,15— 0,30	Осн.	0,025	0,030	—	—	—	+

Продолжение табл. 20

Номер марки	Марка стали или сплава		Массовая доля элементов, %													Назначение стали или сплава				
	Обозначение	Условное обозначение	Углерод	Кремний	Марганец	Хром	Никель	Титан	Алюминий	Вольфрам	Молибден	Ниобий	Ванадий	Железо	Сера	Фосфор	Прочие	Коррозионно-стойкая(ий)	Жаростойкая(ий)	Жаропрочная(ый)
1-11	20Х13	—	0,16—0,25	Не более 0,80	Не более 0,80	12,00—14,00	—	—	—	—	—	—	—	Осн.	0,025	0,030	—	++	—	+
1-12	20Х17Н2	—	0,17—0,25	Не более 0,80	Не более 0,80	16,00—18,00	1,50—2,50	—	—	—	—	—	—	Осн.	0,025	0,035	—	+	—	—
1-13	A25Х13Н2П		0,20—0,30	Не более 0,80	0,80—1,20	12,00—14,00	1,50—2,00	—	—	—	—	—	—	Осн.	0,15—0,25	0,08—0,15	—	+	—	—
1-14	30Х13	—	0,26—0,35	Не более 0,80	Не более 0,80	12,00—14,00	—	—	—	—	—	—	—	Осн.	0,025	0,030	—	+	—	—
1-15	30Х13Н7С2	ЭИ72	0,25—0,34	2,00—3,00	Не более 0,80	12,00—14,00	6,00—7,50	—	—	—	—	—	—	Осн.	0,025	0,030	—	—	+	—
1-16	40Х9С2	—	0,35—0,45	2,00—3,00	Не более 0,80	8,00—10,00	—	—	—	—	—	—	—	Осн.	0,025	0,030	—	—	++	+

Окончание табл. 20

Номер марки	Марка стали или сплава		Массовая доля элементов, %													Назначение стали или сплава				
	Обозначение	Условное обозначение	Углерод	Кремний	Марганец	Хром	Никель	Титан	Алюминий	Вольфрам	Молибден	Никобий	Ванадий	Железо	Сера	Фосфор	Прочие	Коррозионно-стойкая(ий)	Жаростойкая(ий)	Жаропрочная(ый)
1-17	40X10C2M	ЭИ107	0,35— 0,45	1,90— 2,60	Не более 0,80	9,00— 10,50	—	—	—	—	—	0,70— 0,90	—	Осн.	0,025	0,030	—	—	++	+
1-18	40X13	—	0,36— 0,45	Не более 0,80	Не более 0,80	12,00— 14,00	—	—	—	—	—	—	—	Осн.	0,025	0,030	—	+	—	—
1-19	65X13	—	0,60— 0,70	0,20— 0,50	0,25— 0,80	12,00— 14,00	Не более 0,50	—	—	—	—	—	—	Осн.	0,025	0,030	—	++	—	—
1-20	95X18	ЭИ229	0,90— 1,00	Не более 0,80	Не более 0,80	17,00— 19,00	—	—	—	—	—	—	—	Осн.	0,025	0,030	—	+	—	—

Для повышения устойчивости γ -фазы, расширения γ -области и уменьшения количества феррита в них вводят иногда небольшое количество никеля. Это позволяет одновременно уменьшить критическую скорость охлаждения и снизить температуру мартенситного распада, получая за счет этого некоторое повышение прочности.

Помимо рассмотренных наиболее распространенных высокохромистых сталей, применяются как коррозионностойкие стали с более высоким легированием хромом. Это ферритно-мартенситные (табл. 21) на базе 17 % Cr и ферритные (табл. 22) на базе 25–28 % Cr.

Стали с 17 % Cr по сравнению со сталями, содержащими ~12 % Cr, имеют более высокую коррозионную стойкость против коррозии в атмосфере и в некоторых химически активных средах, например в азотной кислоте. Поэтому 17%-е хромистые стали иногда применяют взамен более дорогих и дефицитных хромоникелевых аустенитных.

Структурное состояние и свойства 17%-х хромистых сталей зависит от содержания в них углерода и других легирующих элементов. Чистый сплав железа с 17 % Cr — однофазный ферритный. Практически однофазное α -состояние сохраняется при содержании в стали до 0,04 % C. Однако при более высоком содержании в стали углерода при нагреве появляется $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращение, и после охлаждения в структуре, кроме основного феррита, может образоваться мартенсит. В связи с этим 17%-е хромистые стали могут быть ферритными или полуперлитными.

Полуперлитная 17%-я хромистая сталь, содержащая ~0,1 % C, может быть превращена в ферритную, если в нее ввести достаточное количество титана для связывания имеющегося углерода в карбиды. Такое количество титана отвечает примерно пятикратному содержанию углерода.

Для повышения прочности 17%-х хромистых сталей без ощутимой потери пластичности и вязкости их легируют небольшими количествами никеля при низком содержании углерода.

Таблица 21

Химический состав высокохромистых сталей мартенсито-ферритного класса

Номер марки	Марка стали или сплава	Массовая доля элементов, %														Назначение стали или сплава									
		Обозначение		Условное обозначение	Углерод	Кремний	Марганец	Хром	Никель	Титан	Алюминий	Вольфрам	Молибден	Ниобий	Ванадий	Железо	Не более		Фос- фор	Прочие	Коррозионно- стойкая(ий)	Жаростойкая(ий)	Жаропрочная(ий)		
																	Сера	Сера							
2. Стали мартенсито-ферритного класса																									
2-1	05X12H2M	—	0,02— 0,06	0,15— 0,30	0,30— 0,60	11,00— 12,00	1,20— 1,60	He более 0,05	He более 0,15	—	—	0,80— 1,00	—	—	Осн.	0,010	0,015	Мель не более 0,08; азот не более 0,020	+	—	—	—	—		
2-2	07X12HMФБР	ЧС80	0,06— 0,10	He более 0,20	0,50— 0,80	11,50— 12,50	0,90— 1,10	—	He более 0,10	—	—	0,80— 1,00	0,05— 0,15	0,15— 0,25	Осн.	0,015	0,015	Азот 0,04— 0,06; мель не более 0,08; бор не более 0,005	+	—	+	+	+		

Окончание табл. 21

Номер марки	Марка стали или сплава		Массовая доля элементов, %													Назначение стали или сплава				
	Обозначение	Условное обозначение	Углерод	Кремний	Марганец	Хром	Никель	Титан	Алюминий	Вольфрам	Молибден	Ниобий	Ванадий	Железо	Сера	Фос- фор	Прочие	Коррозионно- стойкая(ий)	Жаростойкая(ий)	Жаропрочная(ый)
2-3	12X13	—	0,09— 0,15	Не более 0,80	Не более 0,80	12,00— 14,00	—	—	—	—	—	—	—	Осн.	0,025	0,030	—	++	+	+
2-4	14X17H2	ЭИ268	0,11— 0,17	Не более 0,80	Не более 0,80	16,00— 18,00	1,50— 2,50	—	—	—	—	—	—	Осн.	0,025	0,030	—	++	—	+
2-5	15X12ВНМФ	ЭИ802	0,12— 0,18	Не более 0,40	0,50— 0,90	11,00— 13,00	0,40— 0,80	—	—	0,70— 1,10	0,50— 0,70	—	0,15— 0,30	Осн.	0,025	0,030	—	—	—	+
2-6	18X12ВМБФР	ЭИ993	0,15— 0,22	Не более 0,50	Не более 0,50	11,00— 13,00	—	—	—	0,40— 0,70	0,40— 0,60	0,20— 0,40	0,15— 0,30	Осн.	0,025	0,030	Бор не более 0,003	—	—	+

Таблица 22

Химический состав высокохромистых сталей ферритного класса

Номер марки	Марка стали или сплава		Массовая доля элементов, %												Назначение стали или сплава					
	Обозначение	Условное обозначение	Углерод	Кремний	Марганец	Хром	Никель	Титан	Алюминий	Вольфрам	Молибден	Ниобий	Ванадий	Железо	Сера	Фосфор	Прочие	Коррозионно-стойкая(ий)	Жаростойкая(ий)	Жаропрочная(ый)
3 Стали ферритного класса																				
3-1	04X14TЗР1Ф	ЧС82	0,02—0,06	Не более 0,50	Не более 0,50	13,00—16,00	Не более 0,50	2,30—3,50	Не более 0,50	—	—	—	0,15—0,30	Осн.	0,020	0,030	Бор 1,30—1,80	+	—	—
3-2	08X13	ЭИ 496	Не более 0,08	Не более 0,08	Не более 0,08	12,00—14,00	—	—	—	—	—	—	—	Осн.	0,025	0,030	—	+	—	+
3-3	08X17Т	ЭИ 645	Не более 0,08	Не более 0,08	Не более 0,08	16,00—18,00	—	5С —0,80	—	—	—	—	—	Осн.	0,025	0,035	—	+	++	—
3-4	08X18Т1	—	Не более 0,08	Не более 0,08	Не более 0,70	17,00—19,00	—	0,60—1,00	—	—	—	—	—	Осн.	0,025	0,035	—	+	++	—
3-5	08X18Тч	ДИ-77	Не более 0,08	Не более 0,08	Не более 0,08	17,00—19,00	—	5С —0,60	Не более 0,10	—	—	—	—	Осн.	0,025	0,035	Церий не более 0,1; кальций не более 0,05	+	—	—

Окончание табл. 22

Номер марки	Марка стали или сплава		Массовая доля элементов, %													Назначение стали или сплава				
	Обозначение	Условное обозна- чение	Углерод	Кремний	Марганец	Хром	Никель	Титан	Алюминий	Вольфрам	Молибден	Ниобий	Ванадий	Железо	Сера	Фос- фор	Прочие	Коррозионно- стойкая(ий)	Жаростойкая(ий)	Жаропрочная(ый)
3-6	10X13CЮ	ЭИ404	0,07– 0,12	1,20– 2,00	Не более 0,08	12,00– 14,00	–	–	1,00– 1,80	–	–	–	–	Осн.	0,025	0,030	–	–	+	–
3-7	12X17	–	Не более 0,12	Не более 0,08	Не более 0,08	16,00– 18,00	–	–	–	–	–	–	–	Осн.	0,025	0,035	–	++	+	–
3-8	15X18CЮ	ЭИ 484	Не более 0,15	1,00– 1,50	Не более 0,08	17,00– 20,00	–	–	0,70– 1,20	–	–	–	–	Осн.	0,025	0,035	–	–	+	–
3-9	15X25Т	ЭИ 439	Не более 0,15	Не более 1,00	Не более 0,08	24,00– 27,00	–	5С –0,90	–	–	–	–	–	Осн.	0,025	0,035	–	+	++	–
3-10	15X28	ЭИ 349	Не более 0,15	Не более 1,00	Не более 0,08	27,00– 30,00	–	–	–	–	–	–	–	Осн.	0,025	0,035	–	+	++	–

Отличительной особенностью ферритных 17%-х хромистых сталей является их высокая склонность к росту ферритного зерна при нагреве. Поэтому для этих сталей при технологических операциях избегают высоких нагревов, их оптимальная термообработка — отжиг при 760–780 °С. Для сталей этого типа — ферритно-мартенситных, содержащих никель, — нагрев при закалке до 1000–1050 °С. Особенно опасен для высокохромистых 17%-х сталей нагрев при температурах 500 °С в связи с развитием так называемой 475-градусной хрупкости, природа которой еще не вполне ясна.

Хромистые ферритные стали практически не пригодны для работы при низких температурах, так как у них пороговая температура перехода в хрупкое состояние лежит, как правило, выше 0 °С. При повышенной температуре (100–200 °С) ударная вязкость этих сталей высокая. Особенно способствует понижению ударной вязкости рост ферритного зерна при нагреве. Ударная вязкость полуферритных сталей, например 17%-х хромистых, содержащих никель, после закалки и отпуска значительно выше, чем у чисто ферритных. Ударная вязкость сталей, содержащих титан, делающий сталь чисто ферритной, ниже, чем у сталей, не содержащих титана.

Дальнейшее повышение сопротивления окислению и коррозии в ряде химических активных сред наблюдается в стали с более высоким содержанием хрома (25–28 %). Эти стали чисто ферритные, даже при наличии в них ~0,1 % С. Такое фазовое состояние стали определяет ряд свойств. Прежде всего необходимо иметь в виду низкую вязкость этих сталей. Их температура перехода в хрупкое состояние лежит выше комнатной температуры, поэтому при +20 °С их ударная вязкость очень невелика и может достигать немногим более 1 кгс · м/см².

Склонность к росту зерна при нагреве и уменьшение в связи с этим вязкости и пластичности после охлаждения требует проведения всех операций деформирования при повышенной температуре выше порога хладноломкости (выше 100 °С).

Высокохромистые стали рассматриваемой группы обнаруживают повышенную склонность к 475-градусной хрупкости и межкристаллитной коррозии после нагрева до температуры выше 900 °С. Эта склонность к коррозии по границам зерен связана с образова-

нием при нагреве карбидов хрома по границам зерен и обеднением в связи с этим пограничных участков зерен хромом.

Свариваемость высокохромистых сталей

Сварка высокохромистых сталей всех трех рассматриваемых групп связана с рядом трудностей, определяемых их свойствами и особенностями процессов, протекающих при нагреве и охлаждении, их фазовым и структурным состоянием [4].

Высокохромистые стали, как и другие высоколегированные, имеют значительно более низкую теплопроводность, чем углеродистые и низколегированные. Это приводит к возникновению в зоне сварки более высокого градиента температур и вследствие этого повышенного уровня временных и остаточных сварочных напряжений.

Стали мартенситного класса в условиях сварочного термического цикла в околосшовных участках закаливаются на мартенсит с высокой твердостью и низкой деформационной способностью. В результате деформаций, сопровождающих сварку, в таком металле возможно образование холодных трещин. При охлаждении сталей с температуры нагрева полностью или даже частично до аустенитного состояния мартенситный распад происходит в широком интервале скоростей охлаждения, что обуславливает обязательное образование в ЗТВ полностью мартенситной структуры, иногда даже с некоторым количеством аустенита (повышенное содержание углерода, легирование никелем) или феррита (стали с низким содержанием углерода, легированные ферритообразующими элементами).

Другая особенность мартенситного превращения, обуславливающая повышенную склонность к образованию холодных трещин в ЗТВ, состоит в том, что мартенситный распад происходит при пониженных температурах ($\sim 150^\circ\text{C}$), исключающих протекание процессов самоотпуска.

В связи с тем, что мартенситные и в том числе жаропрочные высокохромистые стали являются термически улучшаемыми и используются после закалки и высокого отпуска, участки ЗТВ, нагревавшиеся при сварке до температуры, близкой к A_1 , разупрочняются. Такое разупрочнение не может быть ликвидировано последующей после сварки простой термообработкой (отпуском) и требует сложной, двойной, термообработки (нормализации с отпуском).

Для 17%-х и особенно 25%-х хромистых полуферритных и ферритных сталей сильно ограничивают возможность и усложняют технологию сварки быстропротекающий рост ферритного зерна при нагреве в ЗТВ и отсутствие практической возможности каким-либо путем измельчить это зерно после сварки, поскольку ферритные стали не претерпевают перекристаллизации в связи с отсутствием $\alpha \leftrightarrow \gamma$ -превращения. Сильный рост ферритного зерна приводит к значительному охрупчиванию ЗТВ ферритных сталей при сварке.

Выделение карбидов хрома по границам зерен в участках ЗТВ, нагревавшихся до температуры 900 °С и несколько выше, обуславливает понижение их стойкости против межкристаллитной коррозии. Устранение этого недостатка достигается использованием для сварки высокохромистых сталей, легированных титаном или ниобием, которые связывают углерод в стойкие карбиды. При сварке сталей, не содержащих титана или ниобия, устранение склонности сварных соединений к межкристаллитной коррозии достигается термообработкой, восстанавливающей стабильное состояние участков границ зерен.

Хотя высокохромистые стали можно сваривать различными способами сварки, общим условием является использование технологии с наименее интенсивным тепловым воздействием сварочного источника теплоты на участки ЗТВ. При сварке мартенситных сталей это уменьшает размер мартенситной зоны. При наличии в этих сталях феррита и при сварке полуферритных и ферритных сталей это ограничивает рост зерен феррита и снижает эффект охрупчивания ЗТВ.

Изделия из высокохромистых сталей сваривают ручной дуговой сваркой покрытыми электродами, а также применяют дуговую сварку плавящимся электродом в углекислом газе и его смесях с инертными газами, сварку плавящимся и неплавящимся электродами в инертных газах (аргоне, аргоно-гелиевых смесях) и автоматическую сварку под специальными флюсами.

Предварительный и сопутствующий сварке подогрев обычно предотвращает образование трещин. Для хромистых сталей мартенситного и мартенситно-ферритных классов, как правило, рекомендуется общий (иногда местный, с использованием, в частности, гибких индукторов, питаемых от сварочных трансформаторов) подогрев до 200–450 °С (табл. 23).

Условия сварки высокохромистых сталей

Марка стали	Температура воздуха при сварке, °С	Толщина металла, мм	Подогрев, °С	ЗТВ после сварки		Термообработка*	ЗТВ после термообработки	
				НВ	$a_H, \text{ кгс} \cdot \text{м}/\text{см}^2$		НВ	$a_H, \text{ кгс} \cdot \text{м}/\text{см}^2$
08X13	+5 +5	≤ 10 >10	— 150	250	1	Отпуск при 660–770 °С (20X13)	200	1
20X13 30X13 40X13	+10	Все толщины	300	500	2		200	3
15X11МФ 15X12ВНМФ 18X11МНФБ 14X12В2МФ	+10	Все толщины	300–350	500	2	Отпуск при 650–750 °С	250	4
12X17 15X28	+10	≤ 10 >10	— 150–200	300	1	Отжиг при 760–780 °С ускоренным охлаждением. Отпуск при 700–750 °С	200	1
08X17T 15X25T	+10	≤ 10 >10	— 150–200	350	1	Отпуск при 700–750 °С	200	1

Все сварные соединения мартенситных сталей после сварки обязательно подвергают высокому отпуску для снятия напряжений, распада мартенсита и общего повышения вязкости. Отпуск сварных соединений высокохромистых сталей назначают (до температуры 680–760 °С) в зависимости от состава свариваемой стальной шва: более низкая температура отпуска — для сталей без дополнительного легирования карбидообразующими элементами, более высокая — для сталей со значительными количествами молибдена, вольфрама, ванадия.

Сварка ферритных и полужерритных высокохромистых сталей с 25 и 17 % Сг имеет особенности, связанные с ростом ферритного зерна в ЗТВ и значительным охрупчиванием этих участков (рис. 4). Пониженная теплопроводность, требующая подогрева для уменьшения температурного градиента, и необходимость ограничения тепловложения приводят к тому, что при сварке ферритных и полужерритных высокохромистых сталей температура подогрева существенно ниже, чем при сварке мартенситных, и ограничивается 150 °С. При малых толщинах свариваемого металла и положительных температурах окружающего воздуха сварка возможна иногда и вовсе без подогрева.

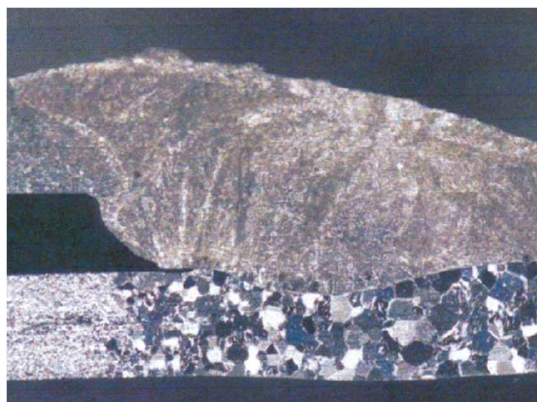


Рис. 4. Образцы соединений разнородных сталей: внизу — сталь ферритного класса (явный рост зерна в зоне сварки)

Одновременно с ростом зерна в ЗТВ у сталей, не содержащих титана или ниобия, снижается устойчивость против межкристаллитной коррозии. В связи с этим сварные изделия, работающие в условиях воздействия коррозионно-активных сред, для восстановления устойчивости против межкристаллитной коррозии должны подвергаться термообработке — длительному нагреву (отжигу) при температуре 760–780 °С последующим ускоренным охлаждением. Такой нагрев приводит к выравниванию концентрации хрома по зерну, восстановлению концентрации хрома в приграничных участках зерен. Ускоренное охлаждение предотвращает возможность образования карбидов и развития 475-градусной хрупкости.

Если изделие работает в условиях отсутствия коррозионно-активных сред, достаточен обычный высокий отпуск при 700–750 °С.

Сварка ферритных и полужерритных высокохромистых сталей, содержащих титан и ниобий в указанных количествах, не связана с развитием склонности к межкристаллитной коррозии. В этом случае после сварки даже для изделий, работающих в условиях воздействия коррозионно-активных сред, применяют указанный высокий отпуск. Снижение вязкости металла ЗТВ за счет роста ферритного зерна происходит и в этих сталях.

Пример выполнения задания

1. Химический состав стали 15X12ВНМФ приведен в табл. 24, а механические свойства — в табл. 25.

2. Сталь 15X12ВНМФ применяется для изготовления роторов, дисков, лопаток, болтов.

Виды продукции, изготавливаемой из стали 15X12ВНМФ (ГОСТ 27702–88):

- 1) сортовой прокат;
- 2) калиброванный прутки;
- 3) сталь со специальной отделкой поверхности;
- 4) заготовка передельная.

3. Сталь 15X2ВНМФ относится к сталям мартенситно-ферритного класса.

4. Сталь 15X12ВНМФ трудносвариваемая. Сваривают ручной дуговой сваркой покрытыми электродами, применяют дуговую сварку плавящимся электродом в углекислом газе и его смесях с инертными газами, а также сварку плавящимся и неплавящимся электродами в инертных газах (аргоне, аргоно-гелиевых смесях) и автоматическую сварку под специальными флюсами. Для ручной дуговой сварки рекомендуются электроды КТИ-9, КТИ-10.

5. Сталь 15X12ВНМФ перед сваркой необходимо подогревать независимо от толщины свариваемых деталей. Температура подогрева 300–350 °С.

6. Сварные изделия из стали 15X12ВНМФ после сварки необходимо подвергнуть термической обработке. Отпуск при 700 °С в течение 5 часов или при 680 °С в течение 10 часов.

Таблица 24

Химический состав стали 15X12ВНМФ (ГОСТ 5632–2014)

Марка стали	Массовая доля элементов, %							
	C	Si	Mn	Cr	W	Mo	V	Ni
		Не более 0,40	0,50–0,90	11,00–13,00	0,70–1,10	0,50–0,70	0,15–0,30	
15X12ВНМФ	0,12–0,18							0,40–0,80
								0,025
								0,030

Таблица 25

Механические свойства стали 15X12ВНМФ (ГОСТ 5949–2018)

Марка стали	Рекомендуемый режим термической обработки образцов или заготовок для изготовления образцов	Механические свойства, не менее			
		σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ_5 , %	Ψ , %
					Ударная вязкость КСЧ, Дж/см ²
15X12ВНМФ	Отжиг при температуре (900–950) °С, охлаждение с печью, закалка с температуры (1000–1020) °С, охлаждение в масле, отпуск при температуре (600–700) °С, охлаждение на воздухе	740	590	15	45
					59

Вопросы для самоконтроля

1. Как влияет хром на коррозионную стойкость сталей?
2. Какой состав имеют высоколегированные хромистые стали?
3. На какие структурные классы делятся высокохромистые стали?
4. Укажите область применения высоколегированных хромистых сталей мартенситного класса.
5. С какой целью высоколегированные хромистые стали мартенситного класса дополнительно легируют вольфрамом, молибденом, ванадием, ниобием?
6. С какой целью высоколегированные хромистые стали мартенситного класса дополнительно легируют никелем?
7. Укажите область применения высоколегированных хромистых сталей мартенситно-ферритного и ферритного классов.
8. К какому структурному классу относятся высоколегированные хромистые стали с содержанием 17 % хрома?
9. Почему ферритные высокохромистые стали не применяются для работы при отрицательных температурах?
10. Укажите причины склонности высокохромистых ферритных сталей к МКК.
11. Назовите основные трудности при сварке высокохромистых сталей мартенситного класса.
12. С какой целью применяется предварительный подогрев перед сваркой высоколегированных хромистых сталей?
13. Назовите температуру предварительного подогрева высокохромистых сталей мартенситного класса.
14. Назовите температуру предварительного подогрева высокохромистых сталей ферритного класса.
15. Какой вид термической обработки и с какой целью применяется для сварных соединений из высокохромистых сталей мартенситного класса?
16. Какой вид термической обработки и с какой целью применяется для сварных соединений из высокохромистых сталей ферритного класса?

Библиографический список

1. Ефименко, Л. А. Металловедение и термическая обработка сварных соединений : учеб. пособие для студентов вузов / Л. А. Ефименко, А. К. Прыгаев, О. Ю. Елагина. — Москва : Логос, 2007. — 455 с. — (Новая университетская библиотека). — ISBN 5-98704-184-8.
2. Стали и сплавы : марочник : справочник / сост.: В. Г. Сорокин [и др.] ; под ред. В. Г. Сорокина, М. А. Гервасьева. — Москва : Интермет инжиниринг, 2001. — 608 с. — ISBN 5-89594-056-0.
3. Материаловедение : учеб. пособие / С. В. Давыдов, Д. А. Болдырев, Л. И. Попова, М. Н. Тюрков. — Москва [и др.] : Инфра-Инженерия, 2020. — 420 с. — ISBN 978-5-9729-0417-4.
4. Лившиц, Л. С. Металловедение для сварщиков = Металловедение сварки и термическая обработка сварных соединений : (Сварка сталей) / Л. С. Лившиц. — Москва : Машиностроение, 1979. — 253 с.
5. Лахтин, Ю. М. Материаловедение : учебник для высших технических учеб. заведений / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. — 5-е изд., стер. — Москва : Альянс, 2009. — 527, [1] с. — ISBN 978-5-903034-66-6.
6. Теория сварочных процессов : учебник для студентов вузов / В. М. Неровный, А. В. Коновалов, Б. Ф. Якушин [и др.] ; под ред. В. М. Неровного. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. — 702, [1] с. — ISBN 978-5-7038-4543-1.

Глоссарий

Автоматическая дуговая сварка — механизированная дуговая сварка, при которой возбуждение дуги, подача плавящегося электрода или присадочного металла и относительное перемещение дуги и изделия осуществляются механизмами без непосредственного участия человека, в том числе и по заданной программе.

Аустенит — твердый раствор углерода и других элементов в γ -железе с кубической гранцентрированной кристаллической решеткой (ГЦК).

Бейнит — сложная структура, формирующаяся при промежуточном (бейнитном) превращении переохлажденного аустенита в интервале температур, ограниченном сверху областью диффузионного превращения, а снизу — областью мартенситного превращения.

Величина зерна — размеры зерна, достоверно определенные по микрошлифу.

Дуговая сварка — сварка плавлением, при которой нагрев осуществляется электрической дугой.

Дуговая сварка в углекислом газе — дуговая сварка, при которой в качестве защитного используется углекислый газ.

Дуговая сварка неплавящимся электродом — дуговая сварка, выполняемая нерасплавляющимся при сварке электродом.

Дуговая сварка плавящимся электродом — дуговая сварка, выполняемая электродом, который, расплавляясь при сварке, служит присадочным металлом.

Дуговая сварка под флюсом — дуговая сварка, при которой дуга горит под слоем сварочного флюса.

Зерно — отдельный кристалл поликристаллической структуры.

Зона термического влияния — участок основного металла, не подвергавшийся расплавлению, структура и свойства которого изменились в результате нагрева при сварке или наплавке.

Легирование — введение в основной металл одного или нескольких химических элементов для получения требуемых структуры и свойств.

Мартенсит — метастабильный твердый раствор с тетрагональной объемно-центрированной решеткой.

Механизированная дуговая сварка — дуговая сварка, при которой подача плавящегося электрода или присадочного металла или от-носительное перемещение дуги и изделия выполняются с помощью механизмов.

Остаточный аустенит — аустенит, не претерпевший фазового $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения при охлаждении и существующий при комнат-ной температуре.

Отжиг — термическая обработка, предусматривающая нагрев изделия до определенной температуры, выдержку и последую-щее медленное охлаждение с целью получения более равновесной структуры.

Отжиг для снятия остаточных напряжений — отжиг без суще-ственного изменения фазового состояния структуры для осущест-вления заданной степени релаксации напряжений.

Перлит — эвтектоидная или квазиэвтектоидная структура, пред-ставляющая собой механическую смесь феррита и цементита, име-ющих пластинчатую форму. В процессе распада мартенсита при от-пуске или после сфероидизирующего отжига получают зернистый перлит (глобулярные частицы цементита, расположенные в фер-ритной матрице).

Прокаливаемость (процесс) — глубина проникновения закален-ного слоя от поверхности изделия вглубь.

Ручная дуговая сварка — дуговая сварка, при которой возбужде-ние дуги, подача электрода и его перемещение проводятся вручную.

Сварка металлов — получение неразъемных соединений по-средством установления межатомных связей между соединяемыми частями при их нагревании и (или) деформировании.

Сварная конструкция — металлическая конструкция, изготов-ленная сваркой отдельных деталей.

Сварное соединение — неразъемное соединение, выполненное сваркой.

Сварной шов — участок сварного соединения, образовавшийся в результате кристаллизации расплавленного металла, или в резуль-тате пластической деформации при сварке давлением, или в резуль-тате сочетания кристаллизации и деформации.

Скорость охлаждения — изменение температуры в процессе охлаждения, отнесенное ко времени. Различают скорость охлаждения на данный момент времени и среднюю скорость охлаждения в заданном интервале температур.

Сталь — сплав железа с углеродом, содержащий не более 2,14 % углерода.

Температура фазового превращения — температура, при которой в стали происходят фазовые превращения, или температура, при которой фазовые превращения начинаются или заканчиваются.

Термическая обработка — процесс обработки изделий из металлов и сплавов путем температурного воздействия и последующего охлаждения с определенной скоростью с целью изменения их структуры и свойств в заданном направлении.

Трещина сварного соединения — дефект сварного соединения в виде разрыва в сварном шве и (или) прилегающих к нему зонах.

Ускоренное охлаждение — контролируемое охлаждение со скоростью большей, чем охлаждение на воздухе, которое позволяет исключить или сократить термическую обработку с отдельного нагрева и обеспечить улучшение свойств стали.

Феррит — твердый раствор (кристаллический твердый раствор) одного или нескольких химических элементов в α -железе или в δ -железе.

Цементит — карбид железа, химический состав которого соответствует формуле Fe_3C .

α -железо — модификация железа с кубической объемноцентрированной кристаллической решеткой (ОЦК), существующая ниже температуры 911 °С.

γ -железо — модификация железа с кубической гранецентрированной кристаллической решеткой (ГЦК), существующая в интервале температур от 911 до 1392 °С.

δ -железо — модификация железа с кубической объемноцентрированной кристаллической решеткой (ОЦК), существующая в интервале температур от 1392 °С до температуры плавления.

Содержание

Введение	3
Практическое занятие 1. Классификация сталей и механические свойства сталей и сварных соединений	5
Практическое занятие 2. Особенности взаимодействия компонентов в сплавах и их свариваемость	17
Практическое занятие 3. Оценка склонности сталей к образованию холодных трещин при сварке	27
Практическое занятие 4. Определение ферритной фазы в металле шва при сварке нержавеющей высоколегированных хромоникелевых сталей	35
Практическое занятие 5. Свариваемость высокохромистых сталей	46
Библиографический список	67
Глоссарий	68

Учебное издание

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ СВАРКИ

Практикум

Составитель

Ковтунов Александр Иванович

В оформлении издания использована иллюстрация с сайта freepic.com

Редактор *О.П. Корабельникова*

Технический редактор *Н.П. Крюкова*

Компьютерная верстка: *Л.В. Сызганцева*

Дизайн обложки: *Е.В. Веселова*

Подписано в печать 17.10.2025. Формат 60×84/16.

Печать оперативная. Усл. п. л. 4,18.

Тираж 100 экз. Заказ № 1-104-22.

Издательство Тольяттинского государственного университета

445020, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14,

тел. 8 (8482) 44-91-47, www.tltsu.ru

