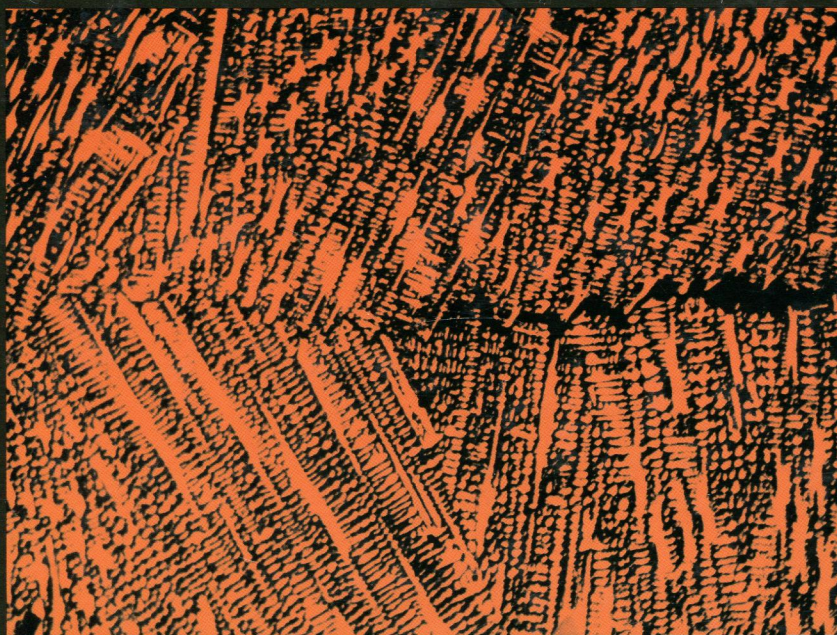


Э. Л. Макаров, Б. Ф. Якушин

ТЕОРИЯ СВАРИВАЕМОСТИ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ



БАШКИР ПРЕСС



ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н.Э. БАУМАНА

Э.Л. Макаров, Б.Ф. Якушин

ТЕОРИЯ СВАРИВАЕМОСТИ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ

Под редакцией Э.Л. Макарова

БАУМАНPRESS



Москва
ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н.Э. БАУМАНА

2014

УДК 621.79
ББК 34.641
М15

Рецензент д-р техн. наук, проф. *В.Ф. Терентьев*

Макаров Э. Л.

М15 Теория свариваемости сталей и сплавов / Э.Л. Макаров, Б.Ф. Якушин; под ред. Э.Л. Макарова. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. — 487, [1] с.: ил.

ISBN 978-5-7038-3938-6

В монографии рассмотрены теоретические и практические аспекты свариваемости конструкционных сталей и сплавов. Приведены экспериментальные методы оценки показателей свариваемости с помощью сварочных технологических проб и специализированных машинных испытаний. Показана возможность применения расчетных методов, реализуемых с помощью компьютерных технологий с использованием специализированного программного обеспечения. На основании анализа металлургических процессов в сварочной ванне, кристаллизации металла шва, фазовых и структурных превращений в твердом металле в условиях сварочного термического цикла трактуются результаты оценки свариваемости. Приведены принципиальные металлургические, технологические и конструктивные способы обеспечения достаточной свариваемости сталей и сплавов.

Изложенные в монографии сведения будут полезны разработчикам свариваемых материалов, технологам при проектировании технологии сварки конструкций, студентам и аспирантам, изучающим курс теории сварочных процессов.

УДК 621.79
ББК 34.641

ISBN 978-5-7038-3938-6

© Э.Л. Макаров, Б.Ф. Якушин, 2014
© Оформление. Издательство МГТУ
им. Н.Э. Баумана, 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава 1. Свариваемость материалов	4
1.1. Понятие свариваемости	4
1.2. Методы оценки свариваемости	5
1.3. Типовые показатели свариваемости	7
Глава 2. Технологическая прочность сплавов в процессе кристаллизации при сварке (горячие трещины)	11
2.1. Развитие теории и практики оценки сопротивляемости сплавов образованию горячих трещин	11
2.2. Методы прогнозирования горячих трещин	15
2.2.1. Прогнозирование ГТ в неравновесных условиях сварочного процесса	15
2.2.2. Актуальность проблемы технологической прочности при сварке высокопрочных сплавов	22
2.3. Природа высокотемпературной хрупкости при сварке	23
2.3.1. Классификация ГТ	23
2.3.2. Определение границ кристаллизационного и ликвационного температурных интервалов хрупкости металла шва и ОШЗ (ТИХ ₁)	29
2.3.3. Особенности выявления границ ТИХ ₂ при высокотемпературной ползучести в металле шва	39
2.3.4. Определение границ ТИХ ₃ при дисперсионном твердении сварных соединений	42
2.3.5. Пластические свойства металла шва в высокотемпературных интервалах хрупкости	43
2.3.6. Анализ высокотемпературных деформаций при сварке	49
2.4. Количественные критерии технологической прочности в температурном интервале хрупкости при сварке	55
2.4.1. Детерминированная и вероятностная оценки запаса технологической прочности технологическими и машинными методами	59

2.4.2. Требования к оценке склонности металла шва к образованию и развитию ГТ	65
2.5. Причины образования горячих трещин в околошовной зоне сварного соединения	67
2.5.1. Методы количественной оценки сопротивляемости сплавов образованию горячих трещин в околошовной зоне	70
2.5.2. Основные принципы повышения сопротивляемости швов образованию ГТ при сварке металлургическими методами ...	73
2.5.3. Технологические методы повышения сопротивляемости швов образованию ГТ	79
Глава 3. Технологическая прочность в процессе превращения аустенита в сталях при сварке (холодные трещины)	87
3.1. Природа холодных трещин	87
3.1.1. Структурный фактор	90
3.1.2. Водородный фактор	93
3.1.3. Сварочные напряжения	95
3.2. Экспериментальные способы определения сопротивляемости образованию холодных трещин	96
3.2.1. Технологические пробы	96
3.2.2. Методы машинных испытаний	103
3.3. Расчетные методы определения сопротивляемости образованию холодных трещин	107
3.3.1. Параметр эквивалент углерода $S_{эжв}$	108
3.3.2. Критерий трещинообразования по Ито–Бессю	110
3.3.3. Компьютерная оценка свариваемости стали	110
3.4. Применение ИПК «Свариваемость» для оценки и обеспечения и свариваемости стали	149
3.4.1. Пример расчетной оценки свариваемости стали	149
3.4.2. Расчет температуры подогрева для предупреждения образования ХТ	155
3.4.3. Зарубежные компьютерные комплексы для оценки свариваемости стали	161
3.5. Способы повышения сопротивляемости сварных соединений легированных сталей образованию холодных трещин	164
3.5.1. Металлургические способы	164
3.5.2. Технологические способы	168
3.5.3. Конструктивные способы	173
Глава 4. Ламелярные трещины	177
4.1. Природа ламелярных трещин	177
4.2. Методы оценки склонности к образованию ламелярных трещин	180
4.3. Способы обеспечения стойкости сталей против образования ламелярных трещин	182

Глава 5. Трещины повторного нагрева	186
5.1. Природа трещин повторного нагрева, образующихся при высоком отпуске	186
5.2. Методы оценки склонности сталей к образованию трещин релаксации напряжений	191
5.3. Способы повышения стойкости сталей против образования трещин релаксации напряжений	196
5.4. Трещины под аустенитной наплавкой на низколегированную сталь	198
5.5. Трещины, образующиеся при среднем отпуске	200
5.6. Поперечные трещины в сварных соединениях типа «частокол» ..	203
Глава 6. Хрупкие разрушения сварных конструкций	207
6.1. Статистика разрушений сварных конструкций	207
6.2. Природа разрушений	209
6.3. Методы определения критериев трещиностойкости	219
6.3.1. Предельная пластичность	219
6.3.2. Критическое раскрытие трещины	222
6.3.3. Критический коэффициент интенсивности напряжений	222
6.4. Инженерные методы оценки склонности к хрупкому разрушению металла	227
6.5. Дegrадация свойств металла в течение длительного времени эксплуатации	231
6.6. Методы предупреждения хрупких разрушений сварных конструкций	238
Глава 7. Свариваемость углеродистых сталей	246
7.1. Состав и классификация углеродистых сталей	246
7.2. Виды заготовок и способы их получения	246
7.3. Проблемы свариваемости углеродистых сталей	248
Глава 8. Свариваемость легированных сталей	257
8.1. Состав и классификация легированных сталей	257
8.1.1. Строительные стали	258
8.1.2. Машиностроительные стали	260
8.2. Проблемы свариваемости легированных сталей	262
Глава 9. Свариваемость высоколегированных мартенситных сталей	277
9.1. Состав и свойства мартенситных сталей	277
9.2. Проблемы свариваемости мартенситных сталей	281

Глава 10. Свариваемость высоколегированных аустенитных и ферритных сталей	283
10.1. Классификация высоколегированных сталей по назначению, структуре и свойствам	283
10.1.1. Антикоррозионные свойства аустенитных сталей	286
10.1.2. Жаропрочные свойства аустенитных сталей	292
10.2. Проблемы свариваемости аустенитных сталей	299
10.2.1. Причины образования ГТ при сварке аустенитных сталей	299
10.2.2. Причины образования трещин в процессе термообработки и охрупчивания при высокотемпературной эксплуатации	310
10.2.3. Причины и механизмы коррозионных повреждений сварных соединений аустенитных сталей в агрессивных средах ..	320
10.2.4. Причины снижения жаропрочности сварных соединений аустенитных сталей	330
10.3. Методы повышения свариваемости аустенитных сталей	332
10.3.1. Способы предотвращения образования ГТ ₁ и ГТ ₂ при сварке аустенитных сталей	332
10.3.2. Способы предотвращения образования трещин в сварных соединениях аустенитных сталей при термообработке и эксплуатации	341
10.3.3. Методы предотвращения МКК сварных соединений аустенитных сталей	342
10.3.4. Повышение жаропрочности сварных соединений	343
10.4. Свариваемость высоколегированных сталей аустенитно-ферритного класса	345
10.4.1. Характеристика аустенитно-ферритных сталей	345
10.4.2. Проблемы свариваемости дуплексных сталей	348
10.4.3. Методы обеспечения свариваемости дуплексных сталей ..	350
10.5. Свариваемость сталей ферритного класса	350
10.5.1. Характеристика сталей ферритного класса	350
10.5.2. Проблемы свариваемости ферритных сталей	352
10.5.3. Методы повышения свариваемости сталей ферритного класса	353
10.6. Свариваемость мартенситно-старееющих сталей	353
10.6.1. Характеристика мартенситно-старееющих сталей	353
10.6.2. Проблемы свариваемости мартенситно-старееющих сталей ..	354
10.6.3. Методы повышения свариваемости мартенситно-старееющих сталей	355
10.7. Свариваемость сталей аустенитно-мартенситного класса	356
10.7.1. Характеристика сталей аустенитно-мартенситного класса ..	356
10.7.2. Методы повышения свариваемости	358

Глава 11. Свариваемость никелевых сплавов	362
11.1. Характеристика никелевых сплавов	362
11.2. Проблемы свариваемости гомогенных Ni-сплавов	369
11.2.1. Образование пор в сварных швах при сварке Ni-сплавов .	370
11.2.2. Горячие трещины при сварке гомогенных Ni-сплавов	371
11.2.3. Коррозионная стойкость сварных соединений гомогенных Ni-сплавов	376
11.3. Технологические методы обеспечения свариваемости гомогенных Ni-сплавов	378
11.4. Проблемы свариваемости гетерогенных Ni-сплавов	381
11.4.1. Горячие трещины в ОШЗ гетерогенных Ni-сплавов	382
11.4.2. Трещины в сварных соединениях при термообработке....	385
11.4.3. Охрупчивание гетерогенных Ni-сплавов в процессе эксплуатации при высоких температурах	390
11.4.4. Охрупчивание при радиационном облучении	391
11.5. Способы обеспечения достаточной свариваемости гетерогенных Ni-сплавов	392
11.5.1. Способы предотвращения образования ГТ при сварке ...	392
11.5.2. Способы предотвращения образования трещин при термообработке	395
11.5.3. Повышение жаропрочности сварных соединений гетерогенных Ni-сплавов	397
Глава 12. Свариваемость разнородных сталей	404
12.1. Характеристика сочетаний сталей в комбинированных сварных соединениях	404
12.2. Проблемы свариваемости разнородных сталей	407
12.3. Формирование структуры металла шва	408
12.3.1. Образование кристаллизационной прослойки	410
12.3.2. Образование диффузионных прослоек при сварке, термообработке и высокотемпературной эксплуатации	415
12.4. Остаточные напряжения в сварных соединениях	416
12.5. Методы сварки элементов конструкций из перлитных и аустенитных сталей	418
12.5.1. Выбор сварочных материалов и режима термообработки сварных соединений	418
12.5.2. Принципы выбора способов и режимов сварки	422
12.6. Методы сварки перлитных сталей с дуплексными и высокохромистыми ферритными сталями	424
12.7. Методы сварки комбинированных конструкций из перлитных и ферритных сталей разного легирования	425

12.8. Методы сварки комбинированных конструкций из перлитных, аустенитных сталей и никелевых сплавов	427
12.9. Длительная прочность и коррозионная стойкость сварных соединений из разнородных сталей	428
Глава 13. Свариваемость высокопрочных алюминиевых сплавов	432
13.1. Характеристика алюминия и его сплавов	432
13.1.1. Системы легирования и методы упрочнения алюминиевых сплавов	435
13.1.2. Способы сварки конструкций из алюминиевых сплавов ..	443
13.2. Проблемы свариваемости высокопрочных Al-сплавов	445
13.2.1. Причины образования пор в сварных соединениях	445
13.2.2. Причины образования ГТ в алюминиевых сплавах	447
13.2.3. Механические и антикоррозионные свойства сварных соединений алюминиевых сплавов	450
13.3. Свариваемость высокопрочных алюминиевых сплавов	452
13.3.1. Свариваемость термически неупрочняемых сплавов Al-Mg	452
13.3.2. Свариваемость термически упрочняемых жаропрочных сплавов Al - Cu - Mg	459
13.3.3. Свариваемость термически упрочняемых сплавов Al-Cu-Mn для криогенной техники	462
13.3.4. Свариваемость упрочняемых естественным старением сплавов Al - Zn - Mg	466
13.3.5. Свариваемость термоупрочненных сверхлегких сплавов Al - Mg - Li и Al - Cu - Li	470
13.4. Пути совершенствования технологии сварки алюминиевых сплавов, обеспечивающих достаточную свариваемость	477