

А. Н. Зайцев



# **МАТЕРИАЛЫ И ИХ ПОВЕДЕНИЕ ПРИ СВАРКЕ**

**А. Н. ЗАЙЦЕВ**

# **МАТЕРИАЛЫ И ИХ ПОВЕДЕНИЕ ПРИ СВАРКЕ**

Учебное пособие

Москва Вологда  
«Инфра-Инженерия»  
2022

УДК 621.791  
ББК 34.641  
3-17

Рецензенты:

д. т. н., профессор кафедры сварочных, литейных и аддитивных технологий  
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный  
технический университет» *А. Ю. Медведев*;  
д. т. н., директор ООО «Головной аттестационный центр РБ»  
*В. В. Атрощенко*

**Зайцев, А. Н.**

**3-17** Материалы и их поведение при сварке : учебное пособие / А. Н. Зайцев. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2022. – 236 с. : ил., табл.  
ISBN 978-5-9729-1079-3

Рассмотрены общие закономерности и особенности металлургии и металловедения сварного соединения, в том числе: кристаллическое строение и кристаллизация; диффузионные процессы в металлах при сварке; характеристики свариваемых и вспомогательных материалов; металлургические процессы при сварке; свариваемость различных конструкционных материалов; равнопрочность сварных швов; основные механические и эксплуатационные свойства сварных соединений и методы их определения.

Для студентов, изучающих курс «Материалы и их поведение при сварке» по направлению подготовки бакалавров 15.03.01 «Машиностроение» в высших учебных заведениях.

УДК 621.791  
ББК 34.641

ISBN 978-5-9729-1079-3

© Зайцев А. Н., 2022  
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2022  
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	8
<b>ЧАСТЬ I. Общие закономерности и особенности металлургии сварных соединений</b> .....	9
<b>1. Физический принцип сварки. Кристаллизация металла сварочной ванны</b> .....	9
1.1. Физические принципы образования сварного соединения .....	9
1.2. Кристаллическое строение и свойства металлов .....	10
Кристаллическое строение металла .....	10
Несовершенства (дефекты) кристаллической решетки .....	12
1.3. Плавление и кристаллизация металла сварочной ванны .....	14
Самопроизвольная и несамопроизвольная кристаллизация .....	16
Общие закономерности кристаллизации и формирования первичной структуры металла .....	17
Химическая неоднородность .....	19
Особенности плавления и кристаллизации металла сварочной ванны при дуговой сварке .....	20
<b>2. Диффузионные процессы в металлах при сварке</b> .....	23
2.1. Механизмы диффузии .....	23
2.2. Самодиффузия и гетеродиффузия .....	24
2.3. Виды диффузии .....	24
2.4. Основные законы диффузии .....	25
Первый закон Фика .....	25
Второй закон Фика .....	25
2.5. Диффузионные процессы в формировании структурно-фазового состояния в металлах при сварке .....	26
<b>3. Характеристика свариваемых и вспомогательных материалов</b> .....	29
3.1. Классификация конструкционных материалов .....	29
3.2. Классификация и маркировка сталей .....	30
3.3. Углеродистые конструкционные стали .....	32
Низкоуглеродистые конструкционные стали .....	34
Средне- и высокоуглеродистые стали .....	34
3.4. Низколегированные и среднелегированные стали .....	35
Низколегированные низкоуглеродистые конструкционные стали .....	35
Низколегированные среднеуглеродистые стали .....	36
Среднелегированные стали .....	36
Высоколегированные стали .....	38
3.5. Титановые сплавы .....	41
3.6. Алюминий и его сплавы .....	42
3.7. Неметаллические свариваемые материалы. Пластмассы .....	44
3.8. Вспомогательные материалы, применяемые при сварке .....	46
Электроды .....	46
Сварочная и присадочная проволока .....	50
Флюсы .....	51

Защитные газы .....	52
Горючие газы .....	52
<b>4. Металлургические процессы при сварке .....</b>	<b>53</b>
4.1. Основные металлургические процессы, протекающие при сварке плавлением .....	53
Диссоциация газов и соединений .....	53
Окисление металла при сварке .....	54
Раскисление металла при сварке .....	55
Взаимодействие металла с азотом .....	56
Взаимодействие металла сварочной ванны с водородом .....	57
Рафинирование металла шва .....	57
Модификация металла при сварке .....	58
4.2. Обеспечение стабильности процессов в сварочной ванне .....	59
Основные факторы, влияющие на стабильность процессов в сварочной ванне .....	59
Механизм процесса крупнокапельного переноса электродного металла .....	60
4.3. Особенности металлургических процессов при различных способах сварки .....	64
Металлургия дуговой сварки под флюсом .....	64
Металлургия дуговой сварки в активных и инертных защитных газах .....	65
<b>5. Свариваемость различных конструкционных материалов .....</b>	<b>67</b>
5.1. Свариваемость сталей .....	67
Влияние на свариваемость легирующих элементов и примесей .....	67
Углеродный эквивалент стали .....	69
5.2. Классификация сталей по свариваемости .....	69
Группы свариваемости .....	69
Характеристика свариваемости сталей различных групп .....	69
5.3. Дефекты сварных соединений .....	72
5.4. Трещины при сварке. Механизм образования и методы устранения .....	72
Горячие трещины .....	73
Холодные трещины .....	80
5.5. Свариваемость титановых сплавов .....	82
Поры и холодные трещины при сварке титана .....	82
5.6. Свариваемость алюминиевых сплавов .....	83
Сопrotивляемость горячим трещинам .....	83
Оксидные пленки .....	84
Газовая пористость .....	84
<b>6. Равнопрочность сварных швов .....</b>	<b>85</b>
6.1. Равнопрочность сварного соединения .....	85
6.2. Примеры расчета сварного соединения с учетом равнопрочности .....	85
<b>7. Основные механические и эксплуатационные свойства сварных соединений. Методы их определения .....</b>	<b>88</b>
7.1. Основные механические и эксплуатационные свойства металлов .....	88
7.2. Методы определения механических свойств сварных соединений .....	89

Определение механических свойств металла отдельных зон сварного соединения .....	90
Определение механических свойств сварного соединения в целом.....	95
7.3. Эксплуатационные свойства сварного соединения.....	99
7.4. Механические свойства сварных соединений при повышенных температурах и методы их испытаний.....	100
Ползучесть.....	100
Релаксация.....	103
7.5. Механические свойства сварных соединений при переменных нагрузках. Усталостная выносливость.....	103
<b>Литература к части I</b> .....	106

**ЧАСТЬ II. Металловедение и термообработка сварных соединений** ..... 109

<b>8. Фазовые и структурные превращения в стали при сварке и последующей термообработке</b> .....	109
8.1. Диаграмма состояния Fe-C.....	109
8.2. Основные фазы и структурные составляющие на диаграмме Fe-C.....	111
8.3. Критические точки в стали: температурные координаты и обозначения .....	112
8.4. Превращения железоуглеродистых сплавов при медленном охлаждении из расплава .....	113
8.5. Термический цикл сварки и его влияние на структуру и свойства сварного соединения.....	116
8.6. Строение зоны термического влияния (ЗТВ).....	119
Распределение электродных потенциалов в ЗТВ при стыковом соединении .....	123
8.7. Образование остаточных напряжений после термического цикла сварки.....	124
Образование остаточных напряжений после нагрева и охлаждения.....	124
Образование остаточных напряжений после фазовых превращений.....	125
8.8. Фазовые превращения в сталях при нагреве, охлаждении и термообработке.....	126
Рост аустенитного зерна. Наследственно мелкозернистые и наследственно крупнозернистые стали.....	126
Перлитные превращения переохлажденного аустенита .....	128
Мартенситное превращение аустенита при непрерывном охлаждении .....	131
8.9. Влияние легирующих элементов на процессы структурно-фазовых переходов.....	134
Взаимодействие легирующих элементов с углеродом.....	135
Влияние легирующих элементов на превращения в стали .....	136
<b>9. Виды термической обработки</b> .....	138
9.1. Термическая обработка сплавов .....	138
9.2. Основные виды термической обработки .....	138
Отжиг .....	140



Нормализация .....	144
Закалка .....	145
Закалка без полиморфного превращения .....	146
Отпуск .....	147
Старение .....	149
Улучшение .....	150
<b>10. Термическая обработка сварных соединений различных сталей и сварных конструкций различного применения .....</b>	<b>151</b>
10.1. Термическая обработка сварных соединений различных сталей .....	151
Термическая обработка сварных соединений низкоуглеродистых нелегированных сталей .....	151
Термическая обработка сварных соединений низколегированных сталей.....	152
Термическая обработка сварных соединений из низколегированных теплоустойчивых сталей .....	154
Термическая обработка сварных соединений высоколегированных сталей .....	157
Термическая обработка сварных соединений аустенитных сталей .....	157
Аустенизация сварных соединений сталей .....	159
10.2. Общие требования к назначению термической обработки сварных конструкций различного назначения .....	160
10.3. Оборудование для термической обработки сварных швов .....	162
<b>11. Фазовые и структурные превращения в сплавах цветных металлов при сварке и последующей термообработке.....</b>	<b>166</b>
11.1. Фазовые превращения, структура и свойства сварного соединения титановых сплавов .....	166
Влияние примесей и легирующих элементов на структуру и свойства титановых сплавов .....	167
Структура шва титанового сплава .....	172
11.2. Термическая обработка титана и его сплавов .....	174
11.3. Свойства алюминиевых сплавов .....	178
Диаграмма состояния алюминиевых сплавов .....	179
11.4. Строение сварного соединения алюминиевых сплавов.....	180
Сплавы системы Al-Mn.....	182
Сплавы системы Al-Cu (дюралюмины) .....	183
11.5. Термическая обработка алюминия и его сплавов.....	184
<b>12. Свариваемость разнородных конструкционных сталей и сплавов .....</b>	<b>187</b>
12.1. Разнородные материалы для сварки. Сварные конструкции из разнородных материалов .....	187
12.3. Свариваемость разнородных сталей .....	191
Диаграмма Шеффлера.....	192
Основные особенности сварки разнородных сталей.....	194
12.4. Сварка стали с алюминием и его сплавами .....	195
12.5. Сварка стали с медью и ее сплавами.....	197
12.6. Сварка стали с титаном.....	199
<b>13. Технология наплавки .....</b>	<b>201</b>

13.1. Классификация способов наплавки.....	201
13.2. Материалы для наплавки.....	204
Основной металл .....	204
Наплавленный металл.....	205
Флюсы для наплавки.....	208
Порошки для наплавки .....	208
Электродные проволоки для наплавки .....	209
Электродные ленты для наплавки .....	209
13.3. Выбор состава наплавленного металла для различных видов изнашивания .....	211
Абразивный износ .....	212
Газоабразивный износ.....	213
Гидроабразивный износ.....	214
Кавитационная эрозия.....	214
Материалы для наплавки медных сплавов при кавитационной эрозии.....	216
Термическая усталость .....	216
Износ при трении металла о металл.....	217
13.4. Методы легирования наплавленного слоя.....	217
<b>14. Сварка пластмасс.....</b>	<b>219</b>
14.1. Виды пластмасс .....	219
Термопласты .....	219
Реактопласты .....	219
Аморфные термопласты .....	221
Частично кристаллизованные термопласты.....	222
14.2. Способы получения полимеров .....	223
Полимеризация .....	223
Поликонденсация .....	225
14.3. Физические принципы соединения пластмасс.....	225
Диффузионно-реологический .....	225
Химический процесс.....	226
<b>Литература к части II .....</b>	<b>227</b>