

Металлургия и техника сварки

Процессы и промышленное применение

Под ред.
Режиса Блондо

Впервые опубликовано во Франции в 2001 году издательством Hermes Science / Lavoisier в двух томах под названием «Métallurgie et mécanique du soudage» и «Procédés et Applications Industrielles du soudage».

Впервые опубликовано в Великобритании и США в 2008 году издательством ISTE Ltd и John Wiley & Sons, Inc.

Кроме любой честной сделки с целью научного исследования или частного обучения, критической работы или написания рецензии в соответствии с Актом 1988 года об авторском праве, образцах и патентах, данная публикация может быть воспроизведена, сохранена или передана, в любой форме или любыми иными средствами только с предварительного разрешения в письменной форме от издателей, или, в случае репрографического воспроизведения в соответствии с условиями и лицензией по выпуску в обращение CLA..

Запросы, касающиеся переиздания вне данных условий, следует направлять издателям по нижеуказанному адресу:

ISTE Ltd
27-37 St George's Road
London SW19 4EU
UK
www.iste.co.uk

John Wiley & Sons, Inc.
111 River Street
Hoboken, NJ 07030
USA
www.wiley.com

© ISTE Ltd, 2008

© LAVOISIER, 2001

Права Режиса Блондо, определенного как автор этого произведения, были подтверждены им в соответствии с Законом об авторском праве, образцах и патентах 1988 года.

Данные каталогизации публикаций библиотеки конгресса

Métallurgie et mécanique du soudage English] Металлургия и техника сварки: процессы и промышленные приложения / Под ред. Режис Блондо.

п. см.

Перевод "Métallurgie et mécanique du soudage and Procédés et applications industrielles du soudage".

Включает библиографические ссылки и указатель.

ISBN 978-1-84821-038-7 1. Сварка. И. Блондо, Режис. II. Название: Procédés et applications industrielles du soudage.

TS227.M385 2008

671.5'2 - dc22

200802755

Данные по каталогизации публикаций Британской библиотеки Запись CIP для этой книги доступна в Британской библиотеке ISBN: 978-1-84821-038-7

Напечатано и перепечатано в Великобритании CPI / Antony Rowe Ltd, Чиппенхем, Уилтшир.

Оглавление

Предисловие	xi
Глава 1. Традиционные процессы сварки	1
Гай Мерри и Доминик Каплан	
1.1. Введение	1
1.2. Необходимые условия для создания металлической связи	1
1.2.1. Активирование поверхности	1
1.2.2. Устранение помех при создании соединений	2
1.2.3. Как мы можем классифицировать различные сварочные процессы?	4
1.3. Промышленные сварочные процессы	4
1.3.1. Процессы локального расплавления компонентов без применения механического воздействия	4
1.3.2. Процессы локального расплавления компонентов с применением механического воздействия	19
1.3.3. Процессы, использующие накаливание без плавления, но с механическим воздействием	23
1.3.4. Процессы с использованием механического воздействия без накала	25
1.4. Список литературы	25
Глава 2. Процессы лучевой сварки высокой плотности: электронный луч и лазерный луч	26
Абделkrim Шехаубу и Жан-Клод Гуссен	
2.1. Свойства лучевой сварки с энергией высокой плотности	26
2.2. Сварка лазерным лучом	28
2.2.1. Предыстория	28
2.2.2. Принцип устройства	28
2.2.3. Различные типы лазеров	29
2.2.4. Лазерные системы	34
2.2.5. Применение сварки лазерным лучом	41
2.3. Электронно-лучевая сварка	44
2.3.1. Предыстория	44
2.3.2. Принцип устройства	45
2.3.3. Оборудование	46
2.3.4. Конструкция и подготовка соединяемых деталей	51
2.4. Металлургия лучевой сварки высокой плотности	51
2.4.1. Стали	52
2.4.2. Алюминиевые сплавы	58
2.4.3. Сплавы на основе никеля	60
2.4.4. Сплавы на основе титана	62
2.4.5. Сплавы на основе циркония	62
2.4.6. Сплавы на основе меди	63
2.5. Механические свойства сварных соединений	64

2.6. Качество сборок	65
2.6.1. Дефекты сварных швов	66
2.6.2. Методы контроля качества сварных швов	67
2.6.3. Стандартизация и аттестация режима работы сварки	68
2.7. Экономические факторы	68
2.7.1. Стоимость электронно-лучевого станка	68
2.7.2. Стоимость станка с лазерным лучом	69
2.8. Безопасность	71
2.9. Примеры промышленного применения	71
2.9.1. Электронно-лучевая сварка	71
2.9.2. Лазерная сварка	73
2.10. Перспективы дальнейшего развития	73
2.11. Список литературы	75
Глава 3. Тепловые, металлургические и механические явления в Зоне Термического Влияния	77
Доминик Каплан и Гай Мерри	
3.1. Термические аспекты, связанные со сваркой	77
3.1.1. Максимальная температура, достигнутая в ЗТВ	81
3.1.2. Параметр охлаждения в ЗТВ	83
3.2. Микроструктурные модификации в ЗТВ: металлургические последствия термических циклов сварки	87
3.2.1. Преобразования в ЗТВ при накаливании	87
3.2.2. Преобразования в ЗТВ при охлаждении	92
3.2.3. Случай многопроходной сварки	95
3.2.4. Холодная трещина	97
3.2.5. Расслаивание	101
3.3. Влияние тепловых циклов на механические свойства ЗТВ	102
3.3.1. Модификации механических свойств твердости или тяги в ЗТВ	102
3.3.2. Прочностные свойства ЗТВ	103
3.3.3. Остаточные напряжения, связанные со сваркой	105
3.3.4. Влияние остаточных напряжений устойчивых термообработок в ЗТВ	107
3.4. Список литературы	108
Глава 4. Расплавленный металл	113
Кристиан БОННЕТ	
4.1. Металлические характеристики	113
4.2. Расплавленный металл	115
4.2.1. Термический аспект	115
4.2.2. Химический аспект	116
4.2.3. Микроструктуры в сварных швах из ферритной стали: связь с характеристикой ударной вязкости	118
4.3. Основные дефекты сварки	126

4.3.1. Образование горячих трещин	126
4.3.2. Холодное растрескивание	132
4.3.3. Растрескивание при повторном нагреве	135
4.3.4. Поры	137
4.4. Список литературы	140
Глава 5. Сварочные материалы	143
Кристиан БОННЕТ	
5.1. Электроды с покрытием	143
5.1.1. Состав покрытий: последствия	143
5.1.2. Основные электроды и диффундирующий водород	145
5.2. Флюсы для дуговой сварки под флюсом	148
5.2.1. Плавленные флюсы и керамические флюсы: преимущества и недостатки	148
5.2.2. Роли потока: металлургические аспекты	149
5.3. Сварочные газы	152
5.3.1. Сварочные процессы под газовым потоком с инфузионным электродом	152
5.3.2. Сварочные процессы в защитном газе с плавящимся электродом	155
5.4. Порошковая проволока	160
5.4.1. Производственные процессы	160
5.4.2. Типы порошковых проволок	162
5.4.3. Эффект титана / бора по отношению к рутиловым порошковым проволокам	163
5.5. Выбор сварочных изделий	164
5.6. Составляющие сварочных работ и режим работы сварщика	165
5.6.1. Электроды с покрытием	166
5.6.2. Газовые смеси для сварки ВИГ	167
5.6.3. Газовые смеси для сварки GMAW	168
5.6.4. Порошковая проволока	170
5.7. Список литературы	171
Глава 6. Усталостная прочность сварных соединений	172
Анри-Поль Лиурэ	
6.1. Усталостная прочность	172
6.1.1. Введение	172
6.1.2. Усталостное разрушение основных сварных соединений	173
6.1.3. Концепция номинального напряжения	176
6.1.4. Факторы выносливости сварных соединений	177
6.2. Определение размеров соединений в механизированной сварке	188
6.2.1. Положение проблемы	188
6.2.2. Общий метод (действующий регламент)	189
6.2.3. Методы проверки	190
6.2.4. Метод геометрических структурных напряжений	192
6.3. Список литературы	

Глава 7. Вязкость разрушения сварных соединений	198
Марк БУССО	
7.1. Пластичное и хрупкое разрушение	198
7.2. Оценка риска разрушения металлических материалов	199
7.2.1. Определение температуры перехода от пластичного к хрупкому состоянию	200
7.2.2. Определение критерия разрушения в упругом линейном поле	203
7.2.3. Критерии разрушения в упругопластической области	205
7.3. Оценка риска разрушения сварных соединений	209
7.3.1. Неоднородность сварного шва	209
7.3.2. Условия взятия образца	210
7.3.3. Определение температуры перехода из вязкого состояния в хрупкое	212
7.3.4. Различные методы оценки прочности	213
7.4. Последствия неоднородностей при оценке рисков разрушений	216
7.4.1. Несоответствующие эффекты	217
7.4.2. Влияние основного материала	219
7.4.3. Влияние присадочных металлов	221
7.4.4. Важность условий сварки	222
7.4.5. Оценка и учет остаточных напряжений	223
7.5. Список литературы	225
Глава 8. Сваривание стальных листов с поверхностной обработкой и без нее	229
Жиль Риго, Оливье Дьерэрт, Паскаль Верьер и Жоэль Клейс	
8.1. Точечная сварка	230
8.1.1. Принцип сварки	230
8.1.2. Испытания свариваемости при точечной сварке	230
8.1.3. Свариваемость при точечной сварке тонких стальных листов	233
8.2. Шовная сварка	239
8.2.1. Роликовая сварка с раздавливанием кромок	240
8.2.2. Сварка шва внахлестку	241
8.2.3. Примеры применения, исследуемые или выполняемые клиентами	242
8.3. Лазерная сварка тонких листов	243
8.3.1. Принцип лазерной сварки сквозного проплавления [BOI92]	244
8.3.2. Стыковой шов	245
8.3.3. Сварное соединение внахлестку	251
8.4. Дуговая сварка	252
8.4.1. Дуговая сварка вольфрамовым электродом в среде инертного газа	252
8.4.2. Дуговая сварка плавящимся электродом	253
8.5. Список литературы	257

Глава 9. Сварка стальных механических деталей	259
Ив Десалос и Жерар Прадер	
9.1. Введение	259
9.2. Особенности сварных соединений в механических деталях	260
9.2.1. Стандартные сварочные процессы и общие рекомендации	260
9.2.2. Металлургические дефекты в зоне расплава и зоне термического влияния	262
9.2.3. Допуски свариваемости при сварке с переплавкой и без нее	264
9.3. Основные виды сварки механических деталей	267
9.3.1. Электродуговая сварка и альтернативы [CAZ 95, COL 83]	268
9.3.2. Сварка при уменьшенной зоне термического влияния ЗТВ с использованием источников энергии высокой плотности: лазерного луча, электронного луча, плазмы	271
9.3.3. Сварка трением	276
9.3.4. Стыковой шов согласно эффекту Джоуля	279
9.3.5. Диффузионная сварка в твердой фазе	283
9.4. Спецификации и контроль сварки этих деталей	285
9.4.1. Спецификации качества сварки	286
9.4.2. План по обеспечению качества сварного шва	289
9.5. Развитие и общие направления	293
9.5.1. Эволюция контекста	293
9.5.2. Положительные процессы	294
9.6. Выводы	296
9.7. Список литературы	297
Глава 10. Сваривание стальных конструкций	299
Жан-Пьер Пескатор и Жан-Анри Боржу	
10.1. Введение	299
10.1.1. История	299
10.1.2. Области применения	300
10.2. Сталь для стальных конструкций	301
10.2.1. Сорт и качество	301
10.2.2. Используемая сталь	302
10.3. Процесс и способы сварки стальных конструкций	303
10.3.1. Таблица типовых процессов	303
10.3.2. Предварительная обработка: технологический шов	303
10.3.3. Особенные методы сварки	304
10.3.4. Типичные положения при сварке	305
10.3.5. Разделка кромок	306
10.4. Сварочная деформация	307
10.4.1. Исполнение мер предосторожности	307
10.4.2. Выпрямление	308
10.5. Дефекты и их предотвращение	309
10.5.1. Трещины	309
10.5.2. Разрушение	310

10.5.3. Другие термические и механические меры предосторожности	310
10.6. Особенности неразрушающего испытания стальных конструкций	311
10.7. Перспективы развития	311
Глава 11. Сварка тяжелых конструкций в атомной промышленности	313
Франсуа Фор и Леон Дюнан-Ру	
11.1. Общая презентация сосуда высокого давления водо-водяного реактора	313
11.2. Основные материалы, используемые в производстве	314
11.2.1. Принцип выбора материалов – строительная норма	314
11.2.2. Низколегированная сталь для сосудов высокого давления	314
11.2.3. Контуры из аустенитной нержавеющей стали	316
11.2.4. Детали никелевого сплава	317
11.3. Сварка крупных деталей из низколегированной стали	318
11.3.1. Намеченные параметры	318
11.3.2. Процедурное описание	318
11.3.3. Сварка покрытыми электродами	322
11.4. Плакирование	322
11.4.1. Способ плакирования	323
11.4.2. Контроль плакирования	324
11.5. Сварка контуров из нержавеющей стали	324
11.6. Поверхности раздела разнородных металлов	327
11.7. Сварка парогенераторных труб	328
11.8. Выводы	330
Глава 12. Сварка нержавеющей стали	331
Жан-Луи Муарон	
12.1. Определения	331
12.2. Основные группы из нержавеющей стали	331
12.3. Строение металлов	332
12.4. Диаграмма состояния	334
12.4.1. Введение	334
12.4.2. Вычисление эквивалентных формул	335
12.4.3. Диаграмма состояния	336
12.5. Сварка ферритной нержавеющей стали	340
12.5.1. Введение	340
12.5.2. Риски, возникающие при сварке	341
12.5.3. Стабилизирующая обработка	341
12.5.4. Риски охрупчивания	342
12.5.5. Присадочные материалы	343
12.5.6. Защитные газы	344
12.5.7. Резюме: частный вывод	344
12.6. Сварка мартенситной нержавеющей стали	344

12.6.1. Введение	344
12.6.2. Список мартенситных нержавеющей сталей	345
12.6.3. Влияние элементов C, Cr и Ni на петлю J	346
12.6.4. Металлургическая свариваемость мартенситных нержавеющей сталей	347
12.6.5. Заключение: неполный обзор	348
12.7. Сварка аустенитной нержавеющей стали	348
12.7.1. Введение	348
12.7.2. Риски, возникающие при сварке	348
12.7.3. Выделение карбидов	349
12.7.4. Образование горячих трещин	350
12.7.5. Сигма-фаза	351
12.7.6. Присадочные материалы	351
12.7.7. Защитный газ	352
12.8. Сварка аустенитно-ферритной нержавеющей стали (дулексный процесс)	352
12.8.1. Введение	352
12.8.2. Риски, возникающие при сварке	352
12.8.3. Основные аустенитно-ферритные нержавеющей стали	353
12.8.4. Свариваемость аустенитно-ферритных сталей	353
12.8.5. Присадочные материалы	354
12.8.6. Защитные газы	355
12.9. Неоднородная сварка	355
12.9.1. Указатель определений	355
12.9.2. Обработка и прогнозирование неоднородных сварных швов	356
12.10. Отделка сварных швов	357
12.11. Глоссарий	358
12.12. Список литературы	359
Глава 13. Сварка алюминиевых сплавов	360
Мишель Курбюр	
13.1. Металлургия сварки	360
13.1.1. Свариваемость алюминиевых сплавов (сравнение сталей/алюминия)	360
13.1.2. Сварочные металлы	362
13.2. Способы сварки	366
13.2.1. Введение	366
13.2.2. Способ дуговой сварки (TIG-MIG)	366
13.2.3. Контактная сварка сопротивлением	371
13.2.4. Стыковая сварка расплавлением	372
13.2.5. Сварка трением и сварка трением с перемешиванием	373
13.2.6. Электронно-лучевая сварка	374
13.2.7. Лазерная сварка	375
13.2.8. Другие методы	377
13.3. Подготовка и использование сварочных изделий полуфабрикаты из алюминия	377
13.3.1. Особенности поверхностей из алюминиевого сплава	377
13.3.2. Хранение	378

13.3.3. Подготовка поверхности	378
13.3.4. Очистка сварных швов	379
13.4. Деформации	379
13.4.1. Введение	379
13.4.2. Сравнение стали и алюминия (деформация из-за нагрева)	380
13.4.3. Усадка	383
13.4.4. Основные правила	383
13.5. Определение размеров сварных конструкций	385
13.5.1. Помеха электростатического сопротивления	385
13.5.2. Вычисление степени усталости	388
13.5.3. Правила, регулирующие оптимальное использование сварных конструкций	388
13.6. Дефекты сварки	389
13.7. Безопасность и охрана труда	391
13.8. Список литературы	392
Глава 14. Стандартизация: организация и контроль качества сварки	393
Жан-Поль Гурмелон	
14.1. Введение	393
14.2. Стандарты общей организации качества	393
14.2.1. Презентация	393
14.2.2. Принципы работы	394
14.2.3. Анализ	394
14.3. Стандарты для аттестации сварочных работ	397
14.4. Стандарты неразрушающего контроля	402
14.5. Заключение	404
Список авторов	406
Алфавитный указатель	407

Предисловие

Сварка: монолитность сварных соединений двух твердых тел

Какова длинная история у сварки! Захватив умы ученых в конце 19 века, она стремительно перешла в руки мастеров своего дела - специалистов, хорошо владеющих техникой ацетиленокислородной сварки с последующим переходом на дуговую и контактную сварки. Затем последовали и другие технологии (мы не будем их всех приводить в этом предисловии), а 20-й век завершился изобретением лазерной сварки, которая берет свое начало в 1980-х годах

Однако следует сказать, что только с 1950-х годов сварка стала главным средством сборки, так как до этого времени наиболее используемым являлся метод скрепления заклепками.

Фактически с отказом от этого метода ученые еще немного углубились в изучение области сварки в 1930-х годах, и в это время во Франции Альберт Портевин сформулировал подход к изучению основ автогенной сварки («Les bases scientifiques de la soudure autogène», который был включен в программу высшего образования в 1931 году в Институте сварки («L'Institut de Soudure»). В 1930-х годах сварка была вовлечена в процесс реконструкции разрушенных мостов, в частности в Германии и Бельгии, а затем во время Второй мировой войны, после потери пароходов «Либерти», и благодаря этой технике сварки кораблей было построено в огромном количестве. Затем произошло катастрофическое разрушение емкостей высокого давления. Именно, в связи с этим в 1948 году был основан Международный Институт Сварки (МИС / IIW). Открытие института повлекло за собой необходимость в развитии международных связей, в частности по вопросам безопасности и научных исследований, именно эти вопросы затрагивались государственными органами власти различных систем и всем сварочным обществом, начиная от ученых и до пользователей. А сегодня, в 2008 году МИС / IIW уже проводит свое 61-е ежегодное собрание: с участием 16 комиссий и подкомиссий, исследовательских групп, охватывая всю область сварки: от проектирования до эксплуатационных характеристик и безопасности, включая стратегии обучения и научных исследований. Это доказывает ценность и богатство вклада международного сотрудничества.

Сварку, как язык Эзопа, можно рассматривать как лучшую, так и худшую сторону. Действительно, это позволяет связывать практически все материалы, с непрерывностью, от металлов до пластмасс; однако это не означает однородности. Процессы, следовательно и возможности очень многочисленны в зависимости от типов сборок, требуемых свойств и очевидных экономических ограничений, которые необходимо соблюдать.

В то же время сварку можно рассматривать как слабое звено большинства конструкций, как это часто ставится под сомнение, когда возникают проблемы. В приведенных выше примерах (мосты, корабли Либерти, емкости высокого давления) каждый раз ставится под сомнение сварка - часто к ней необходимо добавлять основного металла, чья устойчивость к внезапному отказу недостаточна.

Явления, возникающие во время сварки, многочисленны и сложны. В частности, влияние чрезвычайно быстрых тепловых циклов и при высокой температуре по физико-металлургическим и механическим свойствам свариваемых материалов всегда требует тщетного понимания.

Для того, чтобы освоить эту работу, множество знаний, научных, а также технических, чтобы оттачивать все это на практике, привело нас к обращению к ряду авторов. Недостатком безусловно, является, определенное несоответствие между различными главами, а также риск некоторых повторений. С другой стороны, можно отметить многогранность этого факта, поскольку эта работа объединяет вклад многочисленных французских специалистов, хорошо известных в своей области. Можно представить сущность этой области как можно более полную на основе имеющихся сегодня знаний о сварке, но, разумеется, не претендует на то, чтобы быть исчерпывающим (например, сварка пластмасс выходит за рамки ее возможностей).

В первой части из 7 глав, которые посвящены металлургии и технике сварки, в главах 1 и 2 представлены все процессы сварки, от традиционных процессов с наполнителем и без него, с механическим воздействием и без него, до недавних процессов с высокой энергией, электронным лучом и лазером. В главе 3 рассматриваются все термические, металлургические и механические явления, происходящие в зоне термического влияния (ЗТВ) основного материала. Здесь представлены фазы трансформации со всеми последствиями, которые происходят в их структурах и свойствах, а также трещины, в частности, холодные трещины, которая является постоянной темой данной работы.

В главе 4, но поднимается вопрос о расплавленном металле в сварном шве, с другими видами трещин.

Различные типы наполнителей рассматриваются в главе 5. Здесь речь идет о прогрессе, достигнутом в производстве данных наполнителей с целью улучшить свойства сварного шва и устойчивость к трещинам.

Главы 6 и 7 иллюстрируют проблемы в обслуживании сварных конструкции, в первой из которых исследуется выносливость, с решениями, предложенными как для материалов, так и для выполнения сварных швов, а в последней изучается хрупкое разрушение, в которой наряду с изложенными методами оценки ударной вязкости и эволюцией вреда дефектов, приведены предложения, касающиеся состава исходного материала, качества присадочного металла и важности условия сварки.

Вторая часть, главы с 8 по 14, посвящена применению сварки различных материалов, в различных отраслях промышленности.

Прежде всего, глава 8 посвящена сварке тонких листов, как голых, так и с покрытием, которые в основном используются на автомобильном рынке с соответствующими процессами сварки. В этой главе была подчеркнута важность новых сталей с очень низкопроцентным содержанием углерода.

Предмет главы 9 - сварка стальных механических компонентов в автомобильной промышленности с менее традиционными процессами, требующими минимум расплавленного металла.

Сварка стальных конструкций является предметом главы 10. В этой главе были представлены используемые стали и методы сварки с соблюдением необходимых мер предосторожности, чтобы избежать дефектов.

Глава 11 посвящена сварке емкостей высокого давления. Здесь представлены примеры крупных компонентов, такие как водо-водяные реакторы (PWR) в французской ядерной промышленности и анализированы различные процессы сварки и покрытия.

Большинство предыдущих глав относятся к сварке углеродистых и низколегированных сталей, поэтому главы 12 и 13 посвящены другим типам сплавов. Прежде всего, подробно представлена сварка нержавеющей сталей и разных семейств (мартенситный, ферритный, аустенитный и аустено-ферритный) с сопутствующими проблемами трещин и разрушения, а также предложены средства и советы в соответствии с выбранными процессами. Затем представлена сварка алюминиевых сплавов с использованием различных используемых методов, возникающие проблемы и правила, которые необходимо соблюдать, чтобы получить сварные швы хорошего качества.

Глава 14 посвящена разработкам стандартов в области сварки, связанных с общей организацией качества и стандартом неразрушающего контроля.

Мы благодарим всех тех авторов, которые согласились внести свой вклад в эту работу и особенно тех, кто работает в этой отрасли и кто был готов внести свой вклад и ноу-хау и текущие исследования в разных областях сварки в эту коллекцию в их свободное время.

Режис Блондо

Традиционные процессы сварки

1.1. Введение

Во избежание неправильных толкований, определения терминов, встречающиеся в этом тексте, были взяты из документа «Термины и определения основных понятий в сварке и в относящихся техниках», издательства «Публикации автогенной сварки и Международный совет французского языка» [COL 96].

В предисловии к этой книге было сказано, что сварка позволяет восстановить *металлическую непрерывность* между собираемыми компонентами. К подобному виду восстановления относится процесс возобновления силы межатомных связей металла, который требует одновременного наличия соединения в узлах кристаллической решетки и отсутствие инородного тела, которое может образовать экран.

Эта глава будет последовательно охватывать физические условия, необходимые для создания металлических связей, а также технологические процессы, которые позволяют установить эту связь.

1.2. Необходимые условия для создания металлической связи

Создание металлической связи теоретически определяется как помещение связанных поверхностей на достаточно близкое расстояние, так чтобы поверхностные атомы находились на расстоянии меж узлового порядка их собственной кристаллической системы.

Данная операция, которая предполагает, что поверхности изначально химически чистые и в зеркальном состоянии блеска, является неосуществимой на практике.

Чтобы нивелировать эту техническую невозможность, соединяемые поверхности должны подвергаться активированию с целью устранения инородных тел и элементов, которые могут препятствовать созданию связей.

1.2.1. Активирование поверхности

Наиболее эффективным активированием поверхности является **расплавление**, которое одновременно может **обеспечить** их очистку. Металлические связи создаются путем затвердевания, для которых можно применить следующие виды процедур:

а) две собираемые части подвергаются поверхностному **расплавлению** и, таким образом, способствуют образованию ванны расплавленного металла (возможно, с добавлением наполнителя), который затвердевает без механического воздействия;

б) две собираемые части подвергаются поверхностному **расплавлению**, но внешнее механическое действие выталкивает расплавленный металл и создает соединение, путем приведения поверхностей в контакт при температуре солидуса;

с) две собираемые части подвергаются локализованному **расплавлению** и участвуют в образовании соединенной сердцевины расплавленного металла, которое во время затвердевания уплотняется действием внешнего усилия сжатия.

Активация поверхностей также может быть получена путем нагрева без плавления. Которое, как правило, затем дополняется механическим действием, обеспечивающим очистку и улучшение контакта собираемых поверхностей, имеют следующие разновидности:

а) случай, когда нагрев и очистка собираемых поверхностей осуществляется одновременно под воздействием механического трения (подразумеваются соединения осесимметричных деталей) и после остановки последнего происходит дробление («Ковка») осевым сжатием, а также

б) случай, когда нагрев осуществляется внешним нагревом и близкий контакт обеспечивается усилием, перпендикулярным соединяющей плоскости.

В довершение ко всему, активация может также быть результатом механического воздействия без полного нагрева собираемых деталей. Это механическое действие вызывает пластификацию внешнего слоя каждой поверхности и генерирует концентрированный локальный нагрев, который, в итоге, приводит к образованию металлической связи. В данном процессе необходимо проводить одновременное относительное смещение собираемых поверхностей параллельно соединяющей плоскости, наряду с силой сжатия, перпендикулярной этой же плоскости. Необходимо провести тщательную подготовку поверхности и / или убедиться, что относительные смещения последних приводят к отбраковке изделий, которые загрязняют их.

1.2.2. Устранение помех при создании соединений

Помехи при создании металлической связи могут быть различных видов:

- геометрические неровности поверхности,
- загрязнение поверхности (оксиды, смазка, влага и т.д.),
- химические элементы, поступающие из окружающего воздуха.

Поверхностные неровности будут препятствовать образованию металлических связей во всех случаях отсутствия поверхностного слияния собираемых деталей. В таких случаях необходимо проводить подготовку поверхности механическими средствами (шлифовка, механическая обработка и т. д.).

Все загрязнения собираемых поверхностей должны быть устранены механическим воздействием (пескоструйная очистка, притирка) или химическими средствами (растворители, затирка, сушка и т. д.).

Необходимо исключить возможные воздействия химических элементов, внесенных окружающим воздухом. Сварочные работы, как правило, выполняются в открытых

атмосферных условиях, при которых, кислород, азот и водород (присутствующий в воздушной влаге) могут быть особенно вредными.

Кислород может вступать в реакции с элементами, испаряющимися дугой, и таким образом способствовать созданию сварочного дыма. Кроме того, он может, в частности, раствориться в расплавленном металле и во время затвердевания способствовать образованию следующего:

- оксидов металла, которые образуют вкрапления в затвердевшем металле;
- пористости в расплавленном металле из-за уменьшения растворимости, которое сопровождается охлаждением и отверждением. Образование такой пористости может быть усугублено реакцией, вступающей с элементом в составе металла, и привести к образованию газового соединения (например, образование и выделение СО во время сварки стали без защиты от атмосферы).

Защита от кислорода в воздухе может быть обеспечена путем размещения нейтрального газа, расплавленного шлака или посредством фиксации в виде оксидов, путем добавления кислородно-голодных элементов (в частности кремния). В непосредственной близости от расплавленного металла поверхность исходного металла, взаимодействуя с кислородом и покрывается оксидами, что является еще одним обоснованием для использования защитных мер, в том числе на задней части сварного шва.

Азот может растворяться в расплавленном металле и способствовать:

- либо образованию пористости в расплавленном металле из-за падения растворимости, которая сопровождается охлаждением и затвердеванием;
- либо образованию нитридов металла, которые в соответствии с условиями, в которых они появляются, образуют вкрапления или осадки с более или менее затвердевающими и ослабляющими свойствами;
- либо процессу разупрочнения по причине старения для детали, которая остается в твердом состоянии.

Защита от азота может быть обеспечена путем введения нейтрального газа или расплавленного шлака.

Водород растворяется в расплавленном металле, и его концентрация может достигать высокого уровня, и даже достичь перенасыщения, если не принять меры предосторожности, чтобы ограничить его присутствие. Водород, растворимость которого уменьшается при падении температуры, может способствовать формированию следующего:

- пористости при затвердевании;
- растрескиванию в твердом состоянии, когда, будучи перенасыщенным, он в виде молекул газа собирается в структурных дефектах не очень пластичного металла.

Защита от водорода прежде всего состоит в ограничении его введения в расплавленный металл за счет снижения содержания атомарного или ионного водорода в плазменной дуге. Для этого необходимо минимизировать содержание воды в окружающем воздухе (не делать сварку во влажной атмосфере), поместить газ с низким содержанием водорода между окружающим воздухом и дугой, устранить соединения, поставляющие воду (гидроксиды, конденсат, смазки, основные не высохшие обмазки, флюсы и т.д.), и другие источники водорода (целлюлозные или рутиловые покрытия и смазка).

1.2.3. Как мы можем классифицировать различные сварочные процессы?

На этом этапе нам необходимо составить систему классификации процессов сварки согласно методам активирования и средствам защиты от атмосферы (см. Таблицу 1.1).

Таблица 1.1. *Классификация процессов сварки по способам активации и средствам защиты от атмосферы*

Активация	Дополнительное действие	Защита
плавка	отсутствует	обязательно
	сжатие	не обязательно
накаливание	сжатие	возможно
трение	сжатие	отсутствует

В действительности, можно классифицировать разнообразные вышеуказанные сварочные процессы по более практичным критериям, таким как:

- применяемые источники энергии: пламя, электрическая дуга, плазма, эффект Джоуля, искра, индукция, трение, взрыв, и т.д.;
- способы защиты горячего металла: газ или шлак.

1.3. Промышленные сварочные процессы

Промышленные сварочные процессы будут изложены ниже согласно критериям, определенным выше, а именно:

- процессы, в котором идет расплавление без механических действий;
- процессы, в котором идет расплавление в сочетании с механическим действием;
- процессы, в котором идет накал без расплавления, но с помощью механического действия;
- процессы, в котором идет механическое действие без накала.

Классификация по типу промышленной практики будет представлена в конце данной главы.

1.3.1 Процессы локального расплавления компонентов без применения механического воздействия

Для сварочных процессов, действующих без произвольных механических действий, локальное расплавление собираемых деталей может быть описано путем различения используемого способа накала и способа защиты расплавленного металла от химического воздействия окружающего воздуха. Таким образом, можно перечислить следующее:

- пламя или газовая сварка;
- плазменная сварка;
- дуговая сварка;
- вертикальная электрошлаковая сварка;
- алюминотермическая сварка.

Следует отметить, что во всех этих процессах, сварочная ванна расплавленного металла содержится в плавильном тигле, образованном по форме собираемых деталей, сопряженных в

соединяющейся плоскости (иногда полное закрытие «тигля» обеспечивается специальными инструментами, например предкрылками, слайдами, пресс-формой). Таким образом не расплавленная секция деталей, в непосредственной близости от расплавленного металла, доводится до температур, согласно его расстоянию от последнего, между температурой солидуса металла и первоначальной температурой деталей. Часть этого объема (ближайшая к расплавленному металлу), структура и, следовательно, свойства которой изменяются по причине данного накала, называется зоной термического влияния (ЗТВ).

1.3.1.1. Газовая сварка

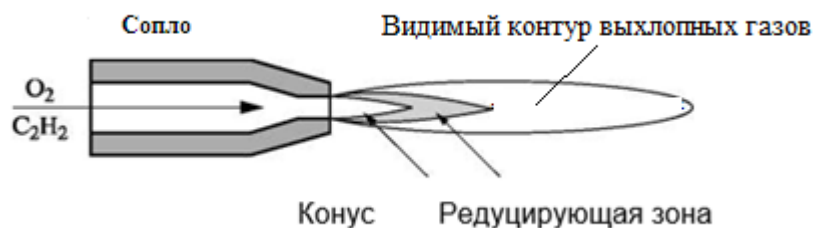


Рис.1.1. Расплавление основных металлов и присадочных металлов, полученных с помощью газовой горелки

Расплавление основных металлов и наполнителя получается путем накала газовой горелкой (рис. 1.1), что позволяет нам, путем сжигания газа (зачастую ацетилена, водорода, пропана) с горючим веществом (обычно кислород), получать эффективное пламя (ацетиленового топлива, с с плотностью потока теплового излучения около $100-300 \text{ Вт/см}^2$ в точке накала [RYK 74], диаметр которого составляет около 5-10 см).

Данное пламя состоит из двух зон, каждая с определенной ролью:

- конус на непосредственном выходе сопла газовой горелки, поверхность которого является местом первичного горения (что, в случае использования ацетилена, выпускает водород и окись углерода). На кончике конуса очень температура очень высока (при использовании ацетилена, она превышает 3000°C) и идет снижение атмосферы;
- сопло, где заканчивается горение. В соответствии с регулировкой коэффициента потребления, а именно коэффициента $r = \text{объем кислорода на объем ацетилена}$, сопло может образовывать окисляющее, нейтральное и науглероживающее пламя (и, таким образом, науглероживающей для сталей). При сварке, нейтральное пламя используется в соответствии с $1 \leq r \leq 1.2$. Регулировка мощности газовой горелки производится путем регулирования потока ацетилена, который регулируется диаметром сопла. Существуют четыре размера сопла, которые дают ацетиленовые потоки, начиная от 10 при 63 л/ч до 1000 при 4000 л/ч. Поток кислорода регулируется соответственно. При данном выборе потока ацетилена учитывается свариваемый металл, его толщина, тип соединения и положение сварки.

Можно добавить присадочный металл, который обычно имеет тот же состав, что и свариваемый металл и поставляемый в виде штырей (диаметром от 1,6 до 5 мм).

Таким образом, газовая горелка, благодаря достигнутым температурам, позволяет плавить металлы и, благодаря своей атмосфере, обеспечивает защиту расплавленного металла от любых химических реакции с газами в окружающем воздухе.

Однако с металлами, которые очень чувствительны к окислению (алюминий, нержавеющая сталь, медные сплавы) необходимо использовать флюс (который вдувают в сопло газовой горелки для удаления тугоплавких окислов, образующихся на поверхности реза) для удаления оксидов, образующихся на поверхности.

1.3.1.2. Плазменная сварка

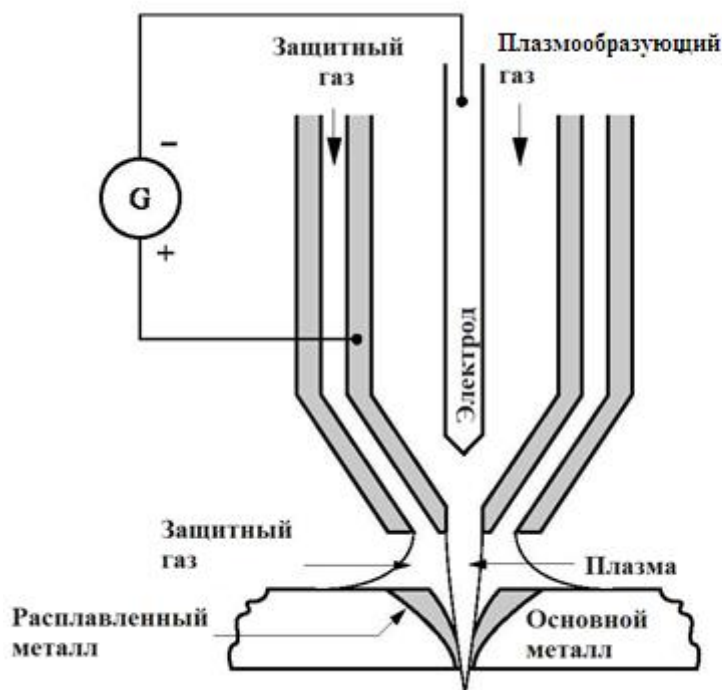


Рис.1.2. Плазменная сварка косвенной дугой

Расплавление осуществляется путем накала с использованием плазменного потока. Эта плазма генерируется путем прохождения известного плазмообразующего газа (аргона, с допустимым добавлением водорода или гелия) в электрической дуге, созданной в кольцевом пространстве, образованном между коаксиальным соплом и тугоплавким электродом (Рис. 1.2). Обычно в постоянном токе тугоплавкий электрод является отрицательным, чтобы избежать его разрушения при облучении частицами электрона. Рекомбинация в потоке ионизированных частиц в дуге высвобождает большую энергию и в результате генерирует очень значительное повышение температуры, которое превышает 10000°C . Удельная мощность может варьироваться от 500 до 10000 Вт/см^2 на месте накала [RYK 74], диаметр которого варьируется от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров). Периферийная трубка обеспечивает распределение инертного газа (обычно аргона или смесь аргона + водород) для защиты расплавленного металла. Эта процедура, называемая дугой прямой полярности или раздувной дугой, предназначена для сборки относительно тонких компонентов.

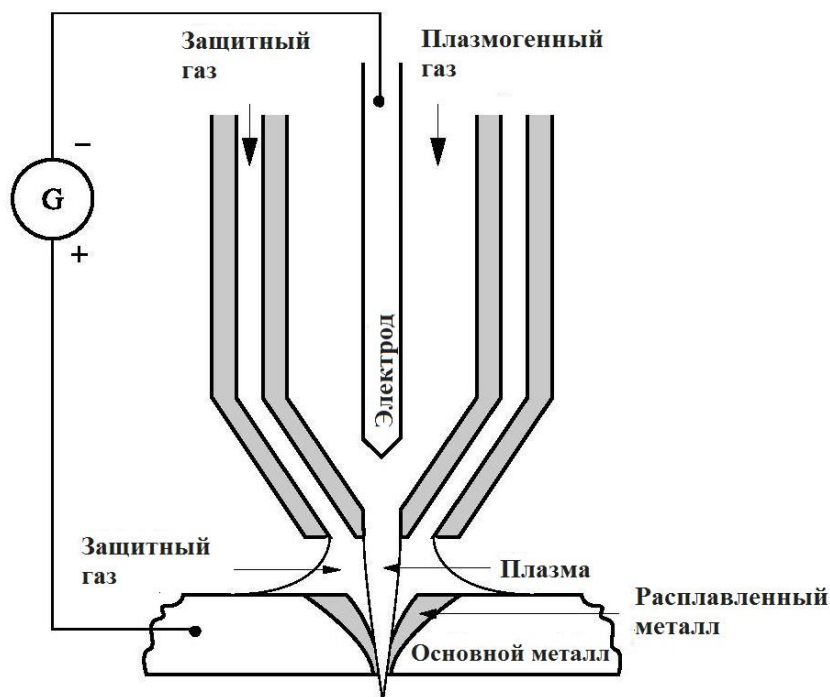


Рис.1.3. Плазменная сварка дугой прямого действия

Передача тепла и, следовательно, тепловой КПД улучшается за счет зажигания дуги между тугоплавким электродом и собираемыми деталями. Дуга далее поддерживается вспомогательной дугой, которая создается между соплом и тугоплавким электродом (Рис. 1.3). Название этой процедуры - плазменная сварка дугой прямого действия. Это процедура, которая наиболее часто используется в сварке. Она позволяет делать соединение более плотных изделий (хотя и с переменным пределом, зависящим от свойств основного металла, но сантиметрового порядка), часто с использованием процедуры замочной скважины; плазменный поток пересекает соединение, толкая сварочную ванну назад, где происходит затвердевание (таким образом, свариваемые поверхности могут иметь прямые кромки). Таким образом, обеспечивается и упорядочивается полное проникновение. Использование опоры в задней части сварного шва, как правило, не является необходимым, поскольку зоны расплава довольно узки (хотя это не устраняет необходимость в газовой защите сзади). Однако этот процесс не подходит для выполнения прохода наполнителя. Используется он обычно для палубной сварки, а также для горизонтальной/вертикальной сварки. Наполнитель может быть введен в виде проволоки. Для увеличения скорости наплава металла, удобно использовать метод горячей проволоки. Однако наполнитель также может быть введен в виде порошка в поток защитного газа (таким образом, вокруг потока плазмы).

Синхронизированная генерация импульсов электрической энергии в дуге и в потоке плазмообразующего газа позволяет осуществлять сварку в вертикальном положении. Такая процедура требует компьютеризированного контроля всех параметров.

1.3.1.3.Дуговая сварка

а

Тепло, используемое для формирования расплавленной сварочной ванны, обеспечивается электрической дугой, работающей на постоянном или переменном токе. Его удельная мощность может варьироваться от 10^3 до 10^5 Вт/см² на месте накала [RYK 74], диаметр которого варьируется от нескольких миллиметров до несколько сантиметров.

Дуга должна легко генерироваться и гореть далее устойчиво. Для обеспечения ее генерации (которое позволит нам не прибегать к слишком высокому стартовому напряжению по сравнению с напряжением дуги в постоянном режиме), а также для ее стабилизации, мы прибегаем к использованию легко ионизируемых химических элементов, которые вводятся в плазменную дугу. Эти элементы могут происходить из легкоплавких и летучих соединений, содержащихся в твердых изделиях, которые будут образовывать шлак, или из газов, применяемых в защите расплавленного металла. Кроме того, источник питания должен быть адаптирован так, чтобы его:

- ненагруженное напряжение было достаточно высоко для генерации дуги,
- нормальное рабочее напряжение позволяло достичь длину дуги, совместимую с используемой технологией,
- напряжение в случае затухания дуги было достаточным для восстановления дуги.

При выборе полярности, в переменном или постоянном токе, следует учитывать различные явления, которые происходят на катоде и аноде. Действительно, электронная эмиссия происходит на катоде и тем более, если катод накаливается до высокой температуры. Однако, если его накал происходит частично из-за прямого эффекта Джоуля и облучения положительными ионами, это связано прежде всего с ролью тепла, исходящего от эффекта Джоуля, который возникает в переходной зоне катода. Это последнее обстоятельство объясняет, почему требуемый ток зависит от диаметра катода: чем больше его, тем выше должен быть ток, чтобы поддерживать катод на достаточном уровне температуры.

Электроны облучают анод и тем самым вызывают значительный накал, повышенный далее эффектом Джоуля в переходной зоне анода.

Если дуга использует постоянный ток, выбор полярности зависит особенно от процесса и свариваемого металла, учитывая, что анодная зона накаливается больше, чем катодная. Источник переменного тока позволяет чередовать данное явление на двух концах дуги.

Когда наполнитель исходит от расходуемого электрода, перенос этого металла в дуге может быть достигнут тремя различными способами в зависимости от электрического режима дуги. Когда наполнитель происходит от расходуемого электрода, перенос этого металла в дуге может быть достигнут тремя различными способами в зависимости от электрического режима дуги.

При умеренных токах перенос происходит в форме крупных капель, которые прежде чем упасть в расплавленный металл, с небольшой силой прилагаемой к ним, следуют по неправильной траектории, или же, вероятно, в форме выступов на одну сторону, что обычно является признаком плохой регулировки параметров сварки. При самых низких токах передача происходит по короткому замыканию. Магнитодинамический эффект недостаточен (ток слишком мал), чтобы отделить каплю от поверхности электрода: капля увеличивается до такой степени, что вступает в контакт с расплавленным металлом. Затем короткое замыкание генерирует скачок тока, который отсоединяет каплю, заключенную в расплавленном металле.

Продукты, которые обеспечивают защиту расплавленного металла, могут, в зависимости от процесса, быть:

- легкоплавкие соединения, которые образуют плавающий сверху шлак (и вступающие с ним в химическую реакцию, чтобы очистить его состав);
- частые инертные газы (аргон, гелий или смеси, иногда с добавлением водорода), иногда и с добавлением углекислого газа (разложение которого в дуге даст защитную окись углерода

и кислород, которые будут зафиксированы элементами, введенными с продуктами наполнителями).

В этом контексте было разработано много процессов, которые можно классифицировать согласно условиям, в которых зажигается дуга (между двумя собираемыми деталями или между этими компонентами и электродом), и которые также можно выделить в соответствии с условиями, в которых применяются сварочные изделия.

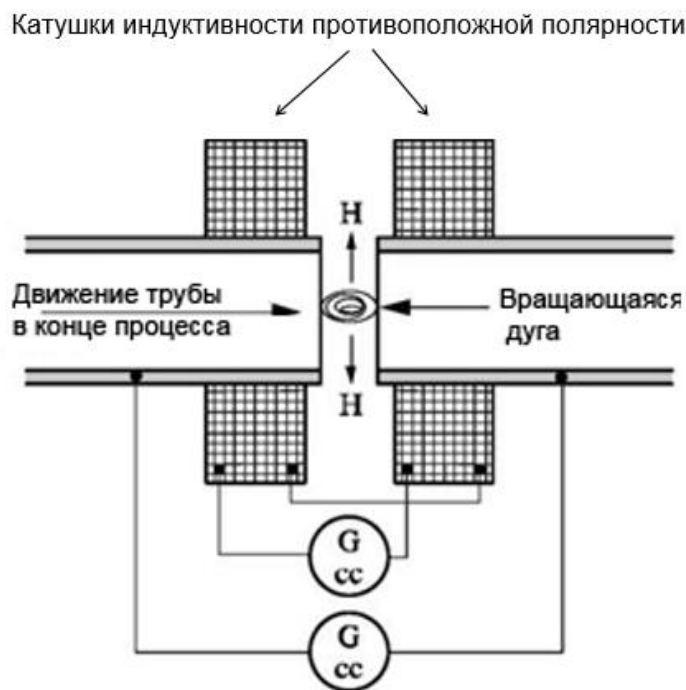


Рис.1.4. Вращающаяся дуговая сварка на трубах

а) Дуга зажжена между двумя собираемыми деталями

Дуговая сварка с давлением, создаваемым магнитным полем

Дуга зажигается и перемещается между соединяемыми поверхностями под действием постоянного рационально направляемого и контролируемого магнитного поля. После оплавления поверхности, соединяемые части спрессовываются вместе (таким образом, образуется шов). Альтернатива этому процессу применяется к трубчатым конструкциям (Рис.1.4) с использованием двух катушек, которые окружают трубку и создают два противоположных магнитных поля. Образующееся поле радиально: тем самым вызывающее вращение дуги в соединяющиеся плоскости. Это и есть вращающаяся дуговая сварка.

Дуговая сварка штырей

Дуга образуется между концом штыря и целевой зоной опоры. После оплавления конца штыря и создания расплавленной ванны на поверхности опоры, где штырь должен быть зафиксирован, штырь погружается в расплавленный металл и поддерживается в положении до полного затвердевания. Смещение блока питания и штыря (контакт, отвод для зажигания дуги, техническое обслуживание, затем опускание – Рис. 1.5) контролируется автоматически. Защита расплавленного металла, как правило, обеспечивается за счет позиционирования защитного питательного кольца, который обеспечивает также «прессование» расплавленного металла во время его затвердевания. Источник питания происходит от разряда постоянного

тока или конденсатора: интенсивность потока дуги корректируется в соответствии с диаметром штыря.

б) дуга зажжена между легкоплавким электродом и собираемыми компонентами

В целом, данная процедура позволяет при каждой операции образовывать наплавленный определенного количества расплавленного металла, количество которого зависит от типа процесса и задействованной энергии. Это может оказаться недостаточным для формирования достаточного шва между плотными компонентами: в таком случае необходимо проводить несколько операций, то есть несколько проходов. Такая ситуация зачастую требует выполнения подготовки кромок, которое обеспечивает создание правильного сварного шва (доступ к электроду, тип сборки, положение, проникновение, возможное предотвращение деформаций и т. д.). Данные приготовления имеют формы и размеры, которые варьируются главным образом в зависимости от свойства основного металла и задействованного процесса. Основные разновидности выглядят следующим образом:

– с прямой кромкой (Рис. 1.6а) для собираемых узлов ограниченной толщины, с допустимым пространством между кромками (расстояние увеличивается с толщиной). Может быть необходимо выполнить проход на оборотной стороне, чтобы обеспечить проникновение, но также можно использовать подставку сзади;

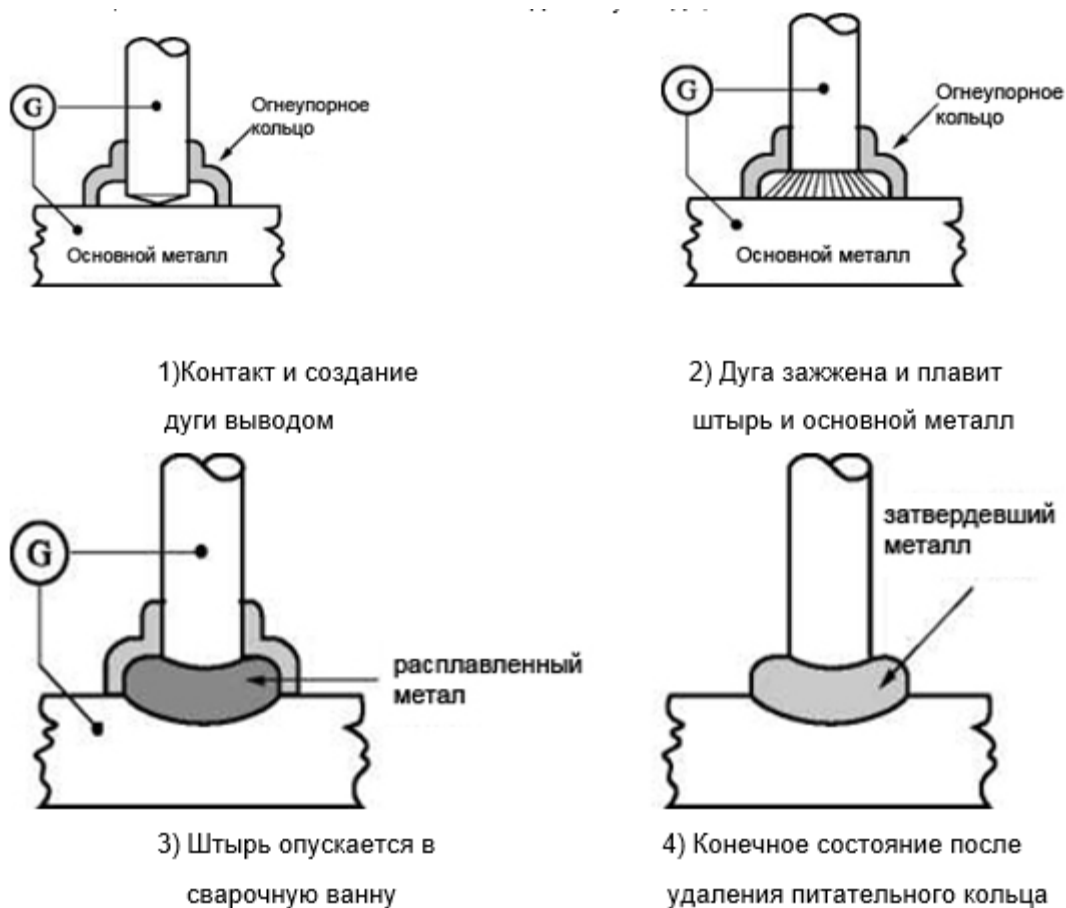


Рис.1.5. Дуговая сварка штыря

– V-образная фаска (Рис. 1.6b) или Y-образная (Рис. 1.6c) с пятой и допустимым пространством между кромками. Данный вид разделки не используется для плотных компонентов, потому что вызывает значительные искажения;

– X-образный (Рис. 1.6d) с пятой и допустимым пространством между кромками. Данный вид разделки требует доступа к обеим сторонам, но ограничивает искажение;

– асимметричный U-образный (Рис. 1.6е) или, еще лучше, симметричный (Рис. 1.6ф), если есть доступ с обеих сторон (с пятой и допустимым пространством между кромками). Данный вид разделки позволяет уменьшить количество необходимого расплавленного металла.

Иногда используются определенные разделки, такие как полу-V-образной формы, полу-U-образной формы (известная также как J), K-образная форма и т. д.

Процессы, которые будут описаны, известны как «полуавтоматические», когда электрод или горелка манипулируются сварщиком, и «автоматические», когда они устанавливаются и управляются автоматическими устройствами.

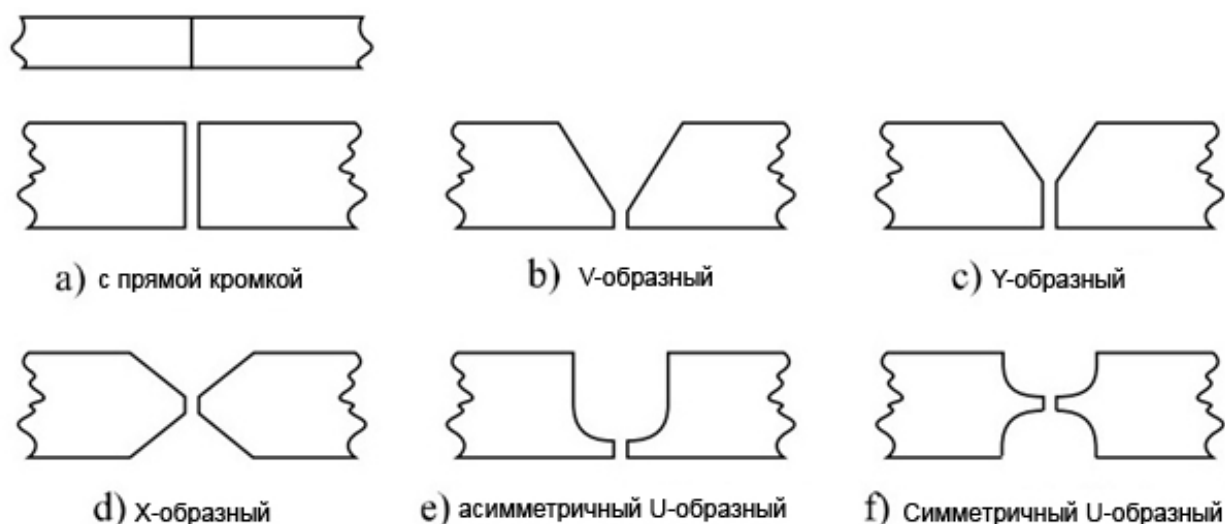


Рис.1.6. Разделки кромок



Рис.1.7. Дуговая сварка с покрытым электродом

Дуговая сварка с покрытым электродом

Электрод состоит из металлического стержня (диаметр которого варьируется от 1 до 10 мм, а длина может быть до 450 мм), который служит в качестве электрического проводника и снабжает присадочный металл, а также из клеевого покрытия, состоящего из веществ, способствующих к образованию защитного шлака и других, которые улетучиваются в плазме дуги для его стабилизации и, возможно, из металлических частиц, которые способствуют образованию расплавленной сварочной ванны (рис. 1.7).

Распространены следующие виды обмазки:

- целлюлозная: создает мало шлака, но ее сгорание выделяет CO_2 и способствует обогащению расплавленного металла за счет растворенного водорода;
- рутил: основным компонентом является оксид титана. Способствует удалению серы из расплавленного металла. Используемые вяжущие вещества выделяют водород;
- базовые (электроды, используемые при сварке стали): основным компонентом является карбонат кальция. Он выделяет мало водорода, но он гигроскопичен и поэтому требует, чтобы электроды были правильно прокалены (примерно 300°C), а затем защищены (например, поддерживая их при температуре около 100°C) перед использованием.

Также предлагаются базово-рутиловые смешанные обмазки (лучше удаляет серу) или рутило-целлюлоза (хорошее проникновение), а также обмазки, содержащие металлические порошки, для увеличения количества добавляемого металла (электроды с высокой выходной мощностью) или для введения легирующих элементов.

Сплавление ядра немного предшествует таковой обмазки; он образует кратер, который направляет перенос присадочного металла к расплавленному металлу. Этот перенос происходит в форме крупных капель (целлюлозные или базовые обмазки) или путем измельчения (рутиловые обмазки).

Во многих случаях дуга может иметь происхождение постоянного тока (полярность далее выбирается в соответствии со свойствами основного металла, обмазки и положением сварки), но иногда допустимо использование переменного тока (в частности, для сварки стали). Интенсивность тока выбирается в зависимости от диаметра электрода, который, как правило, рекомендуется производителем.

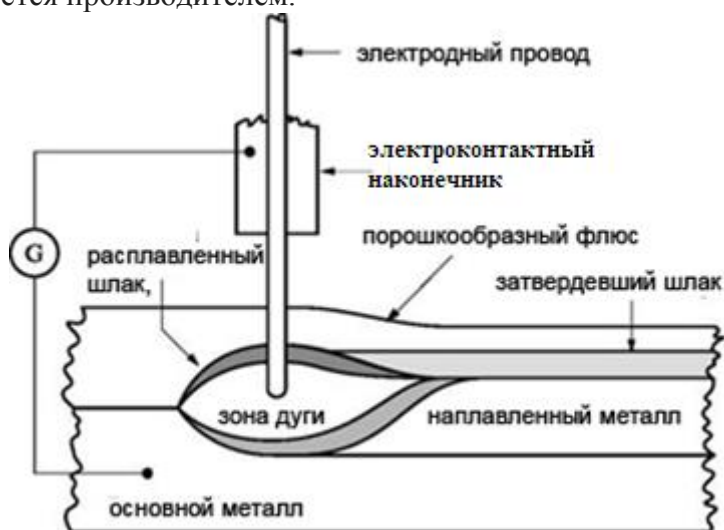


Рис.1.8. Дуговая сварка порошковым флюсом

Сварка на практике возможна во всех положениях, каждая из которых требует определенных настроек и соответствующей подготовки.

Дуговая сварка порошковым флюсом

Электрод представляет собой сплошной провод (диаметром приблизительно от 2 до 10 мм), питание которого обеспечивается автоматическим устройством через горелку, снабженную контактной трубкой, обеспечивающей электропитание. Перед горелкой (по сравнению с направлением процесса сварки) сопло, в которой будет зажжена дуга, распределяет гранулированный флюс, часть которого будет представлять собой защитный шлак, тогда как остальная часть покрывает зону сварки слоем не расплавленного флюса, который замедляет охлаждение, и будет восстановлена позже. Дуга не видна, поэтому это требует точной манипуляции по смещению горелки.

Данный вид сварки (Рис. 1.8) позволяет выполнять сварку с высокими токами и высоким результатом. Однако, как правило, растворение будет значительным, примерно $2/3$, и увеличивается с увеличением сварочного тока.

Дуга зажигается с использованием постоянного тока, когда интенсивность сварки не превышает 1000 А, полярность может быть прямой (проволока отрицательная), если требуется глубокое проникновение, или обратной (проволока положительная), если, наоборот, требуется высокая скорость сварки и уменьшение растворения. При повышенных токах иногда проще использовать переменный ток, что позволяет уменьшить влияние магнитного дугового дутья.

Эффект Джоуля вдоль длины проволочного электрода, между контактной трубкой и дугой, накаляет присадочный металл (все более в зависимости от длины и тока) и облегчает его плавление, увеличивая тем самым количество присадочного металла в сварочной ванне.

Используемые флюсы представляют собой смеси минеральных соединений (зачастую кремний-марганцевые или силико-алюмо-кальциевые соединения), поставляемых в форме калиброванных гранул. Два основных производственных процесса придают им различные свойства:

- так называемые расплавленные флюсы изготавливаются из минералов путем плавления, прессовки, а затем дроблением. Таким образом, они имеют стекловидную и/или кристаллическую структуру и могут быть пористыми;
- так называемые агломерированные флюсы изготавливаются из натурального минерала, агломерированного или спёкшиеся (с вяжущим веществом). Эти флюсы могут адсорбировать или поглощать воду и поэтому необходимо принять меры предосторожности, чтобы избежать добавления водорода.

В целом, производители сварочной продукции сочетают флюс и присадочный металл. Каждая комбинация обычно позволяет придавать особые свойства расплавленному металлу.

Этот процесс сварки, благодаря методу нанесения флюса, позволяет выполнять в нижнем положении сварку (и, возможно, под углом со специальной опорой). Он позволяет выполнять стыковую сварку с прямой кромкой с пространством между кромками значительной толщины (в зависимости от основного металла), но для сварки очень плотных компонентов требуется разделка, учитывающая возможность выполнения прохода (-ов) на обратной стороне:

- нет доступа: V-образная разделка с пятой, пространством и опорой сзади, или разделка в форме тюльпана или U-образная разделка с пятой;
- доступ: X-образный с пятой и пространством или K-образная разделка с пятой.

Кроме того, сварка может быть ускорена путем подключения двух (или более) сварочных головок, каждая со своим собственным источником питания, электроды обычно размещаются в каскадном соединении на расстоянии примерно от 25 до 35 мм.

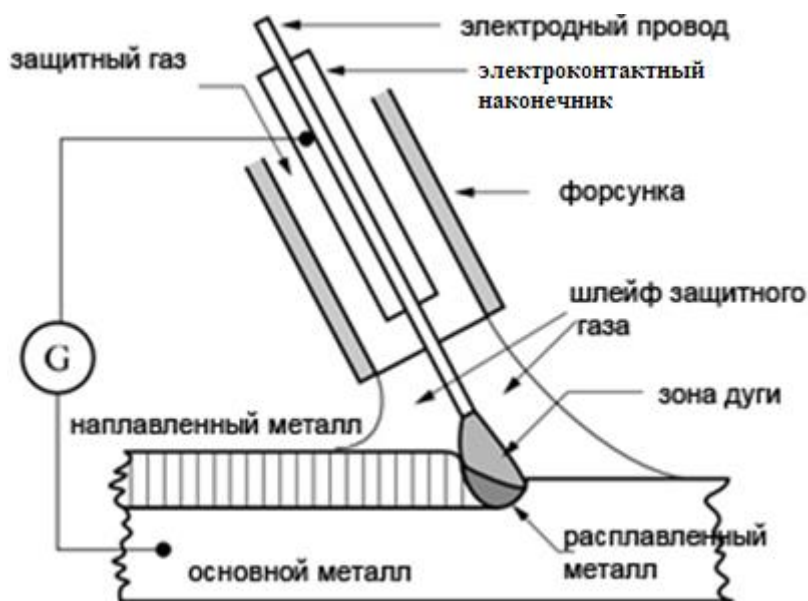


Рис. 1.9. Сварка MIG-MAG

Дуговая сварка в защитном газе со сплошным плавящимся электродом

Электрод представляет собой сплошной провод (диаметром приблизительно от 0,5 до 2,4 мм), питание которого обеспечивается автоматическим устройством через горелку, снабженную контактной трубкой, обеспечивающей подключение к источнику питания.

Данная горелка содержит кольцевую подачу газа, которая обеспечивает защиту расплавленного металла. Данный газ может быть двух видов (Рис. 1.9). Он может быть инертным, в таком случае процесс называется, как сварка MIG (металл в инертном газе). Либо, он может быть аргоном (чистый или смешанный с гелием), который обеспечивает хорошую устойчивость горения дуги и дает хорошее проникновение, или гелий, смешанный с аргоном: доля аргона должна быть достаточно высокой, чтобы сохранить устойчивость горения дуги. Он может быть активным, и тогда этот процесс называется сваркой MAG (металл в активном газе). В этом случае он будет содержать кислород и, чаще всего, CO_2 , смешанный с нейтральными газами (главным образом, с аргоном). Наличие кислорода (будь то подаваемый или поступающий в результате распада CO_2) дает определенный ряд преимуществ: дуга горит более устойчиво, сварочная ванна более жидкая, передача путем распыления может быть установлена в более широком диапазоне условий электропитания, фаски заполнены лучше, а пустоты менее вероятны. Однако риск потери элементов, переносимых по дуге, приводит к введению элементов, которые могут соединяться с кислородом в проволоочном электроде.

Питание обычно подается в постоянном токе и в обратной полярности (положительный проводной электрод), чтобы увеличить скорость плавления провода и стабилизировать режим передачи по дуге расплавленного металла. В основном используются два режима:

- перенос с помощью осевого распыления для сварки плотных изделий, но ограниченный сваркой стыковой и плоского угла или сваркой воронки;
- передача по короткому замыканию, которая требует мало энергии и позволяет сварку тонких изделий и все виды сварки *на месте*.

Некоторое современное оборудование позволяет прилагать толчки напряжения на основной ток, чтобы привести к отрыву капель с фиксированной частотой и, таким образом, закрепить их размер. Далее становится возможным контролировать их перенос и регулировать их поток независимо от сварочного тока. Используемый термин - импульсная сварка.

Сборки производятся с использованием всех видов разделок, уже упомянутых выше, но с учетом необходимости обеспечить достаточный доступ для горелки. Этот доступ может быть облегчен путем удлинения проволочного электрода между контактной трубкой и дугой, с итоговым увеличением количества наплавленного металла вследствие накала эффектом Джоуля на этой длине проволоки и, как правило, с уменьшением проникновения. Сварка может выполняться во всех положениях после адаптации эксплуатационных параметров.

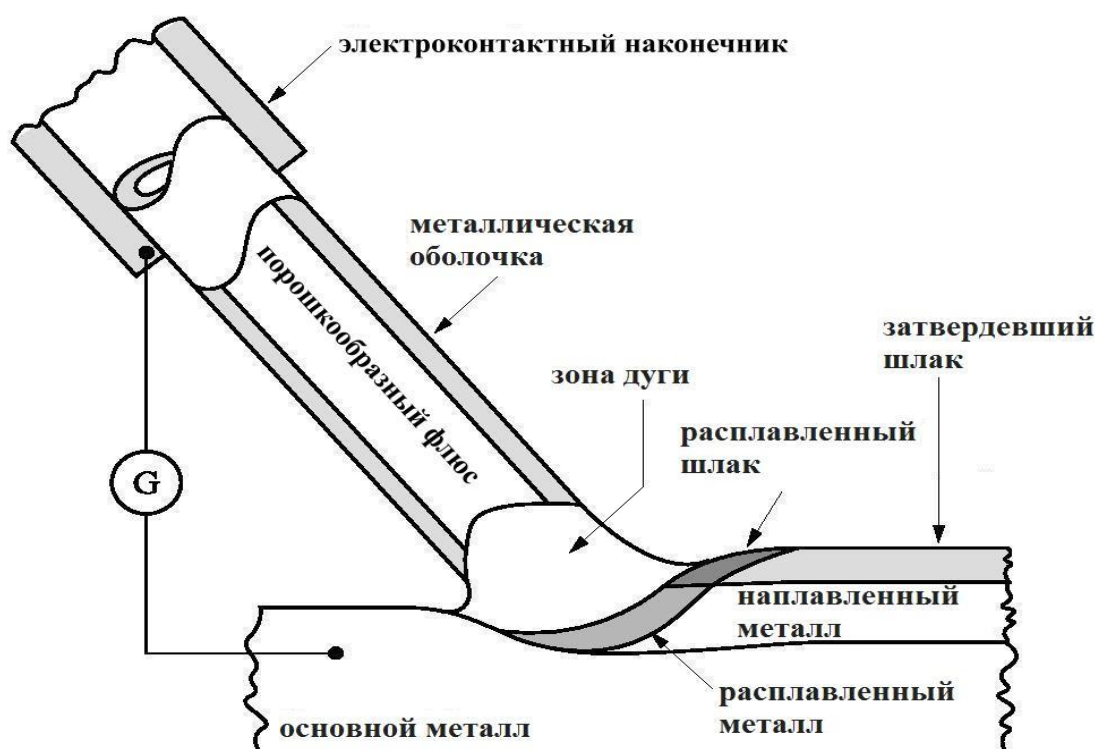


Рисунок 1.10. Дуговая сварка порошковой проволокой

Дуговая сварка порошковой проволокой

Данный процесс (Рис. 1.10) происходит из дуговой сварки в защитном газе со сплошным плавящимся электродом, простой заменой сплошного провода на провод с флюсовой сердцевинкой (диаметр от 1 до 4 мм). Провод с сердцевинкой состоит из металлической трубчатой оболочки, заполненной порошком (флюсом), состав и роль которого сопоставимы с составом и ролью обмазки на покрытом электроде. Согласно процессу изготовления электрода, электрод может быть изготовлен навиванием (путем вытягивания полой цилиндрической проволоки, заполненной флюсом) или сформирован путем укладывания или обжима, тем самым, делая его более или менее герметичным (но оно может снова включать два параллельных наполнения, содержащие флюс и порошок металлического наполнителя). Поскольку флюсы гигроскопичны, а металлическая оболочка более или менее герметична, необходимо принять те же меры предосторожности для использования, что и для покрытых электродов. Однако провода с сердцевинкой без шлака (и, следовательно, содержащие

металлические порошки) позволяет нам с эффективной газовой защитой значительно увеличить скорость сварки и количество добавляемого металла.

Как и при сварке MIG или MAG, подача проволоки гарантируется автоматическим устройством через горелку с контактной трубкой, обеспечивающей подключение питания. Эта горелка делает возможным кольцевую подачу газа, что обеспечивает защиту расплавленного металла. Этот газ обычно реакционноспособный (CO_2 , возможно, и с примесью аргона).

Заполненная проволока, являющаяся более жесткой, чем сплошной провод, позволяет дополнительно увеличить длину проволочного электрода между контактной трубкой и дугой и, таким образом, облегчить доступ (необходимо избегать чрезмерного удлинения данного расстояния, чтобы не отделять расплавленный металл слишком сильно от защитного газа).

Сборки производятся с использованием всех видов разделок, уже упомянутых выше, с учетом улучшенной доступности, обеспечиваемой увеличенной длиной проволочного электрода между контактной трубкой и дугой. Это позволяет уменьшить отверстия фаски. Кроме того, хорошее проникновение позволяет увеличить высоту пядок и уменьшить расстояние между собираемыми поверхностями. Сварка обычно выполняется в горизонтальном, а иногда и в других положениях, и в этом случае используется провод с сердцевинкой небольшого диаметра.

Провода с сердцевинкой также рекомендуются для сварки без защитного газа. Защита, в дальнейшем, обеспечивается как шлаком (ограниченное количество которого недостаточно для обеспечения полной защиты), так и плотной атмосферой, создаваемой определенными изделиями, вводимыми во флюс. Кроме того, металлическая оболочка заполненной проволоки содержит элементы, которые могут снизить вредное воздействие неполной защиты (раскислители и денитрифицирующие вещества). Наконец параметры сварки регулируются для уменьшения длины дуги. Данные провода с сердцевинкой позволяют уменьшить размер сварочной горелки, облегчить доступ и, таким образом, ограничить необходимую разделку кромок.

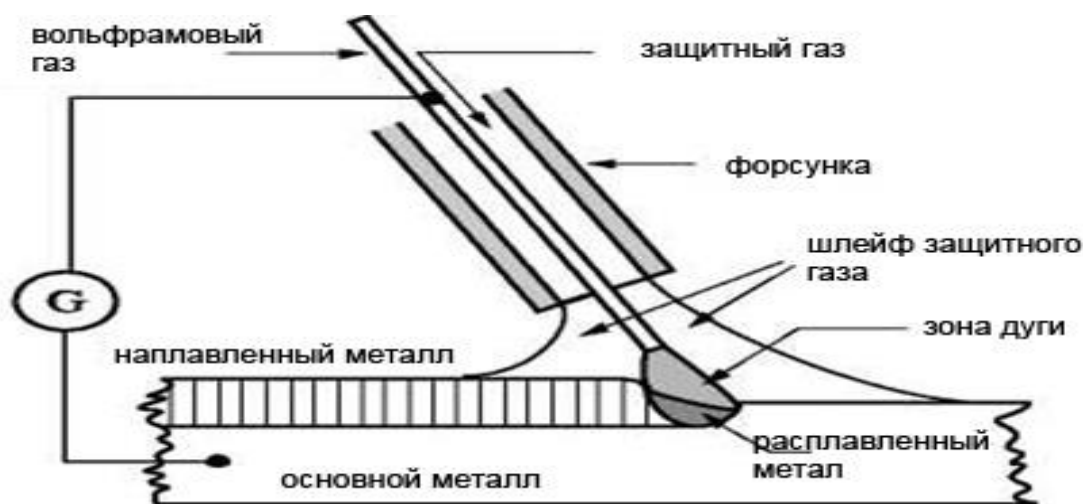


Рис.1.11. Сварка TIG (вольфрам с инертным газом)

в) дуга зажжена между тугоплавким электродом и собираемыми компонентами

Неплавящийся электрод состоит из вольфрамового наконечника (Рис. 1.11), удерживаемого в горелке, снабженной кольцевой подачей газа, которая обеспечивает защиту расплавленного металла. Этот газ нейтрален: аргон (иногда с добавлением водорода -

примерно до 30%) или гелий. Аргон обеспечивает хорошую устойчивость горения дуги, но гелий обеспечивает лучшую тепловую КПД и, следовательно, более глубокое проникновение. Данные соображения означают, что зачастую применяются смеси аргон-гелий (около 80% Ar и 20% He). Этот процесс чаще всего называют сваркой TIG (вольфрам с инертным газом). В зависимости от основного металла может потребоваться установка защиты от газа на обратной стороне с использованием газа, который может быть либо идентичным, либо отличным от газа, подаваемого на горелку (азот-водород).

Электрод (диаметром от 0,5 до 10 мм) может быть из чистого вольфрама или вольфрама с добавлением оксида циркония (0,3-0,5%) или тория (1-2%). Эти добавки позволяют увеличить мощность излучения электрода и, таким образом, улучшить устойчивость горения дуги и помочь иницированию дуги. Они также повышают производительность электрода и, следовательно, допустимый максимальный ток. Форма точки электрода является важным параметром сварки TIG. Электрод обычно используемый в режиме постоянного тока и полусферический в режиме переменного тока.

Источник питания обычно является постоянным током с прямой полярностью (отрицательный электрод), чтобы не подвергать электрод воздействию электронного облучения. Таким образом, воздействие энергии концентрируется на собираемых деталях и в то же время достигается узкий сварной шов и хорошее проникновение. Дуга также может быть установлена с помощью переменного тока (с подходящим источником питания), когда требуется электронное облучение для очистки собираемых деталей. Для иницирования дуги часто используется пилотная дуга.

Наполнитель может быть введен непосредственно в ванну расплавленного металла, в форме прутьев, либо в форме провода с использованием механизированной катушки, позволяющей, при необходимости, предварительно накаливать провод для повышения скорости наплавки.

Сборки производятся с использованием всех видов разделок, уже упомянутых выше, с учетом, с одной стороны, ограничения объема расплавленного металла и, с другой стороны, необходимости особой осторожности (чистота, точность размеров, особенно в расстоянии между деталями, где может быть, есть смысл, установить опору с обратной стороны). Сварка может выполняться во всех положениях после адаптации эксплуатационных параметров.

Более легкое использование процесса TIG и увеличение проникновения может быть достигнуто путем нанесения тонкого слоя реактивного флюса на поверхность собираемых кромок.

Состав этого флюса (часто образованного из оксидов и/или галогенидов) должен быть выбран в соответствии со свойствами основного металла.

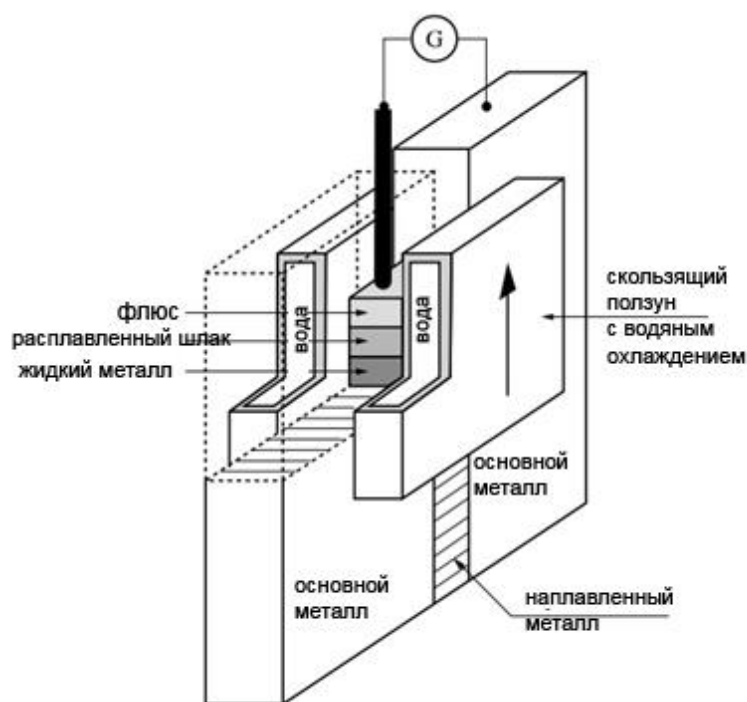


Рис. 1.12. Вертикальная электрошлаковая сварка

Вертикальная электрошлаковая сварка

Этот процесс состоит из образования ванны расплавленного металла в вертикальном формирующем башмаке в виде параллелепипеда, образованного двумя собираемыми секциями и двумя медными ползунами с водяным охлаждением, приложенных на поверхность двух деталей (Рис. 1.12). Непрерывная подача расплавленного металла вследствие плавления наполнителя (плавящийся проволочный электрод и, возможно, плавкий направляющий провод) и постепенное затвердевание расплавленного металла шаг за шагом объединяет две части. Шлаковая ванна (толщина от 40 до 60 мм) обеспечивает защиту над расплавленной сварочной ванной. Постоянный накал происходит из-за эффекта Джоуля, который развивается частично в электроде, но особенно в этом расплавленном минеральном резервуаре. Сварка идет вертикально вверх. Она начинается с зажигания дуги между проволочным электродом и придатком, который закрывает дно формирующего башмака и на котором наплавляется сварочный флюс (который будет образовывать шлак).

Когда объем расплавленного металла достаточен, вводится количество флюса, необходимое для образования шлакового слоя: дуга таким образом потухает. Как правило, рекомендуется устанавливать вдоль собираемой кромки два блока одинаковых по составу с основным металлом и одинаковой с ним толщины. Конечная точка сварного шва будет располагаться после того места, где расплавленный металл достигает уровня этих блоков, так что образование усадочной раковины в конце затвердевания не будет влиять на сварной шов как таковой (любой избыточный наплав, созданный таким образом, будет удален позже). Согласно размерам деталей, которые будут собраны, боковые башмаки можно перемещать вверх, чтобы следовать за сваркой.

Зона термического влияния широка из-за очень значительного тепловыделения. В зависимости от толщины собираемых деталей можно использовать несколько проволочных электродов одновременно. Для выполнения сварки значительной высоты можно использовать направляющий плавкий провод, погруженный в шлак, и одновременно плавящийся

проволочный электрод(ы): этот направляющий плавкий провод способствует сварочной ванне расплавленного металла. Поэтому используется термин «вертикальная электрошлаковая сварка с направляющим плавящимся электродом». Данная техника обычно задействует переменный ток.

Этот процесс позволяет выполнять стыковую сварку и угловую сварку (с использованием приспособленных башмаков) обрабатываемых деталей, толщина которых обычно составляет не менее 40 мм.

Термитная сварка

В данном процессе, сварка выполняется путем подачи металла в расплавленном состоянии (наполнителя) в формирующий башмак, сформированный вокруг двух поверхностей собираемых деталей, расположенных лицом к лицу, на определенном расстоянии. Эти две поверхности обычно предварительно накаляют пламенем через отверстия, предусмотренные в башмаке. Расплавленный металл создается на месте с помощью алюминотермии, то есть экзотермической реакцией между оксидами (металлического наполнителя) и порошкообразным алюминием. Эта операция выполняется в тигле, размещенном в верхней части башмака. При наливании расплавленного наполнителя поверхность собираемых деталей плавится до затвердевания сборки. Защита расплавленного металла обеспечивается шлаком, который образуется в ходе алюминотермической реакции. После этого необходимо удалить пресс-форму и отшлифовать собранные детали, чтобы убрать избыточные наплавления.

1.3.2. Процессы локальной расплавки компонентов с применением механического воздействия

Тепло, используемое для формирования расплавленной сварочной ванны, обеспечивается эффектом Джоуля для переменного тока высокой интенсивности, пересекающего соединяющую плоскость. Именно контактное сопротивление между двумя поверхностями собираемых деталей позволяет сконцентрировать плавление в этой плоскости.

Было разработано несколько процессов, классифицируемых в соответствии с преобразованием, происходящим с расплавленным металлом: удержание или выплеск. В обоих случаях требуются довольно тяжелая и специальная техника.

1.3.2.1. Сварка сопротивлением с удержанием расплавленного металла

Этот процесс сочетает в себе эффект Джоуля и механическое давление, приложенное к внешней части сборки, перпендикулярно ей и прямо там, где находится зона расплавленного металла. Задача применения данной силы - обеспечить хороший электрический контакт между собираемыми деталями, тем самым ограничивая расплавленный металл в зоне, в которой он формируется, и прикладывая к нему давление после его затвердевания, чтобы улучшить его компактность, во избежание образования усадочных раковин (операция, известная как проковка). Как правило, данное усилие прикладывается со стороны электродов, которые несут ток. Это означает, что они представляют собой перекрывающиеся собираемые изделия ограниченной толщины. Удержание расплавленного металла в пределах сварного шва позволяет избежать любого контакта с воздухом, и таким образом не возникает проблема его защиты.

Эффективность данного процесса связана с локализацией зоны, накаляемой эффектом Джоуля, которая зависит от сопротивления электрического контакта между деталями. Следует принять меры предосторожности, чтобы, с одной стороны, другие последовательно включенные сопротивления в электрической цепи были намного ниже, и, с другой стороны, чтобы не было возможности отвода сварочного тока в одну или несколько параллельных цепей.

Управление сварочным током, а также силой сжатия регулируется с помощью автоматизации, которая позволяет следующее:

- прилагать давление до прохождения тока, чтобы привести два компонента в тесный контакт и обеспечить электрический контакт,
- регулировать интенсивность тока и ограничивать его длительность (в основном, от нескольких периодов до нескольких десятков периодов, то есть интервалы, которые рассчитываются в десятых долях секунды),
- регулировать давление во время прохождения тока, чтобы предотвратить отделение поверхностей (из-за расширения) и последующего рассеивания расплавленного металла,
- поддерживать или увеличивать усилие, чтобы обеспечить компактность объема расплавленного металла,
- при необходимости, запускать пониженный ток в качестве дополнительного нагрева.

Электроды являются сплавами на основе меди. Добавление легирующих элементов (Cr, Zr, W, Cd, Co, Be и т. д.) придает необходимые механические свойства без чрезмерного влияния на их электропроводность и теплопроводность. Контактная поверхность, подлежащая сварке, должна быть чистой и однородной по форме.

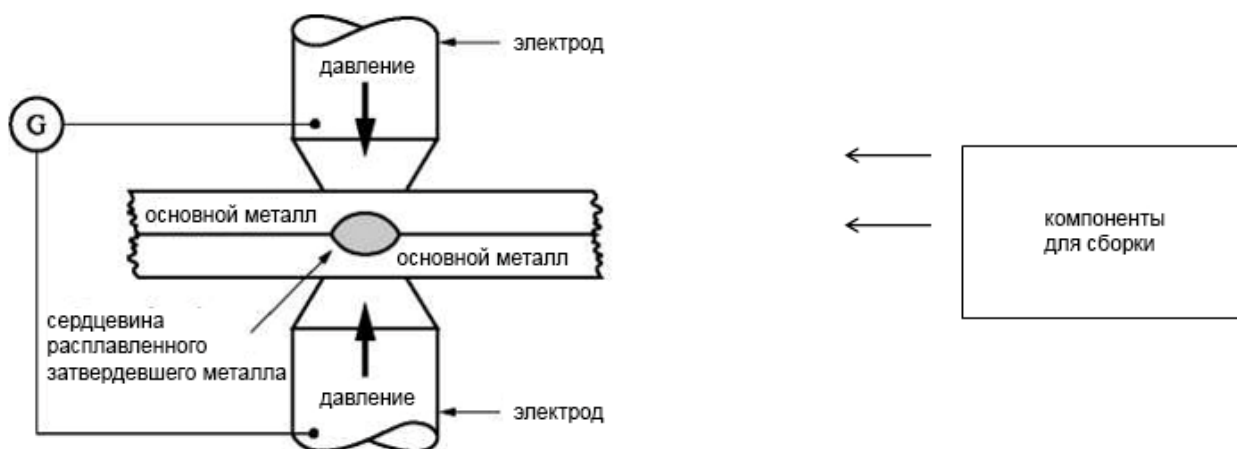


Рис 1.13. Точечная сварка сопротивлением

Таким образом, можно выполнять точечную сварку сопротивлением, рельефную и роликовую сварку.

Точечная сварка сопротивлением

В этом процессе подача тока и приложение нагрузки осуществляются цилиндрическими электродами с наконечниками в форме усеченного конуса, охлажденными внутренней циркуляцией воды. Их контактная поверхность, в основном, плоская или слегка выпуклая. Они устанавливаются на стационарные машины или мобильные инструменты: предпочтительно, чтобы понижающий трансформатор тока был расположен как можно ближе к зоне сварки.

Объем расплавленного металла имеет овальную форму и называется точечной сваркой. Сварка прерывиста и сварной шов не может быть гарантирован. Приложение конечной нагрузки обычно приводит к появлению углубления на двух сторонах сварного соединения, и при этом, на одной из двух сторон этого можно избежать, заменив электрод медной пластиной, через которую будет проходить сварочный ток.

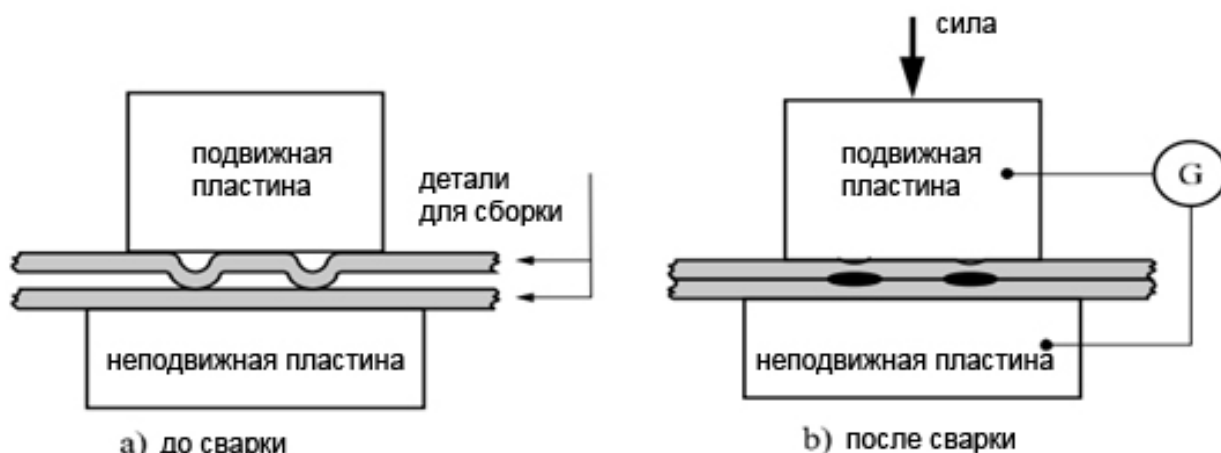


Рис. 1.14. Рельефная сварка

В некоторых случаях можно выполнять два точечных сварных шва одновременно, соединяя два трансформатора (точечное двустороннее, включенное последовательно, с двухтактной сборкой) или только с одним трансформатором (при условии, что контроль токами возможен).

Рельефная сварка сопротивлением

В этом процессе сварки (Рис. 1.14) прохождение тока локализуется поднятыми участками, называемыми *рельефами*, созданными на одной или обеих сборочных поверхностях. Эти выступы штампуются на тонких плоских листах и изготавливаются на станках в остальных случаях. Подача тока и приложение нагрузки применяются, как правило, с использованием пластин: во время нагрева и плавления выступы разрушаются, и подвижная пластина должна реагировать достаточно быстро, чтобы обеспечить плотный контакт собираемых деталей. Если источник питания мощный, можно сварить несколько выступов одновременно в целях экономии. Износ пластин и деформация компонентов минимальны. Геометрия рельефов должна быть точно контролируема.

Роликовая сварка сопротивлением

При роликовой сварке сопротивлением (Рис. 1.15) электроды заменяются дисками из меди или медного сплава, которые называются роликами. Эти ролики приводятся в движение, чтобы обеспечить прогрессирование компонентов. Конечно, они несут электрический ток и прикладывают необходимую нагрузку.

Электрический ток, в основном, модулируется как при точечной сварке, но повторяется, и сварка состоит из последовательных точек. Он может быть:

- прерывистым, если последовательные точки сварки не перекрываются. Можно остановить вращение ролика в каждой точке сварки и выполнить точечное сжатие, и результат будет идентичным точечной сварке. Также возможно работать непрерывно, но в этом случае безковки (с постоянным прилагаемым усилием),

– непрерывным, если различные точки сварки перекрываются, то есть если формирование каждой точки сварки задействует частичную переплавку предшествующей точки. Таким образом, сварка образует идеальный сварной шов.

В роликовой сварке можно выполнять шовную сварку тонких листов, используя силу, приложенную во время сварки: дополнительная толщина в последствии устраняется. Для достижения этого необходимо, чтобы перекрытие не превышало полуторакратной толщины, и чтобы собираемые листы были очень плотно сжаты.

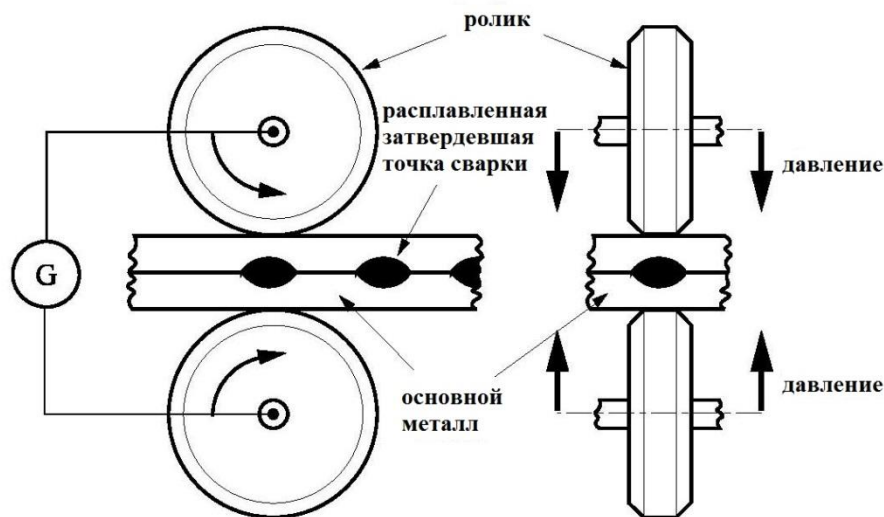


Рисунок 1.15. Роликовая сварка сопротивлением

1.3.2.2. Сварка сопротивлением с вытеснением расплавленного металла

Эти процессы объединяют эффект Джоуля с приложенным механическим давлением, после накаливания, снаружи сборки и перпендикулярно ей по всей ее поверхности. Целью применения данной силы является создание связи, поддерживая в тесном контакте поверхности, нагретые до температуры солидуса. На концах сборки формируется выпуклость из сварного металла, которая затем должна быть устранена. Поскольку зона накала ограничена, проблема ее защиты не существенна. В данных условиях используются два весьма разных процесса.

Осадка в стыковой сварке сопротивлением

Усилие прилагается в два этапа: в первую очередь при холодном соединении деталей с целью обеспечения прохождения тока через собираемые поверхности, и далее, после прохождения тока, для обеспечения сварного соединения, тем самым образуя избыток или наплавленный валик, который необходимо устранить. Эффект Джоуля ограничен зоной контакта между двумя деталями, и накаливание должно довести их до температурыковки.

Этот процесс потребляет много энергии и требует тщательной подготовки собираемых поверхностей (которые должны быть параллельны и перпендикулярными приложенному усилию). Таким образом, стыковая сварка расплавлением иногда более предпочтительна.

Альтернатива, используемая для сварки продольным замыканием холодногнутых профилей, использует высокочастотный (ВЧ) индукционный нагрев. ВЧ-ток подается двумя

контактами, которые растираются по краям сварного шва над намеченным сварным швом, где они все еще разделены.

Из-за скин-эффекта ток проходит по краям к точке контакта, где он генерирует тепло (в конечном итоге к точке плавления) и позволяет формировать связь под давлением двух роликов. Этот процесс может быть реализован каждый раз, когда возможно создать индуцированный ток, который пересекает соединяющую плоскость.

Стыковая сварка расплавлением

Детали стыкуются только после подачи тока, так что ток в первую очередь передается только точками контакта, созданными неоднородностями противоположных поверхностей: в этих точках плотность тока очень высока. С начала плавления жидкая часть выталкивается в виде мелких раскаленных частиц: это и есть расплавление. Постепенно эта расплавление охватывает всю соединяющую плоскость. Как только этот результат будет достигнут, контактное давление увеличивается, чтобы вытеснить расплавленный металл и содержащиеся в нем примеси и обеспечить соединение, с одновременным отключением тока. Излишек наплавленного валика формируется в этой последней фазе и его следует устранить. Предварительный накал деталей большого сечения ограничивает электрическую мощность и требуемую силу. Это также уменьшает потери вещества во время оплавления, но увеличивает объем наплавленного валика и продолжительность операции.

Этот процесс не требует тщательной подготовки кромок собираемых поверхностей: расплавление само по себе достаточно. Как правило, нет необходимости защищать расплавленную зону от окисления, поскольку сила прикладывается сразу после оплавления.

Этот процесс позволяет осуществлять сквозную сварку компонентов и секций различной формы (от нескольких мм² до более чем 1000 см²).

1.3.3. Процессы, использующие накаливание без плавления, но с механическим воздействием

Накал может быть достигнут от внешнего источника (сопротивление или индукция) или механическим воздействием (трение). Прилагаемые силы должны тщательно контролироваться. Таким образом, эти процессы требуют очень специфического оборудования.

Диффузионная сварка

Диффузионная сварка представляет собой процесс твердотельного слипания, при котором собираемые детали, приводимые в контакт под подходящим давлением, доводятся и поддерживаются при достаточно высокой температуре (но достаточно ниже, чем температура плавления), чтобы обеспечить диффузию атомов через соединяющую плоскость. Это позволяет, благодаря локальным пластическим деформациям, обеспечивать непрерывность металла. Давление может быть следующим:

- перпендикулярным к соединяющей плоскости: в таких случаях обычно рекомендуется, во избежание макроскопической деформации, чтобы оно не выходило за пределы упругости металла при температуре диффузии,
- изостатическим: давление в этом случае не ограничено и поглощение пористости значительно улучшено.

Собираемые поверхности должны быть тщательно подготовлены тонкой полировкой (для обеспечения максимально близкого контакта) и чисткой (для устранения любых загрязнений, которые могут препятствовать диффузии). Можно вставить один или несколько негорючих листов (листовой металл или наплавка) между ними.

Необходимо принять меры предосторожности, чтобы избежать любую горячую реакцию этих поверхностей с атмосферой (вакуумная сварка или в нейтральной атмосфере). Для любой заданной подготовки кромок, качество сборки зависит от давления, температуры и продолжительности поддержания при температуре.

Было продемонстрировано [LEF 92], что быстрый локальный нагрев за счет индукции при разумно модулированной осевой нагрузке (такой, чтобы при любой температуре, равную соответствующему пределу упругости) делает возможным выполнение сборки после поддержания при температуре, продолжительность которого варьируется, в зависимости от своего уровня, от 1 до 60 секунд. Условия нагрева позволяют, кроме того, проводить термическую обработку в рамках цикла термической сварки. Эта процедура применима ко многим металлам.

Сварка трением

Сварка трением - это процесс стыковой сварки под давлением, который включает в себя вращение деталей друг против друга (максимальная окружная скорость около 150 м/мин) и приложение осевой нагрузки, чтобы посредством трения генерировать тепло на поверхности контакта (вращается только одна деталь; она должна быть циркулярной, а ее диаметр, если он сплошной, может варьироваться приблизительно от нескольких мм до 150 мм). Когда требуемая температура достигнута, вращение прекращается, и осевая нагрузка одновременно увеличивается, чтобы обеспечить сварку ковкой.

Вращение детали осуществляется серводвигателем или маховиком. В первом случае движение останавливается из-за расцепления и торможения, во втором остановка следует за истощением кинетической энергии маховика (которая вращалась перед работой на достаточной скорости, чтобы обеспечить необходимый нагрев).

Сварной шов не содержит расплавленного металла, и данное обстоятельство имеет два основных последствия:

- шов имеет хорошие механические свойства;
- можно сваривать разные металлы (например, железо и алюминий).

На периферии соединения образуется лишний валик, который должен быть устранен. Очистка собираемых поверхностей обеспечивается трением: таким образом, этот процесс не требует ни тщательной подготовки поверхностей, ни их защиты в процессе сварки.

Если ни одну из двух собираемых деталей нельзя вращать, можно внедрить адаптер, который можно вращать.

Процесс, который можно сравнить со сваркой трением, в настоящее время предлагается под названием перемешивающая сварка трением. В ней задействуется не расходуемый вращающийся инструмент подходящей формы, который проникает в соединяющую плоскость, тем самым трение вызывает значительный нагрев, что снижает предел упругости основного металла. Развивается значительная пластификация, и движение инструмента (со

скоростью, приблизительно равной скорости, используемой при дуговой сварке) вызывает поток вещества, идущий от передней части к задней части инструмента, где он обеспечивает связь между двумя собираемыми деталями. Свойства такой сборки являются интересными.

Кузнечная сварка

В этом процессе собираемые детали нагреваются до достаточной температуры, а затем куются, чтобы вызвать соединение посредством пластической деформации на поверхности контакта. Между двумя собираемыми поверхностями необходимо использовать чистящее средство (эквивалентное флюсу), которое обеспечивает удаление оксидов путем выброса во времяковки.

1.3.4. Процессы с использованием механического воздействия без накала

Ультразвуковая сварка

Это – процесс сварки внахлест под контактным давлением, во время которого кратковременно прикладываются ультразвуковые колебания (от 20 до 100 кГц), так что две собираемые поверхности приводятся в движение друг против друга. Таким образом, незначительный объем металла с обеих сторон соединяющей плоскости повышается (за счет трения) до температуры рекристаллизации и в результате образуется связь.

Чем толще (как правило, не превышая 2 мм) и чем тяжелее компоненты, тем больше требуется ультразвуковой энергии. Таким образом, можно сваривать различные металлы.

Сварка взрывом

Этот процесс сварки используется для изготовления сборок путем покрытия или плакирования. Покрывающий или плакирующий металл интенсивно проецируется на основной металл путем возрастающей детонации взрывчатого слоя, распределенного на его внешней поверхности. Ударная волна по мере ее распространения вызывает выброс перед зоной контакта струи металла, которая идеально очищает собираемые поверхности и обеспечивает создание соединения. Однако для этого необходимо, чтобы перед сваркой был установлен зазор между двумя поверхностями, которые были предварительно химически очищены. Их поверхность (от нескольких см² до нескольких м²) может быть плоской, цилиндрической, трубчатой или изогнутой. Таким образом можно собирать различные металлы.

1.4. Список использованной литературы

[COL 96] COLLECTIF, Termes et définitions utilisés en soudage et techniques connexes, Publications de la Soudure Autogène, 1996.

[LEF 92] LEFRANCOIS P., KERGOAT M., CRIQUI B., HOURCADE M., “L’assemblage de l’acier en quelques secondes grâce au soudage-diffusion-dynamique à l’état solide: cas du 27CD4 soudé à 1050°C”, Mémoires scientifiques de la Revue de Métallurgie, January 1992.

[RYK 74] RYKALINE N.N., “Les sources d’énergie utilisées en soudage”, Soudage et techniques connexes, December 1974.

Процессы лучевой сварки высокой плотности: электронный луч и лазерный луч

Процессы сварки с использованием лучевой энергии высокой плотности происходят из научных исследований физиков второй половины 20-го века в сферах применения рентгеновских и вакуумных методов для процесса электронно-лучевой сварки и оптроники для сварки лазерным лучом. Возможность концентрации этих лучей в точках, имеющих очень малую площадь поверхности, побудила инженеров использовать это свойство для плавления материалов для достижения сварных швов или резов.

По сравнению с традиционными процессами дуговой сварки эти два процесса характеризуются очень высокой плотностью энергии в точке применения на обрабатываемой детали. Рыкалин [RYK 74] дал представление, сравнивая для нескольких процессов, по тепловым потокам в центре источников тепла и диаметрам этих источников. Было выявлено, что плотность энергии, измеренная в фокальной точке лазерного или электронного луча, в 10000 раз выше, чем плотность, получаемая в кислородно-топливном пламени (см. Рис. 2.1).

2.1. Свойства лучевой сварки с энергией высокой плотности

Это обстоятельство проистекает из величины фокусных точек (в основном, меньше миллиметра), используемых на уровне свариваемых деталей. Данные свойства являются следующими:

- однопроводная сварка;
- сварка без присадочного материала при отсутствии зазора между соединяемыми деталями;
- сварка тонких деталей (десятых долей миллиметра) путем теплопроводности;
- сварка очень плотных деталей (десятых долей миллиметра) путем образования пара капилляров.

В последнем случае имеются два режима сварки:

- полное проникновение сварного шва с использованием замочной скважины при котором луч электрона или фотона проходит через всю толщину обрабатываемой детали (см. Рис. 2.2),
- частичное проникновение сварного шва, когда луч плавит только часть толщины обрабатываемой детали (см. Рис. 2.2);
- очень узкие сварные швы (зона расплава и зона термического влияния) из-за очень высокой плотности энергии;
- сварные швы, полученные с очень маленькими деформациями, тем самым превращая эти два процесса в точное механическое решение, поскольку, таким образом, становится возможным сваривать обработанные детали или детали, не требующие коррекции деформации после сварки. На рисунке 2.3 показана деформация (образование поперечной и продольной усадочных раковин), полученная при сварке листа мартенситной стали толщиной 15 мм посредством GTAW, плазменной дуги, GMAW и электронного луча;

– сварные швы с газовой защитой (лазер) или под вакуумом (электронный луч), которые обеспечивают хорошую защиту от окисления расплавленных зон и зон термического влияния и позволяют сваривать материалы, чувствительные к этому явлению, таких как титан и цирконий.

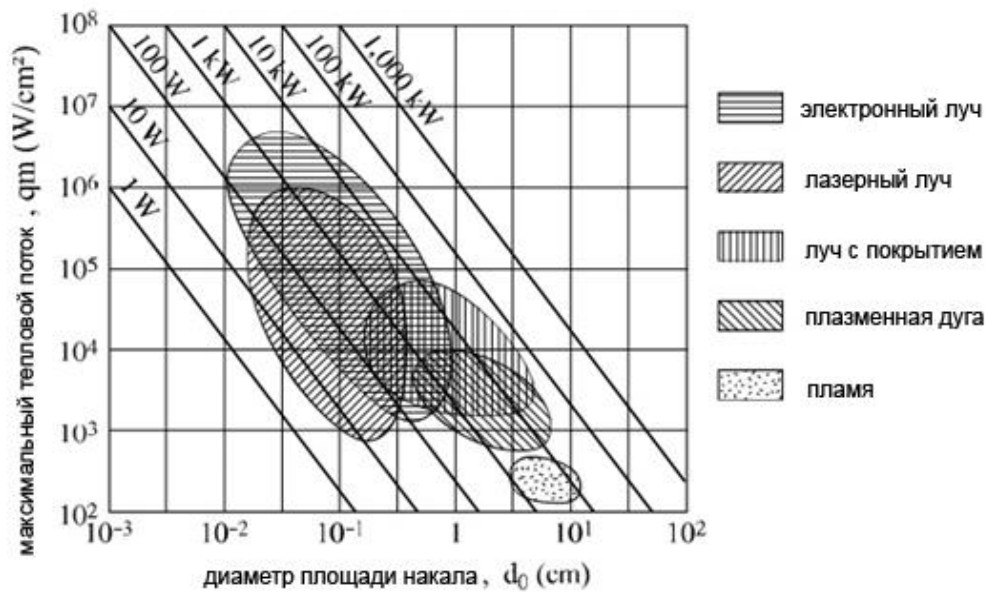


Рисунок 2.1. Диаграмма Рыкалина

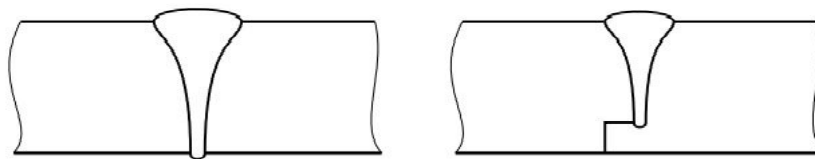


Рисунок 2.2. Сварка с полным и частичным проникновением (документ Institut de Soudure)

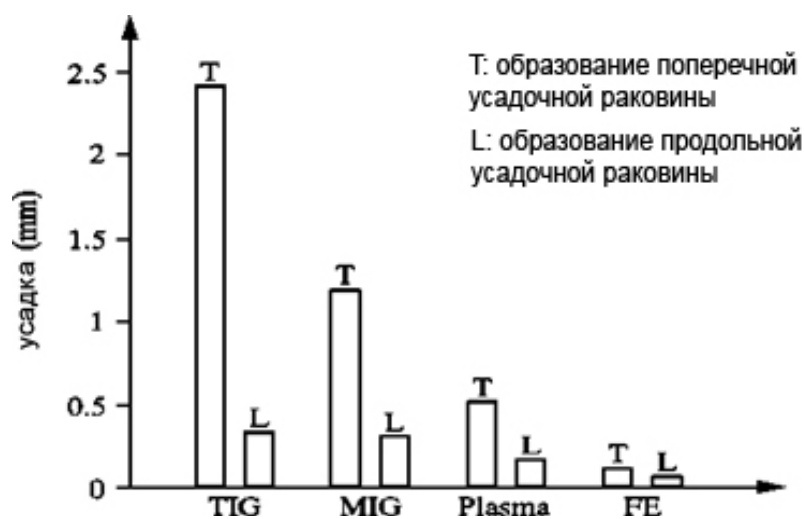


Рисунок 2.3. Сравнение поперечной и продольной усадок в соединении мартенситной нержавеющей стали, сваренной стыковой сваркой (документ Institut de Soudure)

2.2. Сварка лазерным лучом

2.2.1. Предыстория

Эйнштейн, конечно, и не подозревал о технологической революции, к которой привела его теория стимулированного излучения, основанная в 1917 году. Технологическое приключение действительно могло начаться только в 1954 году, когда профессор Таунс и его команда разработали первый усилитель и генератор стимулированного излучения, который они окрестили как «MASER» (Микроволновый усилитель с помощью стимулированного излучения). За этим открытием последовали и многие другие.

В 1958 году Шавлов и Таунс продемонстрировали теоретическую возможность получения когерентного света с помощью стимулированного излучения. Первым лазерным источником был рубиновый лазер, выпущенный Майманом в 1960 году. За ним очень быстро последовала разработка первого газового лазера Яваном (гелий-неоновый лазер). Многие посредники были затем изучены и использованы для изготовления лазеров: легированные кристаллы, полупроводники, ионизированные газы, молекулярные газы, жидкости, красители.

В настоящее время ведется необыкновенное развитие в лазерном направлении, и он уже используется во многих сферах деятельности.

2.2.2. Принцип устройства

Лазер - это аббревиатура, образованная начальными буквами *усиления света при стимулированном излучении*.

Атом может перейти из основного состояния E_1 в возбужденное состояние E_2 путем поглощения некоторого количества энергии ($h\nu$). Этот энергетический вклад может быть механическим или кинетическим по происхождению. Этот атом вернется к своему основному состоянию путем восстановления своего количества энергии, это и есть «спонтанное излучение», выраженное следующим соотношением:

$$h\nu = E_2 - E_1$$

где h – постоянная Планка и ν – частота возникающих фотонов.

Эти случайно излучаемые фотоны производят свет, известный как «некогерентный». Между всеми этими фотонами нет взаимосвязи с фазой, направлением и поляризацией.

Если падающий фотон вызывает возврат к основному состоянию возбужденного атома, происходит «стимулированное излучение». Два излучаемых фотона находятся в фазе, они имеют то же направление и ту же поляризацию, что и падающий фотон: происходит усиление света за счет стимулированного излучения.

Возбуждение среды называется «накачкой». Это позволяет инверсию заселённости между возбужденными и невозбужденными атомами. Для накачки требуется внешний источник энергии, который может быть обеспечен электрическим разрядом или радиочастотой в случае газовых лазеров, а также лампами или лазерными диодами в случае твердых лазеров.

Таким образом, лазерный источник должен состоять из трех основных элементов:

- активная среда, состоящая из частиц (атомов, ионов, молекул),
- источник энергии для осуществления перекачки среды и, таким образом, для получения инверсии заселённости,
- резонаторный отражатель, состоящий из двух зеркал, обеспечивающих колебание фотона. Если одно из зеркал будет частично отражающим, это позволит некоторым фотонам утек и образовать когерентный луч света.

Полученный таким образом лазерный луч будет иметь определенные характеристики расхождения, поляризации и распределения энергии, которые будут определять качество лазерного луча.

2.2.3. Различные типы лазеров

2.2.3.1. Источники CO₂-лазера

Источники газового лазера чаще всего используются для работы с материалами. Активная среда состоит из газовой смеси, содержащей гелий (50%), азот (40%) и CO₂ (10%). Накачка осуществляется электрическим разрядом или более часто радиочастотами. Возбужденные молекулы азота передают свое возбуждение молекулам CO₂. Полученная таким образом длина волны излучения 10,6 мкм не позволит транспортировать луч по оптическому волокну. Возможна только менее гибкая система - транспортировка по зеркалам. Несмотря на возможность пульсации луча, при сварке в основном используется CO₂ в непрерывном режиме работы. Электрическая эффективность таких лазерных источников ниже 10%.

Поиск все более мощных лазерных источников с лучшим качеством луча и большей эффективностью привел к развитию различных технологий. Они различаются по направлению циркуляции газа, типу возбуждения и форме отражателя. Мы можем выделить пять из них.

Герметичный лазерные источники

Они состоят из разрядной трубки, содержащей газовую смесь. Они имеют ограниченную мощность (≤ 600 Вт), но обеспечивают лучом очень хорошего качества. В области металлических материалов они особенно хорошо приспособлены для гравировки и резки тонких листов. Тем не менее, хорошее качество их луча также позволяет использовать его для сварки тонкого полосового железа. Преимущества таких источников заключаются в их низкой стоимости и возможности их установки на механизированных системах.

Лазерные источники с медленным осевым потоком

Это первые источники CO₂-лазера, которые были исследованы. Газ медленно циркулирует в трубках по оси лазерного луча (10 м/с). Возбуждение газа обеспечивается электрическим разрядом. Эти лазерные источники производят луч очень хорошего качества, но их мощность на единицу объема ограничена до 0,5 Вт/см³.

Максимальная мощность этих лазерных источников низкая (≤ 1000 Вт). Их можно использовать для резки и сварки тонких материалов.

Лазерные источники с быстрым осевым потоком

Газ движется с высокой скоростью по оси луча (≥ 200 м/с) с помощью насосов или турбин в отражателе, выполненной из стеклянных трубок. Возбужденный газ далее охлаждается теплообменниками и постепенно регенерируется. Возбуждение может быть достигнуто электрическим разрядом, но самые последние источники используют радиочастоту. Этот режим возбуждения имеет несколько преимуществ:

- более однородное возбуждение,
- электроды, размещенные снаружи, меньше подвергаются воздействию, и их обслуживание не требует открытия отражателя,
- большая гибкость в использовании.

Мощность, получаемая на единицу объема газа, может достигать от 2 до 3 Вт/см³ для возбуждения электрическим разрядом и от 8 до 10 Вт/см³ для возбуждения радиочастотой. Все более компактные лазерные источники получают путем уменьшения формы отражателя. На современном промышленном рынке предлагаются источники мощностью 20 кВт.

Это лазерные источники, наиболее часто используемые сегодня. Ими оснащены режущие и сварочные аппараты.

Лазерные источники с поперечным потоком

Поток газа движется поперек оси лазерного луча благодаря одной или нескольким турбинам. Они не используют стеклянные трубки. Отражатель состоит из герметичной металлической камеры. Мощность на единицу объема газа составляет от 2 до 3 Вт/см³. Максимальная достигнутая мощность - высокая (до 45 кВт). Полученный лазерный луч имеет более низкое качество, чем у лазера с быстрым осевым потоком. Такие лучи в основном используются для сварки или обработки поверхности.

Так называемые источники SLAB-лазера

Параллелепипедный отражатель генерирует прямоугольную конфигурацию луча. Далее луч проходит в пространственный фильтр, который делает его циркулярным. Газ медленно движется в отражателе. Возбуждение газа осуществляется по радиочастоте. Доступная мощность составляет от 100 Вт до 6 кВт. Эта технология позволяет получить компактные источники с более высокой эффективностью. Потребление газа низкое и полученный луч очень хорошего качества (близок к гауссовскому лучу TEM₀₀).

2.2.3.2. Неодимовые источники YAG-лазера

Это твердотельный лазер с активной средой из иттрий-алюминиевого гранатового монокристалла, легированного ионами неодима (Nd^{3+}). Длина волны данного лазера, равная 1,06 мкм, позволяет транспортировать его по оптическому волокну. Этот монокристалл с низким объемом (например, прутки длиной 150 мм и диаметром 9,52 мм) помещается в отражательную полость. Возбуждение среды обеспечивается ксеноновыми лампами или лазерными диодами. Электрическая эффективность лазера зависит от системы накачки, 1-3% для системы с ламповой накачкой и порядка 10% для лазерных диодов. Охлаждение системы обеспечивается циркуляцией воды в отражателе.

Следует отметить два режима работы неодимового YAG-лазера: импульсный и непрерывный.

Импульсные источники YAG-лазера

Импульсные источники YAG-лазера обычно состоят из модуля накачки, который обеспечивает средней мощностью в диапазоне от 300 до 500 Вт. Эти YAG-лазеры могут в среднем достигать мощности до 2 кВт, добавляя к этому модулю накачки дополнительные модули усиления, включенные последовательно. Импульсный режим работы обеспечивается импульсными лампами, которые с каждым импульсом генерируют оптический отклик определенной частоты и длительности импульса. Режим работы данных лазеров схематически изображен на рисунке 2.4.

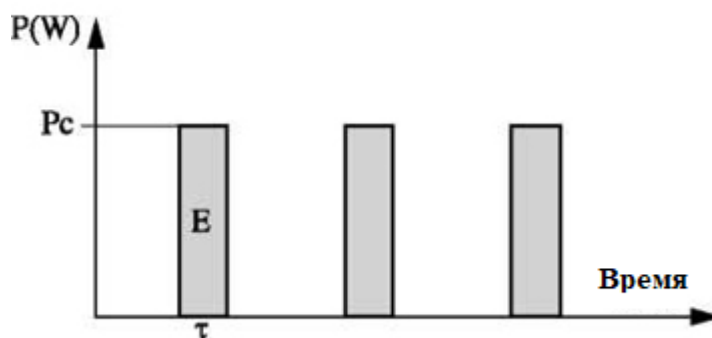


Рисунок 2.4. Режим импульсного YAG-лазера

Характеристики импульсного YAG-лазера связаны с его пиковой мощностью, которая может достигать 50 кВт. Соотношения между различными параметрами лазера выглядят следующим образом:

- пиковая мощность: $P_c = \frac{E}{\tau}(Вт);$
- средняя мощность: $P_m = E \times F(Вт);$
- продолжительность импульса: $\tau (мс);$
- энергия импульса: $E(Дж);$
- частота импульсов: $F(Гц).$

Высокие пиковые мощности предназначаются для работ по сверлению или резки. Для сварки же, пиковая мощность должна быть ограничена и зависит от материала и толщины, подлежащей сварке. Она не должна превышать 4 кВт. Использование высокой пиковой мощности приведет к разбрызгиванию материала. По этой причине средняя мощность источников, предназначенных для сварки, должна быть ограничена до 500 Вт. Источники большей мощности используются только для высокочастотных импульсов. Для качественной стальной сварки, глубина проникновения в любом случае должна быть ограничена 1,5 мм.

Непрерывные источники YAG-лазера

Были разработаны после импульсных источников YAG-лазера. Возбуждение среды обеспечивается непрерывно работающими ксеноновыми лампами. Достигнутая средняя мощность выше, чем в случае импульсных источников YAG-лазера: от 4 до 5 кВт. Существенная разница между импульсным режимом и непрерывным режимом заключается в пиковой мощности. В случае непрерывного режима пиковая мощность равна средней мощности.

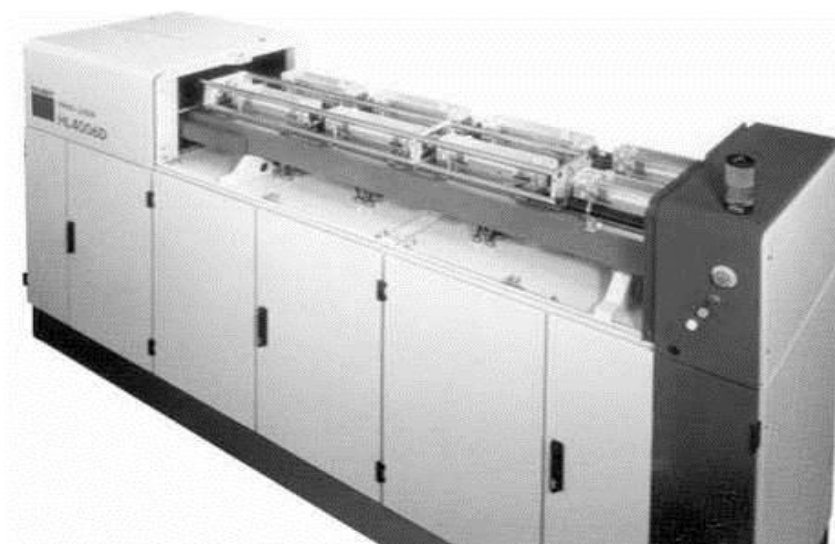


Рисунок 2.5. *Камеры накачки прутка YAG-лазера с непрерывной ламповой накачкой (Средняя мощность луча 4 кВт) (документ Trumpf)*

Текущие исследования в основном направлены на увеличение мощности данных источников и систем накачки (см. Рис.2.5). Увеличение мощности достигается увеличением количества камер накачки (резонаторы и усилители). В случае обычного лазерного источника с цилиндрическими прутками и ламповой накачкой, максимальное количество камер накачки, в настоящее время подключенных последовательно, равно восьми. Это ограничение в основном связано с ухудшением качества луча. Качество луча промышленных непрерывных YAG-лазеров, около 25 мм мрад, позволяет переносить лазерный луч более 4 кВт по оптическому волокну диаметром 0,6 мм.

В 2000 году, исследования открыли широкий потенциал возможностей в сфере источников YAG-лазера неодимовых прутков с диодной накачкой (см. Рис. 2.6). Система накачки лазерными диодами обеспечивает лучшую эффективность ($\geq 10\%$) и явное улучшение качества луча (15 мм.мрад).

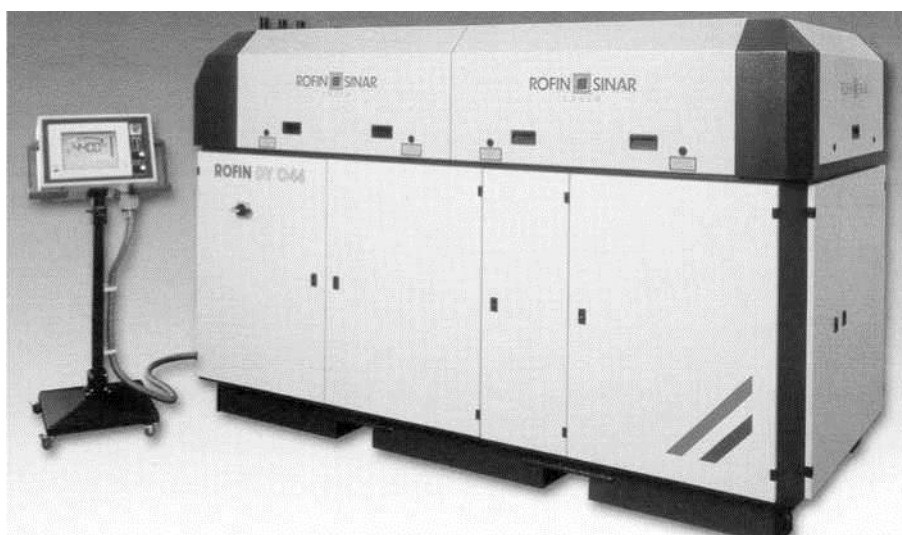


Рисунок 2.6. *Источник YAG-лазера мощностью 4,4 кВт, использующий лазерные прутки с диодной накачкой (документ Rofin Baasel)*

Разработка лазерных источников с диодной накачкой была этапом технологического развития источников YAG-лазера, но они не использовались в промышленности. Они

столкнулись со значительными техническими проблемами, связанными с надежностью источников диодного лазера, используемых для накачки. Сегодня их заменили новыми типами лазерных источников, дисковыми лазерными источниками с диодной накачкой и волоконными лазерными источниками.

Дисковые лазерные источники

Для дисковых лазерных источников с диодной накачкой активная среда состоит из YAG-дисков малого размера (см. Рис. 2.7). Сегодня в промышленности доступны лазерные источники мощностью до 8 кВт с очень высоким качеством луча (0,8 мм. мрад) и высокой эффективностью. В отличие от прутковых систем, дисковый лазер не имеет тепловой линзы. Это означает, что качество луча является постоянным во всем диапазоне мощностей. В ближайшее будущее ожидается разработка более мощных лазерных источников (16 кВт). Исключительное качество луча, полученное с использованием этих лазерных источников, позволяет транспортировать лучи мощностью до 8 кВт в оптическом волокне диаметром 0,2 мм.

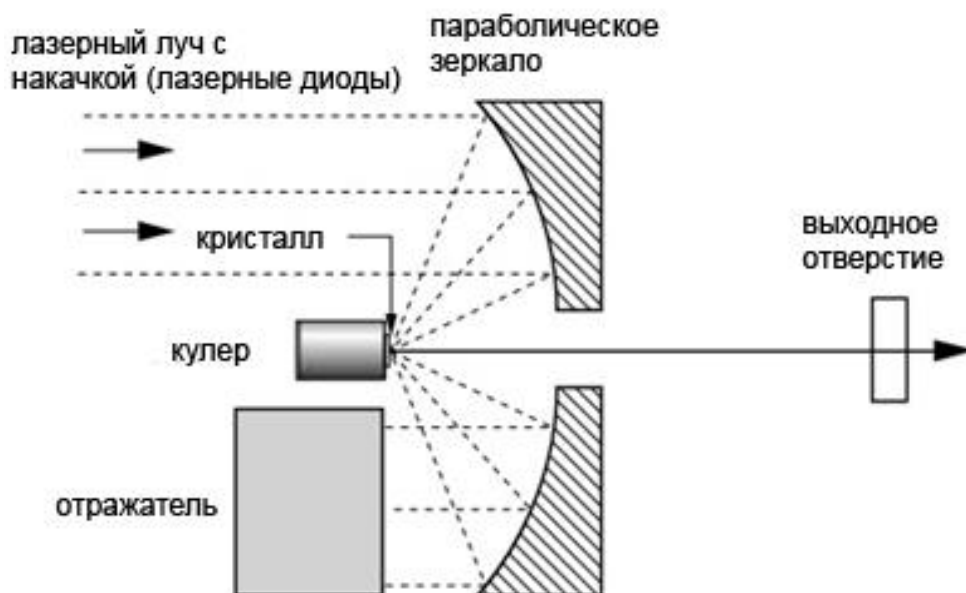


Рисунок 2.7. Резонаторная схема дискового лазерного источника с диодной накачкой (документ Trumpf)

Источники волоконного лазера

Этот новый лазерный источник был недавно разработан для промышленного применения. Первоначально он был разработан для телекоммуникационной отрасли в начале 1990-х годов. Его активная среда усиления – это оптическое волокно, легированное редким элементом, таким как иттербий. Этот тип лазерного источника может давать очень высокую выходную мощность (более 20 кВт) с очень хорошим качеством луча. Достигнутая эффективность составляет около 25%.

2.2.3.3. Источники полупроводникового лазера (или лазерные диоды)

Укладка множества полупроводников позволяет получать системы лазерных диодов от нескольких десятков ватт до нескольких киловатт. Доступные длины волн 0,808 и 0,940 мкм. Множество лучей, выходящих из этих пакетов, обрабатываются сложными оптическими системами чтобы их объединить. Низкое качество получаемого луча не способствует оптимальной фокусировке луча. Прямоугольная и крупная фокусная точка генерирует

удельные мощности на обрабатываемой детали ниже 105 Вт/см², что недостаточно для сварки замочной скважиной.

Эти свойства делают его отличным инструментом для сварки синтетических материалов, пайки, обработки поверхности или кондуктивной сварки. Особое преимущество этой технологии заключается в ее высокой энергоэффективности (> 25%), компактности источников, низких эксплуатационных затратах (отсутствие ламп или генерирующего газа) и малых длинах волн (лучшее поглощение металлическими материалами и возможный перенос по оптоволокну). Разработки оптических систем, позволяющих улучшить фокусировку лазерного луча, коренным образом изменяют использование данных лазерных источников.



Рисунок 2.8. Диодный лазерный источник (документ Rofin Baasel)

2.2.4. Лазерные системы

2.2.4.1. Перенос лазерного луча

Луч, излучаемый лазерным источником, должен переноситься к свариваемому компоненту с минимальными потерями. Используемые системы переноса и фокусирования зависят от длины волны лазерного луча. Неодимовые лучи YAG-лазера могут быть перенесены с помощью оптического волокна, тогда как СО₂-лазер может переноситься только с помощью зеркал. В этом случае оптический путь должен быть ограничен и находиться под давлением, чтобы избежать ухудшения зеркала и возможного ухудшения качества луча.

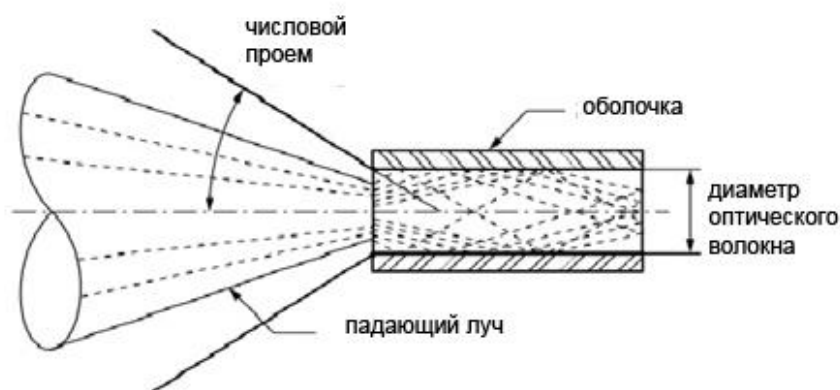


Рисунок 2.9. Ввод лазерного луча в оптическое волокно; от [HAV 96]

Оптическое волокно должно быть как можно меньшего диаметра. Качество луча имеет значение. Импульсные лучи YAG-лазера, в среднем мощностью от 400 до 500 Вт, могут быть введены в волокно диаметром 400 мкм, непрерывные YAG-лазеры с накачкой лампами мощностью 4 кВт используют оптические волокна диаметром 600 мкм, а дисковые лазерные источники с накачкой лазерными диодами пользуются преимуществом сокращения в

диаметре оптического волокна (луч 8 кВт с использованием оптического волокна диаметром 200 мкм). Потери мощности ограничены менее чем 10% на оптическое волокно.

Зеркала, наиболее часто используемые для переноса луча CO₂-лазера, могут быть изготовлены из чистой меди, позолоченной меди или покрыты молибденом. Позолоченная медь ценится за ее очень низкие абсорбционные свойства, но она хрупкая и дорогая. Чистая медь также обладает низкой абсорбцией и сравнительно недорога, но имеет склонность к окислению. Покрытая молибденом медь чрезвычайно устойчива, но ее отражающие свойства ниже, чем у других. Нет точных правил выбора зеркал. Тем не менее, рекомендуется избегать использования чистой или позолоченной меди для фокусирующих головок, подверженных воздействию сварочных рельефов и сварочного дыма. Оптический перенос под давлением может состоять из чисто медных зеркал (менее дорогие), позолоченных медных зеркал (хорошее отражение) или из зеркал с молибденовым покрытием (устойчивее, но более поглощающие).

2.2.4.2. Фокусирование

Лазерный луч должен быть сфокусирован на обрабатываемой детали, чтобы получить плотность мощности, необходимую для сварки. Лучи YAG-лазера обычно фокусируются с помощью стеклянных линз. Лучи CO₂-лазера, мощность которых меньше или равна 3 кВт, могут быть сфокусированы с использованием селен-цинковых линз или зеркал. Лучи CO₂-лазера большей мощности обычно фокусируются с использованием только зеркал. Это может быть чистая или позолоченная медь, покрытая молибденом медь или твердый молибден. Позолоченная медь, как правило, не рекомендуется при изготовлении оптических фокусирующих головок из-за ее хрупкости.

Размеры сфокусированного луча зависят от длины волны луча, его качества и используемой системы фокусировки. Диаметр фокальной точки связан с этими параметрами следующим уравнением:

$$d = M^2(4\lambda f / \pi D),$$

- где: – d: диаметр фокальной точки,
– M²: коэффициент качества луча,
– λ: длина волны,
– F: фокусное расстояние оптической системы,
– D: диаметр луча перед фокусировкой.

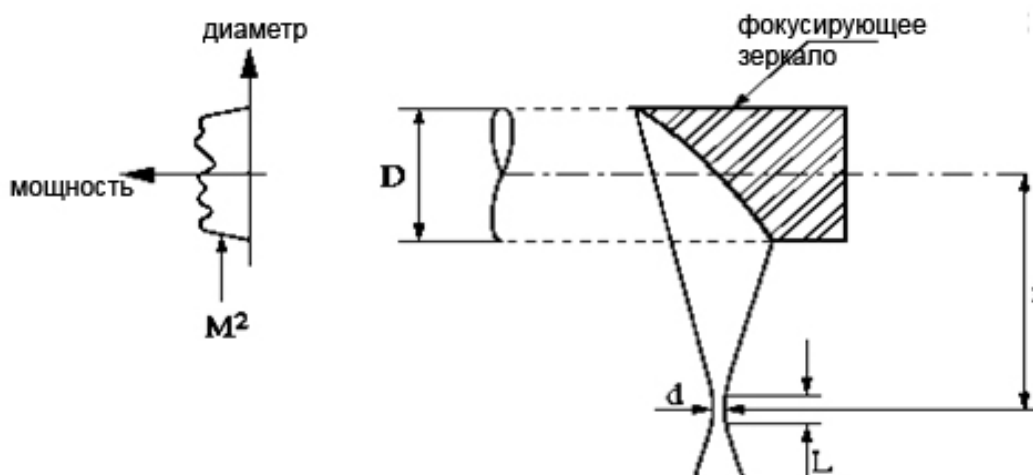


Рисунок 2.10. Фокусировка лазерного луча; из [HAY 96]

В случае YAG-лазеров диаметр фокальной точки зависит главным образом от диаметра оптического волокна и от коллимационной и фокусирующей системы (см. Рис. 2.11), что объясняет важность минимизации диаметра оптического волокна:

$$d = \left(\frac{f}{f_c}\right)d_c$$

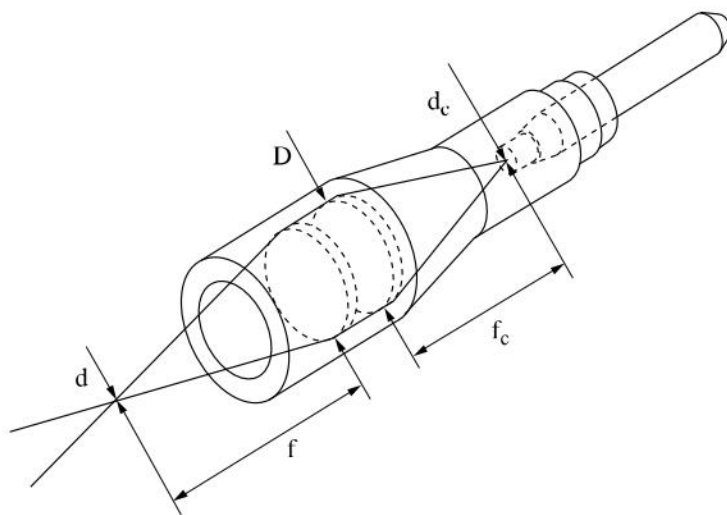


Рисунок 2.11. Фокусировка YAG-лазера. Из [HAV 96]

Другим важным свойством фокальной точки, относящимся к размеру, является глубина поля L. Она определяется как зона, в которой диаметр луча увеличивается не более чем на 5%. Это может быть выражено следующим образом:

$$L \cong \frac{d^2}{2\lambda M^2}$$

Находясь в пределах $\pm 5\%$ допустимого значения диаметра фокальной точки, изменение конечной плотности мощности не превышает 10%. Далее мы рассмотрим важность данного критерия для процесса сварки.

2.2.4.3. Система перемещения луча и обрабатываемой детали

Существуют различные механизированные системы перемещения луча и/или обрабатываемой детали. Эти системы разрабатываются в соответствии с типом используемого лазерного источника, размером свариваемых деталей и экономическими соображениями. В отличие от рынка резки лазерным лучом, сварочные аппараты часто предназначены для определенного применения. Чтобы снизить затраты, производители предлагают все больше и больше станков по каталогу или станков, состоящих из стандартизированных узлов.

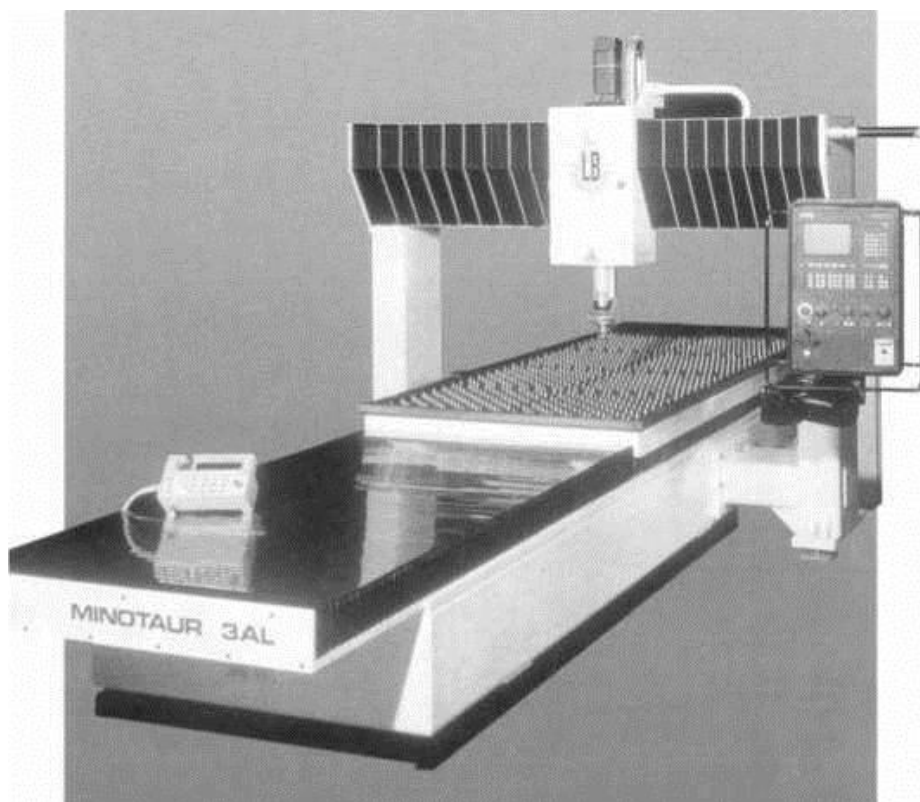


Рисунок 2.12. Смешанная трехосная система (документ Balliu)

Для самых простых компонентов используются машины с фиксированной оптикой. Компоненты перемещаются под сфокусированным лучом. Только фокусирующая оптика перемещается вертикально, чтобы отрегулировать положение фокальной точки или позволить осуществить загрузку и разгрузку детали. Для такого типа простого применения оптический путь не оправдывает использование оптических волокон.

Для более сложных траекторий нам, возможно, придется использовать роботизированные системы с несколькими осями движения. Существуют два типа: декартов роботы или роботы с множественными суставами. Декартов роботы в основном используются для перемещения зеркал в случае CO_2 -лазеров. Они могут включать до пяти осей движения. Эти высокоточные механические системы дороги и требуют точное проектирование оптического пути (см. Рис. 2.12 и 2.13).

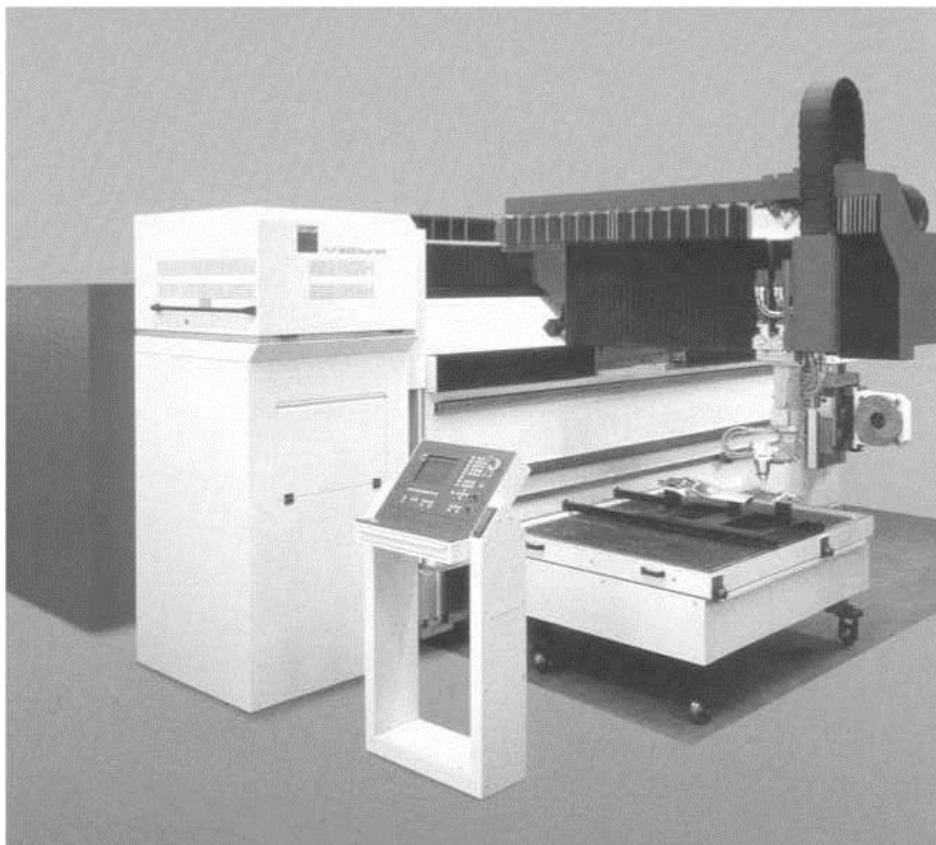


Рисунок 2.13. *Пяти осевая система с мобильной оптикой (документ Trumpf)*

Разработка мощных непрерывных источников YAG-лазера и переноса луча по оптическим волокнам расширила использование полиморфных роботов для сварочных работ. Их неоспоримым преимуществом является очень конкурентоспособная стоимость монтажа по сравнению с пяти осевыми декартовыми системами. Применения в настоящее время в основном производятся при сварки автомобильных кузовов (см. Рис. 2.14).

Эти роботы предлагают меньшую точность позиционирования, чем портальные роботы, но этот недостаток может быть компенсирован использованием систем мониторинга траектории в реальном времени.

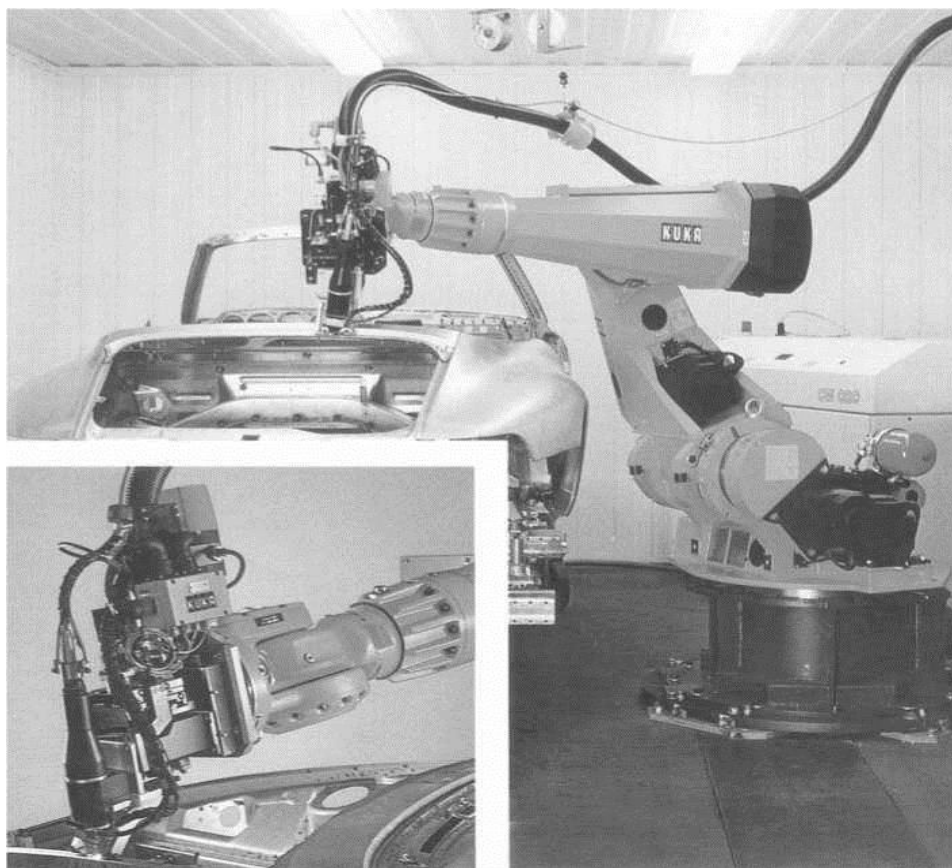


Рисунок 2.14. Шести осевой робот, оснащенный оптическими волокнами для YAG-лазера (документ Kuka)

Эти роботы могут быть оснащены дистанционной сварочной системой (см. Рис. 2.15). Эта технология делает возможной сварку на значительном расстоянии от обрабатываемой детали. В этом дистанционном процессе используются новейшие лазерные источники высокого качества (источники дискового лазера и волоконного лазера).

2.2.4.4. Периферийные системы

Периферийные системы — это устройства, которые наблюдают за правильным функционированием лазерной системы (измерение мощности, анализ луча и т.д.), чтобы контролировать выполняемые сварные швы (инфракрасная термография, анализ плазмы) и облегчать работу робота (системы контроля сварочных соединений).

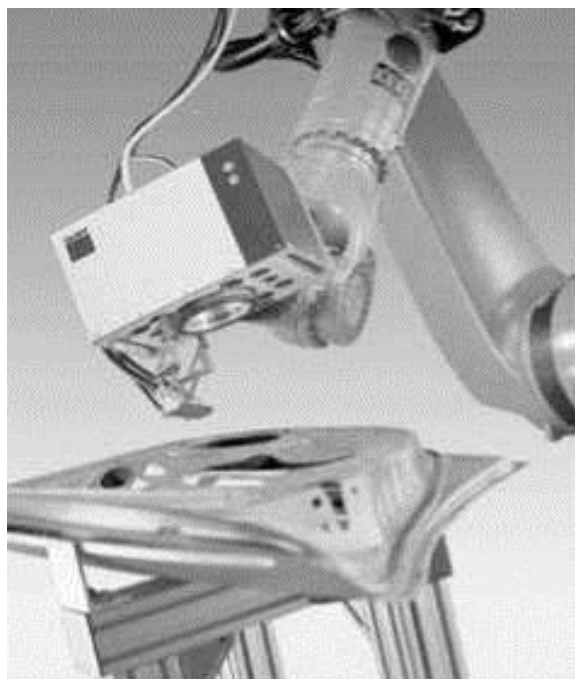


Рисунок 2.15. Шести осевой робот, оснащенный дистанционной лазерной системой сварки (документ Trumpf)

Измерение мощности

Лазерные источники оснащены внутренней системой измерения мощности. Она выдает показания касательно излучаемой источником мощности луча. Это значение мощности не учитывает возможные потери на оптическом пути. Внешние измерительные системы доступны для измерения мощности луча на компонентной площадке. Эти системы не позволяют измерять мощность во время сварки, поэтому являются дополнительными для внутренних измерительных систем, которые могут давать показания во время процесса сварки.

Анализ луча

В случае сварки лазерным лучом, сфокусированный луч представляет собой сварочный инструмент, поэтому важно точно понимать его свойства. Эмпирические методы позволяют высчитывать положение и диаметр зоны фокусировки. Сложность использования этих методов возрастает с увеличением мощности лазерного луча.

Для высокоточного определения свойств лазерного луча были разработаны устройства. Принцип действия этих устройств основан на отборе части луча и анализе его с помощью фотодиодов. Таким образом, в среднем можно анализировать лучи до 20 кВт с плотностью мощности 10^7 Вт/см².

Мониторинг сварных швов

Одним из основных преимуществ лазерной сварки является ее высокая скорость. Это преимущество может быстро стать недостатком, если дефектный шов не будет обнаружен вовремя. Это может привести к отбраковке большого количества деталей. Таким образом, необходимо проводить мониторинг сварных швов на производственной линии, чтобы как можно скорее обнаружить дефекты. Для этого применяются несколько методов.

Инфракрасная термография – это когда инфракрасная камера сканирует заднюю часть сварного шва, в очень близком расстоянии к сварочной ванне. Отмеченные аномалии в температурных изотермах позволяют выделить образование сварочного дефекта. Данный метод контроля дает показания по наличию аномалии, но не дает информацию о качестве сварного шва. Он может быть использован в дополнение к другим методам мониторинга. Этот метод, который трудно контролировать, не очень хорошо подходит для мониторинга производственной линии.

Плазменный анализ – это метод, который состоит из анализа эмиссии плазмы и сварочной ванны. Выборка данных осуществляется на уровне поверхности контакта лазер-материал с помощью оптических волокон или оптических компонентов, расположенных на оптическом пути. Используемые датчики представляют собой фотодиоды, поля чувствительности которых могут быть расположены в ультрафиолетовом (излучение плазмы), видимом или инфракрасном диапазоне (излучение сварочной ванны). Анализ сигнала позволяет соотнести обнаруженные события с появлением дефектов сварного шва. Эти устройства позволяют в реальном времени обнаруживать образование дефектов и активировать тревогу на заданном уровне. Контроль по замкнутому циклу находится на стадии разработки.

Система слежения за сварочным швом

Отслеживание шва, первоначально разработанное для обычной сварки, было адаптировано для лазер-материала сварки. Метод лазерной триангуляции позволяет надежно определять положение сварного соединения в условиях нарушения нормального зрения (испарения, рельефы, высоко излучающая плазма). В большинстве систем используется проецирование лазерной линии, которая сравнивается с компьютеризированной моделью [BOI 98]. Визуализация с помощью ПЗС-камер в настоящее время предлагается в качестве конкурентоспособной альтернативы лазерной триангуляции.

2.2.5. Применение сварки лазерным лучом

Взаимодействие лазер - материал

Лазерный луч фокусируется на поверхности детали, чтобы получить плотность мощности в диапазоне $5 \cdot 10^5$ и $5 \cdot 10^6$ Вт/см². Рисунок 2.16 показывает, что существует порог плотности мощности для создания парового капилляра или *замочной скважины*.

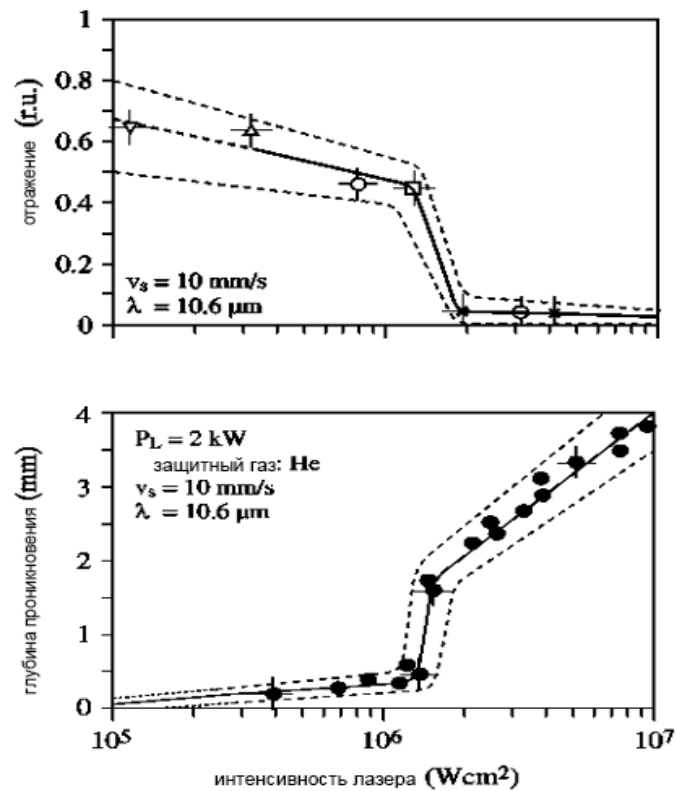


Рисунок 2.16. Глубина проникновения и коэффициент поглощения по отношению к интенсивности лазерного луча. Из [HER 86]

Порог плотности мощности является функцией следующих коэффициентов:

- свойства подлежащего сварке материала,
- длина волны лазерного луча,
- защитный газ,
- качество поверхности обрабатываемой детали.

Свойство материала играет большую роль в создании парового капилляра. Такие материалы, как серебро, золото, медные сплавы и алюминиевые сплавы, трудно поддаются сварке лазерным лучом из-за их низких коэффициентов поглощения.

На рисунке 2.17 показано, что из-за длины их волн лучи YAG-лазера и лазерные диодные лучи лучше поглощаются металлическими материалами, чем CO_2 -лазер. Как видно, длина волны может быть критерием выбора для сварки материалов с низким коэффициентом поглощения.

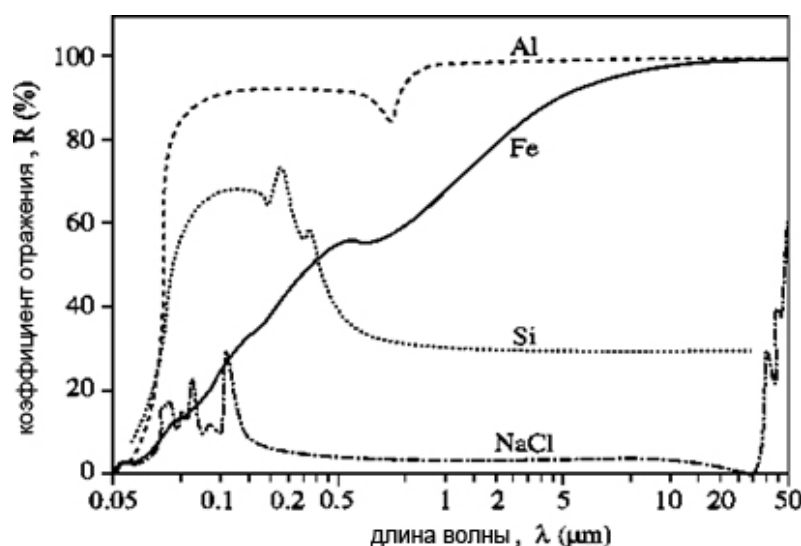


Рисунок 2.17. Поглощение луча по отношению к длине волны, из [ROE 86]

Низкий коэффициент поглощения материала может быть компенсирован высокой плотностью мощности. Эту высокую плотность мощности можно получить путем использования лазерного луча хорошего качества, выбора оптики с коротким фокусным расстоянием, увеличения мощности лазера или, в случае YAG-лазера, путем использования оптического волокна малого диаметра.

Выбор вспомогательного газа также имеет первостепенное значение. Хороший контроль подачи газа и правильный выбор его состава оказывают важное влияние на процесс сварки и качество сварки.

Защитный газ

Для большинства процессов сварки плавлением (кроме электронного луча) требуется защитный газ на поверхности сварного шва, а также, при необходимости, сзади сварного шва. В определенных случаях может быть использовано обдув защитным газом.

Можно выделить три защищаемые зоны: сварочную ванну, поверхность сварного шва сразу после затвердевания, пока она еще достаточно горячая для окисления, и корень сварного шва. Для защиты сварочной ванны и парового капилляра можно использовать:

- коаксиальная сопло,
- поперечная сопло,
- система выдувания плазмы.

Коаксиальные и поперечные сопла переносят газ при атмосферном давлении и низком расходе (от 15 до 30 л/мин в зависимости от мощности лазерного луча). Они обеспечивают хорошую защиту сварного шва без нарушения сварочной ванны. Коаксиальная сопла имеет то преимущество, что его можно использовать для сварки во всех направлениях, что не присуще поперечному соплу.

Использование плазменной струи применяется в некоторых отдельных случаях. Такие как использование трубки малого диаметра (≤ 6 мм), наклоненной под углом от 35 до 45° относительно поверхности детали с высоким выходом газа. Газовая струя, направленная на несколько миллиметров над поверхностью детали, продувает газовую плазму. Эта система

мало используется, потому что она не обеспечивает хорошую газовую защиту и имеет склонность нарушать сварочную ванну.

Основными вспомогательными газами являются инертные газы гелия и аргона, а также активный газ, то есть азот. В случае сварки лазерным лучом газовая защита играет не только роль защиты сварочной ванны от загрязнения, но и участвует во взаимодействии между лазером и материалом. Таким образом, выбор газа зависит от многих факторов:

- ионизирующий потенциал газов,
- длина волны лазерного луча,
- свойство материала, подлежащего сварке.

Газы, подверженные высокой плотности мощности, ионизируют более или менее легко. Гелий, ионизирующий потенциал которого высок (24,46 эВ), создает не очень интенсивную и достаточно проникаемую плазму независимо от длины волны лазерного луча. Можно использовать до мощности 45 кВт без существенных проблем. Аргон и азот, потенциал ионизации которых ниже (Ar: 15,68 эВ и N₂: 15,51 эВ), создают интенсивную плазму, которая препятствует взаимодействию луча и материала. В случае луча СО₂-лазера использование этих газов будет ограничено мощностью ≤ 5 кВт. С точки зрения свойства сварки гелий обеспечивает самое глубокое проникновение сварного шва по сравнению с азотом и аргоном и самыми узкими сварными швами. Добавление гелия в аргон позволяет ограничить негативное воздействие плазмы, генерируемой аргоном. На рынке существуют коммерческие смеси (гелий-аргон), в частности для сварки лазерным лучом. Эти смеси могут использоваться для мощности до 10 кВт.

В случае неодимового YAG-лазера выбор газа не так важен. Первые полученные данные указывают на то, что использование аргона или азота с неодимовым YAG-лазером или волоконным лазером возможно при мощности до 10 кВт.

Аргон и гелий, будучи инертными, могут быть использованы независимо от свойства свариваемого материала, что не применимо к азоту. Последний может привести к металлургическим превращениям в свариваемых материалах. Его нельзя использовать для сварки сплавов циркония и титана, поскольку он будет образовывать нитриды титана и нитриды циркония, которые ослабят сборки. Азот также может вызывать повышение чувствительности к горячему растрескиванию аустенитных нержавеющей сталей из-за его гамма генного эффекта (это приводит к образованию аустенита, а также к затвердеванию первичного аустенита). Для этих материалов для его использование необходимо подвергать процедурам, предотвращающим образование горячих трещин. Однако, поскольку он растворим в нержавеющей сталях, азот можно использовать с некоторым преимуществом, чтобы избежать образования пористостей в зоне расплава [BAR 98]. Его использование для сварки нелегированных и слаболегированных сталей не представляет особой проблемы, если не требуется высокое качество сварки.

2.3. Электронно-лучевая сварка

2.3.1. Предыстория [FRI 98]

Самые ранние применения электронного пучка встречаются в научных исследованиях, проведенных К.-Х. Штайгервальдом в Германии и Ж.А. Сторем из СЕА (Комиссия по атомной энергии) во Франции. Для последнего данная работа была продуктивна по части сварки корпусов из горючего материала, изготовленных из сплава циркония, материала, очень

чувствительного к окислению и для которого в то время не было подходящего процесса сварки. Производство электронного луча требовало условий вакуума, которые, естественно, обеспечивали защиту от окисления. Таким образом, сварка стала возможной, и первые ЭЛ сварные швы были получены с использованием сфокусированного электронного луча, полученного с помощью катодной системы Гинье. Таким образом, в 1956 году был зарегистрирован патент, и компании получили лицензии на конструирование машин, появившихся на рынке в 1960 году.

Первые станки имели электронно-лучевые пушки малой мощности (несколько киловатт), что ограничивало толщину, которую можно было сваривать, примерно до десяти миллиметров. Очень быстро, мощность пушки, которая могла быть увеличена (30 кВт в 1970 году), позволила осуществлять сварку очень плотных деталей (от 40 до 50 мм), встречающихся в производстве котлов или в тяжелом машиностроении.

В течение 1980-х годов проводилась работа по изысканию новых технологий, и в период с 1980 по конец 20-го века в Западной Европе было собрано более 1000 станков.

2.3.2. Принцип устройства

В процессе ЭЛ-сварки используется энергия, рассеиваемая электронами в момент, когда они ударяются о деталь, подлежащую сварке.

Электронный луч

Электрон представляет собой частицу, характеризующуюся массой $m=9,1 \times 10^{-31}$ кг и отрицательным электрическим зарядом $e=1,6 \times 10^{-19}$ кулонов. Когда этот электрон помещается в пространство, где существует электрическое поле E и напряжение V , он подвергается воздействию силы $F=eE$. Под действием этой силы электрон движется со скоростью v и приобретает, игнорируя эффект относительности, кинетическую энергию:

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 = eV$$

Если учесть n/t электронов, испущенных за единицу времени, мощность, переносимая электронным лучом, будет:

$$W = \frac{1}{2} \times \frac{n}{t} \times m v^2 = \frac{ne}{t} \times V = I \times V$$

где:

- V : ускоряющее напряжение электронов,
- I : интенсивность луча.

Удельная мощность

Определяется как отношение мощности, переносимая лучом, к площади воздействия луча на свариваемые детали. При сварке данная удельная мощность составляет несколько десятков кВт/мм².

По сути, вся мощность не переносится в точке воздействия из-за потерь на траектории электрона между точкой излучения и точкой воздействия на деталь.

Первые потери связаны с столкновениями с молекулами атмосферы: чем выше давление воздуха, тем значительнее они.

Вторые потери менее важны по количеству, так как они связаны с явлениями переизлучения, наиболее важным из которых является рентгеновское излучение. Количество энергии, рассеиваемое таким образом, мало ($\sim 1\%$), но последствия важны с точки зрения безопасности.

2.3.3. Оборудование

Существует три метода сварки в зависимости от значения давления P вблизи обрабатываемой детали:

- $P > 10^{-5}$ мбар: вторичная вакуумная сварка,
- $P \sim 10^{-2}$ мбар: первичная вакуумная сварка,
- $P \sim 1000$ мбар: сварка без вакуума.

Используемое оборудование, конечно, различается, но все они включают в себя следующие позиции:

- электронно-лучевая пушка со своей системой просмотра,
- сварочная камера, содержащая свариваемые детали, а иногда и электронную пушку.

Этот корпус также содержит системы перемещения для деталей и пушки,

- агрегат накачивания для получения пониженного давления в пушке и камере,
- блок питания и числовые схемы управления и контроля.

Электронная пушка

Рис. 2.18 иллюстрирует принципы работы триодной электронной пушки, которые включают в себя:

– катод из очень излучающего материала: вольфрам, тантал или гексаборид лантана. Этот катод накаливается в условиях вакуума, непосредственно электрическим током (электронная пушка с прямым накалом), либо косвенно первичным электронным лучом, получаемым из накаливаемой нити (электронная пушка с косвенным накалом);

– немагнитный Венельт, обволакивающий катод и действующий, с одной стороны, на форму эквипотенциальных поверхностей и, следовательно, на форму луча (электроны движутся перпендикулярно этим поверхностям), а с другой стороны, на ускорение электронов, где он играет роль сетки в триоде;

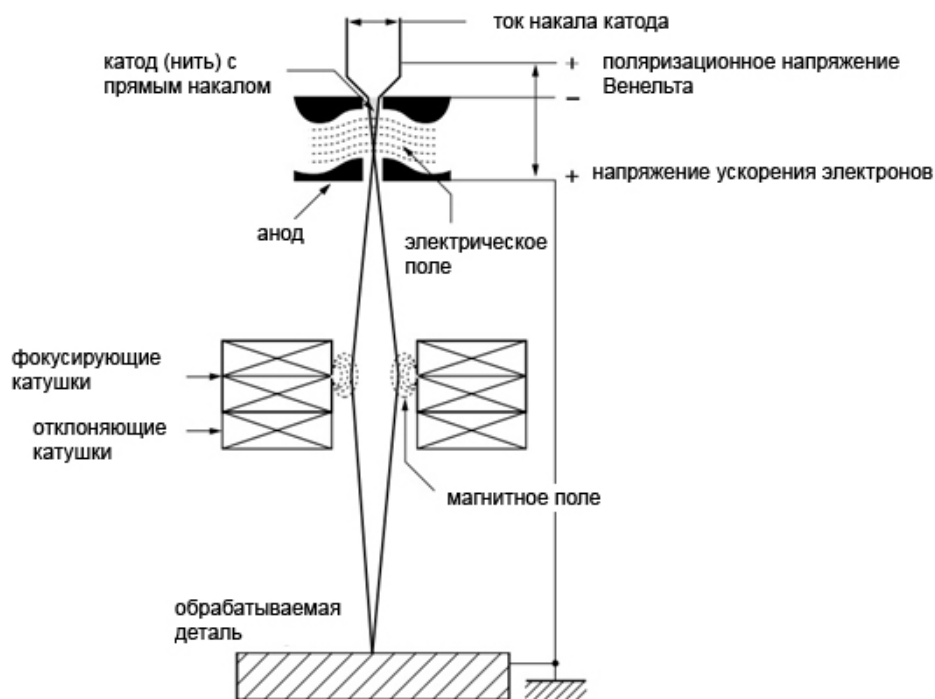


Рисунок 2.18. Принцип работы триодной электронной пушки (документ Institut de Soudage)

- медный анод, несущий положительный заряд по сравнению с Венельтом, образующим электрическое поле для ускорения электронов. Этот анод просверлен в центре с каналом, который позволяет электронному лучу проходить через него, который сходится сразу на выходе анода, затем расходится под действием взаимно отталкивающих электронов, по мере того как они расходятся;

- магнитная фокусирующая катушка с обмотками в одной оси симметрии с пушкой. Она сосредотачивает расходящийся луч и концентрирует его на небольшой точке (около миллиметра в диаметре);

- набор магнитных отклоняющих катушек, позволяющих лучу перемещаться относительно его оси (боковые развертки, круговое движение и т. д.);

- система для точного позиционирования луча на сварном соединении с помощью оптического визира или системы телевизионной камеры.

В соответствии с геометрией электрода и, в частности, геометрией анода и Венельта, максимальный доступный ток «I» вычисляется в соответствии с ускоряющим напряжением «V», свойством пушки, называемой первеансом «р», и выражается следующим образом:

$$I = p \times V^{3/2}$$

Мощность пушки зависит от толщины, которую необходимо сварить. Она варьируется от 5 до 100 кВт, но большинство установок оснащены пушками мощностью от 10 до 30 кВт. Что касается ускоряющих напряжений, то здесь они находятся в диапазоне от 45 кВ до 150 или даже 300 кВ, в зависимости от технологий, выбранных производителями, и мощности, требуемой от пушки.

Механизм корпусного огораживания и перемещения сварки

Корпус станка (вакуумная камера) огораживает свариваемые детали с их инструментами и зону перемещения обрабатываемой детали. Также оно может охватывать электронную пушку со своей системой перемещения с одной или несколькими осями. Как правило, данный корпус станка должен иметь небольшой объем, совместимый с объемом

свариваемых деталей, но следует понимать, что слишком большой объем требует более длительного времени накачки, что отрицательно влияет на производительность оборудования.



Рисунок 2.19. 6 кВт ЭЛС станок, размеры 0,6 м × 0,6 м × 0,9 м (документ Techmeta)

Кроме того, эти данные корпуса станка должны быть спроектированы таким образом, чтобы выдерживать атмосферное давление без каких-либо деформаций, а их внутренние боковые стенки должны быть чистыми, чтобы ограничить эффекты адсорбции газа и, таким образом, сократить время накачки.

Используемые в промышленности объемы корпусов варьируются от 0,5 м³ до более чем 1000 м³ (см. Рис. 2.19 и 2.20).



Рисунок 2.20. 50 кВт ЭЛС станок с внутренней пушкой, размеры 8х5х5м (документ Techmeta)

Чтобы не быть вынужденным изготавливать крупногабаритные корпуса станков, предпочтительнее создавать вакуум локально, где должен быть сделан сварной шов. Такая методика была применена, в период между 1970 и 1980 годами, для различных целей, включая сварку соединительных труб на котлах или трубах на пластинах трубчатых теплообменников. Хотя выглядит априори заманчивой, от данной методики позже фактически отказались, так как оборудование с локализованными вакуумными камерами было очень дорогим из-за его применения только к одному типу детали, будучи не гибким в применении.

Системы для позиционирования и перемещения деталей представляют собой столы с одной или двумя осями или поворотными механизмами для сварки вращающихся деталей. Эти механические оси контролируются посредством ЧПУ.

Системы создания вакуума

Для машин в основном вакууме блок накачки состоит из стандартных механических насосов (роторно-лопастные насосы или бустерные насосы Roots).

Для работающих во вторичном вакууме, добавляют один или несколько масляных диффузионных насосов или турбомолекулярных насосов.

Подача блока накачки зависит от объема заграждения, подлежащего накачки, времени накачки и дегазации, связанной со свойством и толщиной свариваемого материала. Последний критерий особенно важен при сварке очень плотных деталей. Данная подача накачивания может достигать уровней от 2000 до 5000 м³/ч⁻¹ для механических насосов и от 10000 до 20000 л*с⁻¹ для масляных или турбомолекулярных насосов.

Безвакуумные станки или при пониженном давлении [POW 00]

Первый промышленный электронно-лучевой безвакуумный ЭЛ сварочный аппарат был использован в автомобильной промышленности США в конце 1960-х годов. Существенной характеристикой этого типа оборудования является отсутствие вакуумной камеры, что очень важно для массового производства, например, автомобильных компонентов, таких как компоненты трансмиссии, гидротрансформаторы и выхлопные системы. В противовес данному преимуществу имеется также недостаток в необходимости использования очень высокого ускоряющего напряжения (150 кВ) для получения достаточно мощного луча на обрабатываемой детали, притом, что он проходит через газовую атмосферу, составляющую всего несколько миллиметров. Это высокое напряжение генерирует сильное рентгеновское излучение, и поэтому для защиты операторов, работающих на станке, необходимо оборудовать их корпусами, обеспечивающими защиту от данного излучения.

В отличие от США, этот тип процесса мало использовался в Европе. Однако с 1990 года значительные технологические разработки привели к появлению нового оборудования, которое работает при атмосферном давлении или при пониженном давлении (<1 мбар). Таким образом, интерес к этой технологии вновь возрос в двух областях: сварка тонких листов для автомобильной промышленности (сварка алюминиевых панелей) и сварка плотных деталей, таких как трубы для газопроводов и контейнера для хранения радиоактивных элементов.

Применение ЭЛ-сварки

Для получения качественного сварного шва необходимо мониторить следующие параметры:

- мощность, переносимая лучом: произведение ускоряющего напряжения электрона и интенсивности луча. Мощность применяется в зависимости от толщины свариваемых деталей, свойства материала и его физических особенностей (для одной и той же толщины для сварки меди потребуется больше мощности чем для стали), а также скорости сварки;
- скорость сварки: ее следует выбирать не только в зависимости от мощности пушки, а также путем определения металлургической свариваемости материала, то есть его способностью образовывать бездефектный шов (например, без трещин);
- давление в корпусе станка: данный параметр связан с оборудованием, которое предназначено для работы либо в первичном, либо во вторичном вакууме. Некоторые станки могут работать как в первичном, так и во вторичном вакууме, и в таком случае выбор давления будет зависеть от свариваемого материала и его способности вступать в реакцию с кислородом (например, циркониевые сплавы);
- ток в фокусирующей катушке: очень важный параметр, поскольку он определяет удельную мощность и, тем самым, влияет на геометрию расплавленной зоны. Данный параметр варьируется в зависимости от свойства свариваемого материала и его толщины. Таким образом, он связан с ускоряющим напряжением и интенсивностью сварки;
- отклонение луча, с помощью перемещений луча, позволяет выполнять сварные швы, ограничивая движение компонента. Например, можно выполнить циркулярный сварной шов небольшого диаметра без какого-либо движения обрабатываемой детали или пушки, в то время как луч описывает конус, использующий в качестве своей оси ось обрабатываемой детали;
- вибрация луча: в зависимости от сигнала, передаваемого катушкам отклонения, можно придавать лучу качающиеся движения (поперечных или параллельных сварному шву и циркулярных или эллиптических по форме). К сигналу добавляются два параметра, амплитуда и частота, которые имеют отношение к ширине качания и перемешиванию расплавленного металла. Эта вибрация луча используется на рабочем уровне, чтобы расширить зону расплава и, таким образом, допустить зазор между компонентами, чтобы улучшить качество сварочной ванны при сварке на месте. С металлургической точки зрения это может помочь уменьшить трещину в горячем состоянии, наблюдаемое у некоторых материалов (например, никелевые сплавы), и помочь дегазации сварочной ванны, тем самым ограничивая пористость;
- сварочная позиция: плоская сварочная позиция (ось луча вертикальная) используется для сварки толщиной от 15 до 20 мм с полным режимом проникновения. Данное ограничение связано с потерей баланса между силами поверхностного натяжения, которые поддерживают расплавленный металл на границах капиллярной и гравитационной силы. В режиме частичного проникновения максимальная свариваемая толщина в плоском положении составляет около 130 мм для сталей. За пределами этих пределов необходимо использовать горизонтальную/вертикальную позицию сварки (ось луча горизонтальная). В этом случае толщина зависит от мощности электронной пушки. Сварка по вертикали вверх и сварка по вертикали вниз также могут быть использованы на стали толщиной от 60 до 80 мм. Для верхнего положения сварки максимальная толщина такая же, как для плоского положения сварки.

2.3.4. Конструкция и подготовка соединяемых деталей

В большинстве случаев, сварка выполняется без наполнителя, на прямых соединяемых кромках. Рис. 2.21 иллюстрирует некоторые часто используемые разделки кромок.

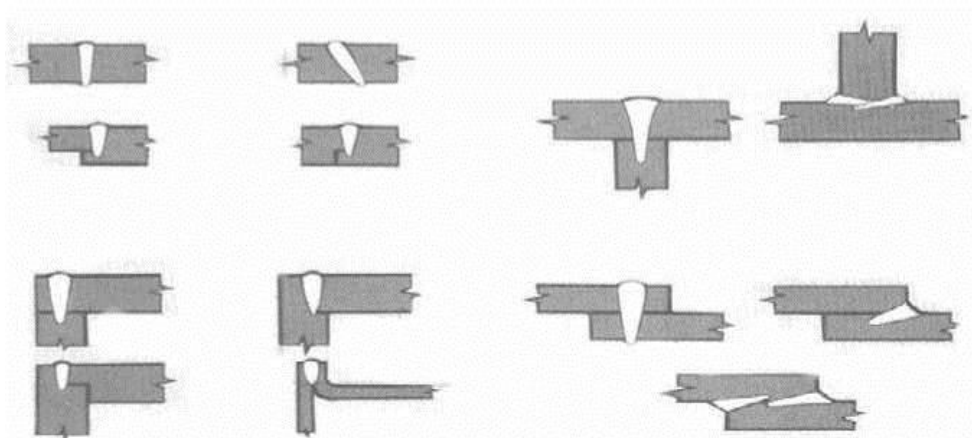


Рисунок 2.21. Примеры подготовки соединений (документ Institut de Soudure)

Данные примеры показывают, что, для того чтобы можно было воспользоваться всеми преимуществами этих процессов, подборку процесса следует производить в исследовательском отделе. Иногда бывает трудно достичь отсутствие зазоров. Можно допустить наличие некоторых сварных зазоров между компонентами, важность которого будет изменяться в зависимости от толщины свариваемых деталей, но для толщины менее 15 мм такой зазор составляет приблизительно 10% от толщины. Кроме того, необходимо использовать наполнитель, чтобы избежать чрезмерно тонких участков. Это часто выполняется лазерным лучом, так как работа при ЭЛ-сварке выполняется более точно.

Из-за механической обработки компонентов, необходимы тщательное обезжиривание перед сваркой и устранение оксидов, присутствующих вблизи шва, для получения качественного сварного шва.

При ЭЛ-сварке особое внимание следует уделять остаточному магнетизму компонентов из-за риска отклонения электронного луча и, следовательно, получения дефекта сварки, такого как, несплавление. Таким образом, необходимо наблюдать за этим магнетизмом перед сваркой, и возможно подвергать детали операции размагничивания. Однако необходимо понимать, что это деликатная операция, которая не всегда приводит к ожидаемому результату.

Для обеспечения точного позиционирования фотонного или электронного луча относительно соединения сварки зачастую необходимо применять позиционирующие и крепежные узлы, которые должны быть высокоточными и изготовленными из немагнитных материалов в случае ЭЛС.

2.4. Металлургия лучевой сварки высокой плотности

Основные особенности процессов лучевой сварки высокой плотности по сравнению с обычными сварочными процессами (дуговая сварка) являются следующими:

- отсутствие присадочной проволоки в большинстве случаев,
- высокие скорости сварки, с более высокими скоростями затвердевания и охлаждения,
- узкая зона расплава и зона термического воздействия,
- низкий накал и ограниченная деформация деталей,
- отсутствие прямого контакта между источником энергии и компонентом.

Эти особенности включают в себя свойства, связанные с поведением свариваемых материалов. Для изучения данных особенностей целесообразно различать, с одной стороны, режимы импульсной сварки, такие как сварка импульсным YAG-лазером, и, с другой стороны, режимы непрерывной сварки, такие как процессы ЭЛС, CO₂-лазера и непрерывного YAG-лазера. Тепловые циклы, получаемые при импульсной сварке, короче, чем в непрерывном режиме.

Чтобы наглядно показать проблемы свариваемости различных металлических материалов, следует различать следующие понятия [MUR 94]:

- технологическая свариваемость: относится к проблемам, возникающим во время сварки, когда поведение свариваемого металла или сплава препятствует завершению сварного шва;

- металлургическая свариваемость: во время процесса сварки, одна из составных зон (зона расплава, зона соединения или ЗТВ), может быть подвергнута видоизменению из-за самой операции, что может поставить под сомнение производительность сборки в предусмотренных рабочих условиях.

Технологическая и металлургическая свариваемость будут описаны для основных металлических сплавов (стали, алюминиевых сплавов, никелевых сплавов, титановых сплавов, циркониевых сплавов и медных сплавов).

2.4.1. Стали

2.4.1.1. Технологическая свариваемость

Стали, как правило, обладают хорошей технологической свариваемостью. В дополнение к преимуществу, связанному с отсутствием вакуумного корпуса станка, процессы лазерной сварки по сравнению с ЭЛ-сваркой имеют преимущество, заключающееся в нечувствительности к отклонениям луча, постоянному магнетизму в случае ферритных сталей или в случае гетерогенных сборок, эффекта Пельтье. Тем не менее, сварка нержавеющей стали должна производиться с газовой защитой, с применением газовой тележки.

2.4.1.2. Металлургическая свариваемость

Нелегированные или низколегированные стали

Что касается металлургической свариваемости, то, помимо определенных особенностей процессов с высокой плотностью энергии, описанных ранее (отсутствие контакта с деталями, отсутствие водорода, более низкие напряжения усадки), эти процессы сварки значительно ограничивают явление холодного растрескивания.

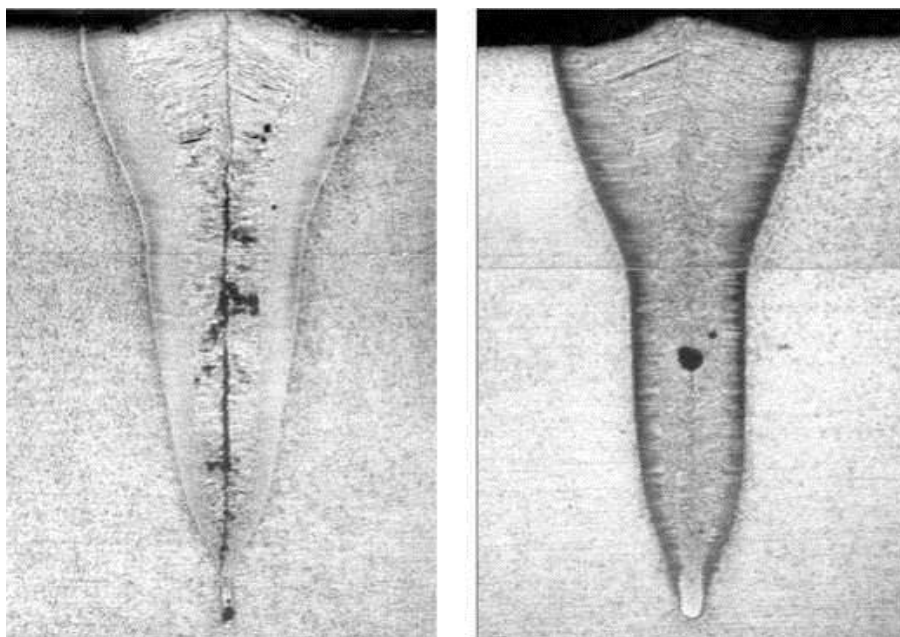


Рисунок 2.22. Иллюстрации сварных швов CO₂-лазера на стали 25 CrMo4V [COL 97].
 25CrMo4V: 0,005% серы, 0,015% фосфора (без трещин)
 25CrMo4V4: 0,031% серы, 0,016% фосфора (с трещиной)

С другой стороны, научные исследования, проведенные в Institut de Soudure [COL 97], выявили увеличение горячего растрескивания из-за комбинированных эффектов высокой скорости сварки и присутствия остаточных элементов, в частности серы и фосфора (см. Рис. 2.22).

Диапазоны химического состава, рекомендуемые действующими стандартами, не учитывают специфику процессов лучевой сварки высокой плотности. Ограничение остаточных элементов (сера, фосфор) имеет важное значение для ограничения риска горячего растрескивания.

Аустенитные нержавеющие стали

Многие прогнозные диаграммы, изображающие металлургическую структуру сплавов в состоянии после сварки, были составлены и изменены по мере развития сварочных процессов. В частности, диаграммы Шеффлера [SCH 49], группа диаграмм Делонга [DEL 56] или диаграмма Суутала [SUU 79], составленные для обычных сварочных процессов, больше не применимы для сварочных процессов, связанных с быстрым охлаждением. По этой причине в исследовании, проведенном в Institut de Soudure [CHE 93], рассматривалось влияние тепловых условий и состава стали на склонность нержавеющих сталей к горячему растрескиванию при сварке лазерным лучом. Было выявлено, что данные явления горячего растрескивания не несут особой важности в режиме непрерывной сварки, но становятся очень значительными при импульсной сварке.

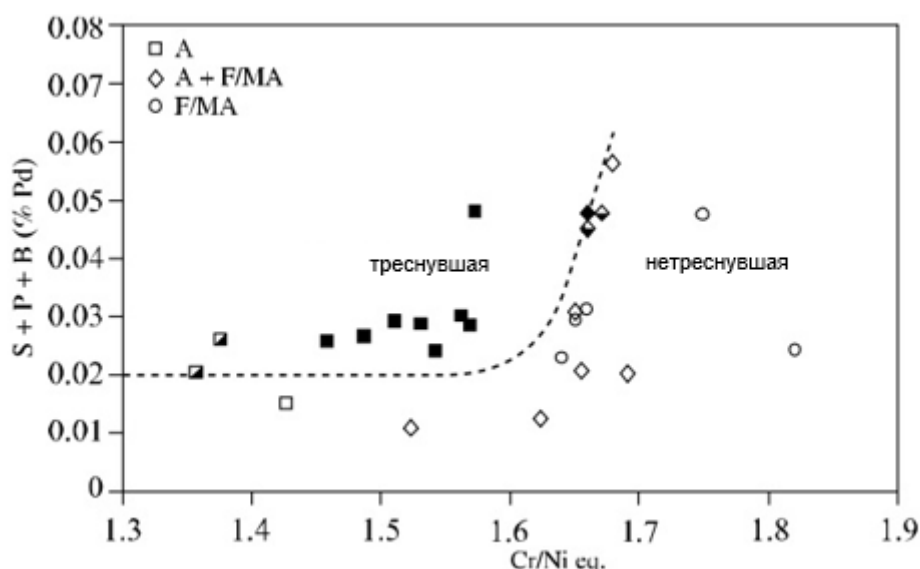


Рисунок 2.23. Диаграмма прогноза горячего растрескивания аустенитных нержавеющей сталей при импульсной сварке YAG-лазером, из [CHE 93]

Была составлена новая прогнозная диаграмма горячего растрескивания, зависящего от содержания серы, фосфора и бора в химическом составе сплава в пересчете на эквивалент Cr/Ni и от режима первичного затвердевания (аустенитный или ферритный), для процессов импульсного луча YAG-лазера и CO₂-лазера (см. Рис. 2.23).

$$\frac{Cr}{Ni}^{eq.} = \frac{Cr + 1.37Mo + 1.5Si + 2Nb + 3Ti}{Ni + 0.31Mn + 22C + 14.2N + Cu}$$

На этой диаграмме представлены три различных поля: две области без растрескивания и область растрескивания. Сплавы, у которых эквивалент Cr/Ni выше 1,7, не очень чувствительны к горячему растрескиванию вплоть до высокого содержания примесей. Они являются результатом режима ферритового отверждения, за которым следует аустенитное превращение в твердом состоянии. Вторая область без образования растрескиваний соответствует сплавам, у которых эквивалент Cr/Ni ниже 1,58, но содержание примесей, у которых, низкое ($S + P + B \leq 200 \text{ ч/млн.}$). Область растрескивания определяется эквивалентом Cr/Ni ниже 1,58 и содержанием примесей ($S + P + B > 200 \text{ ч/млн.}$). Сплавы, чей эквивалент Cr/Ni находится между 1,58 и 1,70, находятся в переходной зоне, образование горячих трещин которых, зависит от содержания примесей.

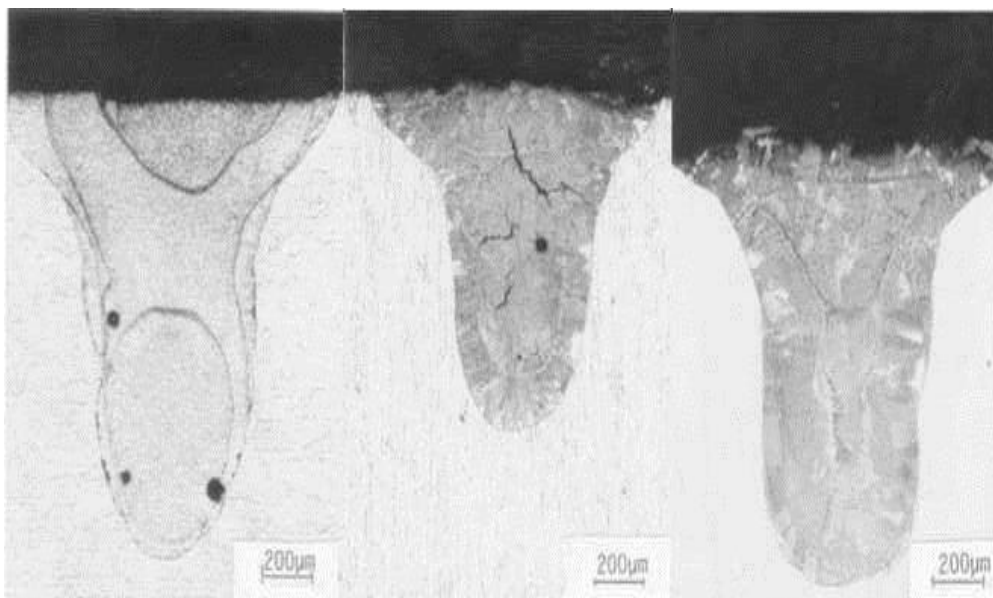


Рисунок 2.24. Импульсный луч YAG-лазера на пластинах из аустенитной нержавеющей стали; из [CHE 93a].

X2CrNi18-09 экв. Cr/Ni=1,75% (S+P+B) = 0,0475% (рисунок слева)

X2CrNiMo17-12-2 экв. Cr/Ni=1,57% (S+P+B) = 0,0481% (в среднем)

X2CrNiMo17-12-2 экв. Cr/Ni=1,523% (S+P+B) = 0,0106% (рисунок справа)

Эта исследование показало, что внешние факторы, такие как использование азота (гамма гена) в качестве защитного газа, могут внести значительный вклад в образование трещин (см. Рис. 2.25).

Ферритные нержавеющие стали

Основными проблемами, возникающими при сварке ферритных нержавеющих сталей, являются увеличение зернистости и осаждение нитридов и карбида хрома, которые могут вызвать межкристаллитную коррозию. Эти явления особенно распространены при использовании сварочных процессов с использованием высокой линейной энергии. Процессы лучевой сварки высокой плотности с низкой скоростью нагрева и высокой скоростью охлаждения ограничивают эти явления и значительно улучшают механическую прочность сварного соединения.

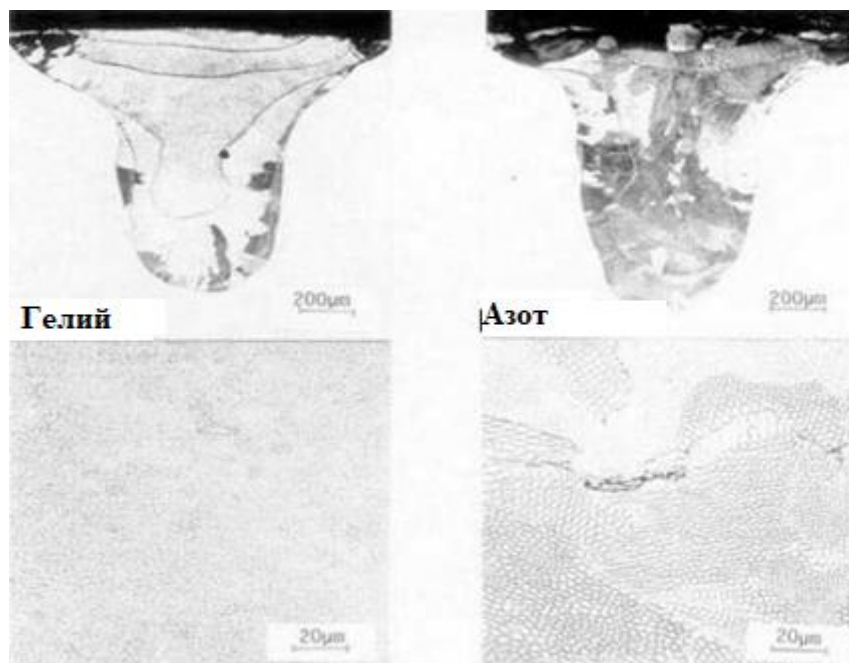


Рисунок 2.25. Сравнение швов на пластинах, сваренных с различными защитными газами (из [СНЕ 93]). Шов на пластине с гелием (рисунок слева). Шов на пластине с азотом (рисунок справа).

Мартенситные нержавеющие стали

Мартенситные нержавеющие стали могут быть чувствительны к явлению холодного растрескивания.

Факторы, которые вызывают холодное растрескивание:

- высокий процент углерода ($> 0,3\%$),
- напряжения, вызванные процессом сварки или неподходящей конструкцией соединения,
- высокие скорости охлаждения,
- наличие водорода в растворе.

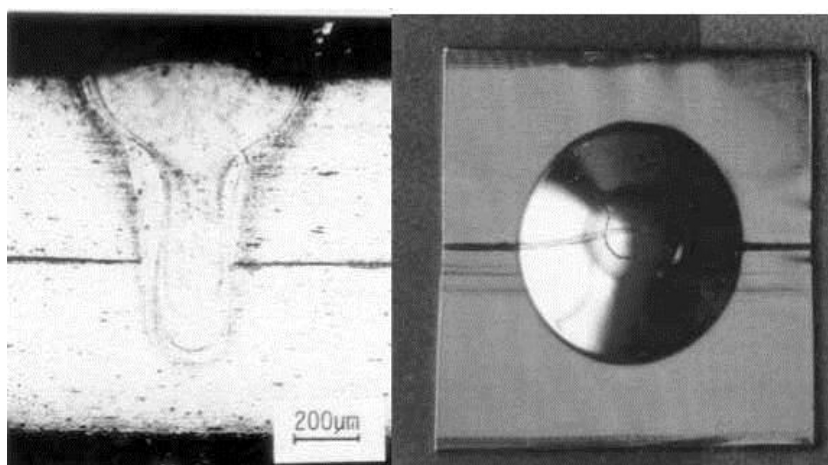


Рисунок 2.26. Лазерная сварка лучом CO_2 -лазера ферритной нержавеющей стали X2CrMoTi 18-2 (документ Institut de Soudure).

Применение следующих различных мер позволяют ограничить или избежать холодных растрескиваний стали:

- использование аустенитной присадочной проволоки,
- предварительный накат и последующий накат,
- избегание введения водорода.

Процессы лучевой сварки высокой плотности энергии имеют большие преимущества по сравнению с традиционными процессами. Не имея контакта со свариваемой деталью, они ограничивают загрязнение водородом, а при очень узкой зоне расплава, напряжения, вызванные образованием усадочной раковины во время затвердевания, значительно уменьшаются. Некоторые стали, считающиеся не свариваемыми дуговой сваркой, были сварены без присадочной проволоки и предварительного нагрева.

Осадочные твердения мартенситных нержавеющих сталей после сварки теряют свои механические свойства, если они свариваются в закаленном состоянии. Целесообразно, если конструкция деталей позволяет, сваривать в состоянии повышенной плотности и проводить обработку выдержки после сварки.

Аустенитно ферритные нержавеющие стали (дуплекс или супер дуплекс)

Эти стали обладают хорошими механическими свойствами и хорошей коррозионной стойкостью благодаря своей микроструктуре, состоящей из 50% аустенита и 50% феррита. Высокая скорость охлаждения, вызванная сваркой, вызывает дисбаланс между ферритом и аустенитом. Высокая скорость охлаждения, создаваемая процессами лучевой сварки высокой плотности, приводит к образованию почти полностью ферритной структуры в зоне расплава. Снижение скорости сварки и/или введение азота в качестве защитного газа увеличивает содержание аустенита. К сожалению, этих методов недостаточно для получения дуплексной структуры (см. Рис. 2.27). Процессы лучевой энергии высокой плотности можно применять только при не высоких коррозионных требованиях.

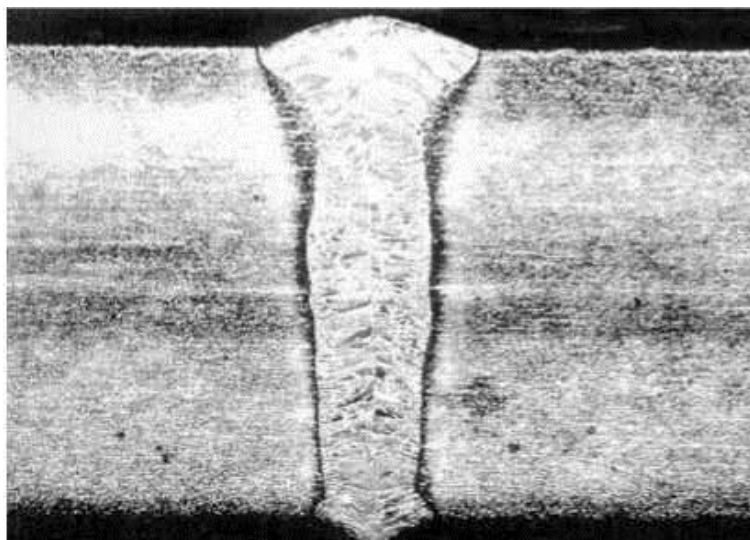


Рисунок 2.27. Сварной шов стыковой сварки CO₂-лазером аустенитно ферритной нержавеющей стали толщиной 3 мм, X2CrNiMoN22-5-3 (документ Institut de Soudure)

2.4.2. Алюминиевые сплавы

Технологическая свариваемость

Основные проблемы технологической свариваемости алюминиевых сплавов связаны с наличием слоя тугоплавкого оксида и их высокой проводимостью. Оксидный слой требует очистки поверхности деталей перед сваркой, независимо от используемого процесса сварки. Лазерная сварка алюминиевых сплавов усложняется из-за их низкого коэффициента поглощения. В этом случае YAG-лазер имеет небольшое преимущество по сравнению с CO₂-лазером из-за его меньшей длины волны, что обеспечивает лучшее поглощение излучения.

Электронно-лучевая сварка имеет преимущества для сварки этих сплавов, потому что у нее нет проблемы поглощения лазерных лучей, в то время как толщина свариваемой сварки велика (см. Рис. 2.28), а сварные швы узкие. Цикл термической сварки достаточно короткий, что ограничивает проблемы, вызванные высокой теплопроводностью алюминия.

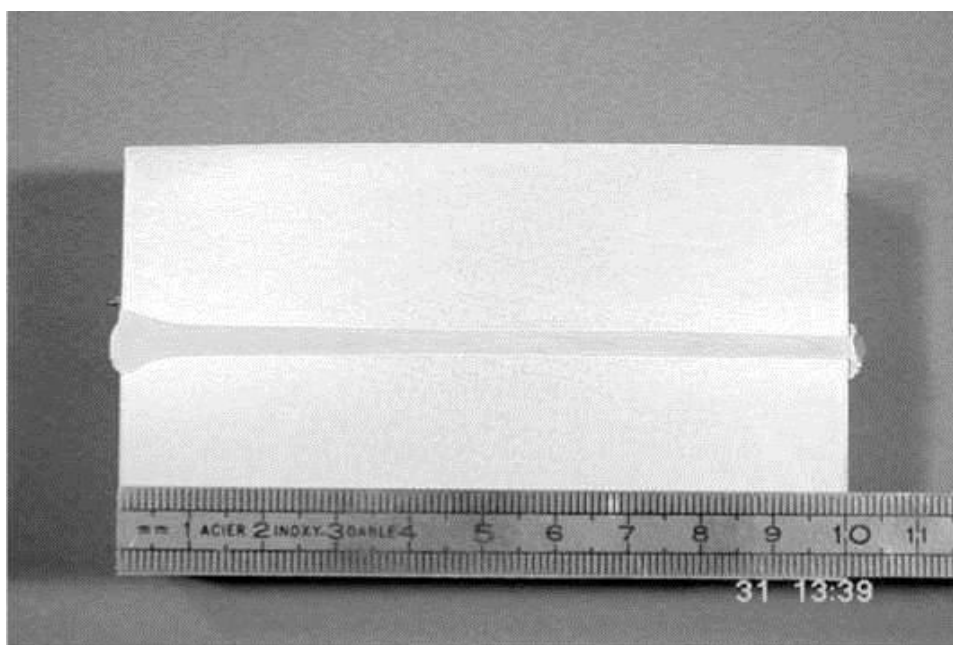


Рисунок 2.28. Электронно-лучевая сварка алюминиевого сплава 5754 (документ Institut de Soudure)

Металлургическая свариваемость

Подобно аустенитным нержавеющей сталям, алюминиевые сплавы по разному реагируют на импульсные или непрерывные режимы сварки.

Скорость затвердевания, полученная при сварке импульсным лучом YAG-лазера, приводит к систематическому образованию горячего растрескивания. Только чистый алюминий и алюминий серии 4000 (Al, Si) могут быть сварены без горячего растрескивания. Алюминиевые сплавы серий 5000 (Al, Mg) и 6000 (Al, Mg, Si) можно сваривать в гетерогенной сборке с алюминиевым сплавом 4047 (или 4043) или с использованием этого сплава в качестве присадочной проволоки.

Процессы сварки в непрерывном режиме вызывают меньше проблем горячего растрескивания. Они позволяют сваривать алюминиевые сплавы серий 3000, 4000, 5000 и 6000 в хороших условиях. Тем не менее, при высоких скоростях сварки серии 6000 может запуститься процесс горячего растрескивания. Использование присадочной проволоки 4047

(или 4043) позволяет избежать процесса горячего растрескивания при лазерной сварке. Однако это может привести к процессу ликвации.

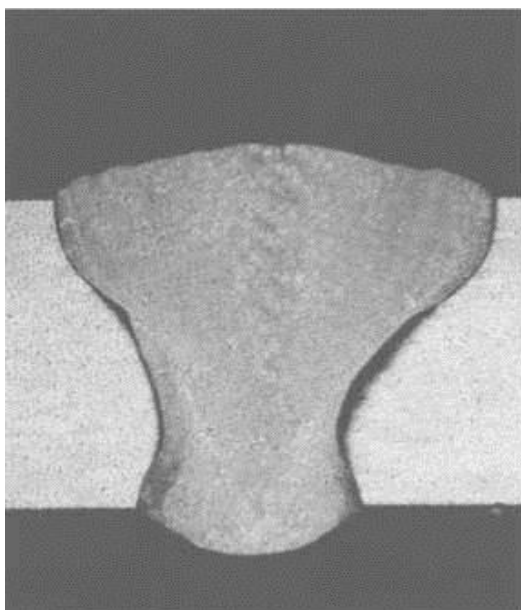


Рисунок 2.29. Лучевая сварка CO_2 -лазером алюминиевого сплава 6013 толщиной 5 мм;
из [CHE 98]

В случае алюминиевых сплавов серии 2000, только сплав 2219 поддается полноценной сварке. Алюминиевый сплав 2024 можно сваривать с осторожностью при низкой скорости сварки.

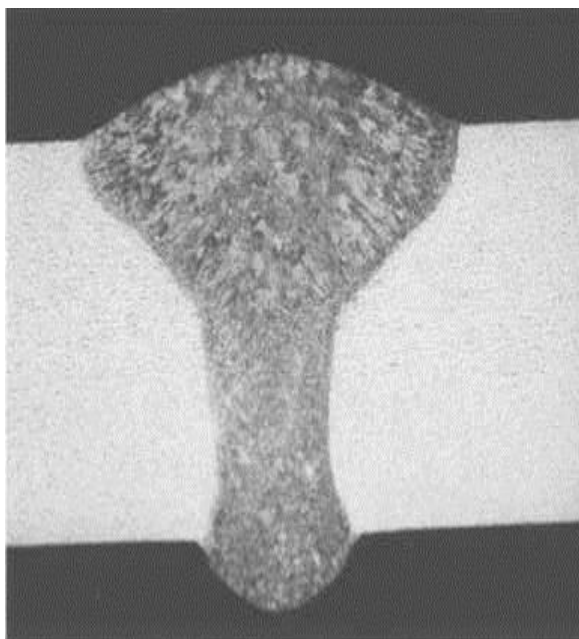


Рисунок 2.30. Лучевая сварка CO_2 -лазером алюминиевого сплава 2219 толщиной 5 мм;
из [CHE 98]

Сплавы серии 7000 необходимо сваривать с осторожностью, поскольку они имеют большую склонность к горячему растрескиванию. Алюминиевый сплав 7020 можно сваривать электронным лучом (см. Рис. 2.31). В этом случае целесообразно учитывать эффект заземления из-за особенностей конструкции деталей.



Рисунок 2.31. 2 мм-вая глубина проникновения в алюминиевом сплаве 7020, сваренном электронным лучом (документ Institut de Soudure)

2.4.3. Сплавы на основе никеля

Технологическая свариваемость

Как и нержавеющие стали, сплавы на основе никеля не создают каких-либо особых проблем с технологической свариваемостью. Однако в случае лазерной сварки необходимо обеспечить достаточный защитный газ посредством газовой тележки.

Металлургическая свариваемость

Сплавы на основе никеля можно разделить на следующие две большие группы:

- сплавы без термической обработки: они обладают хорошей коррозионной стойкостью. Такие сплавы в основном имеют хорошую свариваемость;
- дисперсионно-твердеющие сплавы: они используются благодаря своим хорошим механическим свойствам при высокой температуре. Они чувствительны к горячим растрескиваниям. Необходима термическая обработка после сварки (см. Рис. 2.32).

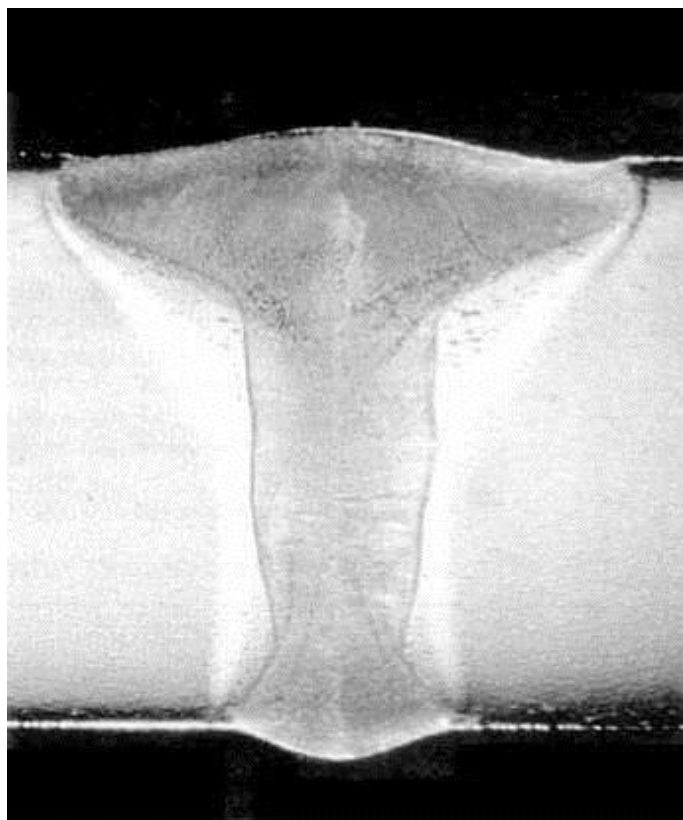


Рисунок 2.32. Лучевая сварка CO_2 -лазером Inconel 718 с толщиной 6 мм (документ Institut de Soudure)

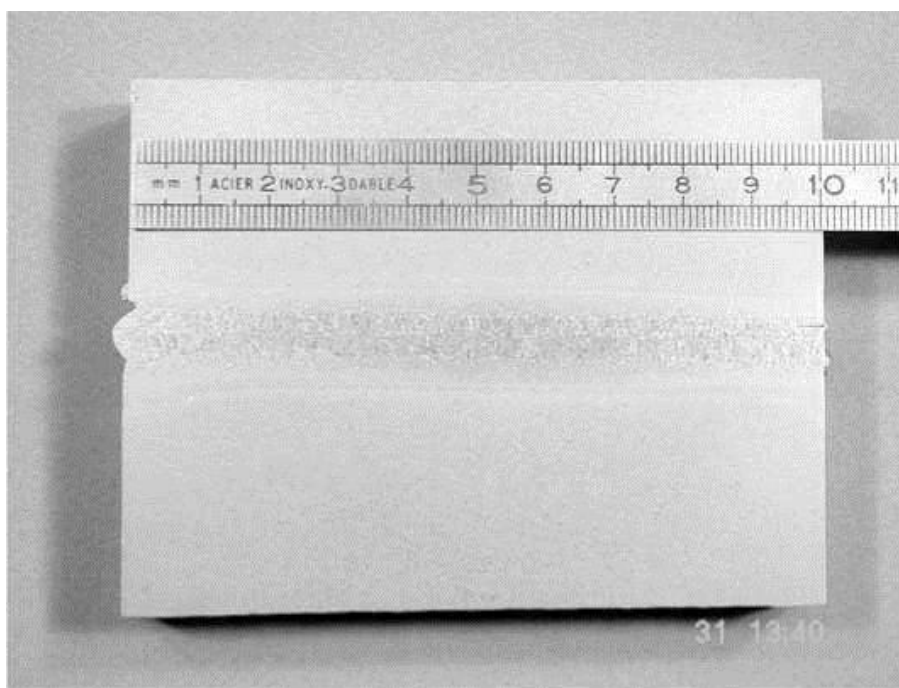


Рисунок 2.33. Электронно-лучевая сварка титанового сплава TA5E с толщиной 100 мм (документ Institut de Soudure)

2.4.4. Сплавы на основе титана

Технологическая свариваемость

Титановые сплавы хорошо реагируют на лазерную или электронно-лучевую сварку. Они имеют хорошую текучесть, которая способствует образованию эстетического сварного шва. Использование избыточных плотностей энергии приведет к таким поверхностным дефектам как подрезы (см. Рис. 2.33).

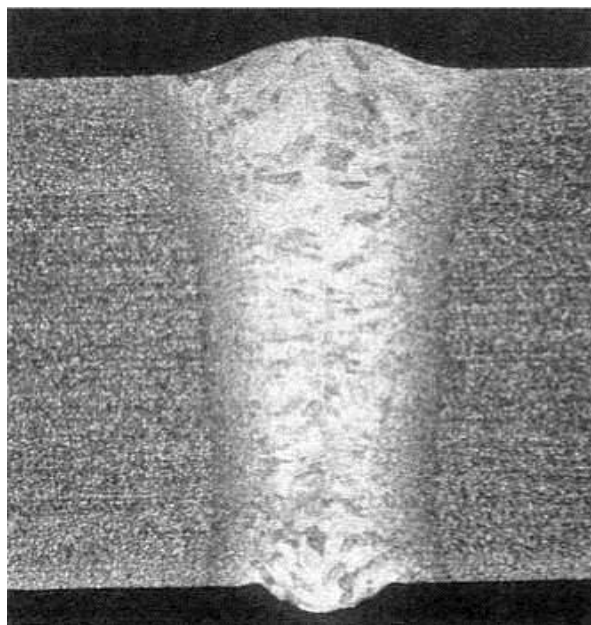


Рисунок 2.34. Лучевая сварка CO_2 -лазером сплава TA6V с толщиной 6 мм (документ Institut de Soudure)

Тем не менее, они имеют большую чувствительность к кислороду и азоту. Во время сварки требуется эффективная газовая защита. Загрязнение кислородом и азотом влечет за собой образование частиц, что увеличивает механическую стойкость в ущерб вязкости металла ослабевая, тем самым, его структуру. По этой причине вакуумный электронный луч является отличной альтернативой.

Металлургическая свариваемость

Некоторые сплавы чувствительны к увеличению зернистости во время сварки. Что касается ферритных нержавеющих сталей, процессы лучевой энергии высокой плотности значительно ограничивают этот процесс. Сварные швы, полученные с помощью лазерных или электронных лучей, обладают лучшей ковкостью чем полученные дуговой сваркой. Используемые в большинстве случаев сплавы не очень чувствительны к горячему растрескиванию.

2.4.5. Сплавы на основе циркония

Технологическая свариваемость

Поведение циркониевых сплавов аналогично сплавам на основе титана. Они могут легко быть загрязнены окружающим воздухом. Окисление начинается при температуре от 400 до

500°C. Поверхностная и задняя газовая защита должна быть обеспечена. Электронный луч является предпочтительным процессом для этих сплавов. Импульсный YAG-лазер можно использовать из-за ограниченного эффекта накаливания.

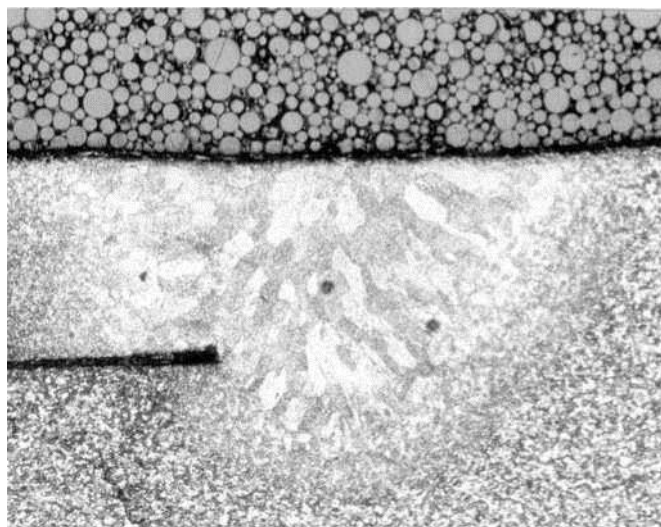


Рисунок 2.35. Импульсная сварка YAG-лазером шва сплава циркония Zr4 с толщиной 1 мм
(документ Institut de Soudure)

Металлургическая свариваемость

Некоторые сплавы широко используются из-за их хорошей металлургической свариваемости. Это также касается циркония при изготовлении корпусов для атомной промышленности. Циркониевые сплавы чувствительны к увеличению зернистости, поэтому они имеют значение при использовании процессов с высокой плотностью энергии.

2.4.6. Сплавы на основе меди

Технологическая свариваемость

Высокая отражательная способность и высокая теплопроводность медных сплавов являются основными недостатками лазерной сварки. Она действует как зеркало. Импульсный луч YAG-лазера, благодаря высокой плотности энергии, можно иногда использовать для сварки очень тонких деталей. С другой стороны, электронный луч имеет много преимуществ. Плотные профили можно сваривать без предварительного нагрева, и получать узкие сварные швы.

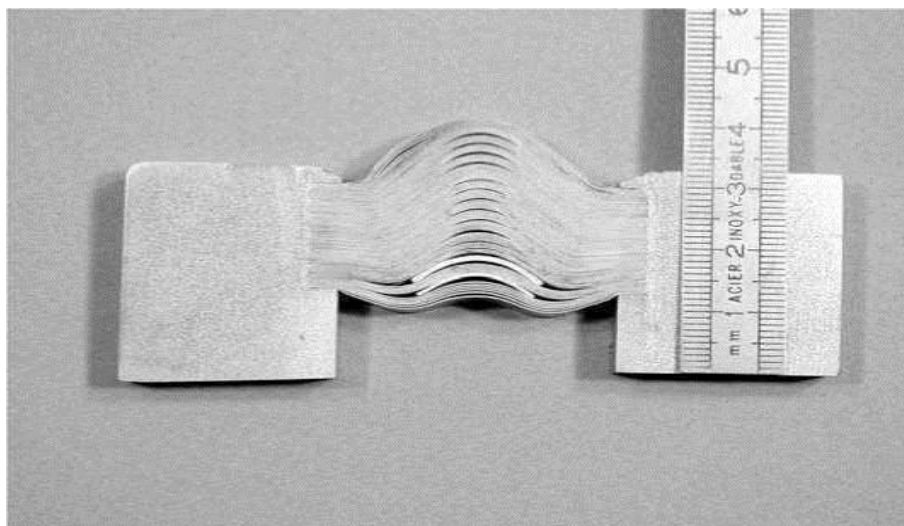


Рисунок 2.36. Электронно-лучевая сварка медной детали (документ Institut de Soudure)

Металлургическая свариваемость

Чистая медь существует в разных уровнях чистоты:

- Cu-a₁: чистота 99,90%, содержит до 0,1% кислорода,
- Cu-b: 99,90%, раскисленный фосфором,
- Cu-c₁: чистота 99,94%,
- Cu-c₂: чистота 99,96%.

Медь должна быть сварена в раскисленных типах Cu-c₁ или Cu-c₂. Независимо от происхождения оксида, когда он формируется в виде межкристаллитных осадков он ослабляет сварной шов и его окружение, что также может привести к образованию пористости.

Основные медные сплавы обладают хорошей металлургической электронно-лучевой свариваемостью. Для некоторых сплавов, таких как медно-алюминиевые, медно-бериллиевые и некоторых медных сплавов возможно явление горячего растрескивания. Абсолютно необходимо избегать наличия свинца (сплавов с улучшенной обрабатываемостью), который увеличивает склонность к горячему растрескиванию.

2.5. Механические свойства сварных соединений

Лучевая сварка с высокой плотностью энергии имеют специфические особенности, такие как однократная сварка, узкая зона расплава и отсутствие присадочной проволоки. Эти особенности влияют на традиционные механические свойства.

Что касается испытания на растяжение, поперечный разрыв образцов на растяжение обычно происходит в основном металле. Только аустенитные стали получают разрыв вблизи линии плавления, но при разрывной нагрузке, очень близкой к нагрузке основного материала. Для материалов со структурным упрочнением разрыв происходит в зоне расплава. Испытания на растяжение в продольном направлении не проводятся из-за сложности отбора образца из-за узости расплавленной зоны.

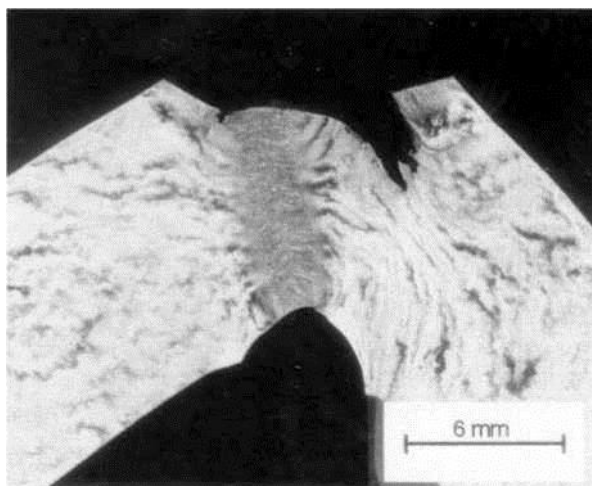


Рисунок 2.37. Лучевая сварка CO_2 -лазером нелегированной стали с толщиной 12 мм
(документ Institut de Soudur)

Испытания на изгиб приводят к хорошим результатам. Однако следует отметить, что в сварных швах, выполненных на легированных сталях, разница твердости, наблюдаемая в области сварного шва, вызывает деформацию во время испытания на поперечный изгиб по обе стороны от расплавленной зоны. Таким образом, более практично проводить испытание на продольный изгиб, поскольку оно приводит к одинаковому деформированию всех зон.

Во время проведения динамических испытаний на прочность часто наблюдаются отклонения в трещинах и отсутствие разрывов в испытательных образцах.

Это, в свою очередь, ставит под вопрос достоверность испытаний. В целях оценки прочности сварных швов были разработаны паллиативные решения. В настоящее время не существует всеобщая согласованность и необходимо проводить дальнейшие работы по поиску новых методов испытаний, проводить которые будет легко и недорого и которые будут давать применимые результаты.

Испытания твердости выявляют разнородные структуры сварных соединений, характеризующиеся более низкими показателями в зоне расплава, чем в зонах термического влияния (ЗТВ). Данное обстоятельство можно разъяснить наличием различных скоростей охлаждения и угар элементов закалки в зоне расплава, таких как у марганца в составе стали. В процессах дуговой сварки испытание твердости зачастую коррелируется с холодным растрескиванием и пороговым критерием максимальной твердости в 350 в числе твердости по Виккерсу. Для лазерных и ЭЛ процессов в большинстве случаев этот порог превышает. Однако, так как сварка выполняется при отсутствии водорода, и поскольку она находится в вакууме или под газовой защитой, риск холодного растрескивания практически равен нулю, за исключением закалённой высоколегированной стали или стали с высоким содержанием углерода.

Из-за наличия сил сдавливающего напряжения, выносливость, как правило, удовлетворительна на поверхностях сварных швов.

2.6. Качество сборок

Качество сварного шва оценивается с точки зрения его соответствия техническим требованиям, предъявляемым к окончательной сборке. Требования могут быть такими как

механическая прочность, водонепроницаемость или устойчивость к коррозии. Качество проверяется в целом с применением испытаний на полной сборке или на образцах, изготовленных при одинаковых условиях эксплуатации, и/или путем высокоточного наблюдения сборки с использованием как неразрушающих, так и разрушающих испытаний.

В следующем разделе мы представим неисчерпывающий список возможных дефектов в сварных швах ЛСВП, наиболее часто используемые методы контроля и основные действующие стандарты.

2.6.1. Дефекты сварных швов

Стандарт NF EN 26520 является «Классификацией дефектов швов сварки расплавлением металлов с пояснениями», который позволяет нумеровать и классифицировать дефекты в соответствии с их геометрией, положением в сварном шве и их происхождения. Процессы ЛСВП, благодаря своим особенностям, приводят к образованию особых дефектов.

Трещины

Горячие растрескивания чаще всего происходят из-за высоких скоростей затвердевания и, в большинстве случаев, из-за отсутствия добавления присадочной проволоки. Они являются обнаруживаемыми или не обнаруживаемыми и имеют небольшие размеры. Их называют горячими растрескиваниями, когда они появляются в конце затвердевания в расплавленной ванне. Существуют междендритные или межкристаллитные трещины, связанные с явлением ликвации. Процесс импульсной сварки YAG-лазером имеет склонность производить такие дефекты в аустенитных нержавеющей сталях, алюминиевых сплавах и некоторых сплавах на никелевой основе.

Растрескивания, известные как *холодные растрескивания*, появляются в конце процесса охлаждения, при температуре около 150°C или ниже. Эти растрескивания появляются в зоне расплава или в зоне термического влияния. Они связаны с мартенситным упрочнением при закалке, водородной хрупкостью и внутренними напряжениями. Нелегированные или низколегированные стали чувствительны к холодному растрескиванию из-за уровня процентного содержания углерода и легирующих элементов. Различные формулы были предложены для определения предела свариваемости для этих сталей. Такие формулы, выведенные для обычных сварочных процессов, учитывают только состав сталей с точки зрения углеродной эквивалентности, но не берут во внимание скорость охлаждения. Данные формулы неприменимы в случае ЛСВП процессов из-за высокой скорости охлаждения, а также из-за того, что они не вводят водород и что усадочные напряжения ограничены. Такое растрескивание встречается реже, чем горячее и бывают довольно небольшими в размере.

Полости

Это объемные дефекты, включающие в себя образование усадочных раковин по причине усадки металла во время затвердевания, которые зачастую появляются в середине зоны расплава или в выемках на конце сварного шва. Образование выемчатой усадки обычно сопровождается микроскопическими образованиями горячего растрескивания. Они часто наблюдаются в местах расширения зоны расплава, в так называемых *наплывах*, что связано с плохим фокусированием лазерного или электронного луча. Они чаще встречаются в очень плотных компонентах, а также когда в сплаве присутствуют высокие уровни примесей, серы и фосфора. Они образуются на одной линии с осью расплавленной зоны.

Полостями являются также поры, образованные заземленным во время затвердевания газом. Они появляются в виде изолированных пор или вдоль зоны сварки, и часто встречаются в сварных швах с частичным проникновением. Они встречаются чаще при сварке плотных компонентов и в случаях плохой очистки (алюминиевые сплавы, титановые сплавы). В швах лазерной и ЭЛ сварки их размер может варьироваться от нескольких десятых долей миллиметра до максимум двух миллиметров, что обусловлено узкой зоной расплава. Они образуются в основном на полпути вниз по шву или в корне шва.

Отсутствие сплавления или проникновения

Отсутствие сплавления – это отсутствие связи между основным металлом и зоной сварки и является плоскостным дефектом. Оно может быть связано с несоответствием между сварным лучом и сварным швом. В случае гетерогенной сборки это связано со значительной разницей в проводимости между материалами, что не легко выявить с помощью неразрушающих испытаний.

Отсутствие проникновения — это отсутствие сплавления между свариваемыми кромками, которое имеет место в корне шва. Оно, в основном, происходит по причине недостаточной мощности луча или из-за ухудшения фокусировки луча.

Дефекты формы

Можно выделить следующие виды дефектов:

– подрезы: в процессах дуговой сварки, они происходят из-за очень локализованного недостатка металла. Они образуют острую линию на поверхности передней или обратной стороны в пределах зоны сварки и основного металла. В ЛСВП процессах подрезы часто возникают из-за выдавливания сварного шва с обеих сторон расплавленной зоны. Они образуются из-за чрезмерной плотности мощности или чрезмерной скорости сварки. Встречаются в основном при сварке титановых сплавов:

– недостаточная толщина: это вызвано коллапсом расплавленного металла в зоне сварки, у которого могут быть следующие различные причины;

- недостаток материала из-за чрезмерного зазора между свариваемыми деталями;

- при сварке очень плотных деталей в плоском положении (пределы: 20 мм для ЭЛ сварки, 15 мм для сварки лазерным лучом);

- чрезмерная плотность мощности;

– смещения: это связано с изменением положения между двумя свариваемыми деталями. Этот сдвиг может привести к отсутствию сплавления в корне шва.

Рельефы (разбрызгивания)

Разбрызгивание металла при сварке может быть сцепленным или не сцепленным. Это может быть вызвано чрезмерной плотностью мощности, наличием органических материалов на поверхности детали, внутри сварного шва или из-за недостаточной газовой защиты. Сварка азотированной или азотонауглеродистой стали может послужить причиной образованию таких сварных рельефов.

2.6.2. Методы контроля качества сварных швов

Для сварных швов ЛСВП HEDB неразрушающие испытания позволяют обнаруживать небольшие дефекты. Скорость сварки требует использование быстрых и недорогих процедур контрольных испытаний. Контроль можно проводить в автономном режиме (визуализация, рентгенография, ультразвук, магнитоскопия, ток Фуко и т. д.) или в режиме оперативного контроля (анализ плазмы, инфракрасная термография, визуально с использованием камеры и т. д.). В массовом производстве автономный контроль не может быть применен ко всем компонентам, поэтому предпочтение отдается оперативному контролю. Зачастую оперативный контроль сопровождается отбором проб. В этом случае к выбору деталей применяется разрушительное испытание.

Разрушающие испытания (испытания по штамповке заземлённых сторон, металлография и т. д.) являются длительными и дорогостоящими. Однако они позволяют выявлять определенные дефекты сварки (растрескивания, отсутствие проникновения или соединения) и не влияют на общее качество сборки.

2.6.3. Стандартизация и аттестация режима работы сварки

Процесс ЭЛ сварка прошел через путь всесторонней стандартизации. Тогда как сварка лазерным лучом, будучи более новым процессом, все еще находится в процессе стандартизации. Оба процесса с диапазонами различной толщины на сегодня имеют общие основные сварочные стандарты. Основные действующие стандарты сварки выглядят следующим образом:

- EN ISO 13.919-1: Сварка. Соединения, сваренные лазерным и электронным лучами. Руководство по уровням качества дефектов - Часть 1: Сталь;
- EN ISO 13.919-2: Сварка. Соединения, сваренные лазерным и электронным лучами. Руководство по уровням качества дефектов - Часть 2. Алюминиевые сплавы;
- EN ISO 15.609-3: Описание процедуры сварки электронным лучом;
- EN ISO 15.609-4: Описание процедуры сварки лазерным лучом;
- EN ISO 15.614-11: Испытание на выполнимость сварного шва для электронного луча и лазерного луча.

2.7. Экономические факторы

Основным препятствием для широкомасштабного развития СЛВП процессов являются эксплуатационные и капитальные затраты на это оборудование. Потенциальный инвестор должен быть уверен в техническом преимуществе процесса, но в особенности в его экономической выгоде. Трудно говорить о затратах для быстро развивающихся процессов. Мы ограничимся рассмотрением лазерных компонентов с их эксплуатационными и капитальными затратами и предоставим читателю только основные элементы любого расчета [SAY 99].

2.7.1. Стоимость электронно-лучевого станка

Стоимость машины будет варьироваться в зависимости от следующих факторов:

- выбранная технология: вакуум или не вакуум,
- напряжение ускорения электронов,
- мощность пушки,
- объем корпуса станка,
- системы перемещения деталей и пушки.

В этих условиях сложно оценить стоимость. Однако, для получения некоторого представления, станок, оснащенный пушкой в 30 кВт и 1 м³ -ым корпусом с накачкой вторичного вакуума, будет стоить около 600 000 евро.

Что касается эксплуатационных расходов, то расходуемыми затратами в основном являются электричество, катоды и нити накала, срок службы которых варьируется в зависимости от использования, но может достигать нескольких десятков часов. Основные эксплуатационные расходы заключаются в поддержании чистоты корпуса и пушки станка, что очень существенно влияет на производительность оборудования (чистый корпус приводит к сокращению времени накачки) и на качество сварного шва (чистая пушка снижает риск прерывания луча из-за отсутствия изоляции).

2.7.2. Стоимость станка с лазерным лучом

Почасовая ставка использования лазерной системы в основном состоит из оплаты капитальных затрат, расходных материалов и затрат на техническое обслуживание и оплату труда. Наиболее значительная часть общей почасовой ставки – это окупаемость капитальных вложений.

Обесценивание

Компании, как правило, предусматривают все более короткие периоды амортизации (менее 3 лет). В общих инвестиционных затратах необходимо учитывать расходы на лазерный источник, робот, периферийные системы, инструменты, установку и компоновку системы.

Расходные материалы

Зависят от выбранной лазерной системы.

Система СО₂-лазера

Газ «генерирующий лазер»: потребление зависит от типа источника и мощности лазера. Для лазеров с быстрым осевым потоком выходная мощность газа низкая, к примеру около 30 л/час в случае с гелием. Лазерные источники, известные как SLAB, обладают самым низким потреблением газа.

Защитный газ: скорость потока газа составляет от 15 до 30 л/мин. Самый дорогой газ – это гелий, который также является самым часто используемым газом из-за его высокого ионизирующего свойства.

Электричество: СО₂-лазеры имеют электрический КПД от 5 до 10%, стоимость, при этом, зависит от используемой мощности. Важно учитывать расход всей установки, включая кулер.

Техническое обслуживание: оценивается в 5% от годовых капитальных вложений.

Оптика: стоимость оптики может значительно возрасти при плохо спроектированном оптическом пути, который зависит от количества зеркал в оптическом пути, типа зеркал и защитных систем, используемых в фокусирующей головке. Она также зависит от процедуры (чистые детали, наличие окислов или масел) и рабочей среды.

Система YAG-лазера

Лампы: стоимость зависит от количества используемых ламп и срока их службы. Лампы в непрерывных YAG-лазерах имеют средний срок службы 1000 часов. Срок службы ламп зависит от их использования и может достигать 2000 часов.

Для импульсного YAG-лазера продолжительность жизни указывается в виде количества импульсов, который может достигать нескольких миллионов импульсов.

Защитный газ: аргон является наиболее удобным в использовании, чем в случае CO₂-лазера, с сопоставим уровнями расхода газа.

Электричество: YAG-лазер с ламповой накачкой имеет более низкий электрический КПД, чем CO₂-лазер, примерно от 1 до 3%. YAG-лазер с диодной накачкой обладает намного лучшим КПД - около 10%. Потребление электроэнергии зависит, конечно, от мощности лазера.

Волоконно-оптические: они не должны ухудшаться при нормальном использовании. Однако необходимо предусмотреть их возможную замену или ремонт.

Фокусирующая оптика: они очень редко заменяются благодаря защищенности их стекла. Они дешевле, чем линзы из цинка, селена или чем зеркала.

Защитное стекло: необходимо предусмотреть регулярную замену защитного стекла с частотой в зависимости от интенсивности применения.

В настоящее время выбор лазерной системы осуществляется в следующих четырех этапах:

1) выбор импульсного или непрерывного режима: этот выбор определяется типом применения (свариваемый материал, толщина, деформация и т. д.) и уровнем требуемой рабочей скорости;

2) выбор типа лазера (YAG или CO₂): гибкость (волокно или зеркала), толщина сварки (доступная мощность), материалы (длина волны);

3) YAG-лазер с ламповой или диодной накачкой: данный вопрос часто поднимается из-за недавней разработки YAG-лазеров с диодной накачкой. Преимуществом этого лазера неопределенно является высокое качество его лучей. Однако необходимо проводить сравнение между эксплуатационными расходами обеих систем. YAG-лазер с диодной накачкой не требует замены ламп, а его электрическая КПД высока.

Однако высокая стоимость лазерных диодов делает его капитальные затраты намного выше, чем у обычного YAG-лазера, что значительно увеличивает стоимость его использования. Ожидается снижение стоимости лазерных диодов, и это должно изменить данную ситуацию;

4) выбор механизированной системы: выбор многосуставного робота или декартового робота зависит от применения и выбора типа лазера (YAG или CO₂). Следует отметить, что капитальные затраты на декартового робота, безусловно, выше, чем у многосуставного робота.

2.8. Безопасность [НЕС 00]

Использование лазеров в промышленности началось сравнительно недавно, и технология развивается быстро, что объясняет недостатки в законодательном регулировании, как в Европе, так и во Франции. Основным справочным текстом является стандарт NF EN 60.825-1 «Безопасность лазерного оборудования. Часть 1. Классификация оборудования, требования и руководство пользователя». Другие связанные стандарты, которые охватывают определенные вопросы, следующие: стандарт NF EN 12.626, декабрь 1997 г. «Безопасность станков. Лазерные станки. Правила безопасности» и стандарты NF EN 207 «Лазерные защитные очки» и NF EN 208 «Защитные очки для регулировки лазера», декабрь 1998 г.

Основной областью риска при использовании лазера являются глаза. Они проистекают из физических особенностей лазера. Определенные излучения, в соответствии с длинами их волн, передаются на сетчатку и фокусируются хрусталиком. Полученная плотность мощности на сетчатке может быть в 5,10⁶ раз выше, чем на роговице. При том, что сетчатка особенно уязвима к излучению видимого или ближнего инфракрасного спектра (от 0,4 до 1,4 мкм). И в случае если получаемая сетчаткой энергия, имеет чрезмерную плотность, это может привести к необратимому повреждению. Стандарт NF EN 60.825 классифицирует различные лазеры в соответствии с их риском.

Для аппаратов ЭЛ сварки, помимо рисков, связанных с наличием высокого напряжения, которое контролируется с помощью мер безопасности, предпринимаемых производителем, основным риском является излучение рентгеновских лучей, как упоминалось ранее. Опять же, меры предосторожности, принятые изготовителем, должны быть достаточными и являются предметом особого внимания во время поставки машины. Таким образом, пользователь обязан не пытаться модифицировать оборудование, в частности его корпус, без проверки правильности функционирования биологических экранов.

2.9. Примеры промышленного применения

2.9.1. Электронно-лучевая сварка

Промышленные применения ЭЛ-сварки в настоящее время хорошо известны и охватывают все отрасли промышленности, от автомобильной (компоненты трансмиссии) и авиационной (производство реактивных двигателей) до производства различных деталей или датчиков (Рис. 2.38-2.40).

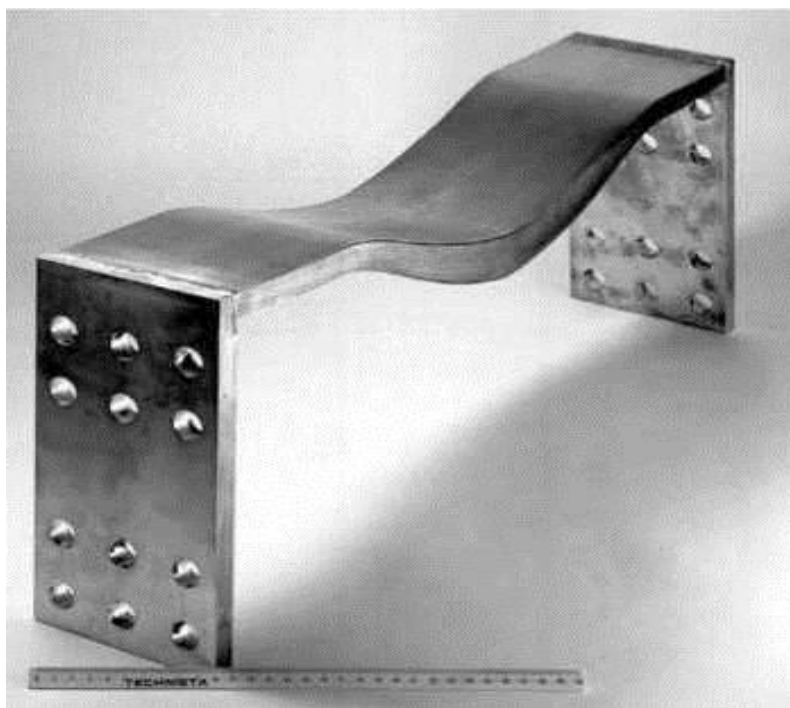


Рисунок 2.38. Электрическое медное соединение (документ *Techméta*)

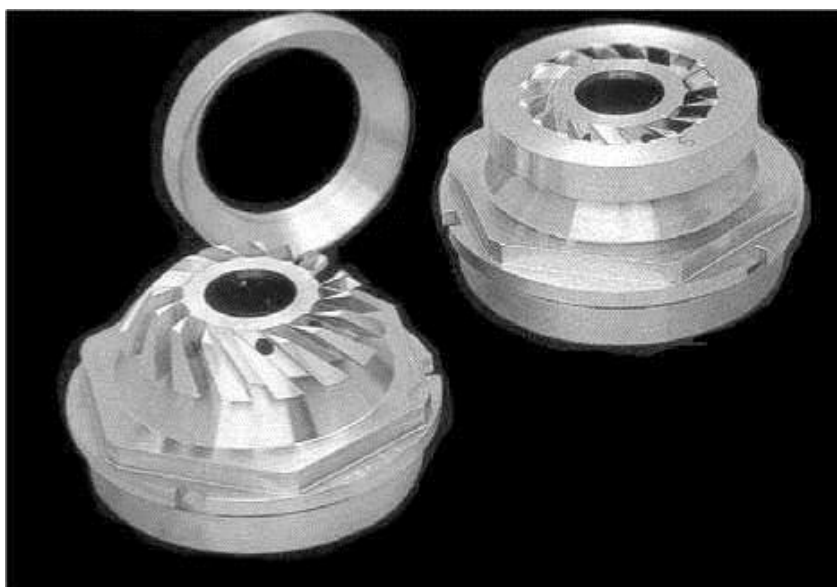


Рисунок 2.39. Турбина из нержавеющей стали

2.9.2. Лазерная сварка

В следующей таблице перечислены некоторые известные промышленные применения.

Приложение	Промышленность	Тип лазера	Материалы	Толщина
Сварка заготовок	Автопром	CO ₂	Нелегированные стали с покрытием или без	0,7 - 2 мм
Кузова автомобиля	Автопром	Непрерывный YAG	Нелегированные стали с покрытием	1,2 мм
Шестерни коробки передач	Автопром	CO ₂	Нелегированные стали	2 - 5 мм
Трубчатые радиаторы	Оборудование	Импульсный YAG	Нелегированные стали	1 мм
Трубопроводы	Авиация	CO ₂	Титановый сплав	1 мм
Профили усиления	Авиация	Непрерывный YAG или CO ₂	Алюминиевый сплав	1 - 4 мм
Пластинчатый теплообменник	Пищевая	CO ₂	Нержавеющая сталь	до 2 мм
Обшивка корпуса	Электроника	Импульсный YAG	Сплавы алюминия, титана, никеля	1 мм
Масляные фильтры	Автопром	Непрерывный YAG	Алюминиевый сплав	1 мм
Кардиостимуляторы	Медицина	Импульсный YAG	Титановые сплавы	0,5 мм
Трубы	Металлургия	CO ₂	Нелегированные или слаболегированные	5 - 16 мм
Усилитель руля	Автопром	Непрерывный YAG	Нелегированные стали	2 мм
Пускатель подушек безопасности	Автопром	Импульсный YAG, непрерывный YAG или CO ₂	Алюминиевый сплав, нержавеющая сталь	0,5 мм

2.10. Перспективы дальнейшего развития

Эти два процесса нередко преподносятся в качестве противоположных друг другу. Это не является таковым, так как каждый процесс имеет определенные преимущества, делающие его более приспособленным к конкретному промышленному применению.

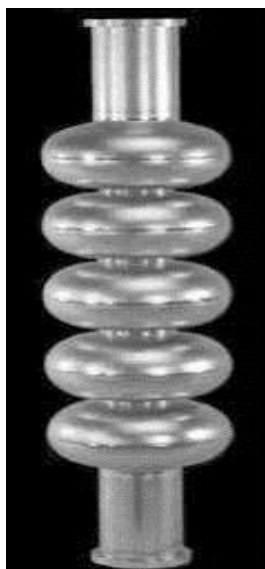


Рисунок 2.40. *Сверхпроводящий ниобиевый отражатель (документ Techméta)*

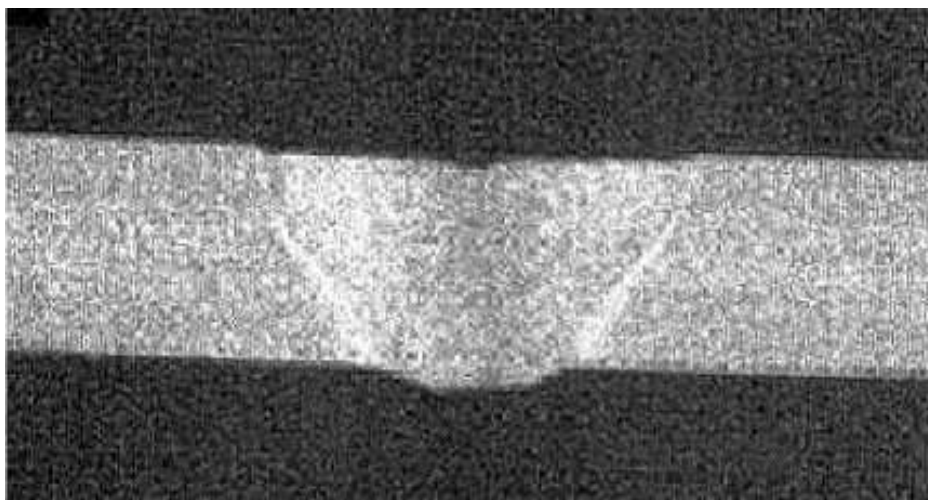


Рисунок 2.41. *Сварка автомобильных заготовок алюминиевым сплавом, с толщиной 1,25 мм, потребляемой мощностью 7,5 кВт, скоростью сварки 18 м*мин⁻¹ (документ igm Steigerwald Strahltechnik)*

Электронно-лучевая сварка достигла своего апогея в 1970-х годах. Области применения были в ядерной, авиационной и автомобильной промышленности. Основным ее недостатком является вакуумный корпус. Тем не менее, в настоящее время наблюдается возобновление интереса к разработке новых не вакуумных сварочных аппаратов, предназначенных для автомобильной промышленности (см. Рис. 2.41).

Однако следует отметить, что в течение нескольких лет появление достаточно мощных лазерных источников привело, в некоторых случаях, к замене ЭЛ сварки лазерной сваркой из-за повышенной производительности, связанной с отсутствием накачки. Основным инициатором развития процессов лазерной сварки стала автомобильная промышленность. Так, была разработана сварка тонкого листа, последующая сварку механических компонентов (шестерни коробки передач). Металлурги стали изготавливать сварные заготовки по индивидуальному заказу, и сегодня производители вкладывают средства в технологию точечной сварки корпусов на непрерывной производственной линии.

Аппараты электронно-лучевой сварки больше не являются предметом значительных разработок, в то время как лазерные системы быстро развиваются. Источники CO₂-лазера более компактны, а лучи более высокого качества. Прилагаются значительные усилия в работе по сокращению расходных материалов. Наиболее значимые разработки связаны с источниками YAG-лазера и диодными лазерами.

Мощность непрерывных источников неодимового YAG-лазера с цилиндрическими прутами технически ограничена 5 кВт, чтобы получить качество луча, совместимое с переносом по волоконной оптике. Появление систем с лазерной диодной накачкой позволяет увеличить мощность с эквивалентным качеством луча. Продолжающиеся разработки в области непрерывных дисковых систем YAG-лазера приведут к дальнейшему улучшению качества луча и, следовательно, к увеличению мощности этих источников.

Лазеры, использующие лазерные диоды, также являются перспективными из-за своей высокой мощности и низкой длины волны, использование в сварке которых связано с улучшением фокусирующего луча.

Среди проектов по разработкам, не следует забывать о периферийных системах, которые связаны с системами управления сварными соединениями и системами оперативного контроля.

Для повышения производительности процесса лазерной сварки проводятся исследования по объединению лазерного луча с электрической дугой. Данный новый вид процесса сварки называется *гибридной лазерной сваркой*, с многочисленными преимуществами данного процесса, такими как:

- увеличение допустимого зазора между деталями,
- увеличение скорости сварки при эквивалентной мощности лазера,
- улучшение взаимодействия лазер-материал (алюминиевые сплавы),
- улучшение металлургии сварки за счет снижения скорости затвердевания, скорости охлаждения и добавления присадочной проволоки (снижение чувствительности к горячему растрескиванию).

Данный процесс выглядит многообещающим и должен расширить диапазон применения лазера.

2.11. Список использованной литературы

- [BAR 98] BAROUILLET C., CHEHAÏBOU A., “Soudage par faisceau laser CO₂ d’un acier inoxydable martensitique à durcissement direct – Influence de l’azote comme gaz de protection”, 6th CISFFEL, vol. 1, 1998.
- [BOI 98] BOILLOT J.P., “La vision laser à haute vitesse, un atout indispensable pour...”, 6th CISFFEL, vol. 1, 1998.
- [CHE 93] CHEHAÏBOU A., GOUSSAIN J.-C., BAROUILLET C., “Etude de la sensibilité à la fissuration à chaud des aciers inoxydables austénitiques soudé par faisceau laser”, 5th CISFFEL, vol. 1, 1993.
- [CHE 98] CHEHAÏBOU A., GOUSSAIN J.-C., KNISPEL D., “Soudage par faisceau laser CO₂ de différentes nuances d’alliages d’aluminium”, 6th CISFFEL, vol. 1, 1998.

- [COL 97] COLLECTIF, Etude du soudage par faisceau laser des aciers de mécanicien dans le cas d'un emboîtement – Investigation pour cerner la limite des nuances soudables, Rapport Institut de soudure no. 31729 (study financed by Cetim), November 1997.
- [DEL 56] DELONG W., OSTROM G., SZUMACHOWSKI E., "Measurement and calculation of ferrite in stainless steel weld metal", *Welding Journal*, vol. 35, no. 11, 1956.
- [FRI 98] FRITZ D., LAZARENKO O.K., IRIÉ H., ABE N., OHMINE M., "Forty years of electron beam welding and material processing", 6th CISFFEL, vol. 1, 1998
- [HAV 96] HAVRILLA D., Laser welding design and process fundamentals and troubleshooting guideline, Document Rofin Sinar, May 1990, revised 19 April 1996.
- [HEE 00] HEE G., MEREAU P., DORNIER G., Les lasers, Document INRS ED 5009, 2000.
- [HER 86] HERZIGER G., "The influence of laser-induced plasma on laser materials processing", in David Belforte and Morris Levitt (eds.), *The Industrial Laser Handbook*, Penwell, 1986.
- [MAI 84] MAILLET H., *Le Laser – Principes et Techniques d'Application*, Lavoisier, 1984.
- [MUR 94] MURRY G., "Soudage et soudabilité métallurgique des métaux", *Techniques de l'ingénieur*, M 715, 1994.
- [POW 00] POWERS D., SCHUBERT G., "Electron beam welding: the useful tool for the automotive industry", *Welding Journal*, p. 35-38, February 2000.
- [ROE 86] ROESSLER D.M., "An introduction to the laser processing of materials", in David Belforte and Morris Levitt (eds.), *The Industrial Laser Handbook*, Penwell, 1986.
- [RYK 74] RYKALINE N. N., Les sources d'énergie utilisées en soudage, Assemblée annuelle de l'Institut international de la soudure, Doc. IIS/IIW-465-74, Budapest, 1974.
- [SAY 99] SAYEGH G., "Eléments à considérer dans l'évaluation économique d'un investissement laser", *LaserAP3*, Sarlat, 1999.
- [SCH 49] SCHAEFFLER A.L., "Constitution diagram for stainless steel weld metal", *Metal Progress*, vol. 56, no. 11, p. 680, 1949.
- [SUU 79] SUUTALA N., KUJANPAA V., TALAKO T., MOISO T., "Correlation between solidification cracking and microstructure in austenitic-ferritic stainless-steel welds", *Welding Research Int.*, vol. 2, p. 55, 1979.

Термические, металлургические и механические явления в зоне термического воздействия

Как правило, сварочные операции существенно изменяют металлургические структуры и локальные свойства соединяемых деталей. В некоторых крайних случаях они могут быть причиной дефектов, таких как трещины, пористость или локального повышения хрупкости. Следовательно, важно четко понимать влияние различных факторов, таких как циклы термической сварки и химический состав собираемых деталей.

В этой главе мы последовательно рассмотрим:

- особые термические явления, связанные со сварочными операциями;
- микроструктурные изменения и основные металлургические последствия, связанные с этими термическими явлениями;
- изменения механических свойств в зоне, прилегающей к расплавленному металлу, то есть в зоне *термического воздействия* (ЗТВ).

3.1. Термальные аспекты сварки

Несмотря на их большое разнообразие, сварочные процессы имеют общую характеристику – локализованная концентрация тепла.

Таким образом, сварочная операция может быть описана как короткий проход небольшого количества вещества при очень высокой температуре с последующим охлаждением, в первую очередь, с проводимостью в смежных областях: более холодный прилегающий металл, зажимные инструменты, электроды (в случае точечной сварки). Таким образом, термический цикл в любой точке, близкой к зоне сварки, представляет собой тепловотвод, связанный со сваркой, и, таким образом, зависит от переменных, связанных с процессом (количество эффективного подводимого тепла), от материала (теплопроводность) и конфигурации сборки. Этот локальный нагрев может быть осуществлен без смещения источника тепла (в случае контактной сварки или термитной сварки) или смещения источника относительно детали (как правило, при дуговой и лазерной сварке).

Во втором случае, если рассматривается постоянная скорость перемещения, могут быть определены тепловые характеристики *квазистационарного* режима, где перераспределение температуры вокруг источника принимает устойчивую форму по отношению ко времени.

[ROS 46] еще в 1935 году, а доработано Рыкалиным [RYK 61], Клайдом и Адамсом [CLY 58]. Основные положения следующие: если представить себе конкретный источник тепла q , движущийся с постоянной скоростью вдоль оси x , дифференциальное уравнение тепла записывается в виде ряда координат (x, y, z) (см. Рисунок 3.1):

$$\alpha \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad [3.1]$$

где:

– θ : температура;

– t : время;

– α : коэффициент теплопроводности ($\text{м}^2 \text{сек}^{-1}$) материала $= \lambda / \rho C$, где:

- λ : теплопроводность ($\text{Дж м}^{-1} \text{°K}^{-1} \text{сек}^{-1}$),

- ρC : теплотворность по объему ($\text{Дж м}^{-3} \text{°K}^{-1}$).

Система мобильных координат может быть определена относительно источника путем постановки: $\xi = x - vt$.

В стационарном режиме $\frac{\partial \theta}{\partial t} = 0$ предыдущее уравнение становится:

$$\alpha \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) = -v \left(\frac{\partial \theta}{\partial \xi} \right) \quad [3.2]$$

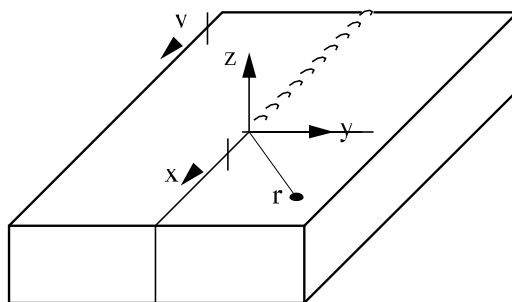


Рисунок 3.1. Определение системы координат, в которой источник тепла движется с постоянной скоростью v

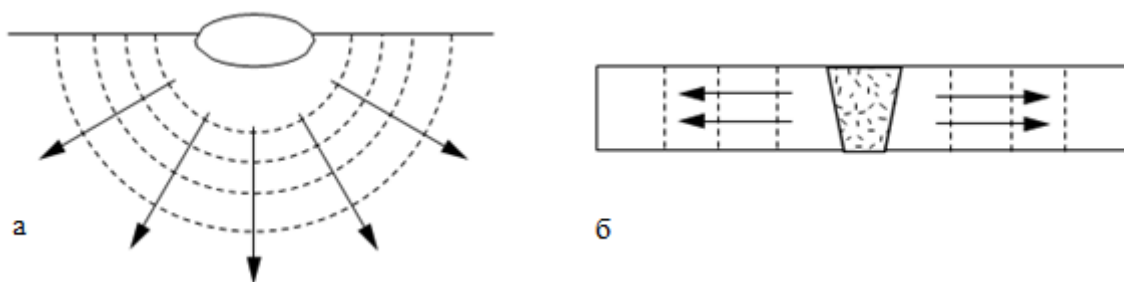


Рисунок 3.2. Схематический поток тепла при сварке «толстых» (а) или «тонких» изделий (б)

Уравнение [3.2] можно решить, рассмотрев две разные ситуации (см. Рис. 3.2).

В случае сварки «толстых»¹ изделий теплоотвод происходит в основном радиально по отношению к источнику. В любой момент изменение температуры в зависимости от времени и расстояния выражается:

¹ Понятия *тонких* или *толстых* изделий будут определены более точно позже.

где:

$$\theta = \theta_0 + \frac{q/v}{2\pi\lambda t} e^{-\frac{r^2}{4\alpha t}} \quad [3.3]$$

- r : точка сопротивления, рассматриваемая по отношению к источнику тепла ($r = \sqrt{(\xi^2 + y^2 + z^2)}$);
- q : термический вклад (Дж);
- v : скорость перемещения источника (м/сек). Член уравнения q/v обозначает линейную энергию или количество тепла, действующего на единицу длины сварного соединения;
- θ_0 : начальная температура.

В случае сварки тонких изделий теплопроводность по глубине незначительная. Таким образом, изотермы перпендикулярны поверхности деталей. Упрощенное решение уравнения [3.2] записывается:

$$\theta = \theta_0 + \frac{q/v}{d(4\pi\lambda\rho Ct)^{1/2}} e^{-\frac{r^2}{4\alpha t}} \quad [3.4]$$

где d обозначает толщину свариваемых деталей.

Портевин и Сефериан [POR 34] выдвинули графическое изображение, термическое тело, для представления температур сварки в пространственных отношениях, выраженных в уравнениях, таких как [3.3] или [3.4]. На Рисунке 3.3 показан пример такого схематического представления: ось Ox указывает направление сварки (x указывает расстояние, а также время), ось Oy - расстояние до оси сварного соединения, а ось Oz - температура.

При заданном расстоянии от оси (фиксированный y_1) термический цикл $\theta(t)$ описывается пересечением термического тела с плоскостью, параллельной (xOz) в y_1 . Таким же образом, при заданной температуре θ_1 форма изотермы описывается пересечением термического твердого тела с плоскостью, параллельной (xOy) в θ_1 . Именно с помощью этого последнего представления можно оценить различия в распределении температуры при сварке тонких или толстых изделий (см. Рис. 3.4). Таким образом, можно наблюдать, что сеть изотерм намного плотнее перед прохождением источника тепла, что приводит к тому, что повышение температуры (фаза нагрева) происходит быстрее, чем снижение (фаза охлаждения).

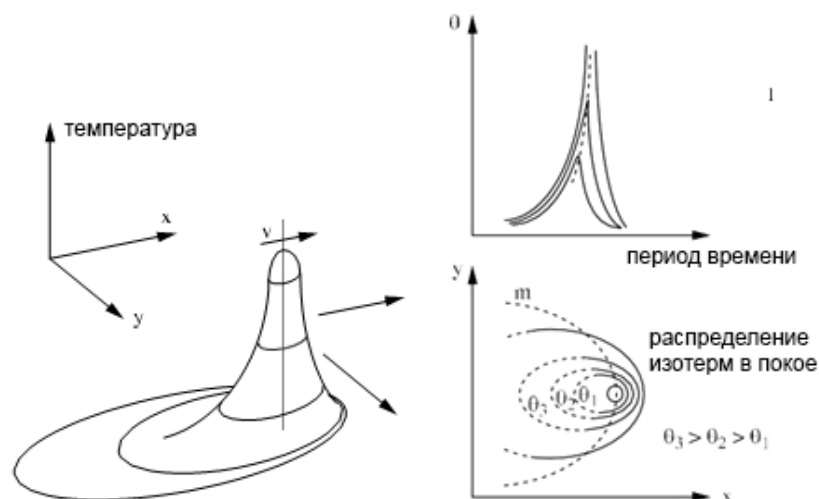


Рисунок 3.3. Трехмерное моделирование распределения температуры сварки при мобильном источнике; из [EAS 83]

Из-за конечной скорости распространения тепла не все волокна, параллельные оси сварки, достигают одновременно предельной температуры. График точек, соответствующих этому максимуму, представляет собой кривую (m). По отношению к направлению смещения источника тепла все точки выше этой кривой находятся в фазе нагрева, а внутри - в фазе охлаждения. Скорости охлаждения и нагрева соответственно выше, поскольку линейная энергия (q/v) слабее или изделия толще, а проводимость больше.

При сварке тонких изделий температура распределяется больше в продольном и поперечном направлении, по сравнению с материалами большей толщины. Разница проистекает из возможности, в этом последнем случае, рассеяния тепла по всей его глубине.

По сравнению с материалами с более низкой проводимостью (например, аустенитная нержавеющая сталь, $\lambda \approx 0,02 \text{ Вт} \cdot \text{мм}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$) сварка такого материала, как алюминий ($\lambda \approx 0,23 \text{ Вт} \cdot \text{мм}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$), приводит к расширенному изотермическому распределению, хотя и менее вытянутому в продольном направлении смещения источника.

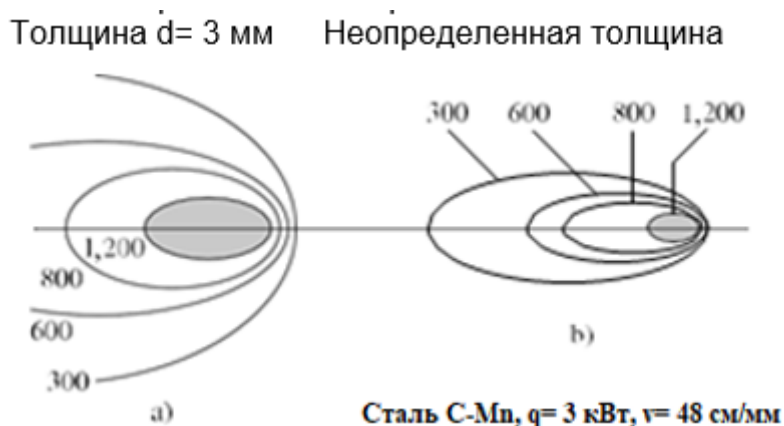


Рисунок 3.4. Пример распределения температуры при сварке (а) тонкой или (б) толстой листовой стали, собираемой в одинаковых условиях; из [EAS 85]

На этом этапе мы должны помнить, что представленные аналитические расчеты основаны на многих предположениях (удельный источник тепла, термические свойства, не зависящие от температуры, игнорирование скрытого тепла из-за фазовых превращений и потерь тепла в результате конвекции или излучения и т.д.). Несмотря на то, что новые цифровые методы

(см., Напр., [GRO 94, KOV 86, WEI 95, ZAC 93]) позволяют учитывать широкий спектр параметров, опыт показывает, что этот упрощенный подход позволяет решать подавляющее большинство задач с удовлетворительной точностью.

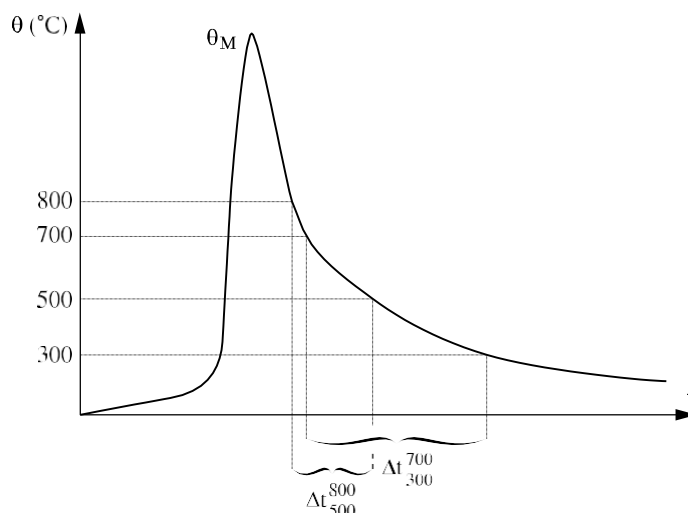


Рисунок 3.5. Схематическое изображение термического цикла в ЗТВ. Определение параметров θ_M , Δt_{300}^{700} , Δt_{500}^{800}

Теперь мы пересмотрим термический цикл $\theta(t)$, применимый в любой точке ЗТВ. Независимо от типа сварочного процесса (стационарный или мобильный), он обычно охватывается (см. Рис. 3.5):

- очень быстрая фаза нагрева, средняя скорость которой обычно составляет около 10^2 °C/сек (дуговая сварка), и поднимается до 10^4 °C/с для процессов HDE, таких как лазерная сварка [DEV 89]
- проход при предельной температуре θ_M . В целом, продолжительность при этой температуре очень короткая, и чем больше уменьшается, тем выше θ_M ;
- более-менее быстрая фаза охлаждения. Для упрощения, мы обычно характеризуем интенсивность этого охлаждения временем, проходящим между двумя заданными температурами:
 - либо между 800 и 500 °C, тогда параметр охлаждения
 - или между 700 и 300 °C. Взаимосвязь между этим параметром и предыдущим обычно находится между 2 и 4.

Выбор этих двух критериев был обусловлен, в частности, тем фактом, что большинство металлургических превращений происходят в этих двух температурных диапазонах в случае марганцево-углеродистых сталей.

Опыт на самом деле показывает, что конечная металлургическая структура в любой точке ЗТВ почти полностью зависит от предельной температуры θ_M , достигнутой в этой точке, и от параметра охлаждения, определенного Δt_{500}^{800} . Некоторые термические аспекты, касающиеся этих двух параметров, теперь будут более полно раскрыты.

3.1.1. Предельная температура в ЗТВ

Было видно, что выражения типа [3.3] и [3.4] описывают изменение температуры в зависимости от времени в соответствующих случаях сварки толстых или тонких изделий. Предельная температура достигается в момент времени t_M , так что:

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right)_{t_M} = 0$$

Более того, чтобы избежать сингулярности ($\theta_M \rightarrow \infty$), когда ($r \rightarrow 0$), накладывается ограничивающее условие: $\theta_M = \theta_f$, точка плавления, когда $r=R$, радиус наплавки расплавленного металла.

Затем мы получаем следующие выражения:

- предельная температура, достигаемая при сварке толстого листа (двумерный поток тепла в участке, перпендикулярном направлению сварки):

$$\frac{1}{\theta_M - \theta_0} = \frac{\pi \epsilon \rho C (r^2 - R^2)}{2 q/v} + \frac{1}{\theta_f - \theta_0} \quad [3.5]$$

- предельная температура, достигаемая при сварке тонких листов (одномерный поток тепла в секции, перпендикулярной направлению сварки):

$$\frac{1}{\theta_M - \theta_0} = \frac{\sqrt{2\pi \epsilon \rho C} dr}{q/v} + \frac{1}{\theta_f - \theta_0} \quad [3.6]$$

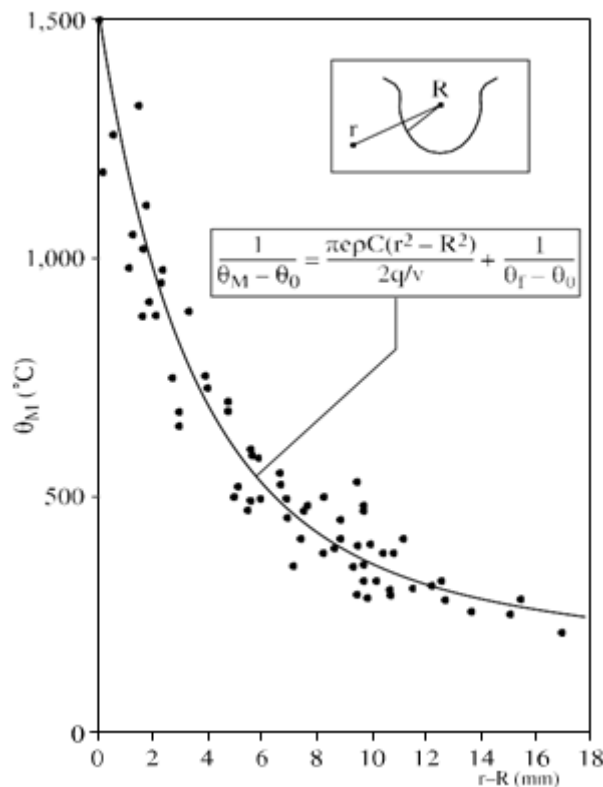


Рисунок 3.6. Эволюция пиковой температуры в зависимости от расстояния до линии оплавления. Сравнение аналитически рассчитанных температур и температур, полученных в ходе экспериментов (дуговая сварка под флюсом); от [DEV 87]

Таким образом, предельная температура в ЗТВ меняется приблизительно обратно пропорционально расстоянию r до линии оплавления (то есть в тонких материалах) или ее

квадрату (то есть в толстых материалах). В случае плит предельно достижимая температура не зависит от толщины изделия.

Несмотря на свою простоту, эти выражения обычно дают хорошее представление о предельном изменении температуры в ЗТВ, о чем свидетельствует Рисунок 3.6. Здесь представлено сравнение экспериментальных данных, зарегистрированных термопарами термических циклов в ЗТВ, с результатами аналитического расчета (сварка толстых изделий в представленном здесь случае).

3.1.2. Параметр охлаждения в ЗТВ

При предельной температуре скорость охлаждения, определяемая параметром Δt_{500}^{800} является наиболее значимым определяющим фактором для металлургической структуры ЗТВ. Выражения [3.3] и [3.4] позволяют рассчитать:

– параметр охлаждения, связанный со сваркой тонких листов:

$$\Delta t_{500}^{800} = \frac{(q / vd)^2}{4 \pi \lambda \rho C} \left[\frac{1}{(500 - \theta_0)^2} - \frac{1}{(800 - \theta_0)^2} \right] \quad [3.7]$$

(температуры указаны в °C);

– параметр охлаждения, связанный со сваркой толстых листов:

$$\Delta t_{500}^{800} = \frac{q / v}{2 \pi \lambda} \left[\frac{1}{(500 - \theta_0)^2} - \frac{1}{(800 - \theta_0)^2} \right] \quad [3.8]$$

Показания термических циклов, взятых для сварных соединений [DEF 75, MUR 67], показывают, что параметр охлаждения очень мало изменяется в пределах одного сварного соединения. Таким образом, можно сказать, что различные зоны наплавка могут характеризоваться одним значением параметра охлаждения.

Таким образом, продолжающаяся эволюция микроструктуры зависит только от предельной температуры, достигнутой локально, причем все точки подвергаются практически одинаковой скорости охлаждения.

Остается более точно связать параметр охлаждения с условиями сварки: если сварные соединения производятся, начиная с изделий различной толщины, при варьировании линейной энергии сварки, то представлено изменение параметра охлаждения, связанного с этими условиями. на Рис. 3.7.

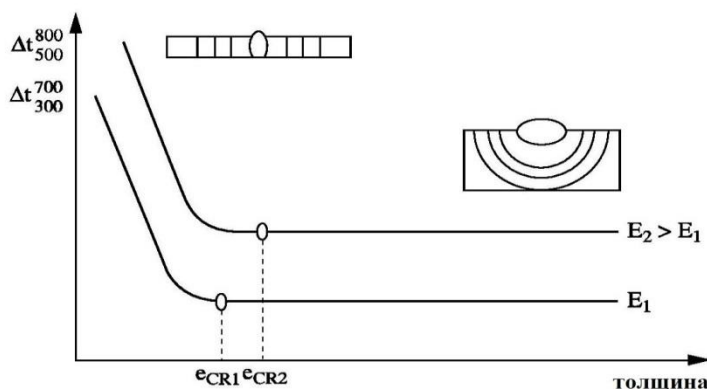


Рисунок 3.7. Влияние толщины и линейной энергии сварки на параметры охлаждения

За пределами определенной толщины изделия, параметр охлаждения уже не меняется. Такая критическая толщина, называемая *пределом толщины*, соответственно тем выше, чем больше энергия сварки. Таким образом, с точки зрения сварки изделие будет считаться «толстым» для данной энергии сварки, если его толщина будет превышать предел толщины.

В действительности это понятие предела толщины представляет собой модификацию характера теплоотвода в сварном соединении: ниже предела поток тепла двумерный, с нормальными изотермами по отношению к плоскости изделия. За этими пределами, поток трехмерный, и изотермы принимают цилиндрическую форму. Между этими двумя режимами существует зона перехода, в которой изотермическая форма подвергается воздействию излучения в нижней части компонента.

На практике важно определить линейную энергию сварки (величина q/v в предыдущих выражениях), встречающуюся в этом явлении. Это продукт:

- Линейной электрической энергии E_e , определяемой из параметров сварки: например, при дуговой сварке, выполненной с напряжением U и силой тока I , уравнение можно писать так: $E_e = \frac{UI}{v}$, где E зачастую выражается в кДж/см;

- коэффициента термической эффективности η_p , характерного для используемого процесса сварки, который характеризует соотношение между фактической энергией, передаваемой детали, и электрической энергией. В таблице 3.1 приведены общепринятые значения.

Таблица 3.1. Коэффициент термической эффективности различных сварочных процессов; из [CHR 65, CON 87, DEV 85, GRO 94, ION 97, NIL 75]

Сварочный процесс	Термический КПД η_p
Дуговая сварка под флюсом	0.9 до 1
Сварка электродами с покрытием	0.7 до 0.85
Сварка плавящимся электродом в инертном газе	0.7 до 0.85
Сварка вольфрамовым электродом в инертном газе	0.2 до 0.8
Электроннолучевая сварка	0.8 до 0.95
Лазер	0.4 до 0.7

Следует отметить, что эффективность сварки вольфрамовым электродом в инертном газе, как правило, низкая и зависит от многих факторов: интенсивности, постоянного или переменного тока, защитного газа и т.д. Аналогичным образом, эффективность лазерной сварки очень варьируется в зависимости от отражающей способности детали: низкая для медных или полированных алюминиевых деталей, эффективность (и, следовательно, проникновение луча) может быть увеличена путем наплавки тонкого слоя графита или фосфата цинка.

Энергия линейной сварки также является произведением коэффициента η_G , связанного с геометрией наплавки и сборки. По определению, плоская наплавка (диффузия тепла под углом 180°) будет выражаться следующим образом: $\eta_G = 1$. Т-образная сборка (диффузия тепла при 270°) характеризуется коэффициентом $\eta_G = \frac{180}{270} = \frac{2}{3}$. Этот подход можно обобщить для более сложных примеров (подготовка Х-образных, V-образных скосов, и т.д.).

Эффективная энергия линейной сварки записывается как: $E = \eta_p \times \eta_g \frac{UI}{v}$

Эта величина, а также толщина свариваемых изделий позволяет определить режим термической сварки: в замечательном исследовании [BER 72], основанном на теоретическом и экспериментальном подходе, Дж. Бернару удалось установить границы толстых и тонких изделий, по тому как происходит теплоотвод при их сварке.

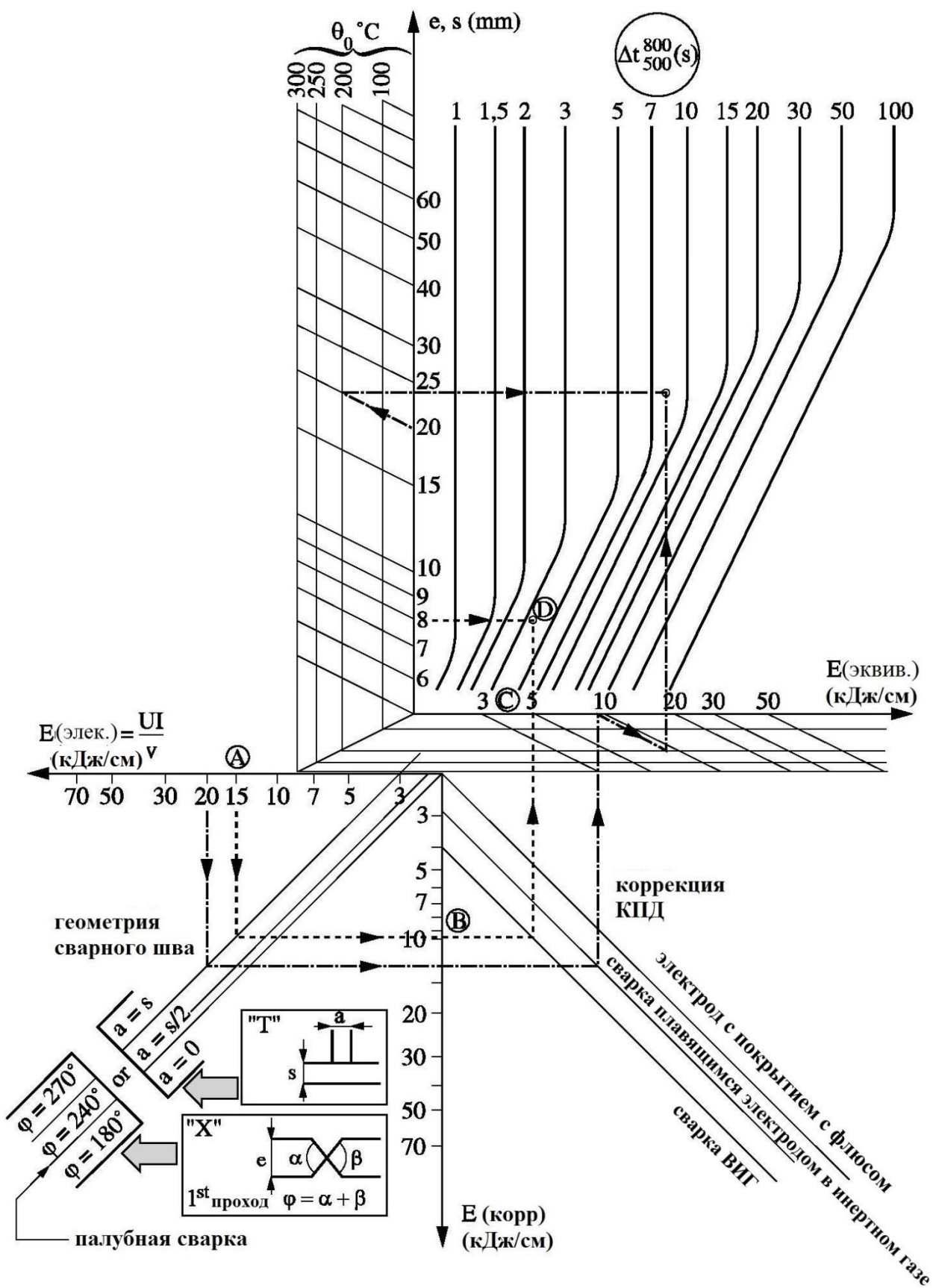


Рисунок 3.8. График определения параметра охлаждения $\Delta t_{\frac{800}{500}}$ в соответствии с условиями сварки; от [ATS 80]

В отсутствии стадии предварительного нагрева ($\theta_0 = 20^\circ\text{C}$), деталь будет считаться толстой основываясь на критерии $\Delta t_{\frac{800}{500}}$ если его толщина d (мм) такова, что:

$$d > 4.5 \sqrt{E}$$

E выраженная в кДж/см. В случае критерия Δt_{300}^{700} это условие можно выразить:

$$d > 6.35 \sqrt{E}$$

Исходя из таких критериев, можно затем вычислить значения параметра Δt согласно выражению [3.7] или [3.8].

Для обеспечения оперативной оценки, IRSID [ATS 80] разработал график прогноза значения Δt_{500}^{800} исходя из различных параметров в случае дуговой сварки (см. Рисунок 3.8). Таким образом, в качестве примера мы можем рассматривать соединение, сваренное вольфрамовым электродом в инертном газе с энергией $\frac{UI}{v}$ 15 кДж/см на Т-образном стыке.

Начиная с электрической энергии (точка А), поправки, связанные с геометрией стыка (точка В) и эффективностью процесса, приводят к эффективной энергии E (точка С), равной 5 кДж/см. В этих условиях сварка материалов толщиной 8 мм приведет к значению Δt_{500}^{800} за 4 секунды (D).

Другой пример (сварка плавящимся электродом в среде инертного газа при 20 кДж/см) показывает, как можно учитывать предварительно нагретую температуру θ_0 (здесь 200°C) путем коррекции толщины и эффективной энергии.

В качестве указания в Таблице 3.2 собраны некоторые типичные значения скоростей охлаждения, наблюдаемых для различных сварочных процессов, в диапазоне толщин, используемых в этих процессах.

Таблица 3.2. Значения скорости охлаждения Δt_{500}^{800} характерных различным сварочным процессам

Сварочный процесс	Δt_{500}^{800}
Линия (точечной сварки, сварки в рулонах)	< 1 сек
Вольфр. Электродом контактная электросварка сопротивлением, плазменная	< 3 сек
Лазерная	< 5 сек
С расплавлением	1-10 сек
С покрытым электродом	2-15 сек
Плавящимся электродом в инертном газе, плавящимся электродом	4-30 сек
Дуговая под флюсом	5-50 сек
Электрошлаковая, электрогазовая	100-250

3.2. Микроструктурные изменения в ЗТВ: металлургические последствия термических циклов сварки

3.2.1. Преобразования в ЗТВ при нагревании

В строгом смысле быстрота термических циклов сварки не позволяет использовать тепловые балансовые схемы для прогнозирования истинной природы различных фаз вблизи

линии плавления. Однако, следуя примеру Истерлинга [EAS 83], такой тип схем - это подходящая отправная точка для качественной интерпретации микроструктурных изменений. В качестве примера, конструкционные стали, которые наиболее широко используются в сварочных операциях, будут рассмотрены путем изучения схемы (Fe-C) параллельно с максимальными температурами, достигаемыми в сварном соединении (см. Рис. 3.9).

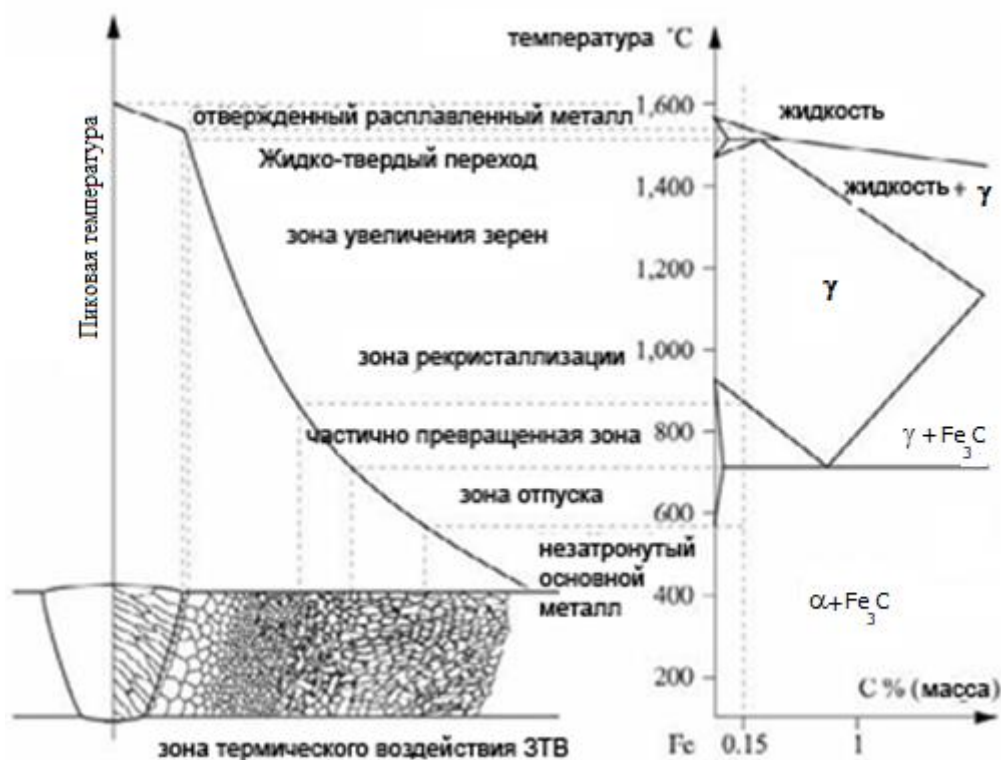


Рисунок 3.9. Изображение различных составных частей сварного соединения; из [EAS 83]

Рассмотрим, например, случай сварки 0,15% стали. По мере приближения к расплавленной зоне, можно обнаружить следующие зональные ситуации.

Основной металл не проходил фазе превращения при нагревании, то есть он нагревался до температуры ниже точки превращения A_1 (727°C). Таким образом, это микроструктура, состоящая из феррита α (твердый раствор углеродной вставки в железе, центрированная кубическая структура) и карбидов железа Fe_3C (или цементита) или, точнее, перлита, пластинчатого агрегата феррита и цементита.

У нас есть докритическая зона, где фазовый сдвиг еще не произошел. Однако, когда достигается достаточно высокая температура (например, $\theta > 600^\circ\text{C}$), могут произойти некоторые явления, такие как отпуск, сфероидизация цементитных пластин, перекристаллизация в случае сварки деформационно-упрочненных изделий, старение и т.д., [GRA 95].

У нас также есть зона частичного превращения (или межкритическая зона), между A_1 и A_3 ($\approx 830^\circ\text{C}$ для рассматриваемой композиции). В этой области феррит сосуществует с недавно образованной фазой, аустенитом γ , твердым инсерционным раствором с гранецентрированной кубической структурой. Именно из этой зоны ($\theta > A_1$) начинается зона термического воздействия.

От температуры A_3 до приблизительно 1495°C происходит полное превращение в аустенит. Таким образом, новая структура заменяет и стирает любые следы прежней ферритной структуры. Именно в этой зоне происходит увеличение аустенитного зерна: оно имеет очень маленький размер при температурах, немного превышающих A_3 , и может достигать нескольких сотен микрон при самых высоких температурах. В этом случае используется термин *крупнозернистая зона* (например, когда размер аустенитных зерен превышает несколько десятков микрон), и, как правило, именно эта зона является наиболее вероятной причиной определенных металлургических проблем, как будет видно позже.

У нас есть другая зона частично в жидком состоянии, где сосуществуют твердая ферритная фаза (δ) и жидкая фаза. Очень маленькая по размеру (и, следовательно, трудно наблюдаемая микрографически), эта зона представляет собой связь между основным металлом и расплавленным металлом. На балансовой схеме это соответствует температурному интервалу между началом и концом проплавления (интервал солидус-ликвидус).

В этой зоне связывания могут происходить определенные явления (локальное обезуглероживание путем обогащения жидкости в растворенном веществе, межкристаллитная ликвация путем эвтетических образований при низкой температуре плавления в случае примесей и т.д. [GRA 95, HAL 84]).

Наконец, расплавленный металл часто имеет состав, отличный от состава основного металла, из-за улетучивания определенных элементов, реакций с окружающей средой или обогащения внешними элементами (материалом заполнителя). Первые ядра расплавленного металла затвердевают путем эпитаксии (кристаллографической когерентности) на зернах ЗТВ.

На данном этапе необходимо отметить следующие моменты:

- приведенные выше преобразования и температурные диапазоны соответствуют состоянию равновесия. В действительности краткость термических циклов означает, что фазовые превращения и структурная однородность интервенируют при температурах, иногда значительно превышающих эти сбалансированные температуры.
- Конкретный пример, рассмотренный здесь (сплав Fe-0,15% C), представляет собой ситуацию, когда фазовые сдвиги происходят при нагреве. В случае других материалов (например, алюминиевых сплавов, меди, ферритных нержавеющей сталей и т. д.) термический цикл сварки интервенирует в однофазной области. Затем в течение всего цикла можно будет обнаружить увеличение зерен без возможности их измельчения фазовыми сдвигами;
- исходя из выражений [3.5] или [3.6] и знания температур фазового превращения, можно прогнозировать ширину ЗТВ при различных условиях сварки. Расчеты, подтвержденные наблюдениями за сварными соединениями, показывают, что ширина может варьироваться от нескольких сотен микрон (например: низкая плотность мощности при лазерной сварке [ION 97] и контактной сварке сопротивлением [CHA 74]) до 15 мм при электрошлаковой сварке [DEB 82, HAR 80].

В дополнение к этим микроструктурным изменениям сварочные операции оказывают заметное влияние на осадки, которые могут присутствовать в основном металле. Действительно, известно, что современные стали получают свои механические свойства (сопротивление, ковкость, вязкость) из оптимизированной комбинации упрочнения, с учетом характера микроструктуры, измельчения зерна и осадков. Этот баланс значительно изменяется термическими циклами сварки.

Обычно растворение различных частиц (карбидов, нитридов, сульфидов, оксидов) можно определить количественно, начиная с изменения их произведения растворимости в зависимости от температуры, описанной в этой форме (случай разбавленных растворов) [RIS 74]:

$M_aN_b \rightleftharpoons aM + bN$, где a и b определяют стехиометрию исходных соединений:

$$\log [\% M]^a [\% N]^b = - \frac{\Delta G_0}{RT} = A - \frac{B}{T}$$

ΔG_0 обозначает свободную энергию реакции, T - абсолютную температуру, R - константа совершенных газов (1,987 кал. К⁻¹ моль⁻¹). В Таблице 3.3 и на Рис. 3.10 представлено произведение растворимости некоторых соединений, из которого можно рассчитать температуру, при которой они полностью растворимы.

Таблица 3.3. Представление произведения растворимости различных соединений в аустените; концентрации в % по массе, T в °K

Вид осадка	$A - \frac{B}{T}$
NbN	4.04 – 10230/T
VN	3.02 – 7840/T
AlN	1.79 – 7184/T
TiN	4.35 – 14890/T
TiC	5.33 – 10475/T
NbC	2.26 – 6770/T
MnS	2.93 – 9020/T
Al ₂ O ₃	20.43 – 125986/T
SiO ₂	5.10 – 44801/T
MnO	-5.71 – 24262/T
Ti ₂ O ₃	16.18 – 104180/T

Чем выше температура, достигаемая локально в ЗТВ, тем выше вероятность разложения осадков. В порядке убывания стабильность этих соединений следующая: оксиды, нитриды, сульфиды, карбиды.

Для обычных составов конструкционных сталей разложение карбидов в ЗТВ будет наблюдаться при температуре около 1100–1150°C (VC, TiC) [HRI 95], нитридов около 1150–1300°C, тогда как сульфиды обычно диссоциируют при температуре около 1100–1200°C. Принимая во внимание их очень высокую стабильность, оксидные включения, образующиеся при выплавке, стали в жидком состоянии (оксид алюминия, силикаты и т.д.), не подвергаются влиянию цикла сварки. Встречаясь единично и будучи относительно большими по размеру (например: от нескольких десятых до нескольких микрон), эти оксиды обычно не играют роли во время фазы нагрева в ЗТВ. Но это не так для нитридов или карбонитридов. Действительно, известно, что эти многочисленные мелкие и диспергированные частицы замедляют рост аустенитного зерна, поскольку достигаемое смещение стыка сопровождается локальным увеличением энтальпии.

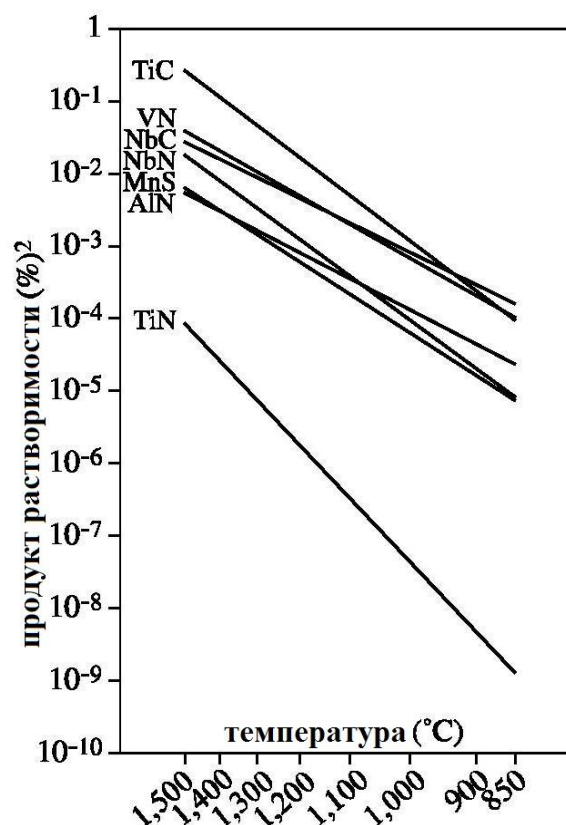


Рисунок 3.10. Произведения растворимости различных соединений в аустените

Максимальный размер зерен $d_{\max}$, в присутствии популяции осадков размером r и объемной долей V_F можно выразить соотношением Зенера [ZEN 48]:
$$d_{\max} = \frac{4r}{3V_f}$$

Как правило, увеличенный размер аустенитных зерен в ЗТВ приводит к более крупнозернистой ферритной структуре. Чтобы ограничить это явление, можно показать, что небольшие добавки титана (элемент, который, как было показано ранее, образует очень стабильные нитриды при высокой температуре), эффективно замедляют рост аустенитного зерна (см. Рис. 3.11). Следует, однако, подчеркнуть, что этот результат получается только в том случае, если эти нитриды относительно мелкие (несколько десятков нанометров), то есть, прежде всего, если они образуются после затвердевания при выплавке стали, а не в виде более крупных осадков (микрометрических частиц, образующихся в расплавленном металле).

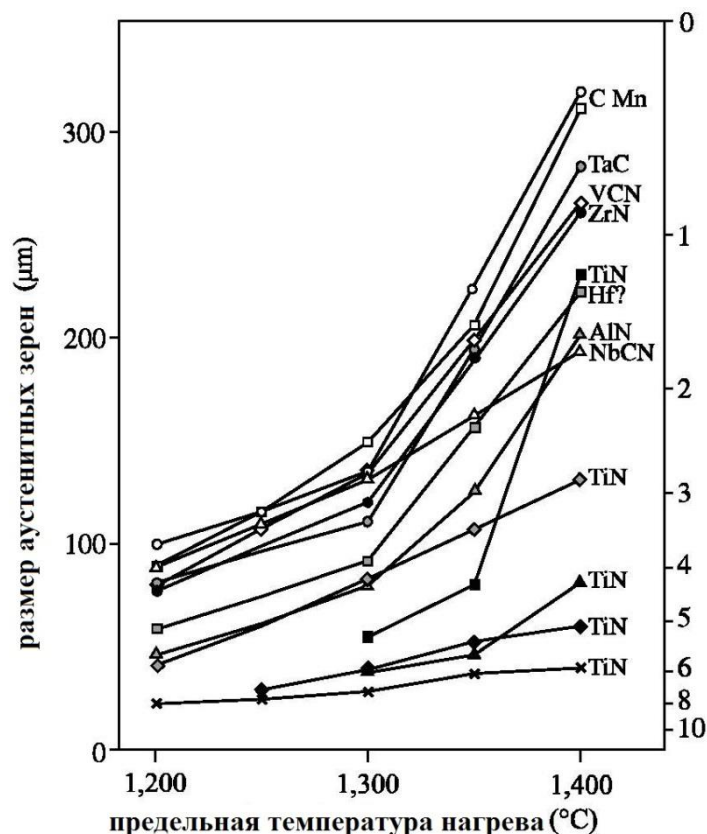


Рисунок 3.11. Влияние предельной температуры на размер аустенитных зерен в 3ТВ сталях, содержащих различные типы осадков; из [Кан 76]

3.2.2. Преобразования в 3ТВ при охлаждении

В случае конструкционных сталей микроструктуры, наблюдаемые в 3ТВ сварных соединений, соответствуют преобразованным продуктам аустенита. На самом деле трудно изучать эти металлургические превращения, начиная с традиционных термокинетических диаграмм (превращение при непрерывном охлаждении). Действительно, такие диаграммы обычно устанавливаются, начиная с аустенитных обработок при относительно низкой температуре (900-950°C) и в течении длительных периодов времени, то есть ситуации, совершенно противоположной той, которая встречается в 3ТВ. Чтобы рассмотреть более характерные условия, изучаются металлургические явления, начинающиеся с циклов термического нагрева и охлаждения, очень близкие к тем, которые встречаются при сварке. Эти тесты обычно проводятся на специфических термических тренажерах (симуляторы Глибла и Смитвельда и т.д.). Для данного материала (см. Рис. 3.12) и условий аустенизации (температура обычно выше 1200°C, чтобы имитировать 3ТВ с крупнозернистыми зернами), можно сделать умозаключение о превращениях аустенита в соответствии со скоростью охлаждения с использованием термокинетических диаграмм в условиях сварки или упрощенно, эволюции упрочнения конечной микроструктуры с температурой.

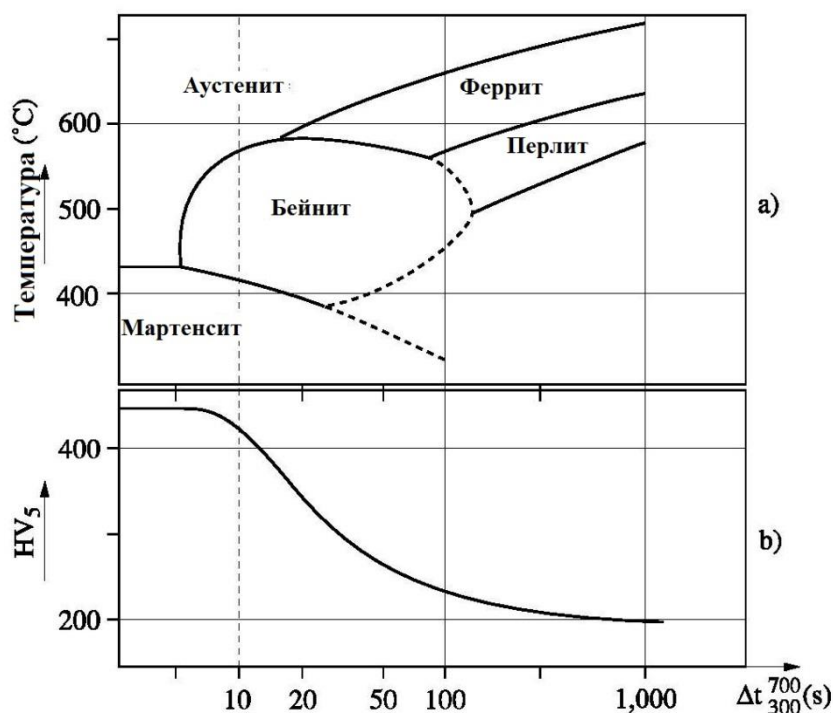


Рисунок 3.12. (а) Пример термокинетической диаграммы в условиях сварки ($\theta_M = 1,300^\circ\text{C}$); (б) соответствующий график (твёрдость-критерий охлаждения Δt).
Сталь $C=0.18\%$, $Mn=1.4\%$, $Si=0.4\%$

В зависимости от скорости охлаждения могут образовываться различные типы микроструктур.

Для очень высоких скоростей (ниже критической скорости закалки V_{CM} , что соответствует плато на графике охлаждения по критерию твердости или $HV-\Delta t$) появляется мартенсит. Обладая тетрагональной кристаллографической структурой, этот перенасыщенный твердый раствор углерода в железе образуется посредством механизма сдвига без атомной диффузии. По составу аналогично материнскому аустениту, мартенсит имеет твердость HV_M , которая зависит практически только от процентного содержания углерода в стали, согласно выражению: $HV_M = 283 + 930(\% C)$ [IRS 77]².

На промежуточных скоростях появляются бейнитные структуры. Образующийся из метастабильного аустенита при температурах, слишком низких для того, чтобы углерод мог диффундировать на границах зерен, бейнит характеризуется очень быстрым ростом игл феррита путем сдвига и осаждения карбидов.

² Другие подобные выражения были предложены: $HV_M = 293 + 812(\% C)$ (Сато), $305 + 802(\% C)$ (Дюрэн) или $HV_M = 294 + 884[\% C(1 - 0.3(\% C))]^2$ (Юриока), и.т.д.

Оставим в стороне сложные обсуждения, касающихся описания бейнитных структур (см., к примеру, [ВНА 97, НЕН 72, НОН 95, ОНМ 74]), просто напомним, что более высокие скорости охлаждения приводят к образованию более жестких низших бейнитных структур. (осаждение карбидов в форме тонких пластин внутри ферритовых планок), в то время как более медленные скорости связаны с более высоким образованием бейнита (карбиды выбрасываются из соединений ферритовых планок, иногда в форме квазинепрерывных цементитных пластин [CON 92]). В этом последнем случае локальное содержание углерода может быть таким, что образование соединений между планками происходит там, где сосуществуют мартенсит и аустенит (соединения М-А), причем последний стабилизируется, поскольку температура превращения M_s снижается ниже комнатной температуры [AND 65].

Более медленные скорости охлаждения при сварке соответствуют осаждению дозвтектоидного феррита на границах старых аустенитных зерен и эволюции к феррито-перлитной структуре. Также в этом диапазоне скоростей охлаждения некоторые соединения (нитриды или карбонитриды ванадия и ниобия и т.д.), растворенные во время фазы нагревания, могут повторно осаждаться в более или менее полной форме.

Были предложены различные более или менее сложные формулы для описания изменения твердости HV_{max} в крупнозернистой ЗТВ С-Мн сталей в зависимости от их состава и скорости охлаждения. К примеру, мы можем сослаться на Юриока [YUR 87], применимого к сталям с составом менее 0.3%С, 5%Ni, 1%Cr без В (Δt_{500}^{800} выраженный в сек, состав в %):

$$HV_{max}=206+442 C+(402 CE_I - 90 CE_{II} + 80) \arctg(x)+99 CE_{II}$$

Где:

$$CE_I = C + \frac{Mo}{4} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{8} + \frac{Ni}{12} + \frac{Cu}{15} + \frac{Si}{24}$$

$$CE_{II} = C + \frac{Mo}{2.5} + \frac{Nb}{3} + \frac{Mn+Cr+V}{5} + \frac{Cu}{10} + \frac{Ni}{18} + \frac{Si}{24}$$

$$x = \frac{\Delta t_{500}^{800} - 2.3CE_I - 1.35CE_{III} + 0.882}{1.15CE_I - 0.673CE_{III} - 0.601}$$

$$CE_{III} = C + \frac{Mn}{3.6} + \frac{Mo}{4} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{9} + \frac{Cu}{20}$$

Эти выражения раскрывают концепцию *углеродного эквивалента* (УЭ, функция по уровню С, М, Мо и т. д.), которая будет предметом дальнейшего обсуждения в связи с холодным растрескиванием. На этом этапе следует закрепить, что это фактор, определяющий способность к закалке. При заданной скорости охлаждения предельная твердость сводится к ограничению процентного содержания углеродного эквивалента.

Как уже подчеркивалось ранее, микроструктура, образующаяся в любой точке ЗТВ, зависит от температуры, достигнутой локально. Рис. 3.13 иллюстрирует влияние температуры на превращение аустенита в стали 32С1. Если охлаждение происходит достаточно быстро (например, сек), все зоны, где Δt_{300}^{700} температура превышает 1000°C, мартенситные. В случае более медленного охлаждения (например, $\Delta t_{300}^{700} < 1s$) часть ЗТВ, нагретая до температуры около 1000°C, имеет бейнитную структуру, тогда как крупнозернистая часть ЗТВ (от 1100 до 1200°C)

составляет мартенситная. Это микроструктурное различие объясняет, почему большинство металлургических проблем (вязкость, чувствительность к растрескиванию в присутствии водорода) возникают главным образом в крупнозернистой части ЗТВ, нагретой до более высокой температуры.

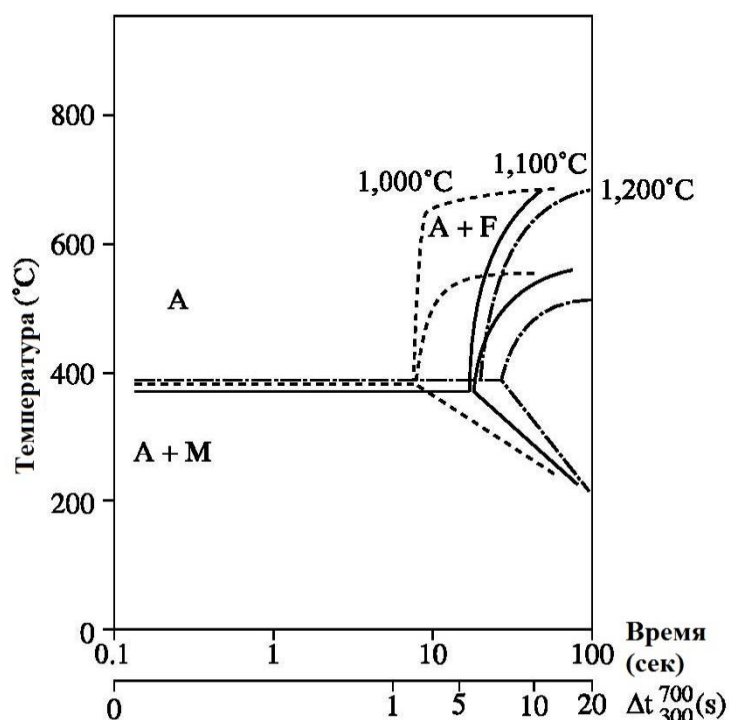


Рисунок 3.13. Влияние предельной температуры в ЗТВ на термокинетическую диаграмму при сварке стали 0,3% С, 0,8% Мн, 0,2% Si, 0,3% Cr

3.2.3. Пример многопроходной сварки

При превышении определенной толщины сборка изделия обычно включает несколько последовательных наплавов (сварка, в несколько проходов, или многопроходная). За исключением последней наплавки, во время этой операции все точки ЗТВ подвергаются сложной последовательности циклов повторного нагрева [DEV 87]. В действительности, если точка находится в ЗТВ в непосредственной близости от заданного прохода N, прогрессивное расстояние наплавов означает, что их металлургическое влияние быстро становится незначительным (предельная температура ниже 500°C) после прохода N+2. Более того, становится понятно, что аустенизация при очень высокой температуре стирает металлургическое влияние предыдущих циклов при более низкой температуре; следовательно, металлургически эффективная тепловая история в многопроходной ЗТВ может быть суммирована с некоторыми присущими комбинациями, содержащими не более трех термических пиков. Таким образом, можно выделить три следующие зоны (см. Рис. 3.14.)

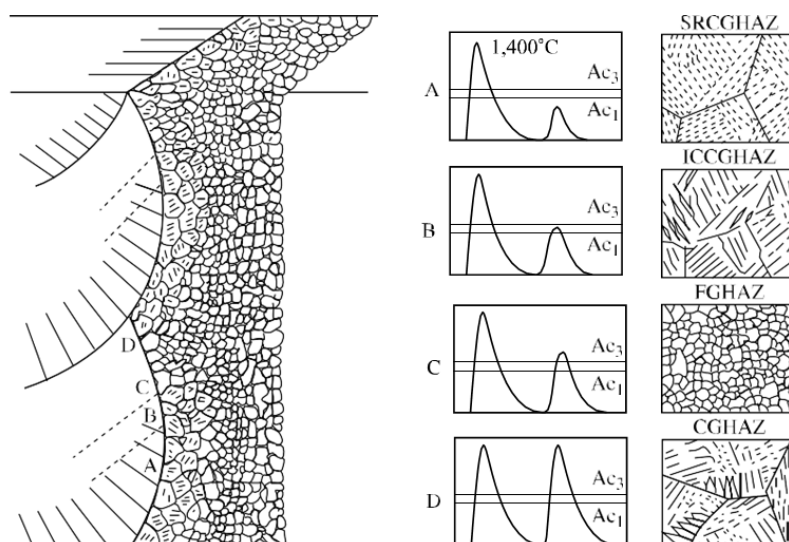


Рисунок 3.14. Схематическое изображение термических циклов и микроструктур, встречающихся в многопроходной сварке; из [MAT 94]

Зона с крупными зернами не затрагивается последующими проходами, потому что она нагревается до температуры ниже, чем A_{c1} (зона A на Рисунке, или SRCGAZ: *субкритическая повторно нагретая зона укрупненных частиц под термическим воздействием*). В целом, микроструктура и механические свойства этой зоны относительно близки к таковым для крупнозернистой зоны в черновом состоянии (CGHAZ, зона D).

Зона с крупным зерном, нагретая в межкритическом поле, между A_{c1} и A_{c3} (ICCGHAZ: *межкритическая повторно нагретая зона укрупненных частиц под термическим воздействием*, зона B). Превращение ($\gamma \rightarrow \alpha$) происходит, в частности, в зонах легкой диффузии, таких как бывшие границы аустенитных зерен, зоны, наиболее богатые углеродом (карбиды, соединения М-А) или сегрегированные зоны. Аустенит, который образуется локально, все больше обогащается углеродом, чем ниже температура. При охлаждении аустенитные участки могут быть превращены в мартенсит или в аустенит (соединения М-А) в соответствии с механизмом, описанным в предыдущем разделе.

Поскольку многие исследования выявили низкое качество этих соединений в плане вязкости [IKA 80, LAM 99, MAT 94], обычно считается, что зона, нагретая в межкритическом поле, наряду с крупнозернистой зоной это зона наименьшей вязкости в многопроходных сварных соединениях. Однако хрупкость этой зоны практически исчезает при повторном нагреве до достаточной температуры отпуска (например, 350-400°C), связанной с наплавкой последующего сварочного прохода или термической обработкой для снятия напряжений.

Когда конструкционные стали должны обеспечивать гарантии вязкости в многопроходных сварных соединениях, промышленники и производители стали особенно стремятся минимизировать долю локальных хрупких зон (LBZ, крупнозернистые или межкритические зоны [HRI 95, TOY 86]) вблизи расплавленного металла путем контроля условий сварки и химического состава.

Наконец, встречается зона с мелкими зернами (FGHAZ, *мелкозернистая зона термического воздействия*), связанная с температурным пиком, немного превышающим A_{c3} . Очень тонкие микроструктуры, связанные с этим типом обработки, соответствуют структурам, полученным в результате нормализационных обработок, и обладают превосходными механическими свойствами. Разумный подбор условий сварки, чтобы

максимизировать эту зону с мелкими зернами и способствовать превращению соединений М-А, позволяет гарантировать хорошие свойства вязкости многопроходных соединений [IKE 95, KAWnd, KOS 81, LIN 89].

В заключение следует отметить, что определенное программное обеспечение, основанное на термическом и металлургическом моделировании, было разработано для прогнозирования риска появления хрупких зон в многопроходных ЗТВ и их влияния на механические свойства [DEV 91, KAP 98, REE 94].

3.2.4. Холодное растрескивание

Понятие *свариваемости* часто путают с чувствительностью к холодному растрескиванию и сводят к ней, что дает некоторое представление о важности этого явления.

Во время дуговой сварки расплавленный металл может растворять водород, полученный в результате разложения присутствующей воды (окружающий воздух, влага и т.п.), или гидрогенизированного вещества (смазки и т. п.) а также, возможно, водорода сварочного газа; растворенное количество может быть высоким. Результаты, опубликованные Граньоном [GRA 95], показывают, что во время сварки конструкционной стали количество диффундирующего водорода, присутствующего в 100 г расплавленного металла, может в среднем достигать:

- 15 см³ при сварке электродами с рутиловым покрытием,
- 9 см³ при сварке порошковым флюсом,
- 7 см³ при сварке электродами с базовым покрытием,
- 4 см³ в сварке плавящимся электродом в инертном газе.

Во время затвердевания, охлаждения и любых возможных аллотропических превращений растворимость водорода заметно снижается. Данный факт вероятно ответственен за образование пористости во время затвердевания и как следствие вызывает диффузию газа в атмосферу и, если этого недостаточно (быстрое охлаждение), также вызывает перенасыщение твердого металла с образованием *in situ* молекул Н₂. Полученный таким образом газ собирается в пространствах, вызванных структурными дефектами и декогезиями между металлом и включениями. В этих местах давление газа повышается с диффузией водорода и может достигать повышенных уровней, что создает значительные локальные напряжения, которые могут сочетаться с усадочными напряжениями. Если структурное состояние металла недостаточно сильное в этих условиях, может возникнуть трещина.

Эта точная локализация встречается при сварке конструкционных сталей, которые могут подвергнуться преобразованию ($\gamma \leftrightarrow \alpha$); это приводит к *холодному растрескиванию*.

Действительно, в соединении: превращение в расплавленном металле (когда оно восприимчиво к ($\gamma \leftrightarrow \alpha$) превращению, что обычно соответствует действительности) начинается до превращения в ЗТВ, потому что, если оно охлаждается подобно последнему, в нем меньше углерода и его точка Ms выше. Таким образом, любой содержащийся водород выделяется частично в атмосферу и частично в ЗТВ (при условии, что последний находится в аустенитном состоянии).

($\gamma \leftrightarrow \alpha$) превращение в ЗТВ под влиянием градиентов тепла и различий в прокаливаемости, вызванных увеличением зерен аустенита, происходит от самых холодных частей (близко к основному металлу) до пределов расплавленного металла.

Следовательно, водород улавливается в наиболее перегретой части ЗТВ, тогда как его растворимость уменьшается в результате охлаждения и особенно при переходе в α -состояние. Если эта часть превращается в мартенсит (не очень пластичный, даже хрупкий), он может растрескиваться под действием напряжений, вызванных локальным давлением водорода и усадочных напряжений. Таким образом, происходит холодное растрескивание.

Чтобы оценить риски холодного растрескивания, необходимо провести испытания на растрескивание в рассматриваемых условиях сварки. Если воспроизведение термических циклов и загрузка водорода это сравнительно легкие задачи (достаточно применить одинаковые условия сварки), то схему напряжений усадки с другой стороны, очень трудно воссоздать. Для этого применяются обычные тесты. Наиболее распространенным и наиболее важным является тест на имплантат, определенный Французскими стандартами NF A 89-100 и NF A 03-185 и рекомендуемой процедурой IIS/IIW-447-73. В толстую пластину имплантируется цилиндрический образец с надрезом. В выбранных условиях проводится тестовая сварка, после чего, при затвердевании расплавленного металла имплантат подвергается растяжению (см. Рис. 3.15).

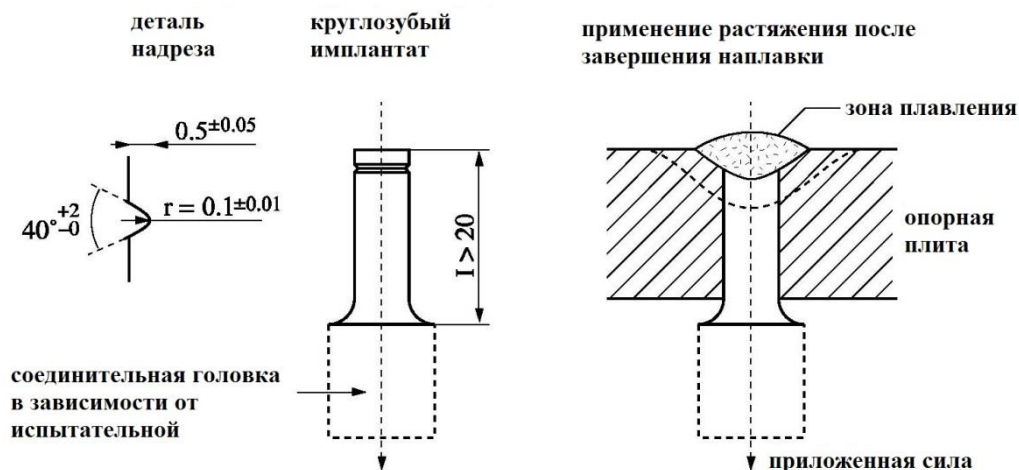


Рисунок 3.15. а) Пример имплантата с круглой насечкой;
б) имплантат подвергается растяжению после нанесения сварного шва

Микрографические срезы, полученные после охлаждения и времени ожидания, позволяют обнаружить возможные трещины. Одновременно варьируя условиями сварки (энергией и толщиной опорной пластины) и нагрузкой, приложенной к имплантату, мы имеем необходимую информацию для построения *кривой растрескивания*, которая определяет, в пределах координат - *прочность на разрыв/параметр охлаждения*, поля, где происходит растрескивание и где этого можно избежать (см. Рис. 3.16). Такая кривая зависит от стали, процесса сварки и рассматриваемого содержания водорода. Эта процедура позволила квалифицировать металлургическую свариваемость многих сталей с точки зрения риска холодного растрескивания и определить минимальные энергии, которые следует использовать при сварке без риска. Однако следует отметить, что влияние содержания водорода первостепенно; часто достаточно снизить его, чтобы холодное растрескивание исчезло, как показано на Рис. 3.17 для простой стали C-Mn. Следовательно, именно этот фактор сварщик должен будет считать приоритетным.

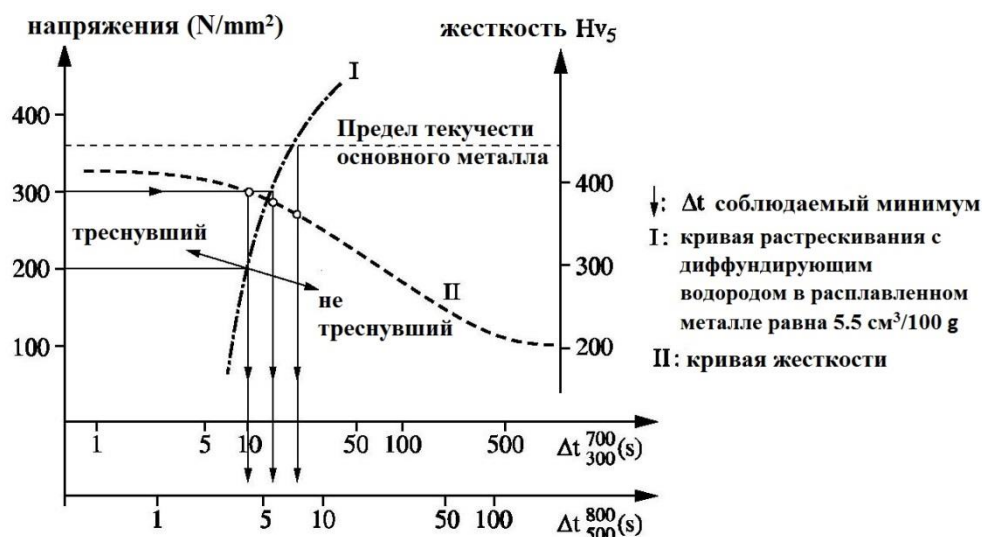


Рисунок 3.16. Пример кривой растрескивания, полученной из теста на имплантат

Однако, если снижение содержания водорода невозможно или недостаточно, сварщик может предупреждать растрескивание, путем тщательного предварительного нагрева и, возможно, последующего нагрева. Эти две операции (которые мы не должны рассматривать как термические обработки) состоят в изменении термической эволюции сварного шва путем нагрева деталей, которые составляют соединение, при более высокой температуре, чем комнатная температура (это предварительный нагрев), и, возможно, путем поддержания этого уровня нагрева, после сварки, в течение определенного времени (это пост-нагрев).

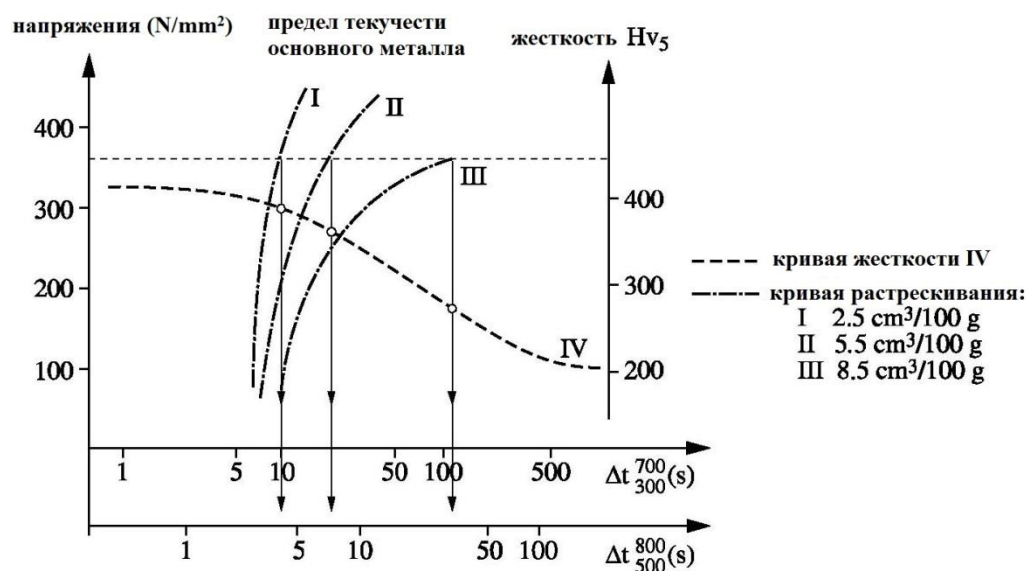


Рисунок 3.17. Влияние содержания водорода на холодное растрескивание

Эти процедуры:

- замедляют охлаждение сварного шва, и применяется с охлаждающей средой - основным металлом - не при комнатной температуре, а при температуре предварительного нагрева. Если основной металл не слишком отверждаемый, это замедление меняет превращение ($\gamma \leftrightarrow \alpha$), позволяя определенной доле бейнита образовываться до мартенситного превращения; металл ЗТВ при этом менее закален и, следовательно, менее твердый, но в частности менее хрупкий. Кроме того, начиная с температуры предварительного нагрева, точно так же, как начиная с

температуры последующего нагрева, окончательное охлаждение идет очень медленно, поскольку оно соответствует всей предварительно нагретой и, возможно, последующей нагреваемой области. Таким образом, конец мартенситного превращения происходит очень медленно в присутствии количества водорода, которое постепенно уменьшается, поскольку он диффундирует в атмосферу вне соединения. Относительно большая продолжительность последующего нагрева, а также между последним и температурой окружающей среды представляет собой операцию отпуска, которой подвергается уже сформированный мартенсит, вызывая дальнейшее снижение его хрупкости.;

– увеличивают глубину ЗТВ и уменьшают градиенты температуры. Таким образом, градиенты расширения уменьшаются и, следовательно, уменьшаются возможности усадки и, следовательно, также значительные напряжения.

Все эти эффекты имеют одинаковый положительный результат; они уменьшают или устраняют риск холодного растрескивания.

Для *априорной* оценки риска холодного растрескивания на практическом уровне регулярно используется определенный параметр, называемый *углеродным эквивалентом* (C_{eq}), рассчитываемый по химическому составу исходного металла. Было предложено много формул, наиболее известная из которых используется с 1940 года Международным институтом сварки [DEA 40]:

$$C_{eq}(\%) = C\% + Mn\%/6 + (Cr\% + Mo\% + V\%)/5 + (Cu\% + Ni\%)/15$$

При постоянном C_{eq} металлургическая свариваемость будет постоянной, и чем ниже C_{eq} , тем ниже риск холодного растрескивания. Такой метод оценки этого риска не выглядит очень удовлетворительным, на самом деле:

– C_{eq} не учитывает содержание водорода в расплавленном металле, важность которого только что обсуждалась (были предложены определенные формулы, которые устраняют этот недосмотр);

– C_{eq} не учитывает условия охлаждения, которые являются определяющим фактором в отношении доли образующегося мартенсита;

C_{eq} , к сожалению, путает способность к упрочнению (и, следовательно, риск хрупкости мартенсита), которая зависит от процентного содержания углерода и во-вторых, закаливаемость (и, следовательно, риска образования мартенсита), которая зависит от содержания легирующих элементов.

Поэтому C_{eq} можно использовать только для сравнения в очень ограниченных областях.

В настоящее время некоторые стандарты NF EN определяют предельные значения для этого C_{eq} . В качестве примера и для того, чтобы подчеркнуть достигнутые улучшения свариваемости, благодаря достижениям в процессах производства чугуна и стали, можно привести максимальное гарантированное значение для сталей, соответствующих стандарту NF EN 10113 и поставленных в нормализованном состоянии или после термомеханической обработки в форме плоских изделий толщиной от 16 до 40 мм.

Наконец, важно подчеркнуть, что разработка многих изделий из железа и стали в течении

последних нескольких десятилетий было обусловлено главным образом стремлением снизить чувствительность к холодному растрескиванию. Следовательно, концепция металлургической свариваемости сыграла решающую роль в эволюции состава конструкционной стали.

C_{eq} предельный (%) сталей согласно NF EN 10113 ($16 < \text{толщина мм} \leq 40$)			
Часть 2 После нормализации		Часть 3 После термомеханической обработки	
S275N	$C_{eq} \leq 0.40\%$	S275M	$C_{eq} \leq 0.34\%$
S355N	$C_{eq} \leq 0.43\%$	S355M	$C_{eq} \leq 0.39\%$
S420N	$C_{eq} \leq 0.48\%$	S420M	$C_{eq} \leq 0.43\%$

3.2.5. Расслаивание

Позже будет отмечено, что сварка приводит к образованию напряжений и значительных деформаций. Возможным следствием этого явления является расслаивание стальных листов, которое соответствует определенному типу трещины, развивающейся параллельно зоне соединения сварных соединений и перпендикулярно зерну плоского проката (см. Рис. 3.18). Его появление соответствует недостаточной пластичности свариваемого материала в направлении его толщины, вызванной наличием включений, расположенных по направлению прокатки.



Рисунок 3.18. Растрескивание как следствие расслаивания

Изучение разрывов в первую очередь выявляет характерный скачкообразный разрыв, соответствующий декогезии между включениями (по существу, сульфидами), удлиненных в результате прокатки, и матрицей. Этот тип растрескивания можно избежать:

- Конструкцией сварного шва, избегая процедур, которые в максимально возможной степени приводят к высоким уровням напряжения в коротком поперечном направлении (геометрия, предварительное смазывание, ограничение предела упругости для расплавленного металла и т. д.);
- выбором металлургического качества стали, которая должна иметь достаточную пластичность по толщине. Эта характеристика проверяется на цилиндрических образцах для испытаний на разрыв, взятых в этом направлении, и на которых измеряется трение (Z%) после разрыва. Таким образом, мы говорим о «Z сталях», продуктах с гарантированными свойствами по толщине, которые получаются путем ограничения содержания включений (в частности, выраженного поведением серы) и/или контроля морфологии этих включений (обработка в производстве, путем добавления кальция, редкоземельных элементов (церия и т.д.) [OLE 81] и т.д.).

3.3. Влияние термических циклов на механические свойства ЗТВ

Важные изменения в микроструктурах, вызванные сваркой, естественно, сопровождаются значительными изменениями механических свойств по сравнению с основным металлом. Они будут рассмотрены в отношении локализованных свойств на растяжение, твердость или вязкость.

3.3.1. Модификации механических свойств твердости или сцепления в ЗТВ

Очевидно, что изменения механических свойств в ЗТВ (механическое сопротивление или, проще, твердость [ГРУ 81]) следует понимать по сравнению с основным металлом, свойства которого могут быть результатом различных комбинаций (термомеханическая композиция/обработка). Таким образом, среди крупных групп конструкционных сталей можно перечислить, например, стали С-Мп феррито-перлитной структуры, полученные в результате нормализационных обработок, высокопрочные стали (ВС), сочетающие измельчение ферритного зерна и мелкодисперсные осадки, стали с высокой или очень высокой прочностью (феррито-бейнитная или бейнитная с очень низким содержанием углерода (ULCB)), двухфазные стали (феррит-мартенситные), закаленные и отпущенные стали и т. д.

В общем, термические циклы, связанные с зоной крупного зерна, приводят к локальному увеличению твердости по сравнению с твердостью основного металла, особенно в случае быстрого охлаждения после сварки. Целью этой механической неоднородности часто является смещение места разрыва в сторону основного металла в случае гладких испытаний на растяжение или изгиб поперек сварных соединений. В случае механических испытаний, включающих выемку, расположенную в ЗТВ, присутствие менее твердого прилегающего основного металла способствует развитию пластической зоны и увеличению кажущейся вязкости [DEV 86a]. В некоторых крайних случаях (очень большая разница в твердости между сварной зоной и основным металлом, очень узкая сварная зона, как в случае лазерной сварки или электроннолучевой сварки), можно отметить заметное отклонение разрыва в сторону наименее твердых зон [DEV 86b, GOL 76].

В более широком смысле, это иллюстрирует возможную разницу между внутренним механическим поведением в данной зоне и тем, которое получается при наличии смежных зон с различными моделями поведения, возможно, при наличии механического дефекта. Все эти довольно сложные вопросы, взаимодействие механических свойств в различных частях сварных соединений, известны как *согласование* сварных соединений (см., например, [LON 94, TOY 92]).

В некоторых случаях (основной металл с высоким пределом текучести, полученный путем тщательной термомеханической обработки), термические циклы могут включать образование размягченных зон по сравнению с основным металлом. Размягчение появляется при температуре, соответствующей A_{c1} или A_{c3} [DEV 83, ITO 00], и увеличивается с увеличением энергии (например, при термитной сварке рельсов). Очень часто трехосность напряжений и локализованное уплотнение позволяют избежать чрезмерной концентрации деформаций в размягченной зоне. Желательно ограничить амплитуду размягчения (разницу в твердости между основным металлом и ЗТВ) а также ширину размягченной зоны [DEV 84], чтобы избежать разрыва или преждевременного износа за счет концентрации деформации в этой зоне. Наконец, следует отметить, что присутствие этой размягченной зоны иногда может быть связано с растрескиванием из-за локализованного водорода (*водородное растрескивание в направлении линий напряжения*, или SOHIC) [TAK 95].

3.3.2. Прочностные свойства ЗТВ

К механическим свойствам в ЗТВ предъявляются все более жесткие требования со стороны пользователей и строительных норм с целью гарантировать жизнеспособность сварных соединений в отношении хрупкого излома. Прочность ЗТВ можно четко оценить по прямому удалению образцов с надрезом внутри сварных соединений. Однако этот метод представляет много трудностей (деликатное расположение выемки в очень узких зонах с высокими микроструктурными градиентами, остаточные напряжения и т. д.), что на практике приводит к чрезмерному разбросу результатов прочности сопротивления. Вот почему прочность этих зон часто оценивается на основе экспериментальных испытаний на образцах, прошедших моделируемую термическую обработку, характерных для тех, которые встречаются в ЗТВ.

На основании таких имитационных испытаний на Рис. 3.19 представлено влияние скорости охлаждения в крупнозернистой ЗТВ на температуру перехода до уровня 28 Дж прочности сопротивления. Параллельно он включает в себя соответствующую эволюцию твердости в ЗТВ.

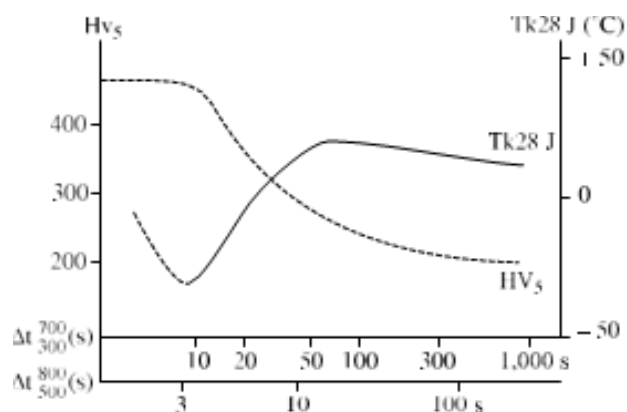


Рисунок 3.19. Влияние скорости охлаждения на прочность сопротивления и твердость в крупнозернистой ЗТВ; сталь $C = 0,18\%$, $Mn = 1,4\%$, $Si = 0,4\%$; из [BER 75]

Что касается самых высоких скоростей охлаждения, будут отмечены три последовательных этапа.

Оптимальная прочность в ЗТВ, соответствующая концу мартенситной зоны. Мартенситы, получаемые при сварке, часто представляют собой самоотпускаемые планки, характеризующиеся наличием твердосплавных стержней, выровненных по направлению $\langle 111 \rangle$ планок.

Действительно, в сталях с низким процентным содержанием углерода температура конца мартенситного превращения M_F настолько высока, что она позволяет определенный отпуск мартенсита даже во время цикла сварки. Присутствие низшего бейнита в этих преимущественно мартенситных ЗТВ встречается довольно часто. Таким образом, прочность структур ЗТВ, полученных при этих высоких скоростях охлаждения, аналогична прочности закаленных мартенситов и смешанных мартенсит-бейнитных структур, полученных традиционными термообработками [HEI 75, ОНМ 74].

Резкое снижение прочности наблюдается тогда, когда скорость охлаждения уменьшается. Это связано с эволюцией нижнего бейнита в сторону более высокого бейнита,

размеры которого или бейнитные упаковки имеют меньшую стойкость к расщеплению.

Для самых медленных скоростей охлаждения (феррито-карбидные структуры), наконец, наблюдается стабилизация прочности, возможно, вследствие небольшого падения температуры перехода. Как уже было показано (см. Раздел 3.2.2), это поле скорости охлаждения соответствует расширению феррита, и некоторые авторы [ОТТ 80] выдвигают связь между ухудшением прочности и толщиной доэвтектических соединений феррита, появляющихся на границах старых аустенитных зерен.

На этом этапе следует отметить, что одновременные требования в отношении прочности и устойчивости к растрескиванию иногда могут показаться противоречивыми: действительно, гарантия минимальной прочности может зависеть от ограничения параметра охлаждения (например: $\Delta t_{500}^{800} < \Delta t_{1\text{крит}}$). С другой стороны, стремление избежать холодного растрескивания может привести к требованию минимальной скорости охлаждения, чтобы избежать слишком сильной мартенситной пропорции (обычно 80%), то есть $\Delta t_{500}^{800} < \Delta t_{2\text{крит}}$. Таким образом, можно видеть, что одновременное соблюдение этих двух критериев может привести к концепции *поля металлургической свариваемости* между значениями $\Delta t_{1\text{крит}}$ и $\Delta t_{2\text{крит}}$.

Влияние различных элементов, присутствующих в С-Мн и микролегированных сталях, на прочность в крупнозернистой зоне термического влияния можно схематически представить следующим образом.

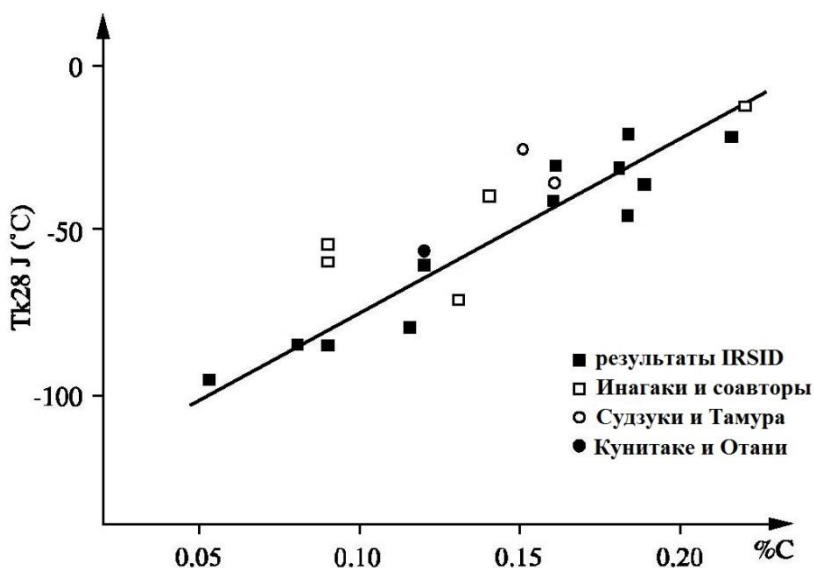


Рисунок 3.20. Влияние процентного содержания углерода на температуру перехода TK_{28J} в структуре ЗТВ (мартенсит + нижний бейнит); из [DEV 88]

Углерод снижает вязкость ЗТВ в равной степени в случае высоких и низких скоростей охлаждения. Таким образом, на рис. 3.20 показано неблагоприятное влияние углерода на температуру перехода прочности для ЗТВ с оптимальной микроструктурой (мартенсит-бейнит), поэтому они охлаждаются относительно быстро.

В случае самых медленных охлаждений (к примеру, когда $\Delta t_{500}^{800} > 100$ сек.), углерод и азот (последний оказывает более заметное влияние) оказывает пагубное воздействие на вязкость [DEV 88]. Пагубное воздействие азота существует как при сварке, так и в состоянии снятия напряжения.

Интересно также ограничить до некоторой степени кремний, элемент, который приводит к образованию соединений М-А, уменьшающих прочность крупнозернистой и высокотемпературной ЗТВ в межкритическом поле [TAI 95].

В определенных пределах ($P < 20 \times 10^{-3}\%$) фосфор, по-видимому, оказывает довольно незначительное влияние на прочность ЗТВ в случае сварки с высокой энергией, но оказывает значительно вредное воздействие в случае сварки на низких уровнях энергии, в частности после снятия стресса [GRO 86].

Как было отмечено ранее, контролируемые добавки титана замедляют рост аустенитного зерна. Это благотворное воздействие на прочность также усиливается фиксацией части свободного азота. Если, кроме того, цель состоит в том, чтобы избежать грубого осаждения нитридов в жидком состоянии, содержание титана и азота должно быть таким, чтобы продукт их активности оставался ниже, чем продукт растворимости в жидком состоянии.

Различные исследования показали, что эффективные добавки титана должны проводиться в сталях с низким содержанием азота ($< 5 \times 10^{-3}\%$) и сами по себе должны быть достаточно низкими ($Ti \approx 10 \times 10^{-3}\%$) [BAK 97, DEV 88, YAO 90].

Недавно разработанные стали, содержащие сложные оксиды титана, также показывают очень хорошие ударные свойства в ЗТВ. В этом случае эти термически очень стабильные оксиды могут быть использованы в качестве участков прорастания ферритного с охлаждением в ЗТВ, даже при высокой температуре (например, 1400°C), и включают образование тонкой дезориентированной игольчатой ферритовой структуры.

Бор является очень эффективным элементом, с помощью которого можно повысить прокаливаемость и ограничить образование доэвтектоидного феррита или феррита Widmanstätten. Тем не менее, желательно ограничить содержание В до 10-15 ч/млн, чтобы избежать хрупкости в результате осаждения борокарбидов или образования соединений М-А [RAM 86].

Гаммагенное свойство никеля значительно снижает температуры превращения при охлаждении и улучшает размер зерна. При содержании от 0,3 до 0,5% он повышает прочность как в ЗТВ, так и в основном металле.

В случае медленного охлаждения (например, когда $\Delta t_{500}^{800} > 100\text{с}$) или во время более позднего отпуска, дисперсные элементы, такие как ниобий и ванадий, могут переосаждаться и приводить к определенному охрупчиванию. Однако для данной марки стали следует отметить, что это, возможно, неблагоприятное влияние в значительной степени компенсируется тем фактом, что присутствие этих элементов обычно связано со значительным снижением процентного содержания углерода.

3.3.3. Остаточные напряжения, связанные со сваркой

Происхождение остаточных сварочных напряжений связано с локализацией источника тепла и изменениями механических свойств материалов в зависимости от температуры. Можно выделить два источника остаточных напряжений:

– остаточные напряжения, имеющие исключительно термическое происхождение, возникают в результате следующего факта: при повышении температуры $\Delta\theta$ элемент нагретой центральной зоны должен расширяться до степени $\varepsilon = \alpha \Delta\theta$, указывающей коэффициент линейного расширения материала. На самом деле, это расширение очень ограничено, поскольку соседние холодные участки играют сдерживающую роль. Элемент, таким образом,

подвергается сжатию от них. При высокой температуре предел текучести очень слабый, все возникающие деформации соответствуют пластическим деформациям. При охлаждении ситуация меняется на противоположную: нагретая центральная зона не может свободно вытягиваться и подвергается давлению со стороны соседних зон. После охлаждения нагретые зоны (расплавленный металл и ЗТВ) будут подвергаться остаточным растягивающим напряжениям, при этом соседние зоны из соображений баланса находятся в состоянии сжатия. В расплавленном металле создаваемые таким образом напряжения могут быть очень высокими, порядка устойчивости материала к деформации при комнатной температуре. На рис. 3.21 представлен типичный пример продольного распределения или поперечных напряжений (по отношению к направлению сварки) внутри сварного соединения;

– остаточные напряжения, связанные с аллотропными превращениями при охлаждении: в случае конструкционных сталей превращение аустенита всегда сопровождается более или менее выраженным расширением. Если это происходит при относительно низкой температуре (термостойкие материалы, быстрое охлаждение и т.д.), связанная с этим деформация больше не будет пластичной, а упругой. Расширение в противоположность соседним зонам приводит к образованию остаточных сжимающих напряжений.

Наложенные на тепловые напряжения, они могут снизить уровень растягивающих напряжений и даже привести к напряжениям сжатия в ЗТВ [МАС 80].

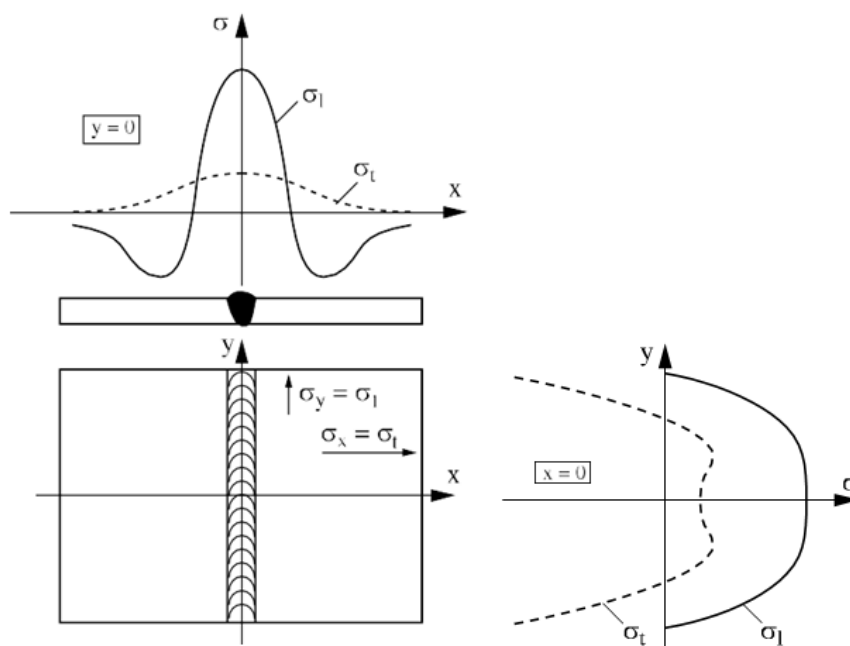


Рисунок 3.21. Типичный пример продольного распределения и поперечных остаточных напряжений в сварном соединении из [МАС 77]

Остаточные напряжения, возникающие в результате сварки, накладываются на напряжения в процессе эксплуатации и по этой причине играют роль в различных явлениях или свойствах: холодное растрескивание, усталостная прочность, разрыв, коррозия под напряжением и т.д.

3.3.4. Влияние остаточных стрессоустойчивых термообработок в ЗТВ

В некоторых случаях остаточные сварочные напряжения могут серьезно снизить эксплуатационные характеристики узлов, и необходимо снизить их уровень путем снятия напряжений. Принципиальный аспект этой операции состоит в преобразовании остаточных

упругих напряжений в пластические деформации. Как правило, это выполняется термической обработкой после сварки при такой температуре, чтобы предел упругости материала был достаточно снижен для достижения этого превращения. Таким образом, этот тип обработки включает:

- медленный нагрев до температуры, при которой снятие напряжения достаточно значительный;
- поддержание этой температуры (например, около 530–630°C для С-Mn и микролегированных сталей и от 670 до 710°C для сталей Cr-Mo и т. д.);
- достаточно медленное охлаждение, чтобы не создавать новых остаточных напряжений.

Мы ограничимся здесь указанием на некоторые общие металлургические последствия этого типа обработки, напомнив, что точный выбор условий зависит от многих факторов (типа материала, толщины и, конечно, любых действующих норм [BER 78]).

В общем, отпуск, связанный с обработкой для снятия напряжения, оказывает благоприятное влияние на закаленные микроструктуры, хотя это менее благоприятно, когда исходные структуры в ЗТВ представляют собой феррит-карбиды. Следует также отметить благоприятный эффект, вызванный восстановлением зон деформационного упрочненного старения во время сварки или после холодной обработки.

Как было видно, осаждение микролегирующих элементов (Nb, V) обычно является неполным во время охлаждения в ЗТВ. Дополнительное осаждение, которое может происходить во время термической обработки для снятия напряжений, обычно оказывает вредное влияние на прочность. Таким образом, металлургический эффект обработки часто будет результатом конфликта между механизмом размягчения матрицы (благоприятный) и более или менее значительным количеством осадков (неблагоприятный).

Отпуск термообработкой может иногда выполнять роль дополнительного нагрева, позволяя водороду диффундировать из сварных соединений, снижая уровни твердости и, таким образом, снижая риск холодного растрескивания (см. Раздел 3.2.4).

В случае низколегированных сталей добавление Mn, Cr, Ni может привести к некоторому ухудшению прочности на разрыв для обработки для снятия напряжений с последующим медленным охлаждением, в отличие от добавок Mo [BLO 80]. Это явление усиливается, чем крупнее зернистость и тем больше характер. Во избежание проблем обратимой хрупкости при отпуске [BLO 88] важно ограничить содержание примесей, что может быть достигнуто, например, с помощью параметра Брускато: $X = (10P + 4Sn + 5Sb + As) / 100$, ниже значения 10 для требовательных спецификаций [BER 97].

В некоторых случаях (низколегированные стали, сплавы, содержащие никель и т.д.) наблюдается, что термическая обработка для снятия напряжений приводит к межкристаллитному растрескиванию в ЗТВ, известному как растрескивание при повторном нагреве [DHO 87, DHO 92].

Это явление происходит при наличии значительных остаточных напряжений, особенно на локальных напряжениях, вызванных геометрией, в зонах грубых зерен, ослабленных межкристаллитными осадками (карбиды AlN, Mo, Nb, V) и отдельными примесями (S, P, As, Sn), Sb и т.д.) в пределах этих же соединений. Появление таких трещин обычно интерпретируется как атмосферное упрочнение внутренней поверхности зерна во время обработки после сварки, которая ограничивает все снятие напряжений или пластическую

деформацию внутри зерен, концентрируя их на менее стойких границах зерен. Таким образом, предотвращение растрескивания при перегреве включает использование менее чувствительных материалов, а также путем использования подходящих условий сварки: расплавленного металла с низким сопротивлением, *плакирования*, повышенного вклада тепла и/или предварительного нагрева, использования метода *обратного валика*, то есть узких проходов для сглаживания предыдущих и т.д.

Список использованной литературы

- [AND 65] ANDREWS K.W., “Empirical formulae for the calculation of transformation temperature”, *Journal of the Iron and Steel Institute*, no. 7, July 1965.
- [ATS 80] ATS/OTUA, “Conseils pour le soudage des aciers de construction métallique et chaudronnée à limite d’élasticité garantie d 420 N/mm²”, *Cahiers de l’ATS/OTUA*, 1980.
- [BAK 97] BAKER T.N., *Titanium Technology in Microalloyed Steels*, Institute of Materials Publications, 1997.
- [BER 72] BERNARD G., PRUDHOMME M., “Compléments à l’étude des phénomènes thermiques dans les joints soudés”, *Revue de Métallurgie*, July-August 1972.
- [BER 75] BERNARD G., “A view-point on the weldability of C-Mn and microalloyed structural steels”, *Microalloying Symposium 75*, Washington, October 1975.
- [BER 78] BERNARD G., Opportunité des traitements thermiques de relaxation dans les constructions soudées, Doc. IIS/IIW no. X.913-78, 1978.
- [BER 97] BERANGER G., HENRY G., LABBE G., SOULIGNAC P., *Les aciers spéciaux*, Lavoisier, 1997.
- [BHA 92] BHADOSHIA H.K.D.H., *Bainite in Steels*, Institute of Materials, 1992.
- [BLO 80] BLONDEAU R., “Les aciers faiblement alliés soudables, influences des éléments d’addition”, *Soudage et Techniques Connexes*, January-February 1980.
- [BLO 88] BLONDEAU R., “La fragilité de revenu réversible, facteurs et remèdes”, *Traitement thermique*, 220, 1988.
- [CHA 74] CHANDEL R.S., GARBER S., “Mechanical and metallurgical aspects of spot-welded joints in heat-treated low-carbon mild steel sheet”, *Metals Technology*, September 1974.
- [CHR 65] CHRISTENSEN N., DAVIES V. DE L., GJERMUNDSEN K., “Distribution of temperatures in arc welding”, *British Welding Journal*, February 1965.
- [CLY 58] CLYDE M., ADAMS C.M., “Cooling rates and peak temperatures in fusion welding”, *Welding Research Supplement*, May 1958.
- [CON 87] CONNOR L.P., *Welding Handbook*, volume 1, American Welding Society, 1987.
- [CON 92] CONSTANT A., HENRY G., CHARBONNIER J.C., *Principes de base des traitements thermomécaniques et thermochimiques des aciers*, PYC Edition, 1992.
- [DEA 40] DEARDEN J., O’NEILL, “A guide to the selection and welding of low alloy structural steels”, *Trans. Int. Welding*, 1940.
- [DEB 82] DEBROY T., SZEKELY J., EAGAR T.W., “Temperatures profiles, the size of the Heat-Affected Zone and dilution in electroslog welding”, *Materials Science and Engineering*, no. 56, 1982.

- [DEF 75] DEFOURNY J., BRAGARD A., “Caractérisation des cycles de température en soudage bout à bout à l’arc submergé de tôles d’aciers au moyen de deux grandeurs du champ thermique”, *Revue Belge de la Soudure*, no. 3, Lastijdschrift, 1975.
- [DEV 83] DEVILLERS L., KAPLAN D., MOUSSY F., Soudabilité des aciers trempés et revenus obtenus par trempe directe, Final research report, CECA no. 7210 KA/308, 1983.
- [DEV 84] DEVILLERS L., KAPLAN D., MOUSSY F., Préviation et comportement de la zone adoucie des aciers trempés-revenus, IRSID Report no. RE 1137, September 1984.
- [DEV 85] DEVILLERS L., KAPLAN D., Propriétés d’emploi d’assemblages obtenus par faisceau d’électrons des tôles de forte épaisseur en acier de construction, Final research report CECA no. 7210 KA/310, IRSID Report RE 1252, December 1985.
- [DEV 86a] DEVILLERS L., KAPLAN D., MAAS E., “Aspects mécaniques de l’évaluation de la ténacité d’éprouvettes métallurgiquement hétérogènes”, *Revue de Métallurgie*, CIT, April 1986.
- [DEV 86b] DEVILLERS L., KAPLAN D., Interpretation of deviated fracture of electron beam steel welds in notch bending tests, IRSID Report no. RE 1319, 1986.
- [DEV 87] DEVILLERS L., KAPLAN D., JANSEN J.P., “Simulation thermique des zones affectées par la chaleur en soudage multipasse des aciers de construction”, *Soudage et Techniques connexes*, March-April 1987.
- [DEV 88] DEVILLERS L., KAPLAN D., JANSEN J.P., “Aspects thermiques et métallurgiques de la ténacité des ZAC”, *Revue de Métallurgie*, CIT, March 1988.
- [DEV 89] DEVILLERS L., KAPLAN D., Aspects métallurgiques de l’assemblage des tôles de faible épaisseur par LASER CO₂, Final research report CECA no. 7210 KA/314, IRSID Report RCA 89333, October 1989.
- [DEV 91] DEVILLERS L., KAPLAN D., TESTARD P., An approach for predicting microstructures and toughness properties in HAZ of multipass welds, IRSID Report 91316, March 1991.
- [DHO 87] DHOOGHE A., VINCKIER A., “Reheat cracking – a review of recent studies”, *Int. J. Pres. Ves. and Piping*, 27, 1987.
- [DHO 92] DHOOGHE A., VINCKIER A., “La fissuration au réchauffage- revue des études récentes (1984-1990)”, *Le Soudage dans le Monde*, vol. 30, no. 3-4, 1992.
- [EAS 83] EASTERLING K., *Introduction to the Physical Metallurgy of Welding*, Butterworths, 1983.
- [GOL 76] GOLDAK J., BIBBY M., “The toughness of EB welds in HSLA steels”, *Welding of HSLA Structural Steels Conference*, Rome, ASME Publications, 1976.
- [GRA 95] GRANJON H., *Bases métallurgiques du soudage*, Publications du soudage et ses applications, 2nd edition, 1995.
- [GRO 86] GRONG O., AKSELSEN O.M., “HAZ toughness of microalloyed steels for offshore”, *Metal Construction*, September 1986.
- [GRO 94] GRONG O., *Metallurgical Modelling of Welding*, Institute of Materials, 1994. [GRU 81] GRUMBACH M., *Les essais de dureté*, Collection IRSID-OTUA, 1981.
- [HAL 84] HALE G.E., NUTTING J., “Overheating of low-alloy steels”, *International Metals Review*, vol. 29, no. 4, 1984.
- [HEH 72] HEHEMANN R.F., KINSMAN K.R., AARONSON H.I., “A debate on the bainite reaction”, *Metallurgical Transactions*, vol. 3, May 1972.

- [HEI 75] HEISER F.A., DE FRIES R.S., “Temper embrittlement in steel for thick wall gun tubes”, *Journal of Metals*, January 1975.
- [HON 95] HONEYCOMBE R.W.K., BHADOSHIA H.K.D.H., *Steels, Microstructure and Properties*, Edward Arnold, 1995.
- [HRI 95] HRIVNAK I., “Weldability of modern steel materials”, *ISIJ International*, vol. 35, 1995.
- [IKA 80] IKAWA H., OSHIGE H., TANOUE T., Effect of M-A constituent on HAZ toughness on a high strength steel, Document IIS-IIW, no. IX-1156-80, 1980.
- [IKE 95] IKEUCHI K., LIAO J., TANABE H., MATSUDA F., “Effect of temper-bead thermal cycle on toughness of weld ICCGHAZ of low alloy steel SQV-2A”, *ISIJ International*, vol. 35, 1995.
- [INO 98] INOUE K., *ISIJ International*, vol. 38, no. 9, 1998.
- [ION 97] ION J.C., “Modelling of LASER welding of Carbon-Manganese steels”, in H.C. Cerjak (ed.), *Mathematical Modelling of Weld Phenomena 3*, Institute of Materials, 1997.
- [IRS 77] IRSID, “Courbes dureté-paramètre de refroidissement en conditions de soudage”, collection established at the IRSID, 1977.
- [ITO 00] ITO R., SHIGA C., KAWAGUCHI Y., HAYASHI T., SHINOHARA H., TORIZUKA S., Microstructural analysis of softening region on weld HAZ of ultra-fine grained steels, Document Institut International de la Soudure no. IX-1968-00, 2000.
- [KAN 76] KANAZAWA S., “Improvement of weld fusion zone toughness by fine TiN”, *Transactions ISIJ*, vol. 16, 1976.
- [KAP 98] KAPLAN D., STUREL T., “Couplage d’un modèle métallurgique de soudage et de critères locaux de rupture pour prévoir la ténacité des joints soudés multipasses”, *9èmes Journées AFIAP*, Paris, October 1998.
- [KAW nd] KAWABATA F., AMANO K., TOYODA M., MINAMI F., Tempering effect by succeeding weld passes on multi-layered HAZ toughness, doc. Kawasaki Steel, no date.
- [KOS 81] KOSO M., MIURA M., OHMORI Y., “Microstructure and toughness of weld HAZ in 785 MNm⁻² steel”, *Metals Technology*, December 1981.
- [KOU 86] KOU S., WANG Y.H., “Computer simulation of convection in moving arc weld pools”, *Met. Trans. A*, vol. 17A, December 1986.
- [LAM 99] LAMBERT A., DRILLET J., GOURGUES A.F., STUREL T., PINEAU A., Microstructure of M-A constituent in HAZs of HSLA steel welds in relation with toughness properties, IRSID report, no. 99 21, 1999.
- [LIN 89] LIN Y., ABKEN M.G., BOWKER J.T., “Mechanical and microstructural analysis of multi-pass welded HAZ”, *Proceedings of Recent Trends in Welding Science and Technology*, ASM International, Gatlinburg, 1989.
- [LON 94] LONGAYGUE X., KAPLAN D., MAURICKX T., “Etude paramétrique de l’influence des facteurs d’hétérogénéité mécanique sur le comportement en service des assemblages soudés”, *Revue de Métallurgie*, CIT, June 1994.
- [MAK 77] MACHERAUCH E., WOHLFAHRT H., “Different sources of residual stress as a result of welding”, in *Residual Stresses in Welded Construction and their Effects*, The Welding Institute Publications, London, 1977.
- [MAR 80] MARQUET F., DEFOURNY J., MARIQUE C., MATHY H., BRAGARD A., Recherches sur les connaissances de base en vue d’améliorer le soudage des aciers sous haut apport calorifique, Rapport final de recherche CECA no. 7210 LA/303, 1980.

- [MAS 80] MASUBUCHI K., *Analysis of Welded Structures*, Pergamon Press, 1980.
- [MAT 94] MATSUDA F., FUKADA Y., OKADA H., SHIGA C., IKEUCHI K., HORII Y., SHIWAKU T., SUZUKI S., Review of Mechanical and Metallurgical Investigations of M-A constituent in Japan, Doc. IIS-IIW no. IX-1782-94, 1994.
- [MIE 92] MIETTINEN J., "Mathematical simulation of interdendritic solidification of low- alloyed and stainless steels", *Acta Polytechnica Scandinavica*, Chemical Technology and Metallurgy Series, no. 207, 1992.
- [MUR 67] MURRY G., PRUDHOMME M., CONSTANT A., "Etude des transformations dans la zone thermiquement affectée lors du soudage et son intérêt pour l'estimation de la dureté sous cordon", *Revue de Métallurgie*, 64, no. 6, June 1967.
- [NIL 75] NILES R.W., JACKSON C.E., "Weld thermal efficiency of the GTAW process", *Welding Journal*, *Welding Research Supplement*, January 1975.
- [OHM 74] OHMORI Y., OHTANI H., KUNITAKE T., "Tempering of the bainite/martensite duplex structure in a low-carbon low-alloy steel", *Met. Sci.*, vol. 8, 1974.
- [OKA 92] OKAGUCHI S., *ISIJ International*, vol. 32, no. 3, 1992.
- [OLE 81] OLETTE M., GATELLIER C., "Action d'une addition de calcium, de magnésium ou des éléments des terres rares sur la propreté inclusionnaire des aciers", *Revue de Métallurgie*, CIT, December 1981.
- [OTT 80] OTTERBERG R., SANDSTRÖM R., SANDBERG A., "Influence of Widmanstätten ferrite on mechanical properties of microalloyed steels", *Metals Technology*, October 1980.
- [POR 34] PORTEVIN A., SEFERIAN D., *XI^e Congrès de l'Acétylène et de la Soudure Autogène*, Rome, vol.3, 1934.
- [RAM 86] RAMBERG M., AKSELSEN O.M., GRONG O., "Embrittlement phenomena in the intercritical HAZ of boron-containing steels", *Advances in Welding Science and Technology*, Publications de l'ASM, Gatlinburg, 1986.
- [REE 94] REED R.C., BHADESHIA H.K.D.H., "A simple model for multipass steel welds", *Acta Metall. Mater.*, vol. 42, no. 11, 1994.
- [RIS 74] RIST A., ANCEY-MORET M.F., GATELLIER C., RIBOUD P.V., "Equilibres thermodynamiques dans l'élaboration de la fonte et de l'acier", *Techniques de l'Ingénieur*, M 1733, 1974.
- [ROS 46] ROSENTHAL D., "The theory of moving sources of heat and its applications to metals treatments", *Transactions ASME*, vol. 68, 849, 1946.
- [RYK 61] RYKALINE N.N., "Calcul des processus thermiques de soudage", *Soudage et techniques connexes*, no. 1-2, 1961.
- [TAI 95] TAILLARD R., VERRIER P., MAURICKX T., FOCT J., "Effect of silicon on CGHAZ toughness and microstructure of microalloyed steels", *Met. Trans. A*, vol. 26, February 1995.
- [TAK 95] TAKAHASHI A., OGAWA H., "Influence of softened heat-affected zone on stress oriented hydrogen induced cracking of a high strength line pipe steel", *ISIJ International*, vol. 35, 1995.
- [TOY 86] TOYODA M., Fracture toughness evaluation of steel welds (Review), Osaka University Document, July 1986.
- [TOY 92] TOYODA M. (ed.), *Proceedings of the Workshop Mismatching and its Control*, Osaka University, Tokyo, July 1992.

- [WEI 95] WEISS D., SCHMIDT J., FRANZ U., “A model of temperature distribution and weld pool deformation during arc welding”, *Mathematical Modelling of Weld Phenomena 2*, Institute of Materials, 1995.
- [YAO 90] YAO S., KOÇAK M., Influence of titanium on HAZ microstructure and toughness of offshore steel welds: literature review – part 1, Report GKSS, no. 90/E/39, 1990.
- [YUR 87] YURIOKA N., OKUMURA M., KASUYA T., COTTON H.J.U., “Prediction of HAZ hardness of transformable steels”, *Metal Construction*, April 1987.
- [ZAC 93] ZACHARIA T., DAVID S.A., “Heat and fluid flow in welding”, *Mathematical Modelling of Weld Phenomena*, Institute of Materials, 1993.
- [ZEN 48] ZENER C., *Transactions ASME*, no. 45, 1948.

Расплавленный металл

4.1. Механические характеристики

В широком значении, механические характеристики стали обусловлены ее структурой и химическим составом. Для заданной структуры химический состав влияет на механические свойства благодаря эффектам элементов, присутствующих в твердом растворе.

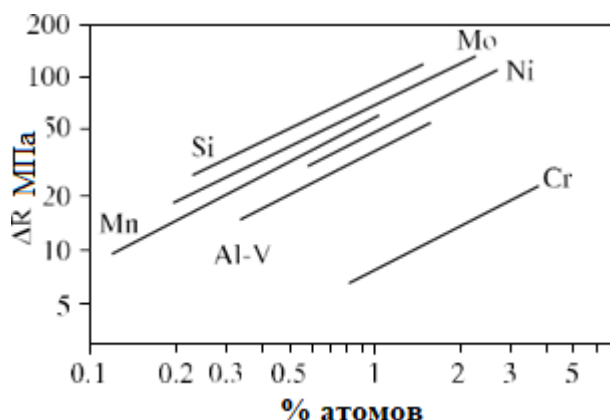


Рисунок 4.1. Увеличение предела прочности чугуна за счет воздействия различных элементов в твердом растворе; из [GAR 75]

На Рисунке 4.1 показано, что этот эффект довольно скромный, поскольку добавление атома в 1% хрома или молибдена меняет прочность феррита на разрыв только на 6 или 70 МПа соответственно.

Что касается структуры стали, то она зависит от термической обработки, а также от химического состава, который определяет ее прокаливаемость. Таким образом, две стали разного химического состава не приведут к одинаковой структуре при одинаковой термической обработке и, следовательно, будут иметь разные механические свойства.

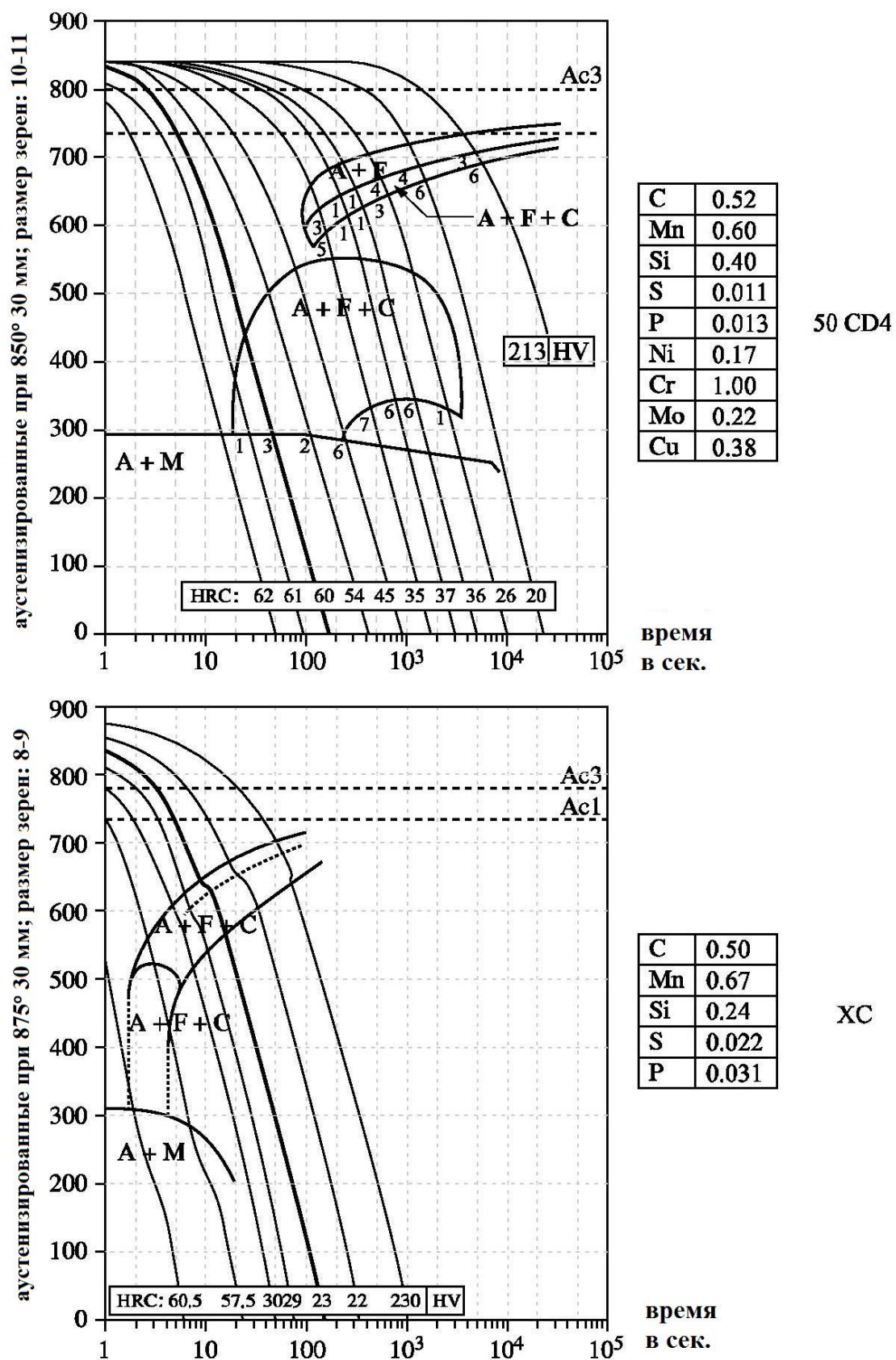


Рисунок 4.2. Термокинетические диаграммы превращений при непрерывном охлаждении (CCT); из [COL 74]

Диаграммы ССТ сталей XC48 и 50CD4 очень ясно показывают, что структурное влияние бесконечно выше, чем влияние твердого раствора легирующих элементов. Действительно, две стали с одинаковым процентным содержанием углерода имеют одинаковую твердость, когда они находятся в одинаковом структурном состоянии (твердость: 210/220 Hv в состоянии феррит + перлит; 60/62 HRC в мартенситном состоянии), но имеют чрезвычайно разные характеристики, когда они подвергаются той же термической обработке. Таким образом, для скорости охлаждения, показанной на Рисунке 4.2, сталь 50CD4 имеет преимущественно мартенситную структуру, которая придает твердость 60 HRC, в то время как сталь XC48 имеет структуру феррит + перлит, твердость которой составляет всего 23 HRC.

Эти металлургические принципы очень широки и, следовательно, также применимы к металлургии сварки. Таким образом, нам придется изучить любую сварочную операцию как с термической, так и с химической точек зрения.

4.2. Расплавленный металл

4.2.1. Термической аспект

Термический аспект уже был рассмотрен в Главе 3. Используемый подход применим к любой точке расплавленного металла, и, таким образом, можно определить условия охлаждения каждого прохода сборки с достаточной точностью при условии, что энергия сварки, тип соединения, процесс, соответствующая толщина/толщины, температура предварительного нагрева и/или температура между проходами известны.

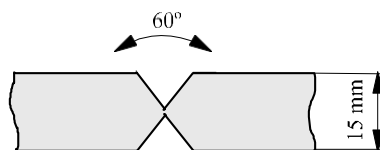


Рисунок 4.3. Двухсторонняя дуговая сварка под флюсом

Влияние изменений рабочих условий на термический цикл обычно недооценивается большинством сварщиков. Например, с помощью графика IRSID (см. Рис. 3.8) можно увидеть, что незначительные изменения электрических параметров или температуры между проходами могут значительно изменить цикл термической сварки и, следовательно, механические свойства сварного соединения (см. Таблицу 4,1).

Такие вариации могут быть использованы сварщиком для улучшения смачивания или для экономии времени при выполнении образца омологации небольшого размера, что приведет к гораздо более высокой температуре между проходами, чем в реальных условиях строительства.

Таблица 4.1. Оценка термического цикла на основе графика IRSID; от [COL 77]

Влияние энергии сварки			
1-ый проход	Пример 1	Изменение	Пример 2
Параметры сварки	600 А; 28 В; 50 см/мин		660 А; 30 В; 40 см/мин
Энергия сварки	20.16 кДж/см	47.3%	29.7 лДж/см
Δt 800/500	11 сек	263%	40 сек

Влияние температуры между проходами			
2-ой проход	Пример 3	Изменение	Пример 4
Параметры сварки	600 А; 28 В; 50 см/мин		600 А; 28 В; 50 см/мин
Температура	20°C	130°C	150°C
Энергия сварки	20.16 кДж/см	-	20.16 кДж/см
Δt 800/500	11 сек	82%	20 сек

4.2.2. Химический аспект

Состав расплавленного металла

Химический состав расплавленного металла зависит от смеси металлов, добавляемой продуктом сварки и основным металлом. Доля основного металла в сварном шве характеризуется коэффициентом разбавления (см. Рис. 4.4.).

$$\text{Коэффициент разбавления} = \frac{\text{Поверхность } \gamma(B)}{\text{Поверхность } \gamma(A + B)}$$

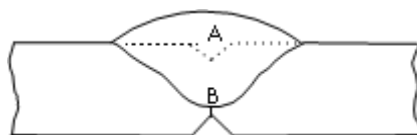


Рисунок 4.4. Влияние основного металла на состав расплавленного металла

В соответствии с процессом, типом соединения и процедурой сварки доля основного металла более или менее важна, и в случае многопроходного соединения она изменяется от одного прохода к другому. Однако сварочные материалы химически сбалансированы таким образом, что их наплавки «наружного разбавления» приобретают необходимые механические свойства в условиях охлаждения, соответствующих наиболее традиционным циклам термической сварки. Следует понимать, что каждый раз, когда сварочный материал подвергается охлаждающим фазам превращения, анализ металла, добавляемого сварочным продуктом, который позволяет получить те же механические свойства, отличается от такового основного металла, поскольку условия охлаждения во время производства последних сильно отличается от тех, которые связаны со сваркой. Таким образом, благодаря эффекту разбавления расплавленный металл имеет промежуточный анализ между анализом добавленного металла и анализом основного металла, и этот анализ может варьироваться от одного прохода к другому при многопроходной сварке. Вот почему большинство процедур режима работы требуют проверки свойств на различных уровнях в сварном соединении и, в частности, в корневой зоне, где коэффициент разбавления самый высокий и, следовательно, где самые низкие значения прочности часто будут найденный. Несмотря на эти квалификации,

производители не избежали неприятных сюрпризов при проверке свойств узлов в процессе производства, если они прибегают к материалам различных источников. Это объясняется тем фактом, что квалификация эксплуатационной процедуры учитывает стандартизированное обозначение основного металла и что в большинстве случаев это основано на механических свойствах продукта. Таким образом, в соответствии с различными доступными им технологиями производства, различные производители стали будут использовать существенно различающиеся анализы, чтобы соответствовать тому же стандартизированному обозначению, что и анализы трех сталей, одинаково используемых одним и тем же производителем, (см. Таблицу 4.2). Если они сварены с одним и тем же присадочным материалом, эти стали, хотя и соответствуют требуемому стандарту, приведут к очень разным анализам и механическим свойствам расплавленного металла в зонах с высокой степенью разбавления.

Таблица 4.2. *Примеры аналитических вариаций в сталях, соответствующих одному стандартизированному обозначению*

%	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni
NF EN 10028: P295GH	0.08 0.20	 <0.4	0.9 1.5	 <0.030	 <0.025	 <0.30	 <0.30
Сталь 1	0.20	0.23	1.02	0.014	0.008	-	-
Сталь 2	0.13	0.28	0.99	0.013	0.010	0.29	-
Сталь 3	0.12	0.40	1.34	0.018	0.008	0.24	0.12

Аналитические характеристики наплавленного металла

Наплавленный металл происходит в результате сплавления присадочного продукта в атмосфере дуги. Процессы сварки огнеупорным электродом (сварка ВИГ, плазменная сварка) обычно происходят в инертной атмосфере, чтобы избежать быстрого износа вольфрамового электрода. Когда используются эти процессы, анализ осажденного металла тогда очень близок к анализу наполнителя; он отличается только улетучиванием различных присутствующих элементов, которые являются функцией их соответствующих напряжений пара. Таким образом, будет отмечено небольшое снижение содержания марганца в наплавленном металле по сравнению с наполнителем.

С другой стороны, для всех других процессов атмосфера дуги преднамеренно более или менее окисляется, потому что легкое окисление поверхности основного металла способствует эмиссии электронов и, таким образом, стабильности дуги. В этом случае окислительно-восстановительные реакции происходят, главным образом, в каплях металла, которые переходят в дугу, поэтому анализ наплавленного металла заметно отличается от анализа наполнителя. Эти химические обмены легко принять во внимание при составлении сварочного продукта, чтобы отрегулировать легирующие элементы для получения желаемого содержания в добавленном металле, но при этих процессах никогда не удастся снизить содержание кислорода. содержание наплавленного металла до уровня основного металла (см. таблицу 4.3). Кислород, практически нерастворимый в большинстве металлов, обнаруживается в виде мелкодисперсных включений в сварном шве. В случае сталей мы увидим позже, что при определенных условиях эти включения могут играть ключевую роль во время аустенитного превращения расплавленного металла.

Таблица 4.3. Диапазоны изменения содержания кислорода в стальных сварных швах в зависимости от процессов и типов сварочных изделий

	Сталь	Расплавленный металл			
		ВИГ/Плазма	Дуговая сварка в активном газе		ДСПЭ/ДСФП
			Одинарный провод	Сварочная проволока	
О ч./млн.	15-40	20-60	250-550	300-1,100	280-1,100

При сварке покрытым электродом (дуговая сварка покрытым электродом, ДСПЭ) существует еще один элемент, содержание которого в расплавленном металле не может быть настолько низким, как хотелось бы: азот. Действительно, хотя покрытия покрытых электродов всегда содержат компоненты, которые разрушаются во время плавления и генерируют на уровне дуговых газов для защиты металлических капель от окружающего воздуха, полученная таким образом защита никогда не бывает идеальной, и мы не можем избежать определенного количества загрязнения. Поскольку процесс является ручным, ясно, что степень этого загрязнения зависит от ловкости сварщика, но, что бы это ни было, очень трудно иметь менее 100 ч/млн азота в наплавленном металле, особенно при сварке в любом положении.

4.2.3. Микроструктуры в сварных швах из ферритной стали: связь с характеристиками прочности

Как и в ЗТВ, механические свойства расплавленного металла зависят от его структуры и его химического состава.

Если химический анализ расплавленного металла легко определить, чтобы сделать его совместимым с растяжимыми свойствами основного металла, это не так просто с точки зрения вязкости. Следовательно, мы ограничимся нашими комментариями здесь вопросом прочности, потому что этот простой и недорогой тест систематически используется в сварке.

В многопроходном соединении всегда можно выделить два типа зон (см. Рис. 4.5): первый сохраняет закаленную структуру, а второй «пере-аустенифицируется» во время выполнения последовательных проходов. Микроструктурные компоненты этих различных зон, как правило, очень разные. За исключением случая сильно легированного сварного шва, пере-аустенизированные участки имеют ферритную структуру с небольшой долей перлита, поскольку процентное содержание углерода в сварочных изделиях всегда очень низкое.

Прочность этой ферритной структуры с равноосными зернами зависит, как всегда в металлургии, от тонкости зерен. Таким образом, это функция цикла термической сварки, который определяет время, проведенное в аустенитном состоянии, скорость охлаждения и, следовательно, температуру превращения аустенита. Это также зависит от присутствия таких элементов, как титан, ниобий, ванадий, алюминий или бор, которые ограничивают увеличение зерна на стадии пере-аустенизации. Во всяком случае, эта подогретая конструкция, как правило, не является источником проблем прочности в сварных соединениях.

С другой стороны, зоны после затвердевания могут иметь очень разные структуры от одного соединения к другому и, следовательно, значительные различия в показателях их характеристик прочности, как показано на рис. 4.6.

Соотношение зон отверждения и повторного нагрева зависит от процесса и условий сварки. В случае многопроходных сварных швов ВИГ или при использовании покрытых электродов малого диаметра узкая ширина валика эффективно гарантирует, что весь расплавленный металл имеет разогретую структуру. С другой стороны, в дуговых сварках под флюсом зоны после затвердевания никогда не составляют менее 50% расплавленного металла и даже могут достигать 90% в случае двухсторонних сварочных швов.

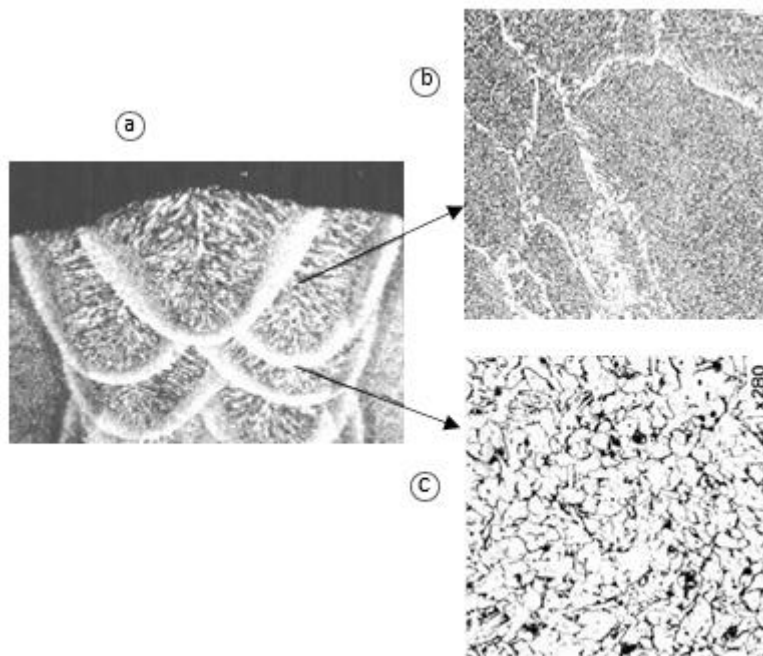


Рисунок 4.5. *Дуговая сварка под флюсом: а) макрографический аспект; б) микроструктура зон отверждения; в) микроструктура перегретых зон*

Пропорция, но особенно положение этих двух типов конструкций в нижней части образцов для испытания на удар, будет влиять на результат. Действительно, энергия разрушения, измеренная во время этого испытания, представляет собой сумму энергии, необходимой для инициирования трещины на дне надреза, и энергии, необходимой для ее прохождения и образования двух поверхностей. Трещина начнется под воздействием маятника, как только критическое напряжение инициирования, характерное для каждой микроструктуры, будет достигнуто в той или иной из них. Таким образом, напряжение, возникающее на дне надреза под воздействием маятника, уменьшается от его центра к сторонам. Вот почему в совершенно однородном материале разрыв всегда инициируется в центре надреза, в то время как в гетерогенном материале инициация может быть смещена в поперечном направлении, если микроструктура, расположенная в центре надреза, имеет критическое растрескивающее напряжение выше, чем у смежной структуры. Таким образом, когда наиболее хрупкая структура смещена по сравнению с центром надреза, составляющая *инициирования* энергии разрыва, измеренная во время испытания на удар, намного выше, чем, когда эта же структура расположена в центре. Что касается энергии распространения, то можно легко понять, что она является функцией размера каждой микроструктуры и их внутренних характеристик.

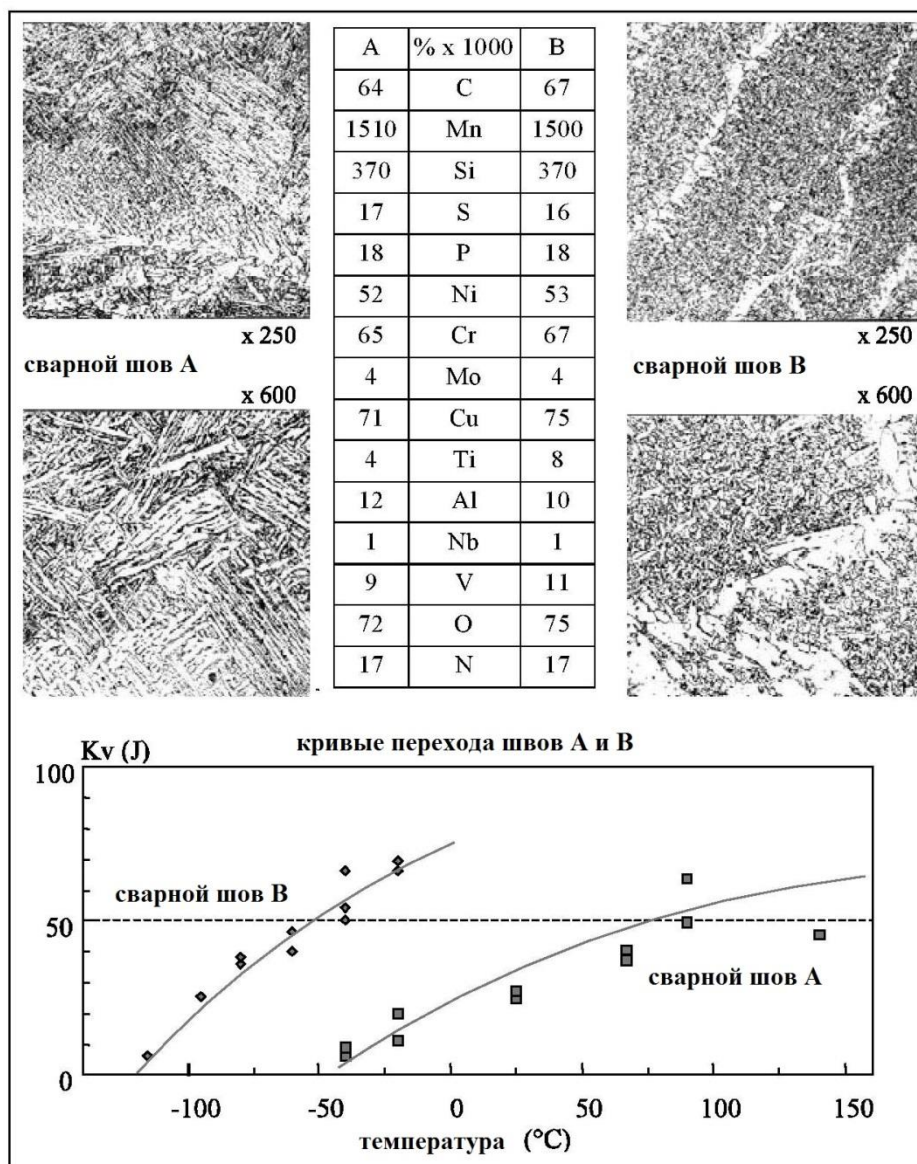


Рисунок 4.6. Влияние микроструктуры на ударную вязкость

Основные микрокомпоненты, которые могут существовать в зонах отверждения, представлены на Рисунке 4.7.

В документе IIS/IIW-999-88 Международный институт сварки предлагает более точный анализ и различает больше компонентов, однако это не главное. Действительно, все металлурги знают, что прочность улучшается за счет улучшения структуры.

В этих условиях становится ясно, что, глядя на микрофотографии на Рис. 4.7, закаленные зоны, обеспечивающие наилучшие характеристики прочности, будут в основном сделаны из игольчатого феррита.

Этот микрокомпонент, который никогда не появляется в сталях, существует в расплавленном металле только в присутствии определенных включений, которые обеспечивают внутригранулярное прорастание феррита во время превращения аустенита [ABS 78, СОС 78]. Известно, что существование этих включений зависит от содержания кислорода в осажденном металле, но, так как происходит внутризерновое прорастание феррита, представляется необходимым, чтобы эти сложные включения, которые возникают в результате окислительно-восстановительных реакций в плавном металле и которые были

захвачены во время затвердевания имеют локально на своей поверхности оксид TiO TiO [STL 93] или оксид MnTi MnTi_2O_4 [BLA 99]. Следует понимать, что титан играет фундаментальную роль [CHA 83, EVA 97] и, кроме того, его вариация (от 0,004 до 0,008%) объясняет разницу между структуры и значения прочности сварных швов А и В на Рисунке 4.6. Однако недостаточно иметь минимум титана, чтобы он находился в той или иной из желаемых форм на поверхности включения. Более того, необходимо, чтобы кинетика реакции, приводящая к образованию включений, позволяла получить этот результат. Таким образом, помимо содержания кислорода, природа и количество всех раскисляющих элементов, присутствующих в расплавленном металле, будут играть роль, независимо от того, происходят ли они из проволоки или основного металла [BUR 88, DEV 83].

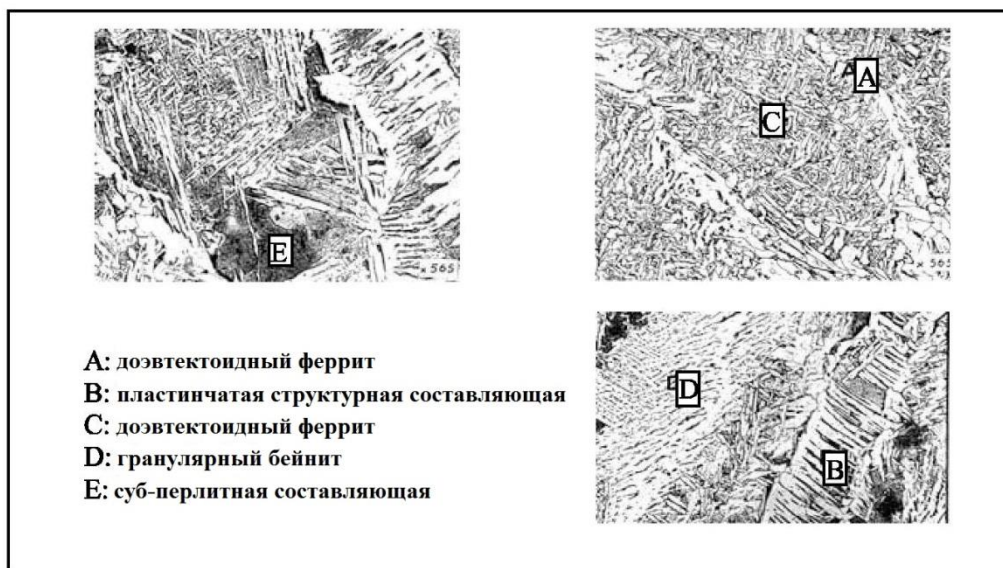


Рисунок 4.7. Основные микрокомпоненты затвердевшего расплавленного металла в его закаленном состоянии

Сложность этих явлений означает, что даже сегодня невозможно предсказать наличие функциональных элементов, необходимых для образования игольчатого феррита, с помощью простого чтения химического анализа расплавленного металла. Только металлографическая экспертиза позволяет нам однозначно определить наличие этого компонента.

Эти конкретные включения необходимы для получения структуры, богатой игольчатым ферритом и, как следствие, хорошей прочностью во всех зонах сварки (включая зоны закаливании). Однако этого условия недостаточно, поскольку доля игольчатого феррита зависит от цикла термической сварки и химического состава расплавленного металла, который определяет его прокаливаемость.

Влияние скорости охлаждения

В металлургии диаграммы ССТ позволяют получить точное представление о структуре и твердости стали в зависимости от скорости охлаждения после аустенизации. Эти диаграммы специфические для каждой стали и каждого аустенитного условия (размер аустенитного зерна).

При сварке такие диаграммы не существуют и, несомненно, никогда не будут существовать, поскольку колебания скорости охлаждения в области превращения аустенита (Δt 800/500 или Δt 700/300) всегда сопровождаются изменением условий аустенизации, но нет никакой корреляции между этими двумя факторами: увеличение энергии сварки, температуры

предварительного нагрева, толщины деталей, подлежащих сборке, или осуществление различных процессов сварки не имеют аналогичных последствий для верхнего (аустенитное поле) и нижние части (поле трансформации) термического цикла [БОН 80].

В любом случае, если присутствуют необходимые включения, было ясно показано [ANT 81], что увеличение скорости охлаждения приводит, по крайней мере, первоначально, к увеличению доли игольчатого феррита и сопровождается улучшением прочности. (см. Рис. 4.8). Во-вторых, дополнительные закаленные структуры (нижний бейнит и/или мартенсит) могут быть обнаружены, если прокаливаемость расплавленного металла высокая.

Влияние легирующих элементов

Добавление легирующих элементов в сталь повышает ее прокаливаемость, задерживая превращения, которые происходят при прорастании и росте, и понижая температуру, при которой начинается мартенситное превращение (M_s). Если рассматривать диаграмму ССТ, основной эффект этих дополнений состоит в смещении кривых диаграммы вправо.

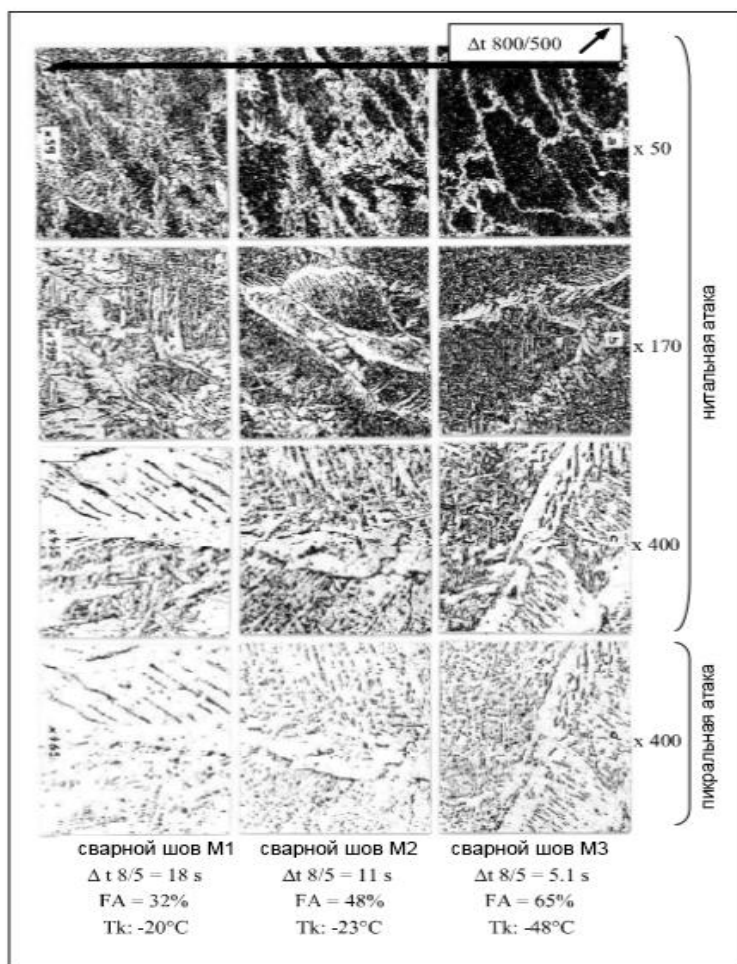


Рисунок 4.8. Влияние термического цикла на структуру и температурный переход - анализ расплавленного металла: 0,066% C; 0,94% Mn; 0,62% Si; из [BON 80]

Это почти то же самое для расплавленного металла, за исключением того, что замедление превращений за счет добавления легирующих элементов, по-видимому, способствует «традиционным» превращениям в большей степени, чем образование

игольчатого феррита. Это легко объяснимо, если учесть, что для существования поля, в котором аустенит превращается в игольчатый феррит, должны присутствовать определенные включения, которые играют роль ранее существовавших микробов. Тогда добавление легирующих элементов может влиять на скорость прорастания игольчатого феррита, но только на его рост.

Таким образом, при постоянной скорости охлаждения добавление легирующих элементов вызывает эволюцию в микроструктуре, аналогичную той, которую вызывает увеличение скорости охлаждения при постоянном химическом составе: первоначально, по меньшей мере, доля игольчатого феррита увеличивается из-за преобразований, которые предшествовали его формированию значительно замедлено; затем зерна игольчатого феррита очищают, затем, наконец, они постепенно заменяются увеличивающейся долей мартенсита и/или нижнего бейнита.

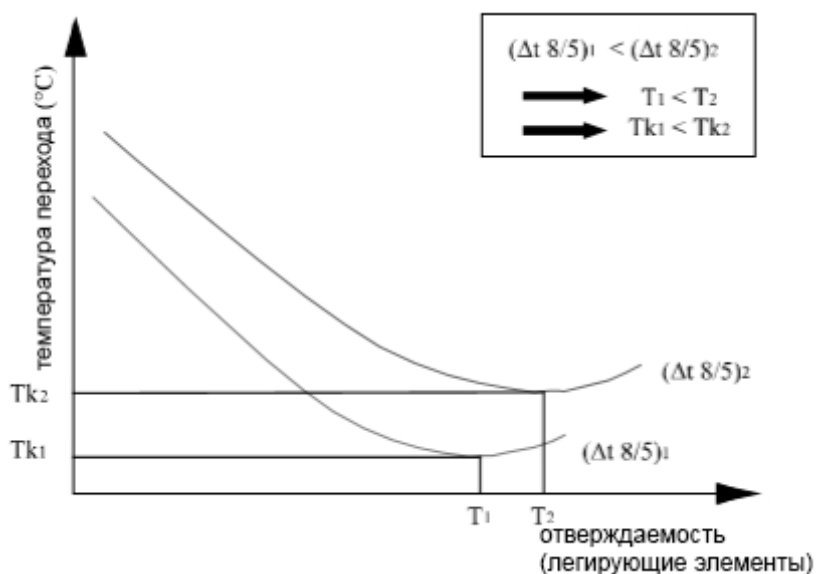


Рисунок 4.9. Влияние легирующих элементов и скорости охлаждения на температуру перехода расплавленного металла

Однако с точки зрения механических свойств увеличение скорости охлаждения и добавление легирующих элементов не являются полностью эквивалентными. Действительно, в той же микроструктуре присутствие большего количества легирующих элементов вызывает, благодаря эффекту твердого раствора, увеличение прочности на разрыв, предела текучести и твердости, но также и снижение значений прочности.

Затем можно суммировать влияние скорости охлаждения и химического состава на характеристики прочности следующим образом (см. Рис. 4.9.):

- когда содержание легирующего элемента низкое (низкая прокаливаемость), мы получаем очень грубую, как затвердевшую структуру, в основном состоящую из доэвтектоидного феррита и пластинчатого компонента. В этом случае прочность ухудшается независимо от скорости охлаждения (высокая температура перехода);
- когда содержание легирующего вещества (Mn, Mo и т. д.) увеличивается, и если присутствуют благоприятные включения, доля игольчатого феррита увеличивается, его зерна становятся все более мелкими, а прочность значительно улучшается;
- если содержание легирующих элементов увеличивается дальше, чем T_1 для $(\Delta t \ 8/5)_1$ или T_2 для $(\Delta t \ 8/5)_2$, наблюдается ухудшение значений прочности, поскольку отрицательный эффект упрочнения за счет эффекта твердого раствора, связанный с увеличением количества легирующих элементов, становится выше, чем положительный эффект, обусловленный

увеличением количества и крупности игольчатого феррита;

– сравнение двух кривых на Рис. 4.9 убедительно показывает, что увеличение скорости охлаждения $(\Delta t \ 8/5)_1$ по сравнению с $(\Delta t \ 8/5)_2$ всегда улучшает прочность.

В отсутствие включений, необходимых для образования игольчатого феррита, сначала появляется зернистый бейнит, а затем - нижний бейнит. Эти структурные изменения также сопровождаются определенным улучшением значений прочности на удар, но они остаются значительно ниже, чем те, которые получены в присутствии игольчатого феррита.

Влияние содержания кислорода

В сварных швах из ферритной стали необходимо минимальное содержание кислорода, чтобы могло произойти превращение аустенита в игольчатый феррит. Это минимальное содержание зависит от других присутствующих раскислителей и увеличивается, в частности, с содержанием алюминия. Это составляет около 250 частей на миллион, когда содержание алюминия ниже 0,015%; он может достигать 350-400 ч/млн при содержании алюминия от 0,035 до 0,040%.

Именно потому, что этот минимум не достигнут, плохая прочность достигается при низкой температуре при сварке ферритной стали, выполняемой с помощью процессов с высокой плотностью энергии, таких как плазменная сварка, электроннолучевая и лазерная.

Содержание кислорода также дает определенное указание на скорость включения, и эта скорость имеет прямое влияние на энергию пластического разрыва: при прочих равных условиях увеличение скорости включения приводит к уменьшению энергии пластического разрыва (см. Рис. 4.10).

Таким образом, существует оптимальный кислородный параметр для сварных швов из ферритной стали, когда требуемые характеристики растяжения доступны для игольчатой ферритовой структуры (<650 или 700 МПа), поскольку будет достигнут лучший компромисс между растяжением и прочностью. Помимо этого, к структурам из более низкого бейнита или мартенсита придется прибегать, а также стремиться к максимальному снижению содержания кислорода, чтобы минимизировать скорость включения. Очевидно, что это также относится к сварным швам из аустенитной нержавеющей стали или, в более общем случае, к гранцентрированным кубическим материалам, которые не представляют пластичный/хрупкий переход.



Рисунок 4.10. Влияние содержания кислорода на переходную кривую Шарпи-V

Влияние азота, ниобия и ванадия

В ферритных сталях азот может быть связан с тремя металлургическими явлениями:

– эффект твердого раствора: атомы азота, находящиеся в промежуточном положении в решетке с кубическим центром железа, генерируют большие искажения кристаллической решетки, которые вызывают увеличение характеристик прочности и твердости, связанных с уменьшением прочности. Именно к этим свободным атомам азота, как правило,

приписывается;

- дисперсионное твердение: это твердение происходит в результате когерентного осаждения нитридов или карбонитридов элементов с сильным сродством к азоту (в частности, ниобию и ванадию). Эти осадки в основном происходят в диапазоне температур 400-650°C;
- старение: это происходит из-за диффузии атомов азота в твердом растворе внедрения к кристаллическим дефектам, что сильно ограничивает возможности дислокационных смещений.

Затем наблюдается увеличение предела упругости, в то время как прочность на удар падает. Это явление действительно появляется только при низких температурах (температура окружающей среды/250°C).

При сварке этих сталей увеличение содержания азота оказывает отрицательное влияние на прочность на удар во всех зонах многопроходных сварок, то есть не только на последнем проходе, который имеет закаленную структуру с высоким содержанием игольчатого феррита, но также в зонах пере-аустенитизации, которые имеют равноосную ферритную структуру с мелкими зернами и зоны с закаленной структурой, но нагретые до значения ниже, чем A_{c1} , во время выполнения последующих проходов [BON 86]. В этих последних зонах увеличение температуры перехода с содержанием азота более заметно, когда сварка содержит небольшое количество ниобия, и еще больше, когда она содержит ванадий.

Ниобий и ванадий очень редко добавляются спонтанно в сварочные изделия, но они необходимы для производства стали ТКО (Термомеханическая контролируемая обработка), а также встречаются в некоторых улучшенных закалкой и отпуском сталях. Благодаря эффекту разбавления небольшое количество будет обнаружено в расплавленном металле и, в частности, в корневых проходах, где они будут вызывать снижение значений прочности, которые становятся все более значительными при повышении содержания азота. Это охрупчивание будет еще более заметным, если сборка должна будет пройти последующую сварочную разгрузочную обработку, поскольку она позволит более полно осаждаться ниобиевым карбо-нитридам и нитридам ванадия.

Титан/бор эффект

Этот эффект обусловлен присутствием очень небольшого количества бора (обычно от 20 до 60 частей на миллион), которое значительно задерживает появление доэвтектоидного феррита на границах аустенитных зерен во время охлаждения сварного шва. Таким образом, превращение аустенита может происходить главным образом в результате внутризернистого прорастания игольчатого феррита на включениях, при условии, что они имеют необходимые характеристики и, таким образом, присутствуют в зонах поверхности оксида титана. Когда весь химический анализ расплавленного металла хорошо сбалансирован с точки зрения марганца и, возможно, никеля, так что его прокаливаемость является оптимальной для термического цикла, которому подвергается сварной шов, сеть доэвтектоидных ферритов сводится к тонкой окантовке, остальная часть аустенит превращается в игольчатый феррит. Более того, если можно прибегнуть к добавлению молибдена, что является случаем, когда требуется предел текучести, превышающий 550 или 600 МПа, таким образом достигается синергетический эффект бор-молибден, который позволяет удалить доэвтектоид. ферритовую сеть полностью и для получения структуры, состоящей только из игольчатого феррита, свойства прочности которого замечательны. Наконец, следует отметить, что действие титана и бора не ограничивается увеличением доли игольчатого феррита в зонах с грубой структурой затвердевания, оно также вызывает измельчение зерен феррита в реаустенизированных зонах (см. Рис. 4.11).

Таким образом, наше использование эффекта титан-бор позволяет достичь заметного улучшения значений прочности во всех зонах сварки и лучшей однородности свойств в этих различных зонах. Тем не менее, эти положительные результаты получаются только в том случае, если содержание азота низкое и отлично контролируется. Вот почему этот эффект был первоначально реализован в присадочных изделиях для изготовления больших труб методом переплавной многоэлектродной сварки под флюсом.

Затем он был использован в заполненной рутиловой проволоке и дал этому продукту привилегированное положение, поскольку оно соответствовало самым строгим металлургическим спецификациям. С другой стороны, он не используется в покрытых электродах, поскольку этот процесс не позволяет в достаточной степени контролировать содержание азота в добавляемом металле.

4.3. Основные дефекты сварки

Мы не будем иметь дело с дефектами чисто эксплуатационного происхождения, такими как канавки, недостаточное проникновение, залипание и т. д.; мы скорее рассмотрим только внутренние дефекты, то есть горячие трещины, холодные трещины, разогревающиеся трещины и пористости.

Мы постараемся прояснить критерии, которые позволяют идентифицировать эти явления, и показать механизмы их формирования, чтобы вывести меры предосторожности, которые мы должны предпринять, чтобы избежать их, или способы их устранения при возникновении проблем.

4.3.1. Образование горячих трещин

Под этим термином мы подразумеваем усадочные трещины, трещины ликвации и трещины, возникающие в результате недостаточной пластичности при высокой температуре.

Усадочные трещины

Они появляются в конце затвердевания. Они могут быть внутренними или появляться на поверхности, но они всегда локализованы в междендритных пространствах и, следовательно, следуют направлениям затвердевания. Таким образом, они перпендикулярны к изотермам в любой точке. Поскольку они образуются при высокой температуре, они окисляются при контакте с воздухом, когда они выходят на поверхность. Наконец, они всегда широкие из-за сокращений в окружающем металле во время охлаждения.

Факторы, влияющие на образование горячих трещин, частично зависят от анализа расплавленного металла и частично от процедуры сварки (см. Таблицу 4.4.)

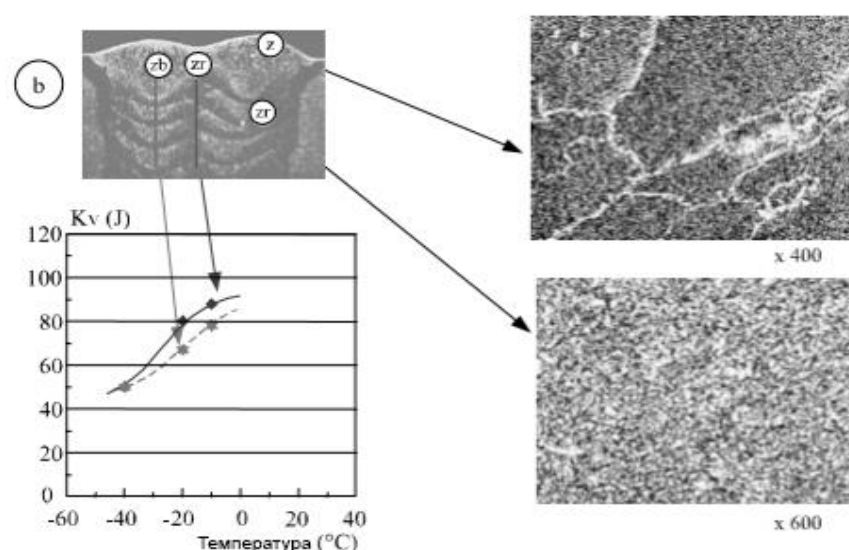
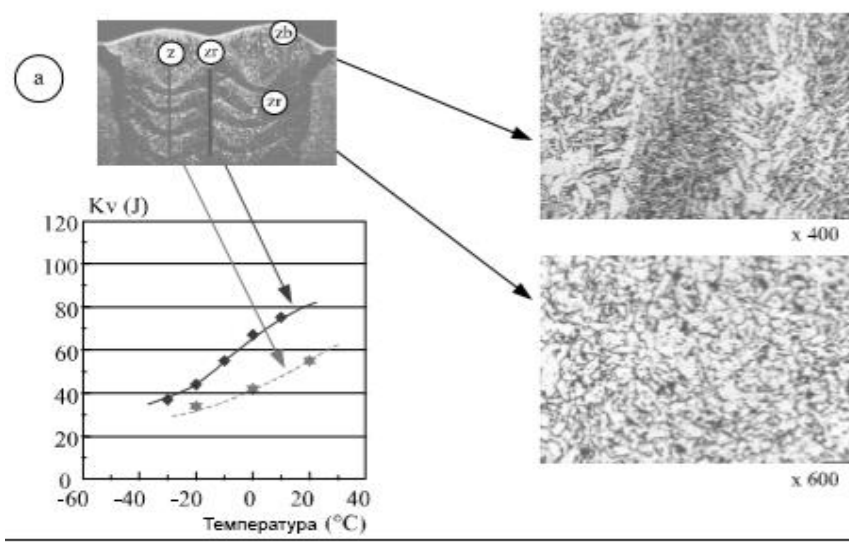


Рисунок 4.11. а) рутитовая проволока без эффекта Ti-B; б) та же формула с добавлением бора. Надрезы для испытания на удар, расположенные на оси прохождения (zb) и на оси пресс-формы (zr)



Рисунок 4.12. Локализация усадочных трещин

Длительный период затвердевания и присутствие компонентов с низкой температурой плавления означают, что твердая и жидкая фазы будут сосуществовать в широком диапазоне температур. Во время охлаждения в этой области жидкость превращается в твердое вещество при сжатии (изменение объема при затвердевании), в то время как твердое вещество уже сформировалось в соответствии с собственным коэффициентом расширения. Понятно, что чем дольше время затвердевания, тем выше риск недостаточного материала в конце затвердевания и появления трещины в зонах, которые затвердевают последними, то есть в междендритных пространствах.

Таблица 4.4. Факторы, приводящие к растрескиванию при затвердевании

Факторы, касающиеся материала	Факторы, касающиеся рабочего и сварочного процессов
Длительное затвердевание	Определенные формы сварного шва (вогнутая поверхность, ширина/глубина $<0,7$)
Составляющие с низкой температурой плавления	Высокая скорость сварки
Основной металл с высоким пределом упругости	Жесткий зажим

Влияние предела текучести основного металла и зажима деталей, подлежащих сборке, имеют различную природу. Когда расплавленная зона охлаждается, она сжимается, так что возникают напряжения, если усадка не может происходить свободно. Эти усадочные напряжения будут воздействовать на расплавленный металл в процессе охлаждения, заставляя его искажаться, что он сможет выдержать или нет в зависимости от обстоятельств. Чем больше внутренний или внешний зажим, ограничивающий таким образом деформации сборки, тем больше будут эти напряжения.

Хотя часто недооценивают, форма сварных швов и скорость сварки имеют большое влияние. Зона, которая затвердевает последней, концентрирует примеси из-за их отторжения в жидкой фазе во время затвердевания. Это делает его химически более чувствительным к риску образования трещин, и, когда сварной шов имеет вогнутую поверхность, эта зона также меньше в своем поперечном сечении. Таким образом, усадочные напряжения с большей вероятностью могут привести к образованию трещин, чем при выпуклой поверхности (см. Рис. 4.13). Таким же образом, когда бусина проникает глубоко (низкое соотношение ширины и проникновения), ее края параллельны, так что заключительная стадия затвердевания влияет на всю ее высоту (центральная колонна); с другой стороны, когда форма треугольная, на поверхности валика заканчивается затвердевание, что снижает риск растрескивания. Наконец, снижение скорости сварки и, следовательно, скорости затвердевания облегчает оставшейся жидкости заполнять промежутки, созданные между междендритными пространствами, за счет уменьшения объема, связанного с жидкой и твердой фазой; таким образом, снижается риск появления трещин.

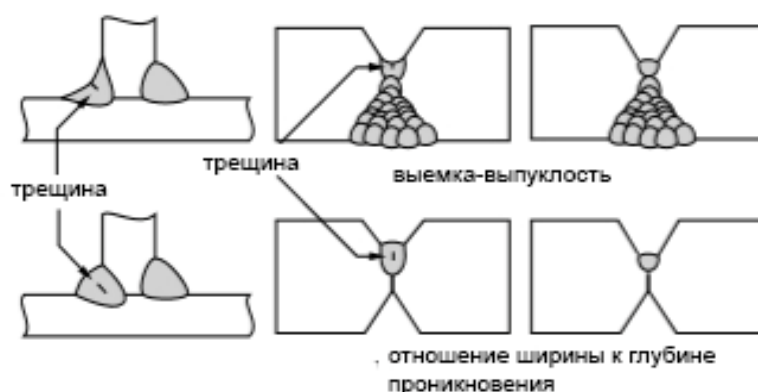


Рисунок 4.13. Влияние формы сварных швов на трещины затвердевания

Эти соображения носят общий характер и, следовательно, применимы ко всем типам материалов, но указание на то, что длительный период затвердевания или присутствие компонентов с низкой температурой плавления ухудшает риск растрескивания, практически не подходит для сварщика, который должен использовать материалы, характеристики

которых он часто не знает. В его интересах учитывать эти риски, используя химический анализ материала.

В случае мягких и низколегированных сталей Бейли [BAI 78] вывел из факторного эксперимента параметр UCS (*Единицы восприимчивости к трещинам*), который характеризует склонность к образованию трещин при затвердевании при дуговой сварке под флюсом, анализируя расплавленный металл:

$$UCS=230C^*+190S+75P+45Nb-12.3Si-5.4Mn-1$$

где $C^* = 0.08$ если $C < 0.08\%$ и $C^* = C$ если $C > 0.08\%$.

Он указал его действительность для следующих значений: C <0,23%; S 0,010-0,050%; P 0,010-0,045%; Si 0,15-0,65%; Mn 0,45-1,6%; Nb <0,07%; Ni <1%; Cr <0,5%; Mo <0,4%; V <0,07%; Cu <0,3%; Ti <0,02%; Al <0,03%; B <0,002%; Pb <0,01%; Co <0,03%. Позже [BAI 94] он уточнил, что увеличение хрома, молибдена или ванадия сверх этих значений снижает риск растрескивания при затвердевании, тогда как увеличение содержания никеля и бора оказывает отрицательное влияние.

Однако он также заявил, что вредное влияние бора было продемонстрировано только для значений выше 0,01%. В этом же документе автор считает, что риск растрескивания незначителен, когда параметр UCS ниже 10 и очень большой, если он выше 30, значение 20 соответствует порогу появления трещин при выполнении угловых сварных швов в первая публикация.

Из этой формулы видно, что углерод не оказывает влияния до 0,08%, но оказывается наиболее вредным элементом, выходящим за пределы этого значения, то есть с момента, когда затвердевание включает перитектическую реакцию. Это широко объясняется тем фактом, что растворимость серы и фосфора в аустените намного ниже, чем в феррите, так что появление перитектической реакции приводит к увеличению сегрегации этих элементов, тем самым способствуя образованию междендритных пленок с низкой температурой плавления и, следовательно, риск растрескивания.

Коэффициенты элемента, которые играют роль в этом параметре UCS, относятся к сварке под флюсом. Они не могут быть в целом применены к другим процессам, в частности, потому что другие факторы, которые влияют на растрескивание (геометрия валика, скорость сварки), сильно отличаются от одного процесса сварки к другому. Тем не менее, химические элементы с отрицательным или положительным эффектом остаются прежними. Столкнувшись с проблемой растрескивания при затвердевании в сварном шве из C-Mn или низколегированной стали, всегда будет выгодно уменьшить содержание элементов C, S, P и Nb и увеличить содержание Mn и Si в расплавленном металле. Разумный выбор присадочного продукта может способствовать увеличению содержания Mn и Si, но не будет влиять на вредные элементы, поскольку эти элементы не сильно различаются в сварочных изделиях. На практике, если их концентрация в расплавленном металле находится на недопустимом уровне, это происходит потому, что они происходят из-за разбавления основного металла. Затем необходимо будет внедрить процедуру, которая позволит свести к минимуму разбавление и, в крайних случаях, потребует предварительной смазки поверхностей, подлежащих соединению.

В случае аустенитных нержавеющей сталей риск растрескивания затвердевания тесно связан с фазами, вовлеченными в это время. Действительно, в зависимости от их химического состава сварные швы аустенитной нержавеющей стали могут полностью затвердеть в

аустените или первичном аустените, затем в феррите, или в первичном феррите, затем в аустените или, наконец, полностью в феррите.

Однако мы уже видели, что растворимость примесей, таких как сера и фосфор, была намного выше в феррите, чем в аустените, и что сегрегация этих элементов может привести к образованию междендритной пленки при низкой температуре плавления. Если результаты многих исследований, касающихся чувствительности к растрескиванию аустенитных нержавеющих сталей, классифицируются в соответствии с режимом затвердевания [КОТ 93], наблюдается увеличение сопротивления при переходе от исключительно аустенитного режима к первичному режиму аустенита, а затем к полностью ферритному режиму и, наконец, первичному ферритному режиму.

Большое сопротивление первичного ферритного режима по сравнению с полностью ферритным режимом, вероятно, связано с тем, что смешанный затвердевающий феррит + аустенит генерирует большую длину границ раздела и, таким образом, сводит к минимуму сегрегацию.

Существует множество диаграмм для прогнозирования структуры добавленного осажденного металла в соответствии с содержанием элементов альфа-гена (эквивалент хрома) и элементов гамма-гена (эквивалент никеля), первым и наиболее известным из них является тот, который был установлен Шеффлером более 50 лет назад. [SCH 49]. Однако большинство этих диаграмм показывают структуру сварного металла после охлаждения до комнатной температуры, и эта структура может сильно отличаться от той, которая существовала во время затвердевания, потому что во время охлаждения феррит обычно регрессирует в аустенит. Суутала [SUU 83] предложил диаграмму для прогнозирования режима затвердевания, в которой он различает области затвердевания в первичном аустените и первичном феррите. Однако, по нашему мнению, наиболее информативной и наиболее адаптированной схемой для современных сталей является ВКР-92 (см. Рис. 4.14), поскольку она выделяет зоны, соответствующие четырем режимам затвердевания, а также дает, выраженный в терминах *ферритного числа*, ферритное содержание после охлаждения.

Из этой диаграммы, таким образом, можно оценить чувствительность к растрескиванию сварного шва в соответствии с положением анализируемой точки в полях А, АF, FА или F; этот анализ может быть результатом измерения или оценки, начинающейся с анализа основного металла, нанесенного металла и предполагаемой степени разбавления. Риск также может быть оценен путем измерения ферритового числа стандартного сварного шва, представляющего предлагаемые соединения, с помощью такого устройства, как ферритоскоп МР30, поскольку на этой диаграмме видно, что ферритовое число, большее 4, соответствует в большинстве случаев сварные швы, затвердевающие в области FА (наиболее устойчивые) или F. Если репрезентативная точка находится в зоне риска (А или АF, или FN <4), будет очень полезно, если технические условия не запрещают это, изменить выбор присадочного продукта или процедуру сварки (степень разбавления) так, чтобы они попадали в поля FА или F. Наконец, для случаев, когда это оказывается невозможным, будет абсолютно необходимо обратить внимание на форму валика, чтобы минимизировать зажим и использовать низкую скорость сварки, как мы указали ранее.

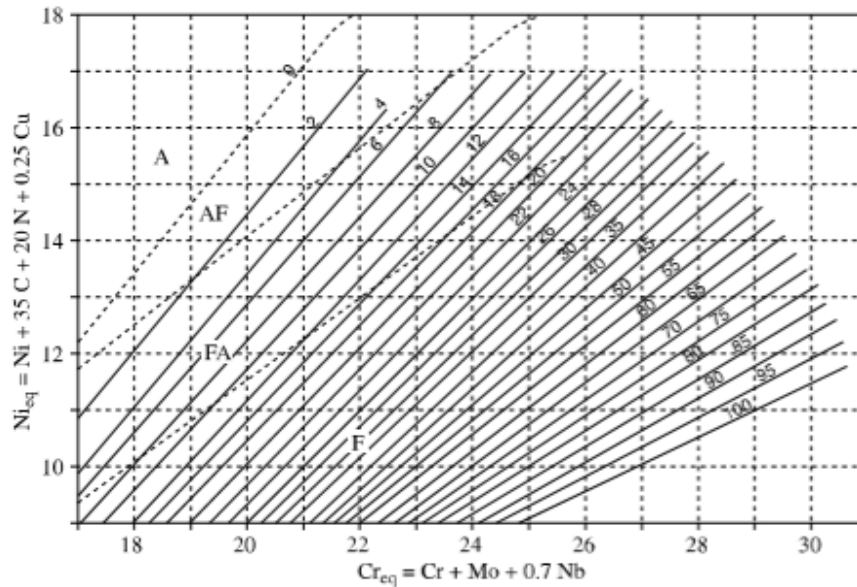


Рисунок 4.14. Схема WRC-92; из [KOT 92]

Ликвационные трещины

Ликвационные трещины происходят в основном в ЗТВ основного металла, вблизи зоны сщепления. Они также могут возникать в расплавленном металле во время термической реактивации путем более позднего прохода, но в этом случае обычно продолжают в виде усадочных трещин в проходе, который в настоящее время производится. Они локализируются в той части ЗТВ, которая доведена до температур, соответствующих интервалу затвердевания материала, причем этот период будет тем больше, чем больше содержание в микросегрегациях материала элементов, которые поддерживают образование компонентов при низкой температуре плавления. При эффекте усадки, связанном с охлаждением, эти зоны частичного слияния с большей вероятностью будут испытывать трещины, чем глубже они распространяются внутри ЗТВ. Именно этот тип механизма часто встречается при сварке формованных изделий; это очень близко к механизму образования усадочных трещин в расплавленном металле.

Другой причиной появления ликвационных трещин может быть образование эвтектики вокруг фазы процесса растворения в матрице.

Это может происходить, когда термодинамическая фаза, стабильная при комнатной температуре, нестабильна при высокой температуре и ее возврат в раствор не может быть полным или его химическая однородность достигнута из-за скорости циклов термической сварки в отношении кинетики растворения и диффузии. В этом случае жидкая фаза появится внутри ЗТВ и будет проникать через границы окружающих зерен, что влечет за собой их выщелачивание и растрескивание при охлаждении из-за усадки.

Чувствительность любого материала к растрескиванию в жидком состоянии можно оценить с помощью испытаний на растяжение в горячем состоянии, проведенных путем моделирования цикла термической сварки во время фазы нагрева и фазы охлаждения (см. Рисунок 4.15). Этот тест позволяет определить разницу между температурой, при которой уменьшение площади разрыва становится равным нулю после нагревания, и температурой, при которой при охлаждении восстанавливается определенная способность к деформации.

Чем больше разница, тем более восприимчивый материал.

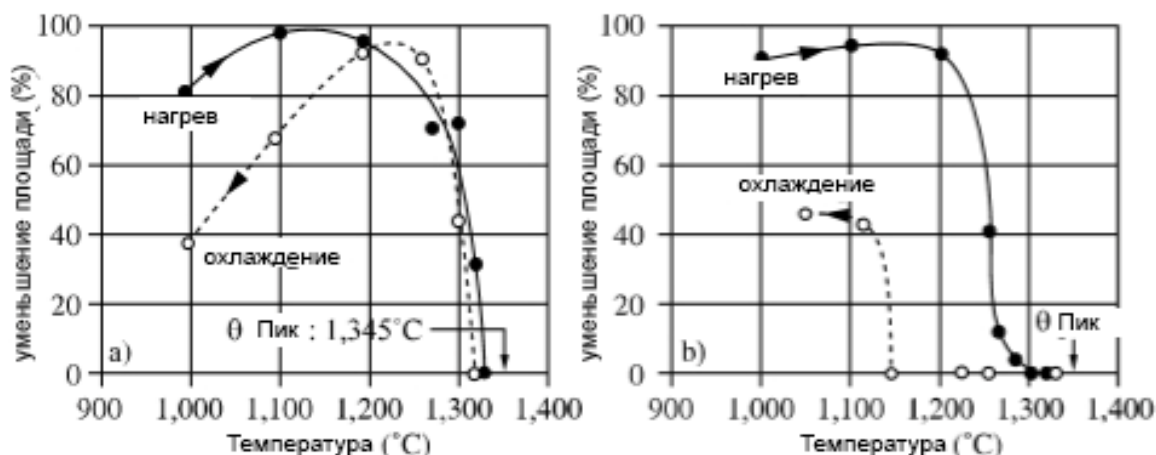


Рисунок 4.15. Горячая пластичность сплава Cabot 214, содержащего (а) 2 ч/млн бора или (б) 30 ч/млн; из [CIE 93]

Таким образом, эта чувствительность к растрескиванию в жидкости является неотъемлемой характеристикой материала; это зависит от всех присутствующих химических элементов, их распределения и микроструктуры, то есть процесс сварки мало влияет на результат, если только не используется присадочный продукт, температура плавления которого значительно ниже, чем у основного металла (сварка припоем).

Трещины из-за отсутствия горячей пластичности

Во время охлаждения из жидкого состояния многие промышленные сплавы имеют температурный диапазон, в котором ответственность за деформацию заметно ниже, чем для температур с обеих сторон. Кривая охлаждения на Рисунке 4.15а позволяет прогнозировать такое поведение.

Это снижение пластичности, которое тем заметнее, чем ниже скорость деформации, находится вблизи температуры рекристаллизации сплава. Это может быть причиной возникновения межкристаллитных трещин как в ЗТВ, так и в расплавленном металле из-за усадки, вызванной охлаждением сварного шва [HEM 69], но этот тип растрескивания редко вызывается в случае ферритных сталей. Однако в этих сталях некоторые авторы [LIM 96] считают, что эти межкристаллитные трещины могут быть продолжены после полного охлаждения транскристаллитными трещинами, вызванными водородом, и могут возникать в результате возникновения трещин в елочку (см. Следующий раздел). По этому вопросу библиография является скорее описательной, чем пояснительной; тем не менее, кажется, что сера еще усиливает это явление.

4.3.2. Холодное растрескивание

Эти трещины появляются при низких температурах (ниже 200°C). Таким образом, они прекрасны и не имеют окисленной поверхности. Они не имеют определенной ориентации по сравнению с микроструктурой. Они обычно развиваются в ЗТВ, но иногда могут возникать в расплавленном металле, когда он имеет очень высокий предел упругости. Они происходят из поля напряжений, которое объясняет, почему они возникают в зонах концентрации, которые представляют собой дефекты поверхности (плохое смачивание, канавки) или разрывы,

связанные с конструкцией сборки (например, частичное проникновение).

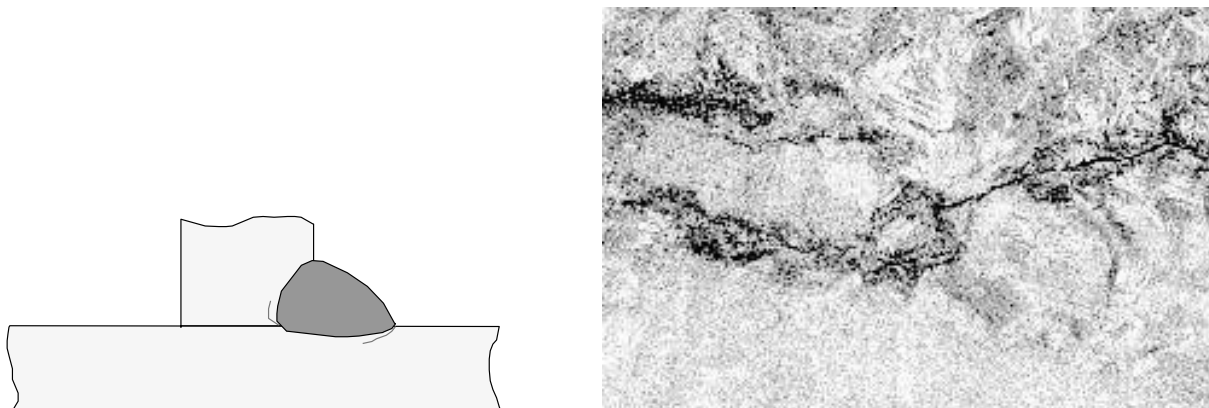


Рисунок 4.16. Пример холодного растрескивания

Для возникновения этим трещинам требуется комбинация трех факторов:

- не очень пластичная структура (мартенсит),
- напряжения,
- водород.

Соответствующее влияние этих трех факторов прекрасно подчеркивается с помощью испытаний имплантатов. Для проведения этих испытаний отбираются баллонги с рассматриваемым материалом. Надрез хорошо определенной геометрии обрабатывается рядом с одним из концов. Пруток помещают в опорную плиту (см. Рис. 4.17), после чего делают сварной шов так, чтобы выемка прутка находилась в ЗТВ сварочного шва. Во время охлаждения нагрузка прикладывается к другому концу стержня и сохраняется в течение нескольких дней. Затем образец разрезают, чтобы определить, образовались ли трещины на конце надреза.

Испытание повторяют, применяя различные нагрузки, чтобы оценить минимальную растрескивающую конструкцию в основании надреза. Это также повторяется путем изменения условий сварки, что позволяет выделить влияние $\Delta t_{800/500}$ и построить кривую растрескивания, как показано на Рисунке 4.16. Параллельно кривая твердости под валиком строится в соответствии с тем же параметром $\Delta t_{800/500}$, эволюция упрочнения фактически представляет структурную эволюцию.

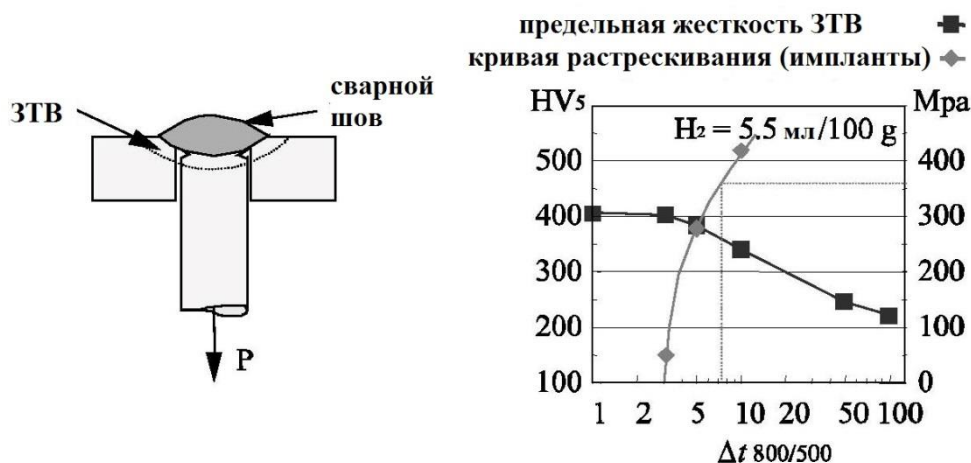


Рисунок 4.17. Тест имплантата

Таким образом, на Рис. 4.17 мы видим, что для низких параметров Δt 800/500, которые связаны с мартенситной структурой (пик кривой твердости), растрескивающее напряжение очень низкое, но, как только структура перестает быть 100% мартенситной, напряжение растрескивания значительно увеличивается. Сталь, рассматриваемая в этом примере, относится к типу E36, кроме того, можно видеть, что на этой фигуре не будет риска растрескивания, если Δt 800/500 выше 7 или 8 секунд, так как тогда зона грубого зерна может выдерживать напряжение выше предела упругости основного металла без образования трещин, что не может произойти, потому что это приведет к деформации основного металла и его релаксации напряжений.

Поведение всех сталей аналогично поведению на Рис. 4.17, где четко прослеживается связь между напряжением растрескивания и структурой.

Испытания, соответствующие этой фигуре, проводились с использованием сварочного продукта, содержание диффузионного водорода в котором составляло 5,5 мл на 100 г нанесенного металла. Те же самые тесты могут быть воспроизведены с другим содержанием водорода, чтобы оценить влияние этого третьего фактора.

На Рис. 4.18 мы видим, что, когда содержание диффундирующего водорода увеличивается, напряжение растрескивания значительно уменьшается независимо от того, какое значение Δt 800/500. Таким образом, водород кажется фундаментальной детерминантой холодного растрескивания. Однако даже когда водород находится в уменьшенном количестве, достаточно низкого напряжения, чтобы вызвать растрескивание, если структура полностью мартенситная. Таким образом, там, где это возможно, необходимо выбирать условия сварки (энергия сварки, предварительный нагрев), чтобы избежать образования 100% мартенситной структуры в ЗТВ.

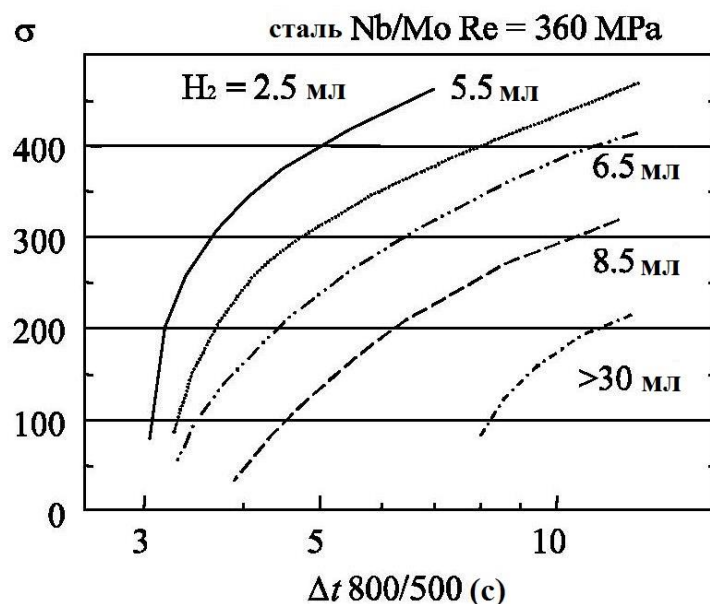


Рисунок 4.18. Влияние содержания диффундирующего водорода на кривую растрескивания; из [COL 77]

Однако это невозможно для всех сталей. Действительно, некоторые, например мартенситные нержавеющие стали, обладают такой прокаливаемостью, что, чтобы избежать мартенситного превращения, охлаждение должно длиться несколько дней. Для сварки таких сталей необходимо убедиться, что водород вытеснен, прежде чем дать узлу остыть в

температурном диапазоне, в противном случае может появиться трещина (ниже 200°C). Это цель последующего нагрева.

Кривые трещин на предыдущих рисунках относятся к ЗТВ, но влияние водорода, напряжения и структуры, которые эти рисунки иллюстрируют, оказываются идентичными, когда испытания проводятся путем отбора экстрактов из наплавленного металла [DEB 92].

Как мы указывали ранее, холодное растрескивание может происходить в расплавленном металле при сварке сталей с высокими пределами упругости. Как правило, в этом случае он является поперечным поперек валика, но также может быть продольным, если под корнем валика существует разрыв (частичное проникновение) или он имеет вид трещины в елочку (микроскопические трещины под углом 45° к направлению сварки) в сварных швах. с промежуточными характеристиками растяжения [MOT 82]. Этот перенос локализации холодного растрескивания от ЗТВ к расплавленному металлу становится все более вероятным при повышении предела упругости наплавленного металла, учитывая, что сварные швы изготавливаются из сталей современного дизайна с низким содержанием углерода. Таким образом, во время сварки этих сталей уже не анализ основного металла, который определяет температуру предварительного нагрева, необходимую для предотвращения растрескивания в ЗТВ, а анализ расплавленного металла, чтобы избежать растрескивания валика.

Интересное средство снижения риска холодного растрескивания и, следовательно, температуры предварительного нагрева во время сварки этих сталей состоит в использовании наполнителя для выполнения корневых проходов для узлов в форме «Х» или «К», остальной части соединения наполнение наполнителем сродни механическим характеристикам основного металла. При этом было показано, что температура предварительного нагрева может быть уменьшена на 50-100°C, что на 50°C меньше по сравнению с использованием одного продукта, и это, конечно, не влияет на общие характеристики растяжения. соединения [ВУИ 94]. Во многих случаях это сводится к устранению необходимости в предварительном нагреве, что, помимо предоставления непосредственного и непосредственного экономического преимущества для производителя, значительно улучшает условия работы сварщиков и, как правило, приводит к снижению частоты эксплуатационных дефектов, и, следовательно, ремонт. Любопытно, что эта практика до сих пор не очень распространена сегодня.

Таким образом, действия, необходимые для предотвращения холодного растрескивания, основаны на всех вышеизложенных соображениях и приведены в таблице 4.5.

4.3.3. Растрескивание при повторном нагреве

Трещины повторного нагрева, межкристаллитные по своей природе, происходят в основном в крупнозернистой зоне, а иногда и в расплавленном металле. Он начинается во время термической обработки после сварки или при эксплуатации при высокой температуре [DHO 92]. Это относится к низколегированным сталям, содержащим карбидообразующие элементы (Cr, Mo, V), а также к некоторым аустенитным нержавеющим сталям, таким как сталь AISI 347, а также к твердосплавным никелевым сплавам (например, Inconel 800H).

Таблица 4.5. Действия, которые необходимо предпринять, чтобы избежать холодного растрескивания

1) Минимизируйте количество водорода, вводимого в сварочную ванну	
– Чистота сварного соединения – Выбор сварочных изделий – Подогрев и консервирование продуктов (кроме случаев герметичного хранения)	Влага, масло, жир и т.д. Низко диффундирующий водород. Согласно рекомендациям поставщика.
2) Везде, где возможно, используйте наполнитель с очень низким пределом упругости и очень низким содержанием водорода для выполнения первого прохода и вторичного прохода толстых сборок.	
3) Контроль условий сварки, чтобы избежать образования мартенситной структуры	
– Энергия сварки – Предварительный нагрев – Температура между проходами	Выбрать, исходя из кривых жесткости под шариком в соответствии с Δt 800/500 и графиком IRSID, например [COL 77]
4) Предусмотреть последующий нагрев для откачки водорода перед охлаждением (в случае сталей, имеющих высокую прокаливаемость), всегда связывать с предварительным нагревом, чтобы избежать охлаждения ниже критической температуры, прежде чем эффективный последующий нагрев	
5) Минимизируйте внутренние или внешние напряжения	
– Процедура сварки – Зажимная	

Такое растрескивание происходит в результате ослабления сильных остаточных напряжений, возникающих в результате изготовления, когда сопровождающие его деформации концентрируются на уровне границ зерен. Это относится к крупнозернистой зоне термического влияния материалов, закаленных в результате осаждения, поскольку во время сварки карбиды, которые затвердевают эти сплавы, возвращаются в раствор в зонах, принимаемых при очень высокой температуре вблизи зоны сцепления, и остаются во время охлаждения, поскольку скорости сварки термических циклов.

При последующем повторном нагреве, эксплуатации или термической обработке после сварки карбиды будут осаждаться внутри зерен на дислокациях, возникающих в результате деформационного упрочнения в результате термических циклов. Это значительно укрепит матрицу, так что деформации ползучести, связанные со снятием напряжений, окажутся на уровне границ зерен, которые не могут их поддерживать.

Таким образом, этот тип трещины относится, в первую очередь, к толстым сборкам материалов, предназначенным для сопротивления ползучести, при этом толщина вызывает высокий уровень остаточных напряжений. Однако риск связан не только с номинальным анализом материала, но также является функцией содержания примесей (S, P, As, Sb) и остатков (Cu, Sn), поскольку эти элементы выделяются на уровень границы зерна и ослабить их.

Различные методы используются для оценки подверженности растрескиванию при повторном нагреве [DHO 98, TAM 95], но наше предпочтение заключается в том, чтобы уменьшить измерение площади во время изотермических испытаний на растяжение в горячем состоянии образцов, в которых с помощью теплового моделирования структура зоны грубого зерна ранее были воспроизведены. Действительно, считается, что риск очень низок, если не зафиксировано уменьшение значения площади ниже 20% независимо от температуры испытания; с другой стороны, оно очень велико, когда трение становится ниже 10%.

На практике, чтобы минимизировать риски, когда необходимо использовать восприимчивый

материал, очень важно:

- спроектируйте соединения, чтобы уменьшить зажим, насколько это возможно,
- выбрать сварочный продукт, который имеет самые низкие характеристики горячего растяжения, совместимые с применением,
- использовать процесс сварки с низким энергопотреблением, чтобы ограничить объем прохода и уменьшить размер крупнозернистого материала.
- распределить проходы для повторной аустенизации зон грубого зерна, созданных предыдущими проходами, и таким образом уменьшить размер зерна,
- предусмотреть последовательность сварки, чтобы минимизировать остаточные напряжения,
- обеспечить хорошее смачивание чистовых проходов и отсутствие канавок, чтобы избежать концентрации напряжений.

Кроме того, обработка термической обработкой после сварки может иметь большую вероятность возникновения растрескивания при повторном нагреве, поскольку в лаборатории и на производстве было показано, что растрескивание стали CrMoV с низкой пластичностью в интервале 550-650°C можно избежать, проводя стадию при температуре около 450°C, а затем очень быстро пересекая область низкой пластичности, чтобы достичь температуры обработки [PIL 86].

4.3.4. Поры

Мы выделим четыре механизма, которые могут порождать пористости в расплавленном металле:

- нестабильность газового капилляра для сварок, осуществляемых с помощью HDE процессов,
- избыточное давление газа под корнем борта,
- содержание растворенного газа в расплавленном металле выше предела растворимости в твердом металле при температуре затвердевания,
- химическая реакция в сварочной ванне с образованием газа.

Процессы HDE включают в себя работу с замочной скважиной. Это подразумевает, что сварочная ванна поддерживается в равновесии благодаря давлению паров газа, которое создается на стенках капилляров, создаваемых улетучиванием металла под воздействием плазменной дуги очень высокой плотности, лазерного луча или электронного луча. Когда рабочие условия позволяют нам поддерживать совершенно стабильное состояние равновесия, стенка жидкости, расположенная в задней части капилляра, может более или менее периодически разрушаться и охватывать часть паров металла, которые ее поддерживали, образуя пористости. Этих гидродинамических пористостей обычно можно избежать, изменяя распределение плотности мощности падающего луча (точка фокусировки, вибрация и т.д.) и уменьшая скорость сварки.

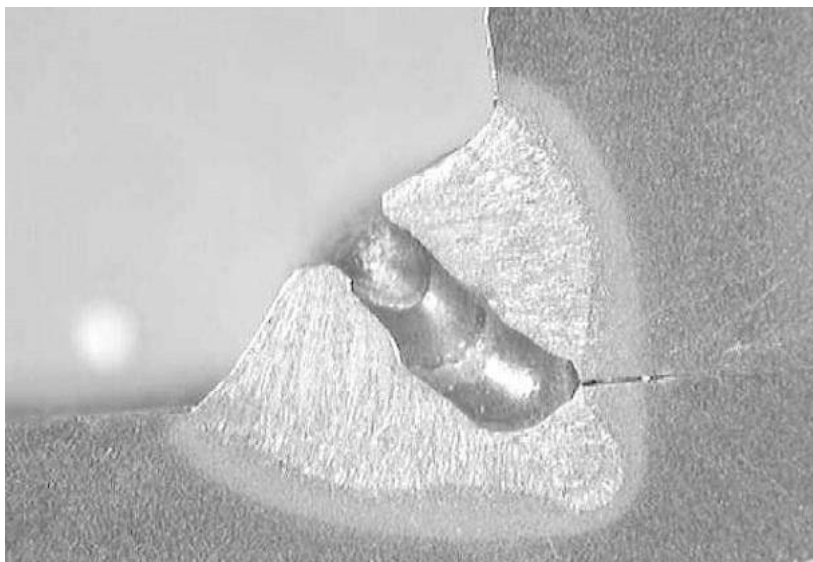


Рисунок 4.19. *Предварительно окрашенный листовый шов - пористость, возникающая в результате разложения краски под валиком*

Когда пористость возникает из-за избыточного давления газа под корнем борта, они принимают удлиненную форму и поддерживают связь с зоной в источнике этого избыточного давления.

Давление может возникнуть в результате нагревания воздуха, заключенного под борт; это обычно имеет место для стыковых сварных швов с подготовкой при толчке, когда проникновение недостаточно. Он также может быть вызван выделением газа в результате разложения или улетучивания листов покрытия продукта, как это имеет место при угловой сварке предварительно окрашенных листов (см. Рис. 4.19) или сварке внахлест с оцинкованными листами.

Наконец, его источником может быть дегазация поверхностей, подлежащих сборке; это, например, азот, высвобождаемый из поверхностей плазменной резки, который объясняет много пористостей, которые образуются при первом проходе стыковой сварной сборки, когда нет никакого нижнего расстояния между стыками (см. Рис. 4.20).

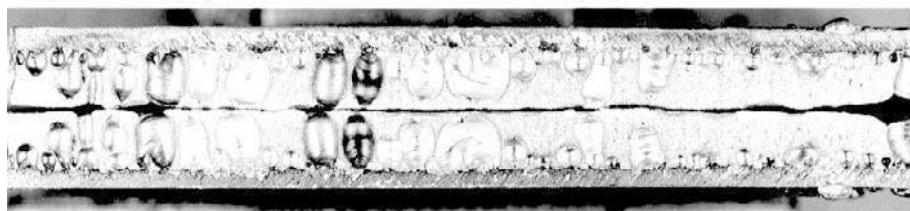


Рисунок 4.20. *Испытание текстуры после первого прохода сварного стыкового сварного соединения под флюсом в виде отрезанных листов, разрезанных плазменно-воздушным процессом*

Внезапное снижение растворимости газообразного элемента во время перехода из жидкого состояния в твердое состояние является основной причиной пористости в сварных швах, потому что это изменение является общим для всех материалов (см. Рис. 4.21). Действительно, когда концентрация растворенного газа в расплавленном металле выше

предела растворимости в твердом металле при температуре затвердевания, происходит отвод газа к границе раздела твердое тело-жидкость. Это приводит к локальному увеличению содержания растворенного газа в жидкости, и, когда оно становится выше, чем предел растворимости в жидкости, образуется пузырь газа.

При сварке сварочная ванна может быть загрязнена атмосферным азотом и кислородом, если защита не гарантирована, или

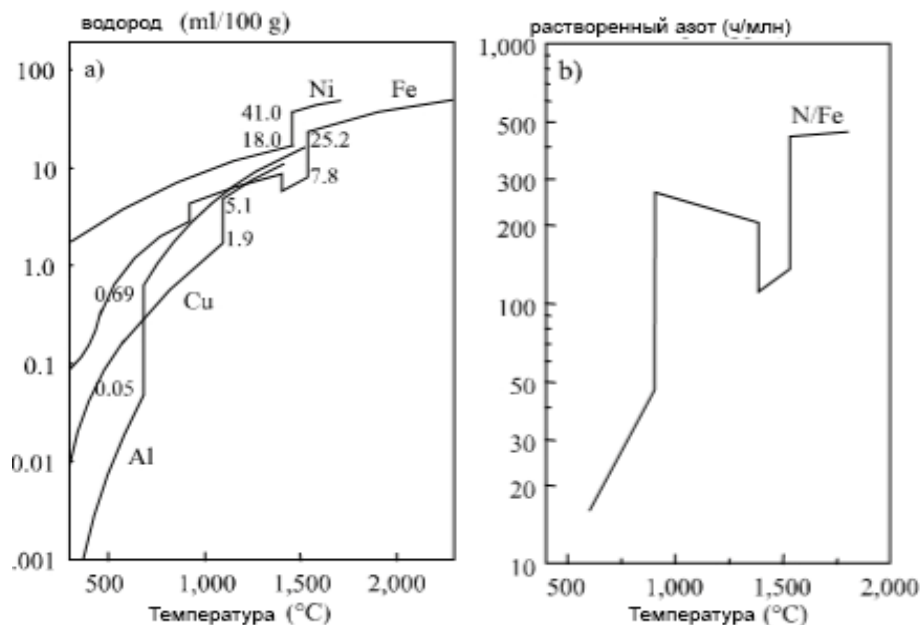


Рисунок 4.21. Эволюция растворимости с температурой: а) водород в различных чистых металлах [LAN 99]; б) азот в чистом железе [KOY 87]

Химическая реакция, приводящая к образованию газа в сварочной ванне, представляет собой последнюю причину пористости, с которой мы здесь будем иметь дело. Образование монооксида углерода происходило из-за пористостей, которые неизбежно возникали во время сварки ВИГ с ободом из стали, если не использовался наполнитель, очень богатый раскислителями. Однако, даже если мы больше не сталкиваемся с этим видом стали, высвобождение CO в расплавленном металле все еще может происходить, когда остаточный кислород стали присутствует в форме силикатов, потому что при очень высокой температуре ($> 1600^{\circ}\text{C}$) они могут быть уменьшаются на углерод в стали. Эта реакция особенно интенсивна во время электронно-лучевой сварки, потому что окружающий вакуум перемещает термодинамические равновесия. Это также способствует такому сокращению, что становится невозможным получение надежного сварного шва, если только сталь не содержит остаточного алюминия (приблизительно 0,02%), а алюминаты более стабильны, чем монооксид углерода, при температуре сварочной ванны (см. Рис. 4.22). Образование пара в сварочной ванне также может быть причиной возникновения пористости. Это будет происходить в присутствии водорода с материалами, для которых энтальпия образования оксида по абсолютной величине ниже, чем у пара при температуре сварочной ванны. Это касается меди, особенно когда она не раскислена; это также касается чистого никеля, монель-металла и даже некоторых никель-хром-железных сплавов [LAN 99]. Существует только одно средство: используйте продукты-наполнители, которые содержат мощные раскислители, такие как титан и алюминий, чтобы избежать этой реакции.

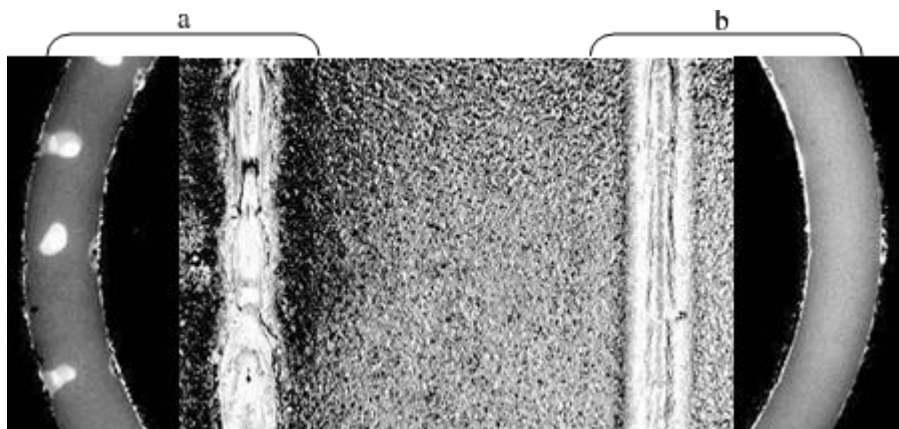


Рисунок 4.22. Поверхностный аспект и рентген на участке сварных швов EB XC 38 (Al = 0,002%): а) без вставки; б) со вставкой в плоскость сопряжения алюминиевой фольги толщиной 0,02 мм

4.4 Список использованной литературы

- [ABS 78] ABSON, DOLBY R.E., HART P.H.M., “The role of non-metallic inclusions in ferrite nucleations in carbon steel weld metal”, *Proceedings of Trends in Steels and Consumables for Welding*, The Welding Institute, Paper no. 25, London, 14-16 November. 1978.
- [ANT 81] ANTUNES M., BONNET C., “Application d’un essai de trempabilité à la recherche des facteurs ayant une influence sur la formation de la ferrite aciculaire”, *Journées d’information Métallurgie de la Zone Fondue*, Société Française de Métallurgie/Société des Ingénieurs Soudeurs – Section sud-est, Conférence no. 9, Publication de la Soudure Autogène, 1981.
- [BAI 78] BAILEY N., JONES S.B., “The solidification cracking of ferritic steel during submerged arc welding”, *Welding Journal*, p. 217s-231s, August 1978.
- [BAI 94] BAILEY N., *Weldability of Ferritic Steels*, Abington Publishing, 1994.
- [BLA 99] BLAIS C., L’ESPÉRANCE G., EVANS G.M., “Characterisation of inclusions found in C-Mn steel welds containing titanium”, *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 4, no. 3, p. 143-150, 1999.
- [BON 80] BONNET C., “Relation Structure – Résilience dans les soudures d’aciers doux et faiblement alliés brutes de solidification”, *Soudage et Techniques Connexes*, p. 3, July- August 1980.
- [BON 86] BONNET C., GASPARD-ANGELI A., “Influence de la teneur en azote sur la résilience des soudures d’aciers C-Mn”, *Soudage et Techniques Connexes*, p. 3, May-June 1986.
- [BUR 88] BURKHARDT J., LAU T., NORTH T.H., L’ESPÉRANCE C., “Effect of aluminum on the Ti-O-B-N balance in submerged arc welding”, *Welding Journal*, p. 25-30, August 1988.
- [CHA 83] CHARPENTIER J.P., BONNET C., “Effect of deoxidation residues in wire and of some particular oxides in CS fused fluxes on the microstructure of submerged-arc weld metal”, in *Proceedings of the Effects of Residual, Impurity and Micro-alloying Elements on Weldability and Weld Properties*, The Welding Institute, Paper no. 8, London, 15-17 November 1983.
- [CIE 93] CIESLIAK M.J., “Cracking phenomena associated with welding”, *ASM Handbook*, vol. 6, p. 88-96, 1993.
- [COC 78] COCHRANE R.C., KIRKWOOD P.R., “The effect of oxygen on weld metal microstructure”, *Proceedings of Trends in Steels and Consumables for Welding*, The Welding Institute, p. 103, London, 14-16 November 1978.

- [COL 74] COLLECTIF, Courbes de transformation des aciers de fabrication française, edited by the CPS, 1974.
- [COL 77] COLLECTIF, Courbes Dureté/Paramètre de refroidissement en conditions de soudage, collection established at the IRSID, 1977.
- [DEB 92] DEBIEZ S., GAILLARD L., MALTRUD F., Etude de la soudabilité d'un acier de nuance E690 T+R de Sollac avec des produits d'apport à bas et très bas hydrogène, Rapport Institut de Soudure no. 28406, 1992.
- [DEV 83] DEVILLERS L., KAPLAN D., MARANDET B., RIBES A., RIBOUD P.V., "The effect of low level of some elements on the toughness of submerged-arc welded CMn steel welds", *Proceedings of the Effects of Residual, Impurity and Micro-Alloying Elements on Weldability and Weld Properties*, The Welding Institute, London, 15-17 November 1983.
- [DHO 92] DHOOGHE A., VINCKIER A., "La fissuration au réchauffage – revue des études récentes (1984-1990)", *Le Soudage dans le Monde*, vol. 30, no. 3-4, p. 45-71, 1992.
- [DHO 98] DHOOGHE A., "Survey on reheat cracking in austenitic stainless steels and Ni base alloys", *Welding in the World*, 41, p. 206-219, 1998.
- [EVA 97] EVANS G.M., BAILEY N., *Metallurgy of Basic Weld Metal*, Abington Publishing, 1997.
- [GAR 75] GARLAND J.G., KIRKWOOD P.R., "Towards improved submerged arc weld metal toughness", *Metal Construction*, p. 275-283, May 1975, p. 320-330, June 1975.
- [HEM 69] HEMSWORTH B., BONIZEWSKI T., EATON N.F., "Classification and definition of high temperature welding cracks in alloys", *Metal Construction and British Welding Journal*, p. 5-16, February 1969.
- [KOT 92] KOTECKI D.J., SIEVERT T.A., "WRC-1992 constitution diagram for stainless steel weld metals: a modification of the WRC-1988 diagram", *Welding Journal*, p. 171s-178s, May 1992.
- [KOT 93] KOTECKI D.J., "Welding of stainless steel", *ASM Handbook*, vol. 6, p. 677-707, 1993.
- [KOU 87] KOU S., *Welding Metallurgy*, John Wiley & Sons Inc., 1987.
- [LAN 99] LANCASTER J.F., *Metallurgy of Welding*, Abington Publishing, 1999.
- [LIM 96] LIMU H., HANNERZ N.E., "Influence of vanadium and niobium on weld solid state cracking", *Int. J. for the Joining of Materials*, vol. 8, no. 4, p. 134-144, 1996.
- [MOT 82] MOTA J.M.F., APPS R.L., "Chevron cracking – a new form of hydrogen cracking in steel weld metals", *Welding Journal*, p. 222, July 1982.
- [PIL 86] PILARCZYK J., DEBSKI E., "Reheat cracking in low alloy steel weldments and welded structures", *Proceedings of 3rd International Conference Joining of Metals (JOM-3)*, Helsinki, Finland, December 1986.
- [SCH 49] SCHAEFFLER A.L., "Constitution diagram for stainless steel weld metal", *Metal Progress*, 56, S 680, 1949.
- [STL 93] ST LAURENT S., Etude de l'influence du Bore, de Titane et de l'Azote sur les propriétés de la zone fondue de dépôts soudés d'aciers microalliés, Thesis, University of Montreal, Ecole Polytechnique, July 1993.
- [SUU 83] SUUTALA N., "Effect of solidification conditions on the solidification mode in austenitic stainless steels", *Metall. Trans.*, 14A, p. 191-197, 1983.
- [TAM 95] TAMAKI K., SUZUKI J., IMAI I., HORII Y., KUMAGAI T., "Effects of impurities and alloying elements on reheat cracking sensitivity of 720 N/mm² class high-strength steel", *Welding International*, vol. 9, no. 12, p. 960-966, 1995.

[VUI 94] VUIK J., VAN WORTEL J.C., VAN SEVENHOVEN C., “Application of very low yield strength consumables in the root pass of weldments to avoid preheating”, *Welding in the World*, vol. 33, no. 5, p. 362-369, 1994.

Сварочные материалы

5.1. Электроды с покрытием

5.1.1. Состав покрытий: последствия

Стандарты классификации сварочных изделий различают несколько типов покрытых электродов в зависимости от вида покрытия.

Электродное покрытие всегда состоит из множества составляющих, которые обеспечивают различные функции:

- минеральные продукты, которые воздействуют на характеристики плавления, способствуют защите от окружающей атмосферы капель и сварочной ванны, распадаясь на газообразное излучение под воздействием тепла дуги и образуя шлак, физико-химические характеристики которого имеют большое значение влияние на эксплуатационные характеристики электрода;
- металлические изделия, которые, будучи объединены с металлом в результате расплавления сердечника электрода, позволяют скорректировать анализ металла сварного шва таким образом, чтобы получить свойства, эквивалентные свойствам стали, используемой в сварном соединении;
- органические материалы, добавляемые в небольших количествах в основные покрытия в качестве экструзионного агента и которые будут разрушаться при высокотемпературном нагреве этих электродов. Они присутствуют в гораздо больших количествах в электродах, выпекаемых при низкой температуре (целлюлоза, рутил и т. Д.), потому что разложение этих продуктов в дуге вызывает выделение водорода, что придает им эксплуатационные характеристики, которые оказываются ценными во многих применениях;
- связующие, которые позволяют получить твердое покрытие, которое прилипает к металлическому ядру. В общем, существуют простые или сложные силикаты натрия, калия или лития, которые помимо своей функции сцепления действуют на характеристики дуги из-за низкого потенциала ионизации щелочных элементов.

В промышленности наиболее часто используются основные и рутиловые электроды. Таблица 5.1 позволяет сравнивать, с одной стороны, составляющие и условия выпекания, а с другой стороны, последствия этого как для эксплуатационных свойств, так и для химического анализа осажденного металла.

Таблица 5.1. Основные составляющие и характеристики рутиловых и основных электродов

Тип электрода		Рутиловый	Основной
Основные компоненты	неметаллические	TiO ₂ , Al ₂ O ₃ , SiO ₂ , Карбонаты, целлюлоза и др. Силикаты, экструзионные добавки	CaF ₂ , MgO, Карбонаты и др. Силикаты, экструзионные добавки
	металлические	Легирующие элементы Раскислители	Легирующие элементы Раскислители
Температура печи		Низкая (<160°C)	Высокая (350/480°C)
Последствия	Практические	Мягкий сплав, стабильная дуга, Перенос в виде мелких капель, коротких замыканий нет или несколько, Легкий перезапуск, Стадия плавления металла при высокой температуре, с выделением паров	Неправильный расплав, нестабильная дуга, агрессивный, Перенос большими каплями с короткими замыканиями, Сложный перезапуск, Стадия плавления металла при низкой температуре, с тенденцией к излому
	Аналитические	O: 600 до 1,000 ч./млн. Ti: 300 до 800 ч./млн. Nb: 100 до 300 ч./млн. V: 50 до 250 ч./млн. H ₂ Diff: >15 мл/100 г DM	O: 200 до 500 ч./млн. Ti, Nb, V: настраивается на желаемые значения H ₂ Diff: <5 мл/100 г DM

Таким образом, кажется, что электроды рутилового типа обладают лучшими свойствами при использовании: очень хорошая стабильность дуги, перенос металла в мелкие капли, что обычно приводит к низкому уровню разбрызгивания и более низкому выделению дыма, чем у основных электродов, очень хорошее смачивание шариков и очень легкий перезапуск с холода.

Однако по своей природе этот шлак влияет на содержание остаточных элементов в осажденном металле, элементы, которые, как правило, нежелательны с точки зрения оптимизации механических свойств.

Содержание кислорода в наплавленном металле может варьироваться в зависимости от природы и количества раскисляющих элементов, присутствующих в покрытии, тем не менее оно не может быть снижено до уровня, который может быть достигнут базовым электродом. Это приводит к более значительному содержанию включения и, следовательно, к более низкой энергии пластического разрушения во время испытаний на удар.

Содержание титана в наплавленном металле не может быть отрегулировано, как хотелось бы, чтобы оптимизировать механические свойства. Действительно, поскольку шлак состоит в основном из рутиловых элементов (оксид титана TiO₂), некоторое количество титана неизбежно переносится в осажденный металл в различных количествах в соответствии с реакциями окисления-восстановления и обментами металл-шлак, которые происходят в дуге и на границе раздела с сварочной ванной. Эти реакции зависят от всех присутствующих химических элементов, которые должны быть сбалансированы в соответствии с различными механическими характеристиками, которым должен соответствовать сварной шов (предел прочности при растяжении, предел текучести) и в зависимости от типа стали, которую мы должны сваривать.

Содержание ниобия и ванадия в наплавленном металле не может быть снижено выше определенной точки, поскольку эти элементы существуют в качестве примесей в природных рутилах, используемых при производстве сварочных изделий. Использование синтетических

рутилов, которые поэтому очень чисты, возможно, но не распространено, потому что его стоимость значительно выше, чем у натуральных рутилов.

Содержание диффузионного водорода в сварных швах, созданных рутиловыми электродами, всегда очень высокое. Это объясняется наличием органических материалов, добавляемых для облегчения экструзии и улучшения характеристик дуги. Однако это также является результатом низких температур выпекания, которые позволяют удалять только небольшую часть воды, содержащейся в силикате, и не разрушают экструзионные агенты. Таким образом, рутиловые электроды ценятся за их удобство в использовании и создание сварного шва, тогда как базовые электроды необходимы, когда соединения, которые должны быть изготовлены, должны соответствовать строгим металлургическим стандартам качества. Базовый электрод должен удовлетворять требуемым механическим свойствам сталей, которые он должен сваривать (растяжение, прочность, CTOD, ползучесть и т.д.). Многие аналитические комбинации позволяют получить характеристики растяжения, требуемые в наплавленном металле, но растворы, которые удовлетворяют как характеристикам растяжения, так и прочности, гораздо более ограничены. Это все более верно, чем выше растяжимость. Кроме того, химический баланс, сохраняемый для электрода, должен быть максимально надежным, то есть он должен удовлетворять различным требованиям, несмотря на различия, присущие любому промышленному производству, а также в широком диапазоне условий сварки (тепловые циклы). Наконец, базовый электрод должен быть спроектирован таким образом, чтобы содержание диффузионного водорода в наплавленном металле было как можно ниже, чтобы избежать любого риска холодного растрескивания, минимизируя или даже исключая предварительный нагрев и последующий нагрев.

5.1.2. Основные электроды и диффундирующий водород

Определение содержания диффундирующего водорода в сварочных изделиях проблематично, поскольку из-за его небольшого размера атом водорода легко диффундирует и выходит из стали даже при комнатной температуре, так что невозможно узнать точное количество водорода, введенного во время сварки. Столкнувшись с этой трудностью, а также с необходимостью классификации сварочных изделий в зависимости от их восприимчивости к холодному растрескиванию, определение содержания диффундирующего водорода является предметом строгих рекомендаций, которые очень точно описывают методологию, которая будет использоваться. Эту методологию необходимо строго соблюдать, если не нужно регистрировать экстремальные отклонения в результатах (вплоть до двойных) (ISO 3690 или AWS 4.3-1993).

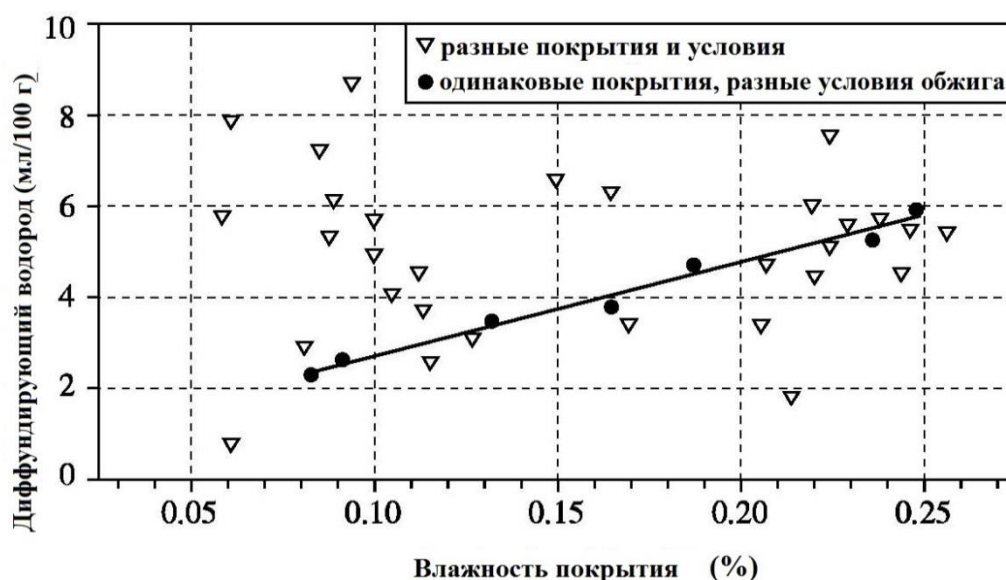


Рисунок 5.1. Соотношение диффундирующего водорода к влажности покрытия для электродов типа AWS 7018

Содержание диффундирующего водорода обычно выражают в миллилитрах на 100 г осажденного металла (мл/100 г DM). Естественно, это зависит от влажности, содержащейся в сварочном продукте, но Рис. 5.1 ясно показывает, что между этими двумя измерениями нет общей связи, и мы видим на Рисунке 5.2, что, даже будучи ограниченным конкретным покрытием электрода, существуют два различных отношения в зависимости от того, является ли изменение влажности результатом изменения условий выпечки или сбора влаги.

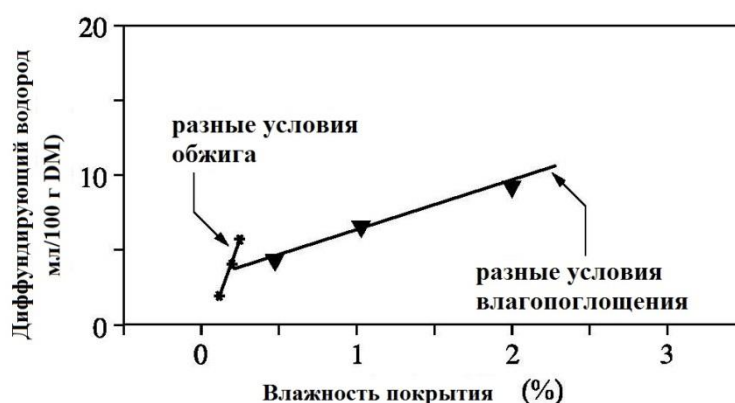


Рисунок 5.2. Соотношение диффундирующего водорода к влажности покрытия для электродов типа AWS 7018

Фактически, сложность отношений, связывающих диффундирующий водород и влажность покрытия, проистекает из того факта, что вода существует в различных формах: вода, известная как свободная, которая соответствует первому состоянию воды, поглощенному во время воздействия влажной атмосферы, и вода называется кристаллизационной водой, которая химически связана с различными составляющими электрода. Если температура покрытия повышается, свободная вода уходит, как только она превышает 100°C, в то время как кристаллизационная вода выделяется только при гораздо более высоких температурах, которые зависят от типа связи, и, следовательно, материал из нее получается. Таким образом, можно видеть, что при одинаковом количестве воды в

электродном покрытии, чем выше температура экстракции этой воды, тем больше она будет выделяться вблизи дуги в процессе сварки и тем больше будет перенос водорода в сварном шве. бассейн. Таким образом, когда температура обжига электрода снижается во время изготовления основного электрода, уменьшающееся количество кристаллизационной воды удаляется из материала покрытия. Это небольшое изменение остаточной воды в результате обжига приводит к увеличению содержания диффундирующего водорода, намного превышающему аналогичное изменение содержания воды в покрытии, когда оно происходит в результате поглощения влаги (см. Рис. 5.2). Как следствие, ясно, что для наложения максимального содержания влаги в спецификациях закупки электродов (или флюса для дуговой сварки под флюсом) с целью устранения риска холодного растрескивания нет практической логики, поскольку нет универсального отношения, связывающего влажность с диффундирующий водород существует. С другой стороны, использование измерения влажности, которое намного проще и быстрее, чем измерение диффузионного водорода, для проверки последовательности изготовления данного электрода в конце процесса выпечки является практикой, которая является жизнеспособной и принятой. Это приемлемо, потому что для каждого электрода существует единственная связь между остаточной влажностью выпечки и диффузионным водородом.

Сегодня большинство производителей сварочных изделий имеют ряд базовых электродов с очень низким уровнем диффузионного водорода. Лучшее из этого гарантирует уровень ниже 3 мл/100 г наплавленного металла с помощью стержней из вновь открытой упаковки. Такой результат может быть достигнут только благодаря тщательному отбору сырья, высокой температуре выпечки и герметичной упаковке, чтобы избежать накопления влаги при хранении продукта [LED 92]. В целом, эти электроды также характеризуются низким поглощением влаги, когда они подвергаются воздействию влажной атмосферы.

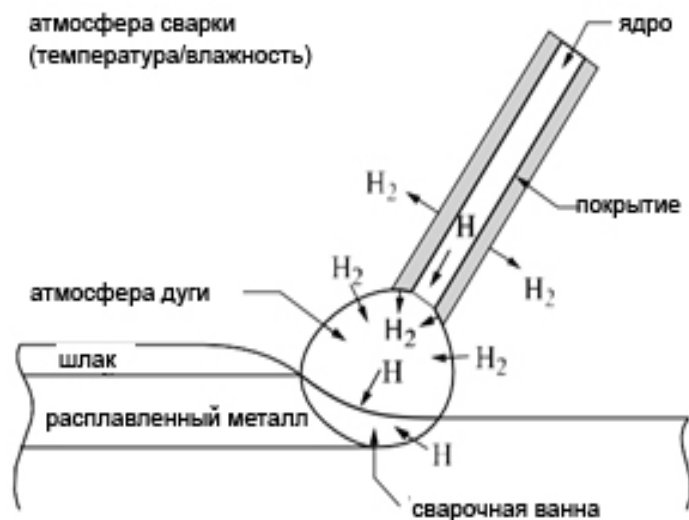


Рисунок 5.3. Происхождение диффундирующего водорода в расплавленном металле

Однако содержание диффундирующего водорода в наплавленном металле зависит не только от водорода, доставляемого в той или иной форме сварочным продуктом. В случае покрытых электродов поток газа, возникающий в результате разложения компонентов покрытия, недостаточен для предотвращения обмена с окружающей атмосферой (см. Рис. 5.3). Таким образом, парциальное давление водорода на уровне дуги и, следовательно, диффундирующий водород в наплавленном металле увеличиваются вместе с абсолютным содержанием влаги в окружающей атмосфере (см. Рис. 5.4.).

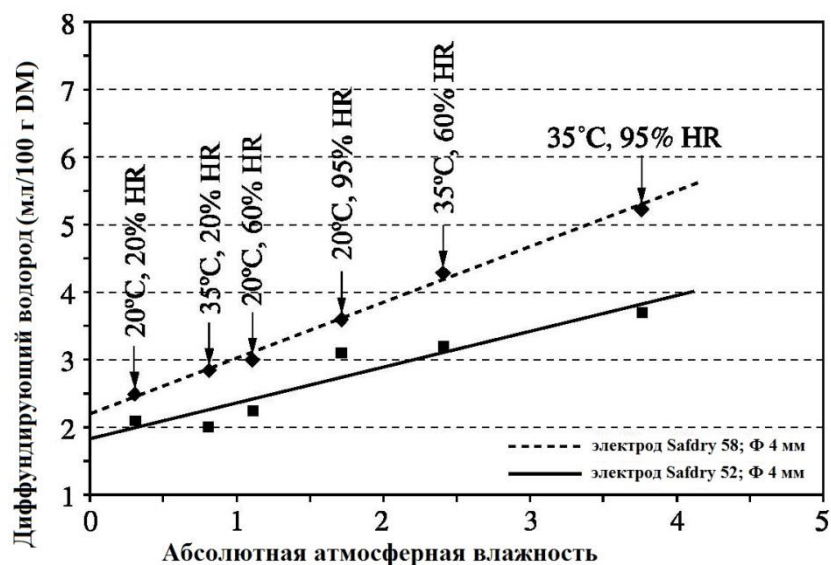


Рисунок 5.4. Влияние содержания воды в атмосфере на диффундирующий водород в наплавленном металле (данные SAF)

Диккё и Руге предложили диаграмму, которая позволяет узнать содержание диффундирующего водорода при любых условиях температуры и давления, при условии, что мы знаем результат при любых условиях. Этот график не является универсальным, потому что атмосферные обмены обязательно зависят от защиты электрода (глубина кратера, объем выпущенного газа и т.д.). Тем не менее, эксперимент показывает, что в первом приближении он охватывает поведение большинства низко водородных электродов типа AWS 7018, продаваемых в настоящее время.

5.2. Флюсы для дуговой сварки под флюсом

5.2.1. Плавленные флюсы и керамические флюсы: преимущества и недостатки

Флюсы для дуговой сварки под флюсом могут быть получены путем плавления или грануляции.

Плавленные флюсы изготавливаются из грубого сырья, которое смешивают перед вводом в электропечь. Затем их нагревают до температуры около 1600°C, что позволяет получить химически однородный жидкий продукт. Этот продукт затем отливают на пластину, сильно охлаждают, чтобы придать стеклянную структуру после затвердевания и охлаждения до комнатной температуры, сохраняя тем самым идеальную химическую однородность.

Это стекло затем измельчают и просеивают для получения желаемого гранулометрического распределения. В альтернативном производственном процессе жидкий продукт распыляется в струе воды, а не отливается на пластину, что устраняет операцию дробления.

Изготовление керамических флюсов начинается с сухой смеси, образованной из сырья, которое в этом случае имеет очень тонкую гранулометрию (обычно менее 300 микрон). После гомогенизации сухой смеси перемешивание проводят путем добавления простого или смешанного силиката натрия, калия или лития. Гранулирование, то есть агломерация мелких частиц, взятых из различного сырья, может затем происходить благодаря силикатному

связующему. За этим следует стадия предварительной сушки, часто с использованием псевдоожиженного слоя, затем выпекание при температуре около 500°C, если изготовленный флюс содержит карбонаты, или при более высокой температуре (приблизительно 800°C), даже если она не содержит каких-либо.

Плавленные флюсы и керамические флюсы имеют свои преимущества и недостатки.

Каждое зерно **плавленного** флюса химически идентично другим, в отличие от зерен керамического флюса, частицы которого не являются химически однородными. Таким образом, можно изготавливать плавленные флюсы, в которых конкретный элемент должен присутствовать в очень небольшом количестве, без риска разделения формул (например, бор). Это особенно важно для керамического флюса.

Изготовление плавленных флюсов не требует использования связующего вещества. Это дает два преимущества и один недостаток по сравнению с керамическими флюсами:

- влагопоглощение слитых потоков практически ничтожно, поскольку вода адсорбируется только на поверхности зерна. Поток керамического потока, напротив, намного больше, потому что связующее реагирует с атмосферной влажностью [GAS 86];
- зерна плавленного флюса более прочные, чем зерна керамического флюса, что делает их более пригодными для переработки;
- однако связующие, используемые в производстве керамических флюсов, обычно создают лучшую стабильность дуги, чем плавленные флюсы.

Сплавленные флюсы, в отличие от керамических флюсов, не могут содержать ни ферросплавов, ни раскислителей, поскольку они будут окисляться во время производства в жидком состоянии. Это позволяет повторно перерабатывать шлак после сварки и использовать его повторно, смешивая с новым флюсом - практика, которая может быть экономически выгодной для определенных крупных отраслей промышленности, чье потребление флюса высокое (например, производство труб) [GAS 86]. С другой стороны, это исключает аналитические корректировки и контроль содержания кислорода в осажденном металле, что может быть достигнуто с помощью керамического флюса путем добавления раскисляющих элементов. Сегодня керамические флюсы наиболее часто используются в Европе и США, тогда как флюсированные флюсы все еще очень популярны в Японии и России.

5.2.2. Роли потока: металлургические аспекты

Дуговая сварка под флюсом включает использование сплошной или порошковой проволоки и флюса, причем дуга проникает в флюс от конца проволоки к деталям, подлежащим сборке. Флюс должен выполнять две основные функции: он должен обеспечивать хорошую стабильность дуги и защищать сварочную ванну и металлические капли от атмосферного азота и загрязнения кислородом во время их переноса в дуге. Флюс также оказывает важное влияние на форму сварного шва (смачивание и проникновение). Это связано с тем, что оно изменяет распределение мощности в дуге, а также физические характеристики шлака, которые возникают в результате его плавления и окислительно-восстановительных реакций, происходящих во время сварки. Вот почему, в зависимости от его состава, флюс может быть более или менее хорошо приспособлен для сварки угловых швов, высокоскоростной сварки или многоэлектродной сварки. Тем не менее, с чисто металлургической точки зрения, основные характеристики флюса обусловлены тем, что он определяет содержание кислорода и диффузионного водорода в наплавленном металле для данной проволоки.

Все современные производители сварочной продукции до сих пор используют эмпирическую формулу, первоначально предложенную Тулиани, для классификации флюсов для сварки под флюсом [TUL 69]. Эта формула позволяет рассчитать индекс основности, различая составляющие потока в соответствии с их основным характером; кислота, амфотерная или нейтральная:

где $[AxBu]$ = процентное содержание по массе составляющей потока $AxBu$.

$$BI = \frac{[CaO] + [MgO] + [BaO] + [SrO] + [Li_2O] + [Na_2O] + [K_2O] + [CaF_2] + \frac{1}{2}([FeO] + [MnO])}{[SiO_2] + \frac{1}{2}([Al_2O_3] + [TiO_2] + [ZrO_2])}$$

Тулиани и другие после него показали, что содержание кислорода в осажденном металле уменьшается, когда индекс основности увеличивается до 1,5, а затем стабилизируется около 280-300 ч/млн (см. Рис. 5.5). Конечным результатом является то, что бессмысленно прибегать к потоку со значительно более высоким индексом основности при поиске оптимизации характеристик наплавленного металла.

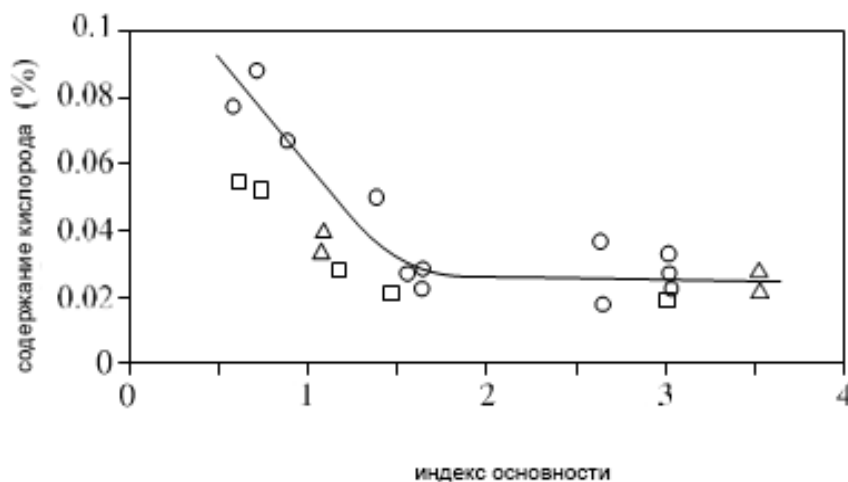


Рисунок 5.5. Связь между содержанием кислорода в наплавленном металле и основностью флюса; от [EAG 78]

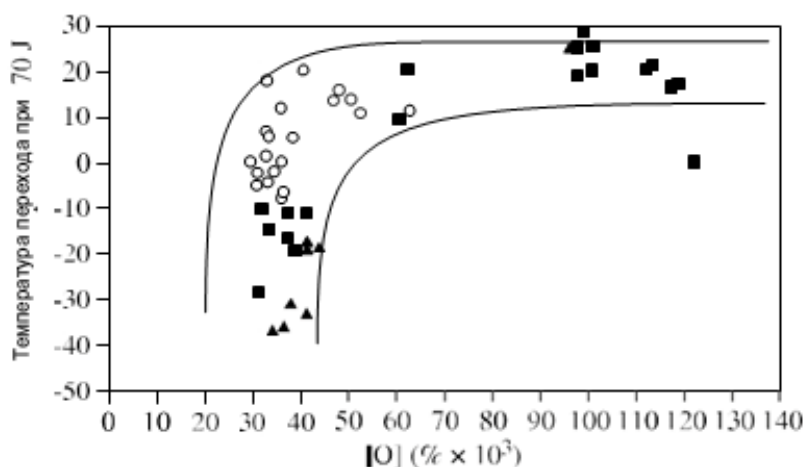


Рисунок 5.6. Связь между температурой перехода при 70 Дж и содержанием кислорода в сварке под флюсом; с [TAY 75]

Более того, если изменение температуры, соответствующее определенному значению энергии разрыва (70 Дж на рис. 5.6), измеренному во время ударных испытаний большого количества сварных швов в зависимости от содержания кислорода в них, оказывается, что при превышении 400-450 ч/млн кислорода это температура всегда высокая. И наоборот, при более низких значениях появляется очень большое несоответствие в результатах. Это подтверждает тот факт, что содержание кислорода, несовершенный показатель скорости включения, определяет пластическую энергию разрыва, которая при высоких скоростях очень близка к значению, выбранному здесь для характеристики перехода. С другой стороны, очень большое рассеяние, наблюдаемое на рис. 5.6 для содержания кислорода ниже 400-450 ч./млн., показывает, что этот фактор не является определяющим, поскольку именно микроструктура регулирует переход пластичный/хрупкий.

Второе свойство флюса, фундаментальное для металлургического уровня, заключается в содержании водорода в осажденном металле, который он контролирует. Что касается керамических флюсов, то, что было указано ранее для покрытых электродов, применимо:

- нет универсальной связи между влажностью потока и диффузионным водородом;
- для данного потока существует два разных соотношения между влажностью и водородом в зависимости от того, является ли изменение влажности результатом изменения остаточной влажности после выпекания или сбора влаги;
- для достижения низкого уровня водорода требуется отбор сырья, содержащего мало кристаллизационной воды, и выделение этой воды при максимально низкой температуре;
- использование смешанных связующих, то есть натрия, калия, лития, позволяет минимизировать поглощение влаги;
- повышение температуры обжига флюса позволяет снизить содержание диффундирующего водорода в наплавленном металле.

Однако мы не должны упускать из виду тот факт, что флюс должен удовлетворять требованиям эксплуатационной свариваемости, которые часто оказываются несовместимыми с поиском очень низкого уровня водорода. Чтобы исключить эту трудность, некоторые основные потоки не обжигаются при очень высокой температуре, а затем содержат карбонаты, которые, разрушаясь вблизи дуги, позволяют снизить парциальное давление водорода в газовой полости и тем самым уменьшить перенос водорода в расплавленный металл.

В случае **плавленных** флюсов факторы, которые влияют на содержание диффундирующего водорода, меньше, чем с керамическими флюсами, но даже для данной формулы флюса невозможно сделать наименьшую корреляцию с влажностью. Это связано с тем фактом, что измерения влажности обычно проводятся при 950 или 1000°C, в то время как приготовление **плавленных** флюсов включает взятие флюса в жидком состоянии до 1500 или 1600°C. Измерение влажности, такое, как оно практикуется, не может, таким образом, выявить содержание воды, все еще присутствующее во флюсе, потому что оно выделяется только при более высокой температуре, чем температура изготовления **плавленных** флюсов. Фактически, для каждого состава флюса наблюдается строгая корреляция между температурой его производства и содержанием диффундирующего водорода в наплавленном металле (см. Рис. 5.7.).

Низкое содержание диффундирующего водорода, таким образом, не обязательно связано с конденсированными потоками; и наоборот, воздействие потока во влажной атмосфере не имеет большого значения, что сводит к минимуму меры предосторожности, которые необходимо принять перед его использованием (условия хранения или условия нагревания и т.д.).

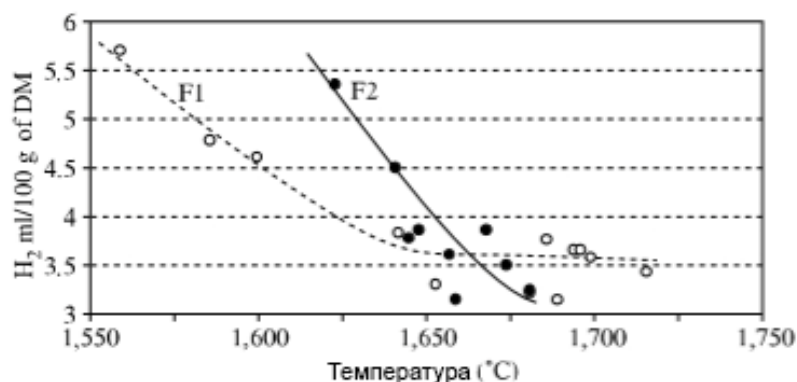


Рисунок 5.7. Влияние температуры производства на содержание диффундирующего водорода в металле, осажденном двумя плавными флюсами из силиката кальция

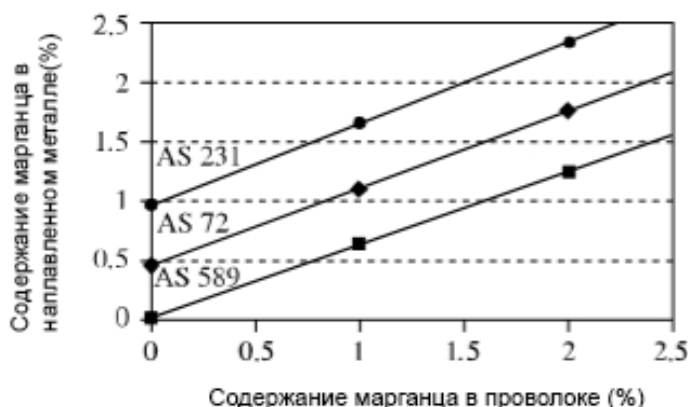


Рисунок 5.8. Марганцевый перенос гранулярных потоков AS 231 и AS 589 и плавного потока AS 72 (данные SAF)

Конечная характеристика, которую необходимо учитывать как для плавленных, так и для зернистых потоков, относится к переносу легирующих элементов в дуге. Действительно, поток определяет атмосферу дуги и, следовательно, химический обмен, который происходит там: анализ наплавленного металла никогда не является анализом используемой проволоки. Как правило, мы наблюдаем обогащение в кремнии, в то время как содержание марганца может быть выше или ниже, чем в проволоке, в зависимости от используемого флюса (см. Рис. 5.8). Это не является стандартом качества, но эти характеристики химического переноса, предоставленные поставщиком, должны быть приняты во внимание перед выбором проволоки, подходящей для флюса, или продиктованы свойствами, требуемыми для сварного шва.

5.3. Сварочные газы

5.3.1. Сварочные процессы под газовым потоком с инфузионным электродом

Ручная аргонодуговая сварка неплавящимся электродом и плазменные процессы используют вольфрамовый электрод в качестве катода. Поскольку вольфрам является очень окисляемым материалом и, более того, оксид вольфрама сублимируется при низкой температуре, защитный газ для ВИГ и плазменный газ для плазменной сварки не могут содержать ни кислорода, ни CO₂. Кроме того, содержание азота должно поддерживаться на уровне ниже 2%, чтобы не ухудшать срок службы электрода, даже если с металлургической точки зрения выгодно иметь больше (например, при сварке дуплексных нержавеющей

сталей).

Таким образом, оставляя в стороне редкие и чрезвычайно дорогие газы, такие как неон, ксенон и криптон, единственными газами, которые можно использовать в смесях, связанных с этими процессами, это аргон, гелий, водород и азот в пределах, указанных ранее.

Аргон и гелий - нейтральные газы и, таким образом, могут использоваться для любых материалов, подлежащих сварке, но их физические характеристики придают им особые эффекты при сварке:

- аргон имеет гораздо более низкий потенциал ионизации, чем гелий (15,7 и 24,5 эВ соответственно) и гораздо более высокую электропроводность (см. Рис. 5.9). В результате гораздо легче завести дугу и стабилизировать ее под аргоном, чем под гелием, но при этом дуга заданной длины при том же токе является более мощной под гелием, чем под аргоном (более высокое напряжение);
- теплопроводность гелия намного больше, чем у аргона. Таким образом, при одинаковом токе дуга под гелием является более открытой, чем под аргоном, и приводит к более низкому тепловому градиенту на уровне собираемых деталей, способствуя смачиванию бортов.

Водород представляет собой двухатомный газ при комнатной температуре. Когда температура повышается, она сначала переходит в атомарное состояние, а затем в ионизированное состояние, что объясняет два пика теплопроводности на Рисунке 5.9, тогда как другие газы показывают только пик ионизации. Эта характеристика имеет очень важные последствия для дуговой сварки:

- молекула водорода защитного газа поглощает энергию, распадаясь вокруг периферии столба дуги, что локально понижает температуру и вызывает сужение дуги;
- атомарный водород, присутствующий в дуге, будет рекомбинировать при выделении некоторой энергии в «холодных» зонах, то есть на уровне сварочной ванны и т. д..

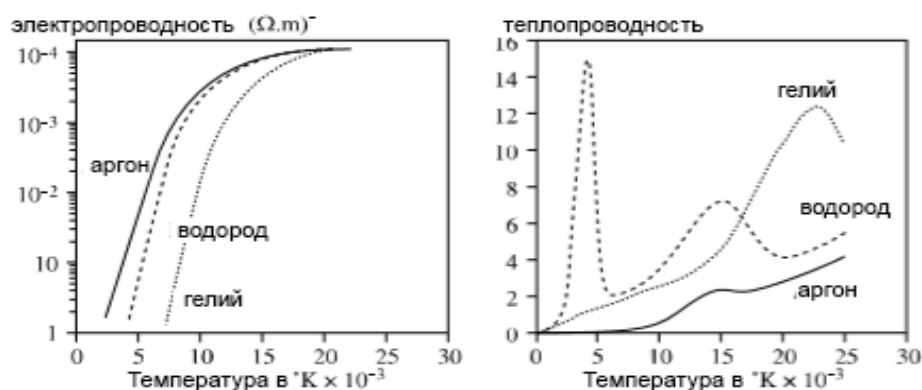


Рисунок 5.9. Электропроводность и теплопроводность различных газов в зависимости от температуры; из [BOU 83]

Сужение дуги увеличивает плотность мощности и, следовательно, проникновение, так как рекомбинация атомов водорода в месте сварочной ванны, таким образом, улучшает передачу энергии и, следовательно, эффективность процесса сварки (см. Рис. 5.10). Как следствие, для данной электрической мощности и толщины комбинация этих двух эффектов позволяет значительно увеличить скорости сварки ВИГ или плазменном процессе, используя смесь аргон-водород, а не чистый аргон или аргон-гелий.

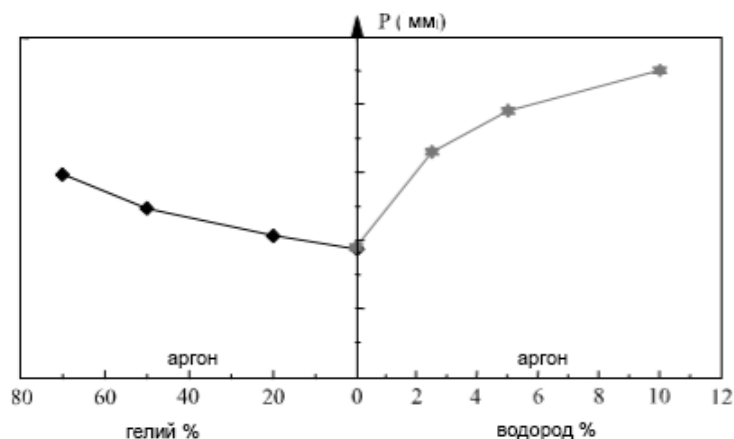


Рисунок 5.10. Влияние защитного газа на проникновение при сварке ВИГ (сталь 316L: $I = 200$ А; расстояние от электрода до детали = 2 мм; скорость сварки 20 см/мин.)

Таким образом, основным газом при сварке ВИГ или плазменной сваркой является аргон, но каждый раз, когда это возможно, то есть в отсутствие неблагоприятных металлургических эффектов, будет выгодно использовать аргон-водородные смеси. Это связано с тем, что они позволяют увеличить скорость сварки или толщину прохода, что в обоих случаях приводит к значительному повышению производительности. Использование тройной смеси Ar-He-H₂ может еще больше повысить скорость сварки, а гелий способствует смачиванию валика.

Металлургическая несовместимость может быть результатом образования пористости в сварном шве со сплавами, которые представляют собой существенное изменение растворимости водорода при затвердевании, например, алюминиевых сплавов. Это также может быть связано с риском холодного растрескивания ферритных сталей, когда они достаточно «закаляются», чтобы создать непластичную структуру в ЗТВ или расплавленном металле. Этот последний риск, однако, должен быть тщательно рассчитан, поскольку содержание диффундирующего водорода, переносимого в расплавленный металл, конечно, зависит от содержания водорода в используемой газовой смеси, но остается ниже 5 мл/100 г при содержании водорода 3% в аргоне. С другой стороны, мы можем без недостатков использовать смеси, содержащие до 5% водорода, для сварки аустенитных нержавеющей сталей или никелевых сплавов.

Когда присадочная проволока используется при сварке ВИГ или плазменной сваркой, она вводится перед дугой, чуть выше ванны с жидкостью. Затем он расплавляется на периферии дуги, и капли вводятся одна за другой в сварочную ванну, не подвергаясь воздействию очень высоких температур, достигаемых в центре столба дуги. Следовательно, существует мало аналитических различий между наплавленным металлом и присадочной проволокой, единственное заметное изменение, касающееся потери азота при сварке дуплексных и супердуплексных сталей. Использование сварочного газа, содержащего азот, позволяет регулировать содержание наплавленного металла и, таким образом, повышать коррозионную стойкость сварного шва (см. Рис. 5.11).

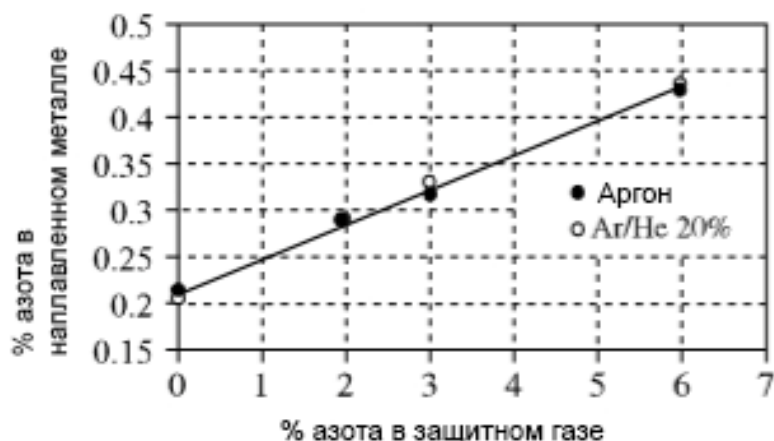


Рисунок 5.11. Содержание азота в наплавленном металле как функция содержания азота в защитном газе (сварка ВИГ); супер дуплексный провод; азот в проволоке: 0,25%

5.3.2 Сварочные процессы в защитном газе с плавящимся электродом

Газовые смеси, используемые при сварке плавящимся электродом (gas metal arc welding (GMAW)), влияют на стабильность дуги, режим переноса металла от проволоки к сварочной ванне и форму валика. Они также определяют химический обмен в дуге и, следовательно, анализ осажденного металла данным электродом.

Операционные аспекты

Стабильность дуги зависит от более или менее легкого извлечения электронов из катода для поддержания дуги. Тем не менее, при сварке MIG/MAG именно части, которые должны быть собраны, образуют катод. Вот почему каждый раз, когда это металлургически приемлемо, используют смеси окисляющих газов, чтобы образовать тонкое оксидное покрытие непосредственно перед дугой, которое способствует термоэлектронной эмиссии [JON 95].

Перенос металла может принимать различные формы в зависимости от используемых параметров:

- при малых сварочных токах, то есть при низких скоростях подачи проволоки, перенос металла из проволоки в сварочную ванну осуществляется посредством короткого замыкания (режим короткой дуги). Периоды дуги прерываются периодами, в течение которых капля, образовавшаяся на конце проволоки, входит в контакт с сварочной ванной. Во время этой фазы дуга гаснет, и ток значительно возрастает, что с помощью электромагнитных сил сначала вызывает трение расплавленного металла в верхней части капли, а затем ее отрыв. Дуга может быть восстановлена, и процесс начался снова;
- при высоких токах (высокая скорость подачи проволоки) перенос металла происходит путем осевого распыления (распылительная дуга). Конец проволоки принимает форму конуса, из точки которого мелкие капли выбрасываются на ось проволоки, которые затем перемещаются к сварочной ванне. Чем выше ток, тем мельче капли и тем выше их скорость;
- при промежуточных токах перенос известен как крупнокапельный. Капли, которые образуются на конце проволоки, увеличиваются до достижения диаметра, значительно превышающего диаметр проволоки, и случайным образом отсоединяются до возникновения короткого замыкания. Этот режим, который относительно нестабилен, является источником большого разбрызгивания.

Таким образом, сварочный ток является определяющим фактором режима передачи. Тем не менее, для тока, совместимого с переносом посредством короткого замыкания или осевого распыления, можно получить крупнокапельный перенос, регулируя напряжение (очень высокое напряжение при низких токах или очень низкое напряжение при высоких токах).

Как правило, различные поля передачи могут быть представлены на диаграмме $U = f(I)$, как на Рисунке 5.12.

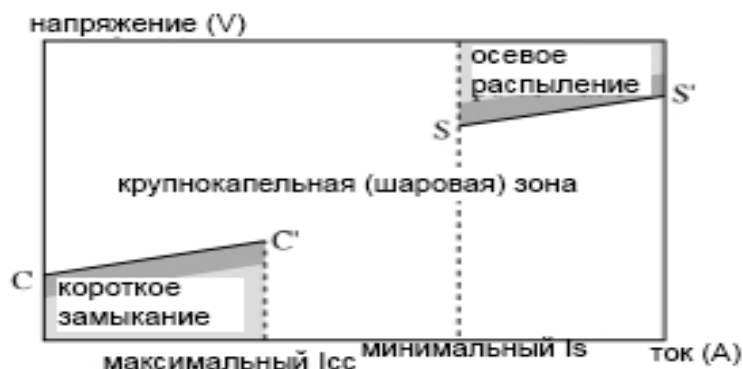


Рисунок 5.12. Режимы переноса металла по параметрам сварки плавящимся электродом в инертном газе/сварки металлическим электродом в среде газа

На этом Рисунке следует отметить следующие моменты:

- ток $I_{ss \max}$, который соответствует максимуму, при котором возможен перенос по короткому замыканию;
- правый сегмент CC' , который определяет максимальное значение напряжения, разрешающее этот тип передачи; на практике сварщики регулируют напряжение до значения немного ниже этого максимума (см. затененную зону);
- ток $I_{s \min}$, который соответствует минимуму, при котором может быть достигнут перенос путем осевого распыления;
- сегмент SS' указывает минимальное напряжение, при котором наблюдается перенос путем осевого распыления, сварщики обычно работают с немного более высоким значением;
- точные пределы этих полей переноса на диаграмме $U=f(I)$ характерны для данной комбинации провод/газ. Они меняются в зависимости от природы защитного газа, но также и от диаметра используемой проволоки: любое добавление CO_2 и/или кислорода в аргон увеличивает размер шарового поля за счет уменьшения I_{ss} и увеличения I_s (см. Рисунок 5.13), так что невозможно получить перенос металла путем осевого распыления, когда содержание CO_2 превышает 50% в аргоне.

Кроме того, увеличение диаметра проволоки вызывает увеличение тока I_s , I_{ss} , оставаясь практически неизменным (см. Рисунок 5.14).

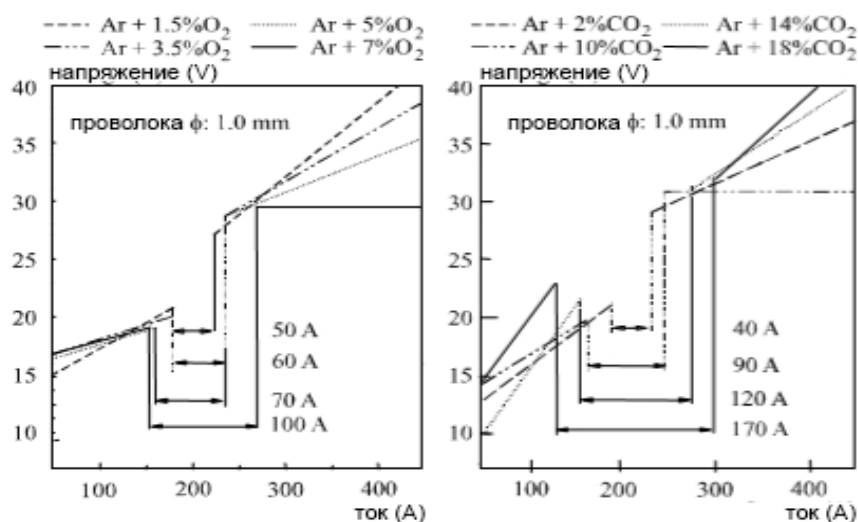


Рисунок 5.13. Влияние содержания O_2 и CO_2 в аргоне на размер шарового поля при сварке MAG (проволока ER 70S3; I 1 мм; **вылет проволоки 15 мм.**)

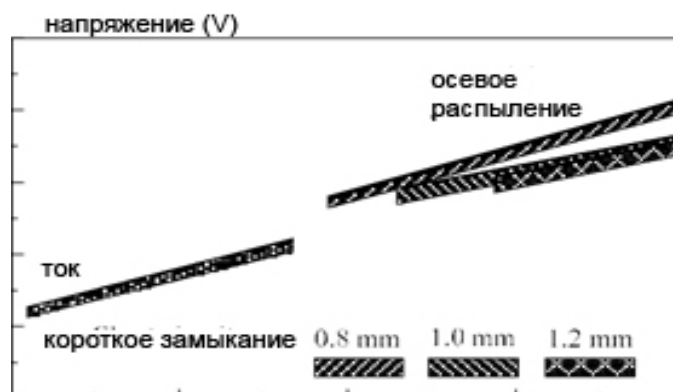


Рисунок 5.14. Влияние диаметра проволоки на переходные поля при сварке MAG (проволока ER 70S3; газ: $Ar + 3\% CO_2 + 1\% O_2$; расстояние между контактной трубкой и контактом / вылет проволоки 15 мм.)

В дополнение к этим трем основным полям существует режим при очень больших токах, когда сварные швы выполняются с большим зазором от контактной трубки до детали (>25 мм), где перенос вращательный (вращающийся струйный перенос или вращающаяся струя) [LES 58, USC 93]. Помимо определенного значения сварочного тока, конус, который образуется на конце проволоочного электрода, становится достаточно длинным и податливым, чтобы изгибаться и вращаться под воздействием электромагнитных сил.

Кривая тем сильнее, чем выше ток и даже может достигать 90° , так что капли расплавленного металла, которые выбрасываются в соответствии с направлением конца конуса, вызывают много брызг. Это, несомненно, причина, по которой этот тип передачи давно считается нежелательным; тем не менее, пока кривая остается небольшой, это может привести к улучшению смачивания гранул и компактности, поскольку она сильно зависит от формы проникновения.

Форма проникновения напрямую связана с режимом переноса металла. В режиме короткого замыкания или шаровидной формы наблюдается линзовидное проникновение, которое объясняется просто законами распространения тепла от поверхности. С другой стороны, когда перенос осуществляется осевым распылением, проникновение становится заостренным. Это связано с тем, что капли, которые движутся с большой скоростью по оси проволоки, вызывают депрессию жидкой ванны в точке их удара и вызывают движение к

ней, которое передает тепло по направлению к дну борта. В этой части валика, имеющего форму пальца перчатки, скорость затвердевания намного выше, чем в остальной части валика, и когда она очень глубокая, то есть при высоких сварочных токах, мы часто наблюдаем недостаток компактности, такой как волдыри наблюдаются усадочные раковины (см. Рис. 5.15). С другой стороны, режим вращающегося переноса, как правило, приводит к образованию четких гранул, несмотря на очень высокие используемые токи, потому что воздействие капель в сварочной ванне постоянно меняется, так что обнаруживается круглое или даже плоское проникновение, которое не подразумевают высокие скорости затвердевания.

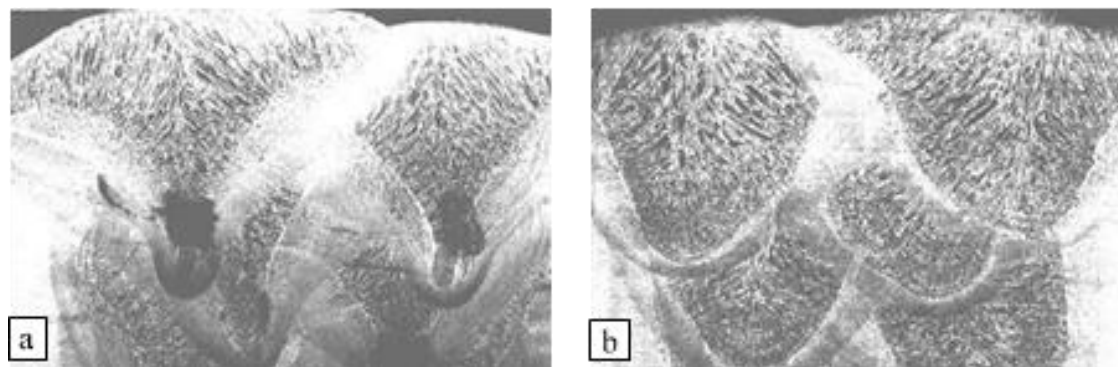


Рисунок 5.15. Морфология и компактность шариков, созданных при больших токах в зависимости от режима переноса металла: а) перенос путем осевого распыления; б) вращающийся перенос

Различные поля, которые мы только что описали, соответствуют естественным изменениям в режимах переноса металла в зависимости от плотности тока в проволочном электроде, длины дуги (напряжения) и ее атмосферы; при условии, что для сварки используется простой генератор напряжения. Это создает некоторые проблемы для сварщика, потому что эти естественные режимы передачи тесно связаны с используемой энергией, которая на практике не может быть выбрана независимо от положения сварки и предполагаемого типа соединения.

Таким образом, ток, соответствующий режиму осевого распыления, не может использоваться для сварки в вертикальных или верхних положениях, потому что сварочная ванна будет слишком громоздкой и разрушится. Таким образом, мы должны выполнять сварку в шаровом режиме и принимать неустойчивый перенос и связанные с ним брызги, если только мы не значительно снизим производительность за счет снижения тока и сварки в режиме короткой дуги. Чтобы смягчить эти недостатки и в определенной степени отделить режим переноса металла от тока и сварочного напряжения, некоторые генераторы используют электронику, которая постоянно контролирует ток очень быстрым и точным способом, так что перенос капель может быть регулируется и контролируется даже для средних значений сварочного тока и напряжения, которые естественным образом склоняют нас к шаровому режиму. Это называется импульсным режимом. Для каждого среднего тока и, следовательно, скорости подачи проволоки, этот режим характеризуется базовым значением тока и времени, пиковым значением тока и времени, а также восходящим и нисходящим наклонами. Пиковый ток должен быть выше минимального тока, допускающего осевое распыление (см. Рис. 5.12), остальные параметры программируются таким образом, чтобы в каждом цикле от проволоки к сварочной ванне переносилась только одна металлическая капля. Это приводит к совершенно стабильному режиму, свободному от брызг - при условии, конечно, что программирование различных параметров импульсного режима хорошо адаптируется к комбинации провод/газ. Напомним, что каждая комбинация провод/газ имеет

«естественные» характеристики передачи, которые присущи ей.

Как правило, те же самые генераторы, которые оснащены электроникой быстрого управления, также могут сохранять режим передачи при коротком замыкании для средних значений тока, превышающих $I_{сс}$ на Рисунке 5.12. Это особенно выгодно, когда мы хотим сваривать на высокой скорости, потому что можно использовать линейную энергию, адаптированную к скорости движения, при сохранении очень короткой дуги, которая, таким образом, с меньшей вероятностью остановится, чем «естественная» или импульсная дуга, соответствующая до того же среднего тока.

Химические аспекты: Анализ наплавленного металла никогда не идентичен анализу проволочного электрода при сварке в потоке газа с плавкой проволокой, поскольку при переносе его по дуге капли металла на поверхности достигают точки кипения. Таким образом, более летучие элементы испаряются более интенсивно, чем другие, что объясняет, почему они обнаруживаются в больших количествах в сварочных газах, но менее распространены в наплавленном металле, чем в присадочной проволоке. Обычно это справедливо для марганца в сталях, магния в сплавах серии 5000 или цинка в латунях.

В дополнение к этой фракционной перегонке и независимо от атмосферы сварки происходят химические реакции, особенно на уровне капель, когда защитный газ обладает некоторой способностью к окислению. Чем выше эта окислительная способность, тем больше аналитические колебания между наплавленным металлом и проволокой, и тем более окисляемые элементы (Si, Mn, Al, Ti и т.д.). Встречаются в виде шлака на поверхности шариков (см. Рис. 5.16). В то же время увеличивается содержание кислорода в наплавленном металле и скорость включения.

Традиционно Международный институт сварки считает, что мощность окисления защитного газа равна сумме содержания кислорода в нем и половины содержания CO_2 (Док. IIS XII-543-77). Два графика на Рисунке 5.16 показывают, что этот подход очень приблизительный, так как потери марганца и кремния намного больше, чем предлагает IIS при сравнении смесей аргон-кислород и смесей аргон- CO_2 . Кроме того, в зависимости от процентного содержания углерода в проволоке и CO_2 в защитном газе, в дополнение к его окислительному эффекту будет наблюдаться эффект науглероживания или обезуглероживания. Таким образом, смесь аргона + 18% CO_2 будет науглероживать, если процентное содержание углерода в проводе будет ниже 0,07% и обезуглерожится выше этого значения; по той же причине у нас не должно быть более 1,5% CO_2 в защитном газе, если мы надеемся сохранить низкоуглеродистую характеристику (<0,03%) сварного шва из аустенитной нержавеющей стали (рис. 5.17).

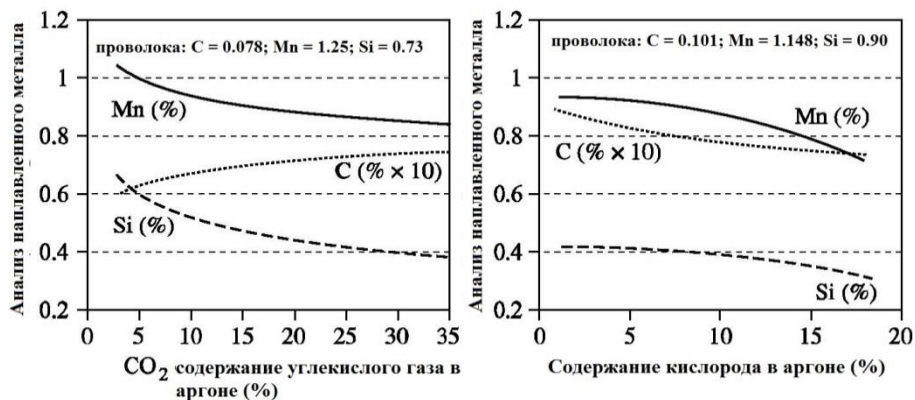


Рисунок 5.16. Химические переносы в соответствии с содержанием CO_2 и кислорода в защитном газе



Рисунок 5.17. Влияние содержания CO_2 в защитном газе на процентное содержание углерода в наплавленном металле в зависимости от режима переноса (проволока ER308LSi с $\text{C} = 0,18\%$)

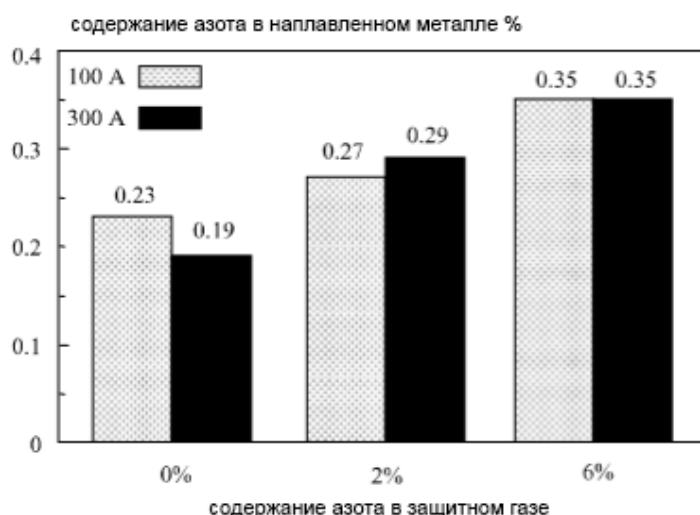


Рисунок 5.18. Влияние содержания азота в защитном газе на содержание азота в наплавленном металле (сварка МИГ); сверхдуплексный провод ($\text{N} = 0,24\%$); два режима передачи

Таким образом, для сварки GMA (дуговая сварка металла в защитном газе), как и для сварки с твердым флюсом, химические характеристики сварных швов связаны не только с используемой проволокой, но и с комбинацией проволока/флюс. Однако разница существует. Принимая во внимание, что, в зависимости от используемого твердого флюса, осадок может быть более или менее богат легирующими элементами, чем присадочная проволока, обычно он менее богат сваркой газообразным флюсом за исключением углерода, как мы видели ранее, и азота, определенное количество которого может быть перенесено в осажденный металл, когда в защитном газе присутствует азот (Рисунок 5.18)

5.4. Порошковая проволока

5.4.1. Производственные процессы

Проданные сегодня порошковые проволоки в основном изготавливаются в соответствии с

тем или иным способом, представленным на Рисунке 5.19.

Для изготовления проволоки по технологии Chemetron мы начинаем с холоднокатаного стального чугуна небольшого размера (около 13×1 мм), который сначала формуют в U. Гомогенную смесь различных составляющих сырья затем помещают внутрь и формуют в O, который затем вытягивается до необходимого диаметра. Наконец, отжиг при низкой температуре проводится для того, чтобы разрушить остаточное мыло, все еще присутствующее на проводе, и слегка окислить его поверхность, чтобы придать достаточную стойкость к атмосферной коррозии.

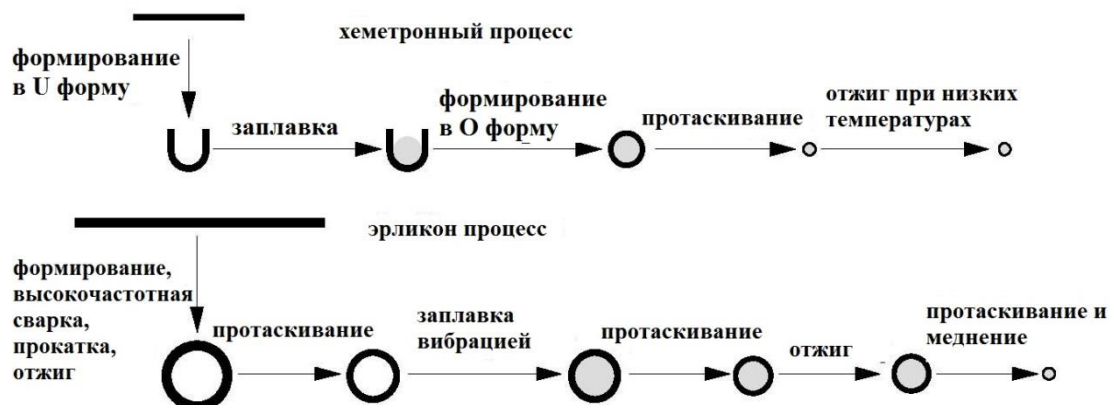


Рисунок 5.19. Процессы производства порошковой проволоки

Технология Oerlikon более сложна. Он начинается с изготовления трубы диаметром около 16 мм, начиная с горячекатаного стального чугуна, толщиной чуть более 2 мм, сваренного с высокой частотой, затем прокатанного до диаметра около 13 мм. Размягчение проводят отжигом, затем трубу вытягивают до диаметра наполнения, который варьируется в зависимости от производственных спецификаций.

Затем происходит заполнение, при котором порошок поднимается за счет вибрации в секциях трубки весом примерно 500 кг, установленных на вибрирующем столе. Заполненную трубку затем вытягивают до промежуточного диаметра, и на этом этапе она должна подвергаться рекристаллизационной термообработке перед вытягиванием ее окончательного диаметра, где она будет покрыта медью.

Таким образом, технология Oerlikon позволяет производить запечатанные медные провода с наполнением, которые напоминают сплошные и используются как таковые. Эти порошковые проволоки абсолютно непроницаемы для поглощения влаги и, как правило, имеют уровни диффузионного водорода, составляющие от 2 до 3 мл/100 г наплавленного металла. Это связано с тем, что во время рекристаллизационного отжига внутри трубы происходят химические реакции с выделением водорода, который выходит через трубчатую оболочку. Однако этот процесс предполагает предварительное гранулирование порошка с помощью силиката, чтобы избежать сегрегации во время операции вибрационного наполнения. Кроме того, эти керамические порошки должны выдерживать высокие температуры, связанные с обработкой рекристаллизацией, нанесенной на трубку, без нежелательных изменений.

Такие ограничения не существуют с процессом Chemetron. Ни в коем случае не нужно гранулировать порошки или вводить силикат, который может иметь нежелательные побочные эффекты во время сварки, или даже учитывать возможное разложение компонентов во время термической обработки, которая в этом случае проводится при низкой температуре. Кроме того, эта технология позволяет изготавливать проволоку с более высокой

скоростью наполнения (отношение массы порошка к массе проволоки) и, как результат, получать более высокую скорость осаждения для данного сварочного тока. С другой стороны, поскольку провода Chemetron не приварены, они более или менее подвержены воздействию влаги в зависимости от их содержания и поэтому требуют больше мер предосторожности при хранении и использовании.

5.4.2. Типы порошковых проволок

Обе технологии позволяют изготавливать все виды порошковой проволоки, предназначенной для использования с защитным газом, порошковые проволоки без газа производятся сегодня только с помощью технологии Chemetron.

В зависимости от природы наполняющих порошков можно найти три типа порошковых проволок с защитным газом: порошковые проволоки с рутиловым покрытием, основные порошковые проволоки и металлические порошковые проволоки. В таблице 5.2 показаны основные компоненты этих различных типов порошковой проволоки, а также их эксплуатационные и металлургические последствия. При сравнении с Таблицей 5.1 относительно электродов с покрытием мы видим большое сходство между порошковыми проволоками и электродами одного типа, но также и некоторые важные различия с точки зрения неметаллических компонентов и эксплуатационных и металлургических последствий.

Таблица 5.2. Основные составляющие и характеристики порошковых проволок с защитным газом

Тип проволоки		Рутиловая	Основная	Металлическая
Основные компоненты	Неметаллические	TiO ₂ , Al ₂ O ₃ , SiO ₂ , Ионизирующие элементы	CaF ₂ , MgO, Карбонаты и т.д. Ионизирующие элементы	<1% Ионизирующие элементы
	Металлические	Легирующие элементы Раскислители	Легирующие элементы Раскислители	Легирующие элементы Раскислители
Последствия	Практические	Мягкий сплав, стабильная дуга, Большое поле переноса путем осевого распыления, Очень хорошее смачивание, Легкая сварка из положения.	Хрустящая дуга, Крупнокапельный перенос, Брызги, Сложная сварка вне позиции.	Стабильная дуга, перенос путем осевого распыления с высоким ток.
	Аналитические	O: 450 до 1,000 ч./млн. Ti: 300 до 800 ч./млн. Nb: 100 до 300 ч./млн. V: 50 до 250 ч./млн. H ₂ Diff: 2 до 15 мл/100 г DM	O: 300 до 500 ч./млн. Ti, Nb, V: настраивается на желаемые значения H ₂ Diff: <5 мл/100 г DM	O: 500 до 1,000 ч./млн. Ti, Nb, V: настраивается на желаемые значения H ₂ Diff: 2 до 8 мл/100 г DM

В проводах, изготовленных по технологии Chemetron, мы всегда добавляем ионизирующие элементы, чтобы обеспечить стабильность дуги; это не существенно в процессе Эрликсона, эту роль играет силикат, используемый для гранулирования порошков наполнителя.

В отличие от покрытых электродов, порошковые проволоки с защитным газом не содержат систематически карбонатов, потому что в этом случае именно защитный газ предотвращает загрязнение капель и сварочной ванны атмосферным азотом и кислородом.

Рутиловая проволока никогда не содержит органических элементов, таких как целлюлоза или экструзионные агенты в электродах. Таким образом, для порошковой проволоки рутильный или основной характер не оказывает влияния на диффундирующий водород наплавленного металла.

В проводах можно использовать более мощные раскислители или раскислители, добавляемые в большем количестве, чем в рутиловых электродах.

Это позволяет получить формулы, которые связывают хорошие эксплуатационные свойства с содержанием кислорода в осажденном металле около 450 ч/млн, то есть не очень отличаются от основных продуктов.

При сварке порошковой проволокой плотность тока значительно выше, чем при использовании электродов с покрытием (от 120 до 300 А для проволоки диаметром 1,2 мм, по сравнению с 80 до 120 А для электрода диаметром 3,2 мм). Это позволяет достичь осевого распыления в режиме переноса металла с рутиловыми проволоками и порошковой проволокой. Этот режим приводит к очень стабильной дуге и практически отсутствию брызг.

Сочетание режима осевого распыления с физическими характеристиками некоторых рутиловых шлаков (температура плавления, вязкость и поверхностное натяжение) придает этим проводам гораздо более высокую производительность, чем всем остальным проводам, с сердечником или твердым телом, во время сварки вне позиции (+ 50% в вертикальной сварке, например); такого изменения не существует между рутиловыми и основными электродами.

Если мы рассмотрим металлургический потенциал этих различных типов проволоки, основные проволоки несомненно лучшие, за ними следуют порошковые проволоки с металлическим порошком, а затем рутиловые; с другой стороны, прямо противоположная классификация достигается на основе их эксплуатационного качества с очень большим преимуществом для рутиловых проволок, когда речь идет о сварке во всех положениях. Вот почему в течение примерно 15 лет разработки в основном были связаны с улучшением металлургических свойств рутиловых проволок за счет улучшения микроструктуры металла шва с использованием эффекта титан/бор. Эти усилия увенчались успехом, поэтому сегодня основные проволоки эффективно используются только для сварки сталей с очень высоким пределом текучести (t690 МПа). Остальная часть рынка поделена между металлической порошковой проволокой, которая ценится в плоской сварке, потому что они предлагают лучшую производительность, чем другие проволоки (отсутствие шлака), и рутиловой проволокой, когда необходимо сваривать во всех положениях.

5.4.3. Эффект титана / бора по отношению к рутиловым сердечникам

Этот эффект является следствием присутствия очень небольшого количества бора (обычно от 20 до 60 частей на миллион), что значительно задерживает зарождение доэвтектоидного феррита на границах аустенитных зерен, пока сварной шов охлаждается. Таким образом, превращение аустенита может происходить в основном за счет внутризеренного прорастания игольчатого феррита на включениях, при условии, что они обладают необходимыми характеристиками и, таким образом, присутствуют на поверхностных зонах оксида титана.

Когда полный химический анализ металла сварного шва хорошо сбалансирован в марганце и, возможно, никеле (так что его прокаливаемость является оптимальной для термического цикла, которому подвергается сварной шов), сеть доэвтектоидных ферритов сводится к тонкой окантовке, а остальная часть аустенит превращается в игольчатый феррит.

Если, кроме того, возможно включить добавку молибдена, достигается синергетический эффект бор/молибден, который позволяет полностью удалить сеть проэвтектоидных ферритов и получить структуру, состоящую только из игольчатого феррита, которая обладает замечательными характеристиками прочности.

Таблица 5.3. Характеристики сварных швов, достигнутые с помощью рутиловой проволоки с оптимизированным эффектом Ti-B

C%	Mn%	Si%	S%	P%	Ni%	Nb%	V%	Ti%	В ч./млн.	О ч./млн.	N ч./млн.
0.070	1.39	0.35	0.006	0.007	0.65	0.006	0.008	0.046	40	400	39
Состояние				Сварка				Снятие напряжения (580°C/3 часа)			
Положение надрезов				Сварные зоны		Отожженные зоны		Сварные зоны		Отожженные зоны	
Kv - 40°C (Дж): ср.; (мин.)				145 (136)		139 (137)		118 (106)		115 (91)	
Kv - 60°C (Дж): ср.; (мин.)				109 (85)		121 (118)		98 (88)		94 (82)	

5.5. Выбор сварочных изделий

Из предыдущих соображений ясно, что выбор комбинации проволоки/флюса, будь то твердый или газообразный, должен будет учитывать:

- данные поставщика, касающиеся химических и механических характеристик, определенных соответственно на сварочной площадке и наплавленном металле сварного шва,
- форма соединения, толщина и химическая природа основного металла.

В каталоге поставщиков указаны химические и механические характеристики отложений, выполненных в стандартных условиях с большой точностью.

Эти стандарты (EN, AWS и т. д.) Более или менее точно указывают параметры сварки (U, I, Ws), температуры между проходами и, возможно, даже температуру предварительного нагрева, распределение проходов (обычно два прохода на слой) и положение различных образцов, необходимых для характеристики во всем наплавленном металле.

Этот тип информации абсолютно необходим для проверки целостности продукта, но, принимая во внимание все, что было сказано ранее, ясно, что эти данные не обязательно отражают то, что будет получено во время выполнения реального соединения, для которого термическая сварка цикл и/или степень разбавления основного металла не могут иметь отношения к стандартизированным условиям.

Вот почему поставщики сварочной продукции обычно публикуют таблицы данных относительно своей продукции, которые, в дополнение к характеристикам, полученным в стандартных условиях, дают результаты по соединениям, полученным в различных условиях

(подвод тепла, степени разбавления и т. д.) И с различными сталями. Они также предоставляют дополнительную информацию, специфичную для каждого продукта, такую как:

- поле используемых параметров,
- депозитная ставка в соответствии с текущим,
- графики химического переноса,
- поведение в отношении поглощения влаги,
- гранулометрическое распределение (для потоков в погруженной дуге).

Именно исходя из этих спецификаций и применяя металлургические рассуждения, мы сможем выбрать продукты, подходящие для достижения целей, налагаемых строительными спецификациями.

Когда сваривают большие толщины, коэффициент разбавления является низким, за исключением корневой зоны, но его часто вырезают перед сваркой второй стороны соединения. В этом случае мы можем использовать данные каталога, чтобы выбрать продукты, наилучшим образом адаптированные к желаемым механическим свойствам, или, если рассматриваемые условия сварки сильно отличаются от стандартных условий с точки зрения циклов термической сварки, мы можем прибегнуть к техническим данным. Более того, поскольку этот тип соединения часто подвергается обработке для снятия напряжений после сварки, выбор сварочных изделий должен учитывать эту возможность, так как характеристики металла сварного шва могут быть значительно изменены во время этой обработки¹.

5.6. Составляющие сварочных работ и режим работы сварщика

Сварка является источником многих вредных воздействий (ультрафиолетовое излучение, шумы, испарения, всплески (при плавке) и т.д.), которые требуют необходимости использования индивидуальных и совокупных защитных средств для сохранения здоровья сварщиков и других специалистов, работающих по соседству. Однако, не всегда легко гарантировать абсолютную эффективность составляющих сварочных работ, независимо от локализации сварки, и поэтому любые меры по снижению вредных воздействий на уровне исходного окажут только положительное влияние на условия труда. Эта задача стала основной целью на этапе совершенствования сварочных материалов и сварочных процедур, и даже если, еще многое предстоит сделать, уже сейчас можно значительно снизить некоторые из этих вредных воздействий.

¹ Целью снятия напряжения является снижение внутренних напряжений, возникающих из-за многократных и неоднородных нагревов, что характерно для сварки. Его принцип заключается в снижении предела текучести материалов при одновременном повышении температуры: в данной конструкции не может быть внутренних напряжений, превышающих предел текучести, поскольку в этом случае это приведет к деформациям, которые будут продолжаться до тех пор, пока напряжения не будут понижены до их предела текучести. Обработка для снятия напряжений состоит из нагревания до температуры, при которой предел текучести рассматриваемого металла достаточно низок (580/600°C для большинства сталей), так что возникают деформации и снимаются напряжения.

Однако в дополнение к этому явлению снятия напряжений обработка может вызывать некоторые полезные металлургические реакции (отпуск несбалансированных структур, размягчение закаленных зон и т. д.). Но иногда очень разрушительные с точки зрения прочности (карбид, нитрид) или осаждения при карбонитридном отверждении; при охлаждении после стадии сброса и т. д. возникает охрупчивание. Масштабы этих вредных вторичных явлений в значительной степени зависят от природы используемых продуктов, поэтому при выборе продуктов для данной конструкции важно учитывать наличие или, наоборот, отсутствие такой обработки в процессе производства.

5.6.1. Электроды с покрытием

Количество паров, выделяющихся при сварке покрытым электродом, зависит от природы покрытия и используемой электрической мощности. Это то, что показано на рис. 5.20 для различных диаметров двух рутиловых и двух основных электродов разных марок. Эти результаты были получены с использованием для каждого электрода среднего тока, рекомендованного производителем для рассматриваемого диаметра. Однако следует иметь в виду, что выбросы дыма могут быть удвоены, когда интенсивность сварки изменяется от минимальной до максимальной области применения для конкретного диаметра. В целом, можно видеть, что рутиловые электроды имеют скорость выделения дыма в диапазоне от 0,8% до 1% от наплавленного металла, в то время как для основных электродов эта скорость составляет от 1,5% до 2%.

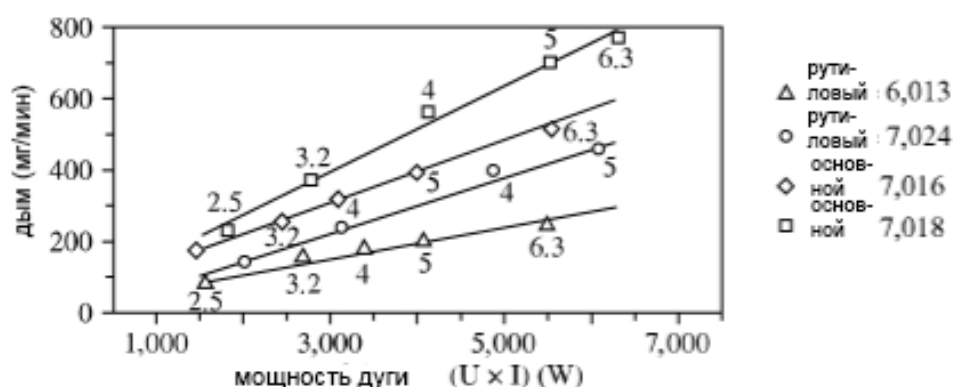


Рисунок 5.20. Скорость эмиссии дыма различных типов и диаметров электродов в зависимости от мощности дуги: рутил 6,013 и 7024; основные 7,016 и 7,018

В случае электродов, прокаленных при низкой температуре (рутиловые электроды), скорость испарения дыма увеличивается с увеличением потенциального содержания водорода, то есть водорода, поступающего из остаточной влажности после обжига, а также из всех органических материалов покрытия. С другой стороны, для электродов, выпекаемых при высокой температуре (основной и нержавеющей), скорость выделения дыма является возрастающей функцией содержания натрия и калия в покрытии. Таким образом, удаляя все компоненты, содержащие эти элементы, из покрытия и заменяя их соединениями лития, можно вдвое сократить количество выделяемых паров. Применение этого состава к нержавеющей электродам имеет дополнительное преимущество, заключающееся в значительном снижении токсичности дыма. Действительно, пары традиционных нержавеющей электродов содержат приблизительно 4% шестивалентного хрома, который имеет индекс токсичности в 100 раз выше, чем стандартные пары, и в 10 раз выше, чем хром в трехвалентном состоянии (Oel CrVI: 0,05 мг/м³; Oel CrIII: 0,50 мг/м³; стандартные пары масла: 5 мг/м³). Однако это доказывает, что замена соединений натрия и калия соединениями лития позволяет снизить содержание CrVI в парах до уровня менее 1%, так что пары этих электродов для нержавеющей сталей больше не токсичны, чем для нелегированных электродов (см. Рисунок 5.21).

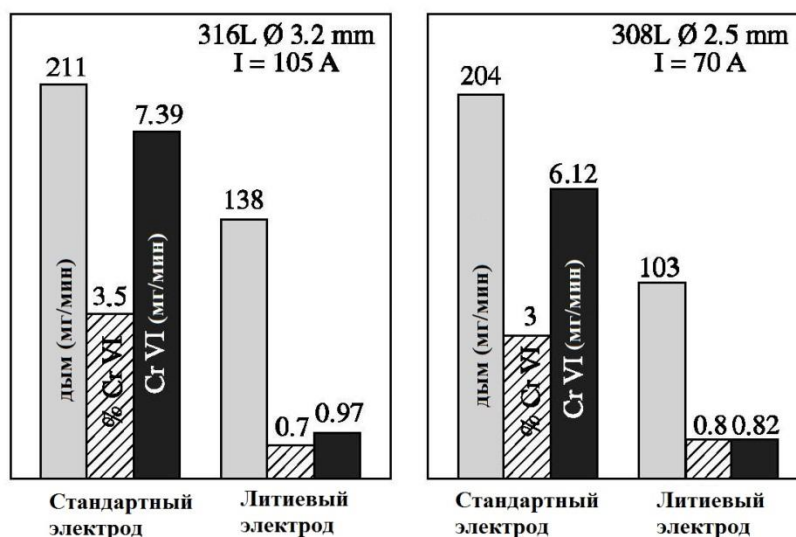


Рисунок 5.21. Сравнение скоростей эмиссии дыма и шестивалентного хрома между стандартными электродами из нержавеющей стали и электродами с литием

Сегодня надбавки к стоимости, связанные с этими разработками рецептур, считаются чрезмерно высокими в случае традиционных базовых электродов. Однако это приемлемо для нержавеющей стали из-за гораздо более высокой цены на сердечники этих электродов. Они сейчас на рынке.

5.6.2. Газовые смеси для сварки ВИГ

При сварке ВИГ пары и брызги отсутствуют, но существует проблема образования озона во время сварки нержавеющей стали и еще больше при сварке легких сплавов.

Озон возникает в результате воздействия ультрафиолетового излучения, которое «разрушает» окружающие молекулы кислорода. Образованные таким образом отдельные атомы кислорода (O) будут способны реагировать с другими молекулами кислорода (O₂) и образовывать молекулы озона (O₃), токсичность которых признается. Фактически, в ультрафиолетовом излучении в спектральной полосе от 130 до 180 нм особенно подвержены образованию этих отдельных атомов.

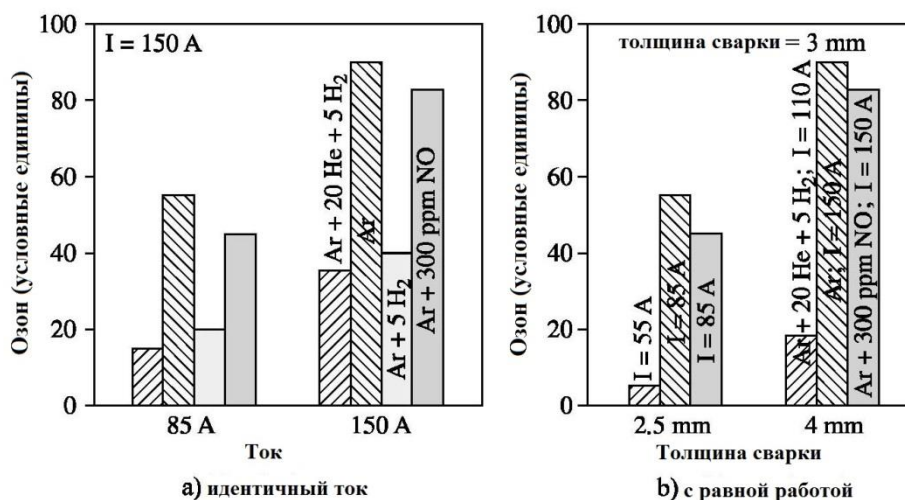


Рисунок 5.22. Влияние типа защитного газа на количество озона, образующегося при сварке ВИГ аустенитной нержавеющей сталью

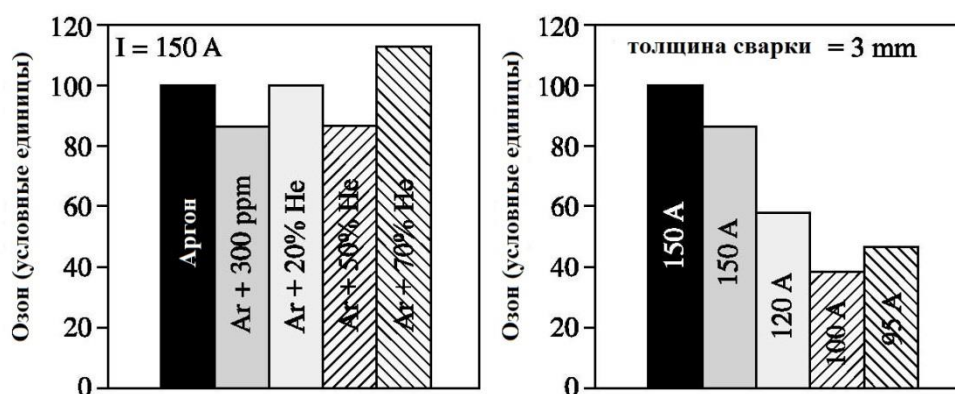


Рисунок 5.23. Влияние типа защитного газа на количество озона, образующегося в легком сплаве (сплав 5086) АС ВИГ-сварки

Спектр излучения, испускаемый дугой, зависит от используемой энергии и присутствующих химических элементов. Вот почему количество образовавшегося озона увеличивается с увеличением мощности дуги ($U \times I$), и при одинаковой мощности и защитных газах при сварке легких сплавов образуется больше озона, чем нержавеющей сталей.

Если целью является уменьшение количества озона, который будет диффундировать в атмосферу, окружающую сварщика, существует несколько решений:

- минимизировать излучение в спектральной полосе от 130 до 180 нм. Это может быть достигнуто путем замены аргона гелием, насколько это возможно, в защитном газе;
- минимизировать энергию, используемую для производства любого данного соединения. Это может быть достигнуто путем изменения процесса: двойной поток ВИГ или плазма ведут к более глубокому проникновению, чем процесс ВИГ с идентичной энергией, и, таким образом, позволяют уменьшить энергию сварки, необходимую для получения данного соединения. Это также может быть достигнуто с помощью защитного газа, содержащего гелий и/или водород, который, изменяя морфологию дуги и увеличивая напряжение с одинаковой длиной дуги, значительно улучшает производительность процесса ВИГ;
- вводить в защитный газ молекулы газа, которые очень реактивны по отношению к озону и вызывают его разрушение (водород или закись азота NO).

Рис. 5.22 и 5.23 иллюстрируют преимущества, которые можно получить от этих различных действий. Они показывают, что там, где это возможно, выгодно использовать тройные смеси аргон-гелий-водород, которые объединяют различные эффекты. Однако смесь должна быть спроектирована таким образом, чтобы учитывать, с одной стороны, эксплуатационные аспекты (слишком высокое содержание гелия и/или водорода может создавать проблемы для сварки вне позиции), а с другой стороны, металлургии, которая приводит нас к отвергнуть, например, использование водорода для сварки легких сплавов для сохранения компактности сварного шва. Наконец, следует также отметить, что определенное сварочное оборудование не обеспечивает хорошую стабильность дуги при очень высоком содержании гелия. Это объясняет увеличение содержания озона в смеси аргона + 70% гелия на Рис. 5.23.

5.6.3. Газовые смеси для сварки GMAW

Помимо ультрафиолетового излучения, выделение паров является основным вредным эффектом, связанным со сваркой GMA. В первом приближении это возрастает в зависимости от степени окисления защитного газа (см. Рис. 5.24), но пары и брызги также тесно связаны с режимом переноса металла.

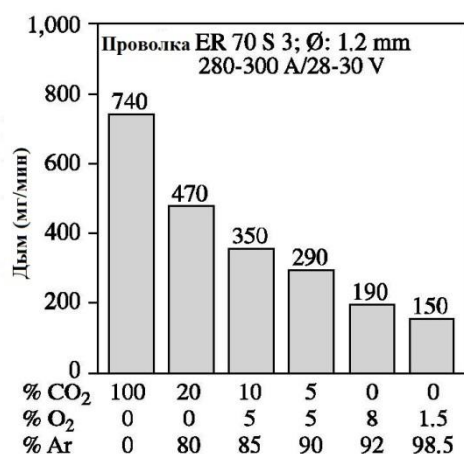


Рисунок 5.24. Влияние защитного газа на скорость выделения дыма при сварке металлическим электродом в среде газа

Когда сварные швы производятся с током, который вызывает перенос путем осевого распыления для используемой комбинации проволока/газ, скорость выброса дыма и проекции уменьшаются, когда мы увеличиваем напряжение до тех пор, пока не будет достигнут устойчивый перенос посредством осевого распыления. Помимо этого значения, увеличение напряжения не будет изменять перенос металла, но вызывает простое удлинение дуги, что, в свою очередь, вызывает увеличение улетучивания металлических элементов и, следовательно, скорости выделения дыма (см. Рис. 5.25).

Это очень общий процесс, как показано на Рис. 5.26, где сравниваются скорости выделения дыма относительно трех газовых смесей в различных условиях сварки. На этом же рисунке мы также видим, что минимальные значения выбросов уменьшаются при уменьшении мощности окисления защитного газа. Также видно, что конкретные сравнения с постоянными электрическими параметрами могут привести к обратным классификациям защитных газов, поскольку идентичные электрические параметры не соответствуют подобным точкам расположения рабочих точек по сравнению с характеристиками переноса, характерными для каждого газа.

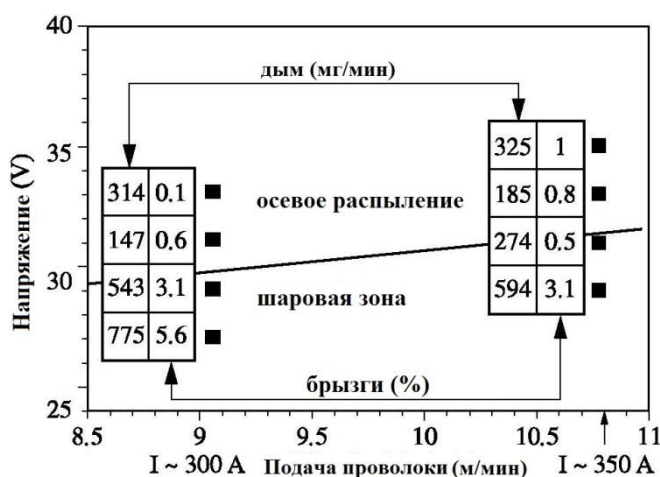


Рисунок 5.25. Соотношение между скоростью выброса дыма, разбрызгиванием и графиком переноса. Проволока: ER70S6 1,2 мм; газовая смесь: Ar + 3% CO₂ + 1% O₂; расстояние от контактной трубки до детали: 20 мм

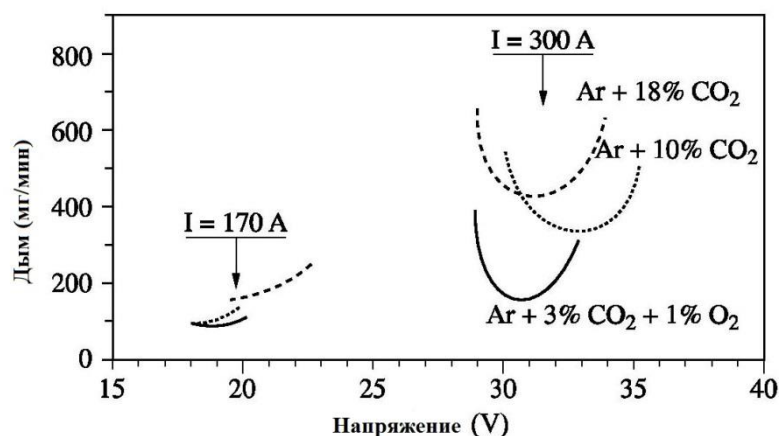


Рисунок 5.26. Сравнение скорости выделения дыма тремя газовыми смесями по напряжению для двух сварочных токов. Провод: ER70S6 I 1,2 мм

На практике, если мы хотим снизить скорость выделения дыма, всегда будет выгодно использовать наименее окисляющий защитный газ, совместимый с эксплуатационными требованиями. С этой точки зрения, смесь $\text{Ar} + 3\% \text{CO}_2 + 1\% \text{O}_2$ представляется нам отличным компромиссом для сварки ферритных сталей, и тем более, что эта смесь идеально подходит для импульсной сварки. Это позволит нам упорядочить перенос металла, а также значительно сократить разбрызгивание и выбросы дыма, когда мы обязаны использовать параметры, которые соответствуют крупнокапельному переносу, если используется постоянный ток (см. Рис. 5.27)

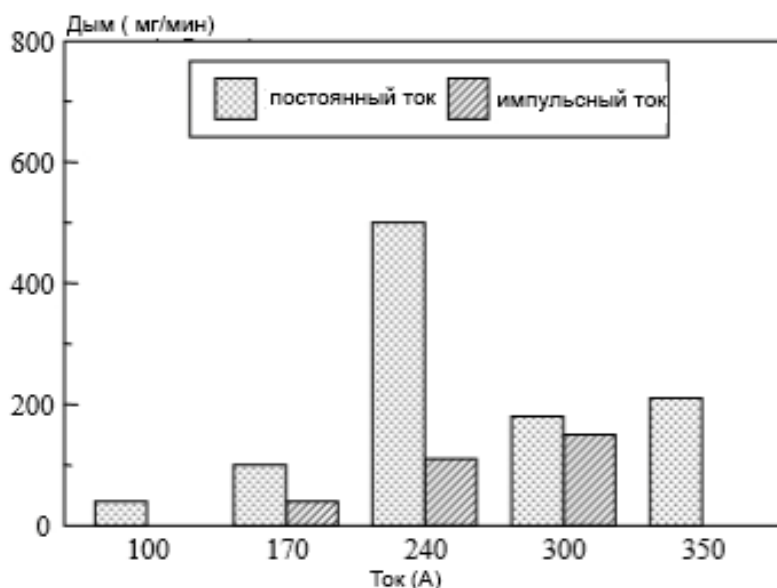


Рисунок 5.27. Сравнение скорости эмиссии дыма между постоянным током и импульсным током. Провод: ER70S3 I 1,2 мм; газ: $\text{Ar} + 3\% \text{CO}_2 + 1\% \text{O}_2$

5.6.4. Порошковая проволока

Использование порошковой проволоки, кажется, развивается в ущерб покрытым электродам. Однако, хотя эти продукты не генерируют значительно более длительные выбросы дыма, чем электроды, когда мы рассматриваем результаты определения количества осажденного металла, их более высокая производительность приводит к скорости выбросов в единицу времени, которая иногда может препятствовать их использованию.

Эксплуатационные качества порошковой проволоки частично связаны с используемым защитным газом, а также с природой «ингредиентов», составляющих наполнитель. По сравнению со сплошными проволоками, таким образом, существует дополнительная степень свободы, которая позволяет рассматривать развитие комбинаций порошковая проволока/газ, использование которых не приведет к образованию СО. Количество образующегося СО находится в прямой зависимости от содержания CO_2 в экранировании. газ, необходимо адаптировать составы проволоки таким образом, чтобы они обладали необходимыми эксплуатационными качествами для газа, не содержащего CO_2 . Кроме того, чтобы свести к минимуму выбросы дыма, газ должен быть как можно менее окислительным.

Сегодня существуют не только проволоки с металлическим сердечником, но и рутиловые проволоки, предназначенные для работы со смесью $\text{Ar} + 3,5\% \text{O}_2$. Кроме того, в качестве средства минимизации выбросов СО они могут снизить выбросы дыма примерно на 50% по сравнению со стандартным проводом, используемым со смесью $\text{Ar} + 18\%$ или $25\% \text{CO}_2$.

5.7 Список использованной литературы

- [BOU 83] BOURDIN E., FAUCHAIS P., BOULOS M., “Transient heat conduction under plasma conduction”, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 26, no. 4, p. 567-582, 1983.
- [DIC 88] DICKEHUT G., RUGE J., “Method for predicting the content of diffusible hydrogen in the weld metal under the influence of atmospheric moisture”, *Schweissen und Schneiden* 40, no. 5, p. 238-241, May 1988.
- [EAG 78] EAGAR T.W., “Sources of weld metal oxygen contamination during submerged arc welding”, *Welding Journal*, p. 76s-80s, March 1978.
- [GAS 86] GASPARD-ANGÉLI A., BONNET C., “How to optimize the properties of the longitudinal welds of pipes using a fused flux”, *Proceedings of the 3rd Intern. Conf., Welding and Performance of Pipelines*, London, 18-21 November 1986.
- [JON 95] JÖNSSON P.G., MURPHY A.B., SZEKELY J., “The influence of oxygen additions on argon-shielded gas metal arc welding processes”, *Welding Journal*, p. 48-58, February 1995.
- [LED 92] LEDUEY B., BONNET C., DAMAGNEZ P., “Principes d’évolution des électrodes enrobées pour réduire l’hydrogène diffusible”, *Soudage et Techniques Connexes*, p. 15- 19, July-August 1992.
- [LES 58] LESNEWICH A., “Effect of shielding gas composition on metal transfer phenomena in high current GMA Welding. Part II – Control of metal transfer”, *Welding Journal*, p. 418s-425s, September 1958.
- [TAY 75] TAYLOR L.G., FARRAR R.A., “Metallurgical aspects of the mechanical properties of submerged-arc weld metal”, *Welding and Metal Fabrication*, p. 305-310, May 1975.
- [TUL 69] TULIANI S., BONISZEWSKI T., EATON N.F., “Notch toughness of commercial submerged-arc weld metal”, *Welding and Metal Fabrication*, p. 327-339, August 1969.
- [USH 93] USHIO M., IKEUCHI K., TANAKA M., SETO T., “Effect of shielding gas composition on metal transfer phenomena in high current GMA welding”, *Trans JWRI*, vol. 22, no. 1, p. 7, 1993.

Усталостная прочность сварных соединений

6.1. Усталостная прочность

6.1.1. Введение

Наблюдение за нарушением работы в сварных конструкциях, как правило, указывает на усталость. Кроме того, стало очевидно, что для сварных конструкций допустимые эксплуатационные напряжения были очень низкими в отношении статических напряжений (предел текучести, прочность на разрыв) и что этого было недостаточно для применения коэффициента безопасности, основанного, например, на доле предел текучести, чтобы быть уверенным во избежание отказа. Действительно, сварные швы могут создавать серьезные концентрации напряжений, отличные от одного элемента конструкции к другому.

Например, на рисунке 6.1 сравниваются усталостные характеристики стальной пластины E36 и той же пластины с отверстием или двумя ребрами жесткости, приваренными в продольном направлении. Усталостная прочность, которая обычно задается как 2×10^6 циклов, проходит соответственно от 260 (плоская пластина) и 180 (пробивная пластина) до 70 МПа для сварного соединения.

С другой стороны, если мы применяем достаточно большой коэффициент безопасности для исключения возможности разрыва, то сварная конструкция становится слишком большой и невыгодной.

Фактически, при проектировании структуры каждый ее аспект должен удовлетворять трем следующим условиям:

- выполнять свои функции максимально эффективно,
- экономное производство,
- обеспечение определенного срока службы в эксплуатации

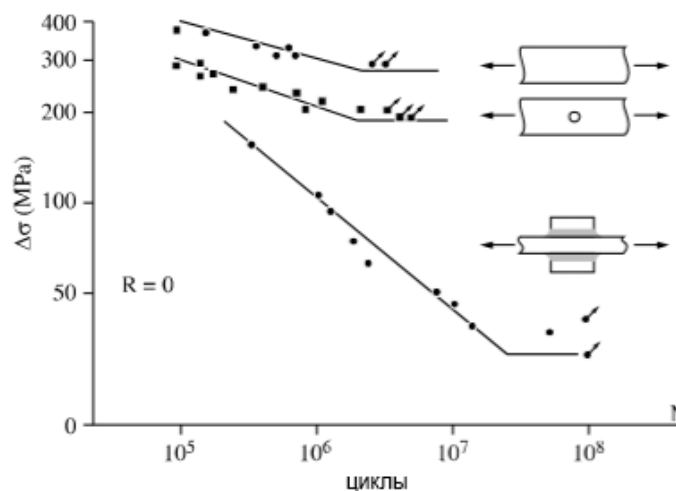


Рисунок 6.1. Сравнение усталостных прочностей листа с отверстиями или гладкой стали и углового шва

Последствия первых двух условий на этапе проектирования приводят к снижению коэффициентов безопасности с целью уменьшения веса и затрат. К сожалению, эта тенденция вступает в противоречие с необходимостью достаточного срока эксплуатации и, следовательно, безопасностью конструкции, в которой может возникнуть усталостное повреждение. Кроме того, усталостная прочность фактических конструкций не может быть однозначно определена теоретическим путем. Вот почему единственный реалистичный подход к проектированию конструкции, подверженной усталостным напряжениям, состоит в том, чтобы связать уровни нагрузки, приложенные к данным по усталостной прочности, которые соответствуют каждой используемой конфигурации соединения. В связи с этим каждая страна имеет свои собственные стандарты или рекомендации. Однако эти коды применимы только к определенным типам металлических конструкций.

Цель этой главы - представить основные параметры, влияющие на усталостное поведение сварных соединений, как аналитическим, так и схематическим способом.

6.1.2. Усталостное разрушение основных сварных соединений

Сварочные операции приводят к тому, что в местах, подверженных напряжению, возникают усталостные трещины, которые могут формироваться и расширяться. Эти зоны представляют собой либо геометрическую аномалию в сварном шве, внутренний дефект (отсутствие проницаемости, пористости), либо внешний дефект (поднужения, шлаковые включения); их относительная важность зависит от типа сборки и типа нагрузки, применяемой при обслуживании.

6.1.2.1. Стыковые сварные соединения

Поперечные стыковые сварные швы

На рисунке 6.2 представлен этот тип сборки, позволяющий соединить две пластины поперечной сваркой, перпендикулярной оси нагрузки.

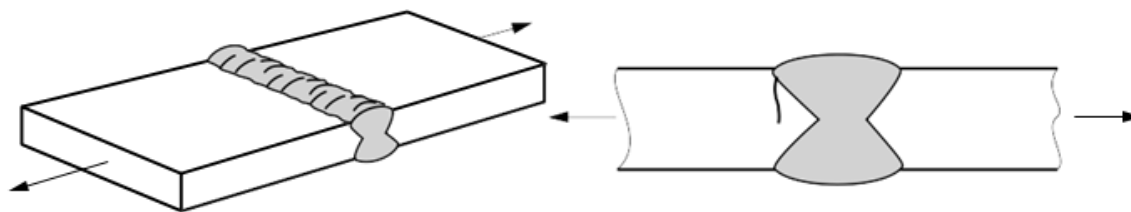


Рисунок 6.2. Усталостное растрескивание поперечного стыкового шва

Для этого типа соединения усталостная трещина начинается у подошвы сварного шва и распространяется по толщине листа, перпендикулярно направлению нагрузки. Таким образом, трещина не является результатом дефектной сварки или плохого качества наплавленного металла, а является следствием концентрации напряжений на подошве сварного шва.

В этом типе стыкового сварного соединения влияние формы сварного шва важно для определения характеристик прочности соединения. Это сильно зависит от сварочных условий.

Продольные сварные швы

Для продольных соединений изменение сечения из-за избытка металла теперь параллельно направлению прикладываемой нагрузки, и можно подумать, что усталостные характеристики этих сварных швов лучше, чем у поперечных соединений. Тем не менее, это не всегда так.

Трещина в этом типе соединения обычно начинается (см. Рис. 6.3) на уровне остановки и повторного запуска сварки, например, при замене электрода или при деформации поверхности сварного шва.

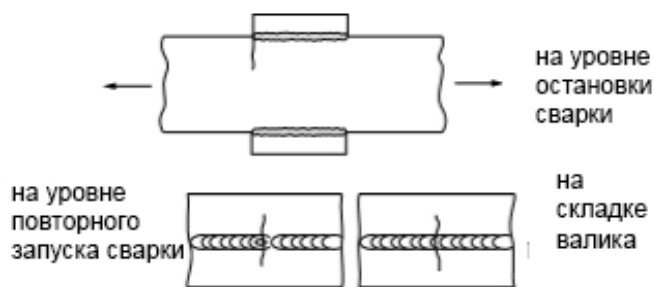


Рисунок 6.3. Усталостное растрескивание продольного стыкового шва

Хорошая усталостная прочность продольных соединений может быть получена только в том случае, если они являются непрерывными и, следовательно, предотвращаются перерывы при сварке.

6.1.2.2. Сборные единицы углового сварного шва

а) Крестообразное соединение

Существует два типа крестообразных соединений, в зависимости от того, переносят ли сварные швы нагрузку или нет.

Угловой сварной шов, не несущий нагрузку

В первом типе (см. Рис.6.4а и 6.4б) угловая сварка не передает нагрузку на сплошной металлический лист. В этом случае трещина начинается у подошвы сварного шва и распространяется по толщине пластины в плоскости, перпендикулярной к напряжению.

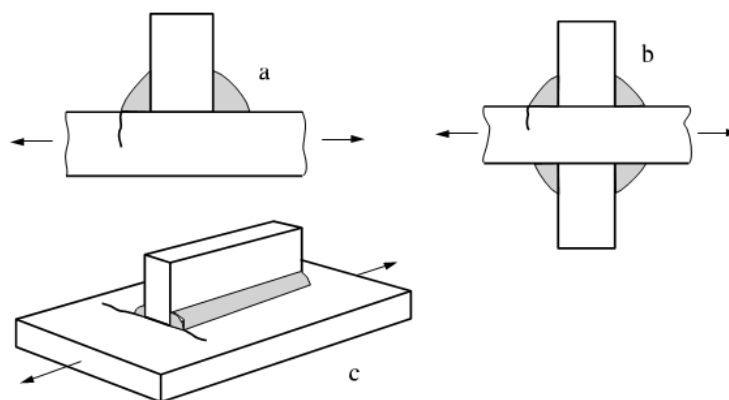


Рисунок 6.4. Усталостное растрескивание углового шва, не несущего нагрузку

Нет какого-либо преимущества в изготовлении сборных единиц с угловыми сварными швами, параллельными направлению напряжения (см. Рис. 6.4с). Затем трещина начинается

на конце валика и приводит к низкой усталостной прочности. С другой стороны, непрерывные продольные угловые сварные швы значительно улучшают долговечность по сравнению с прерывистыми угловыми сварными швами.

Несущая угловая сварка

В этом типе соединения вся нагрузка передается сварным швом (см. Рис. 6.5a).

В этом случае в дополнение к зонам концентрации напряжений, расположенным на подошве сварного шва, в основании сварного шва имеются зоны остроугольных внутренних выемок. Как правило, здесь начинается трещина, которая затем распространяется в осажденном металле в наклонном направлении по сравнению с направлением нагрузки. Этот тип нарушения означает, что сборка имеет относительно низкие характеристики прочности по сравнению с предыдущими сварными соединениями. Вот почему цель состоит в том, чтобы избежать появления трещины в корне сварного шва; однако увеличение толщины сварного шва за счет более широкого сварного шва или большей глубины не всегда достаточно для обеспечения усталостной трещины, на этот раз в границе наружной поверхности сварного шва. Как правило, полностью взаимопроникающие валики (см. Рис. 6.5b) заметно улучшают свойства выносливости.

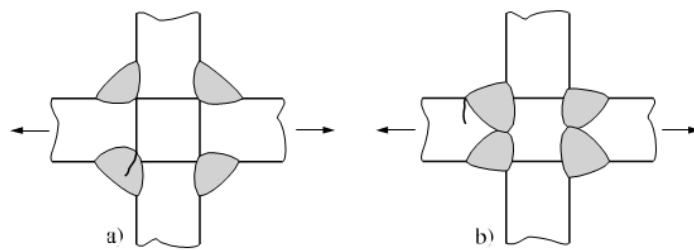


Рисунок 6.5. Усталостное растрескивание несущего углового шва

Как правило, взаимопроникновение валика не всегда необходимо для передачи образования трещины в корне сварного шва на границу наружной поверхности сварного шва. На рис. 6.6 представлены геометрические условия валиков, необходимые для перехода от одного типа неполадки к другому.

b) Т-образные стыки

На первый взгляд, это соединение напоминает половину крестообразного соединения (см. Рис. 6.7) и должен демонстрировать аналогичную усталостную модель. Однако в этом случае возможен третий режим разрыва. Если изгибочные напряжения, приложенные к поперечному элементу, имеют тот же порядок величин, что и ограничения, применяемые непосредственно к Т, трещина сможет начаться на других границах сварного шва и распространиться через поперечный элемент.

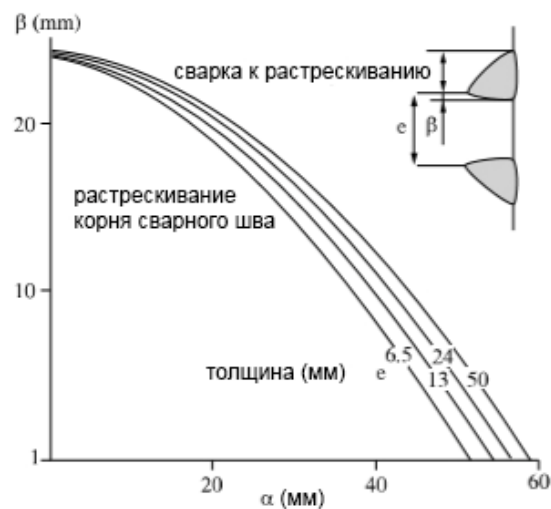


Рисунок 6.6. Условия растрескивания крестообразного соединения. Влияние неполного проплавления; от [LIE 73]

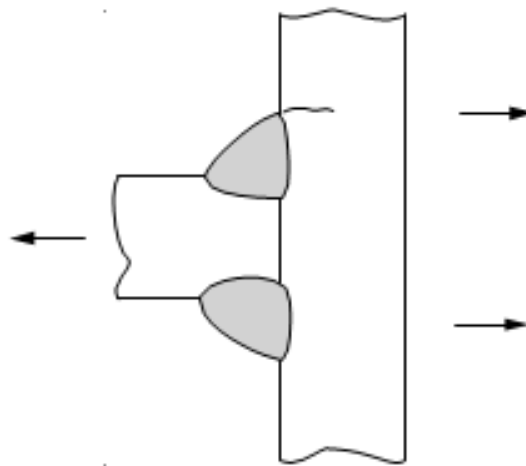


Рисунок 6.7. Усталостное растрескивание Т-образного сварного шва, когда поперечный элемент испытывает изгибающее напряжение

6.1.3. Концепция номинального напряжения

Элементарное сварное соединение можно рассматривать как элемент с надрезанной структурой, причем сварной шов представляет собой выемку. Как и в случае с надрезанной частью, диапазон номинальных напряжений $\Delta\sigma_N$ считается экстраполированным до уровня точки образования трещины.

Рис. 6.8 представляет $\Delta\sigma_N$ в отношении соединения с поперечным ребром жесткости, подвергнутому либо растяжению, либо изгибу. Номинальное напряжение представляет собой отдаленное напряжение по части прочности материала, то есть без учета локального эффекта, обусловленного сварным швом, или геометрического эффекта, например, в присутствии элемента жесткости для Т-образного соединения. При растяжении это напряжение выражается как $\sigma_n = F/S$ (F : сила, S : сечение), а при изгибе – как $\sigma_n = M.v/I$ (M : изгибающий момент, I : инерция и v - расстояние до нейтрального волокна).

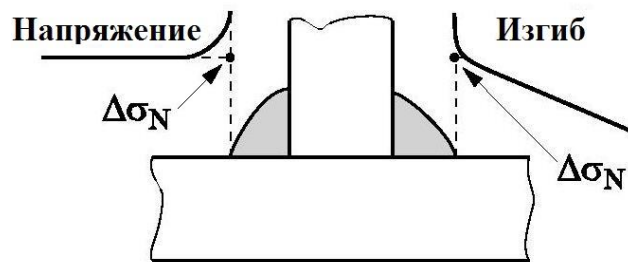


Рисунок 6.8. Определение варьирующегося диапазона номинальных напряжений $\Delta\sigma_N$ в случае углового шва

Как правило, $\Delta\sigma_N$ используется на диаграммах Вёлера ($\Delta\sigma - N_R$) для построения кривых S-N (см. Рис. 6.9).

Как будет видно позже, условный предел выносливости 2×10^6 циклов часто принимается в качестве стандарта. Например, на Рис. 6.9 для некоторых типов сборки представлены допустимые уровни напряжения, предложенные Международным институтом сварки [СТІ 00]. Следует отметить относительно низкие значения в отношении предела текучести базовой плиты ($R_e \geq 240$ МПа). Фактически, эти допустимые значения напряжений одновременно отражают влияние многочисленных параметров и большое несоответствие результатов испытаний для сборок в их сварном состоянии.

6.1.4. Факторы выносливости сварных соединений

Статическое сопротивление стыкового сварного соединения в целом равно сопротивлению основного металла, при этом разрыв происходит вдали от сварного шва (если только сам сварной шов не очень плохой). С другой стороны, усталостная прочность всегда ниже для сварного соединения. Она варьируется в зависимости от многих параметров, в первую очередь относящихся к сборке (основной металл, добавленный металл, околошовная зона (HAZ - heat affected zone)) и силам, которым он подвергается (см. Рис. 6.10).

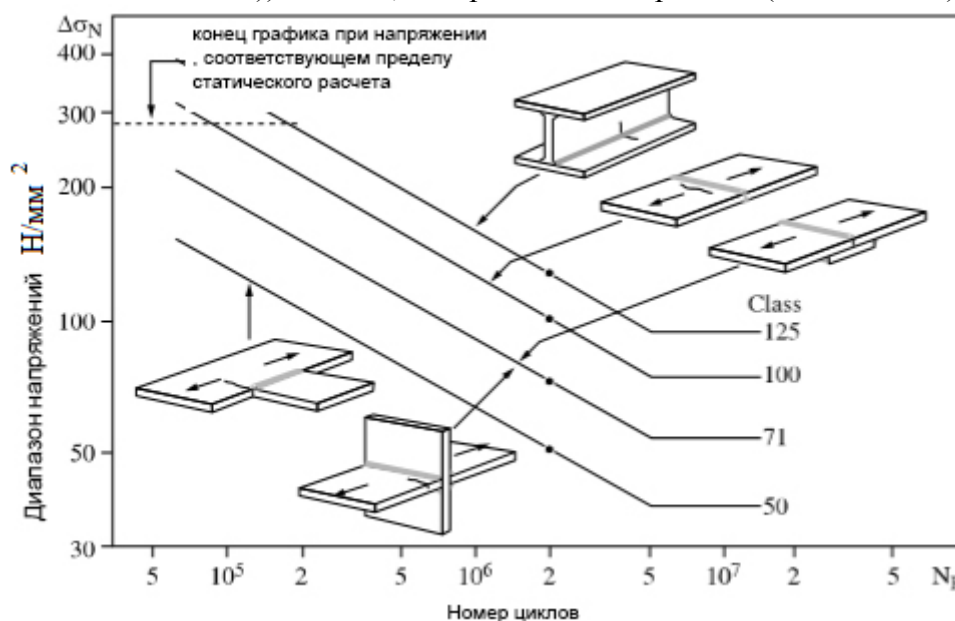


Рисунок 6.9. Типичные S-N проектные кривые IIS и соответствующие детали конструкции, показывающие место усталостного растрескивания и рассматриваемое направление нагрузки

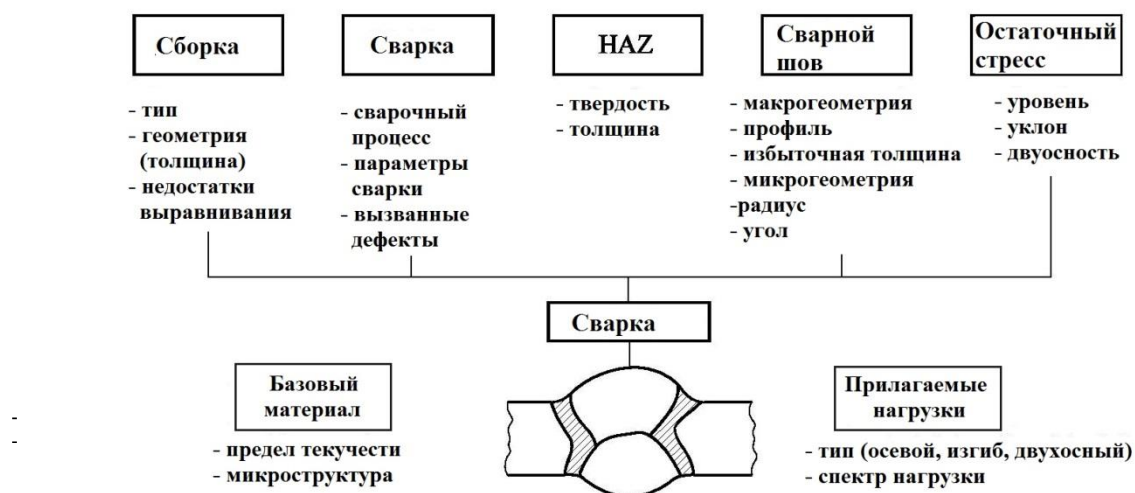


Рисунок 6.10. *Параметры, влияющие на усталостную прочность сварных соединений*

Эти различные параметры, влияющие на усталостные характеристики сварных соединений, можно разделить на три категории:

- геометрические факторы: форма валика, плохое выравнивание листа, изгиб сварного элемента, размеры сборки (толщина листа, геометрия валика);
- металлургические факторы: природа основного металла, процесс сварки (энергия, металлический наполнитель), дефекты сварки, уровни остаточных напряжений;
- факторы, связанные с нагрузкой: структура нагрузки (постоянная или переменная амплитуда, коэффициент напряжения), градиент напряжения, двуосность напряжения, окружающая среда.

Каждый из этих многих факторов обычно не работает сам по себе. Часто необходимо принимать во внимание синергетические эффекты, которые приводят к различным уровням стресса в процессе эксплуатации.

6.1.4.1. Геометрические факторы

а) Форма сварного шва

Мы можем выделить общее влияние сварного шва, сравнивая полученные пределы выносливости для стыковых соединений в их состоянии после сварки с теми же сварными соединениями при промывке в грунте [LIE 73].

На сварных соединениях без усиления немного более низкий предел выносливости (5-10%), чем у основного металла, в то время как предел прочности, наблюдаемый на сварных соединениях, определенно слабее (от 30 до 45%), чем у основного металла.

На самом деле, несколько авторов показали, что необходимо учитывать, с одной стороны, макрогеометрический эффект, обусловленный общим профилем шва, и, с другой стороны, геометрический эффект, вызванный дефектами сварки, расположенными в зоне соединения шва поверхности и основы из металла.

Макрогеометрический эффект

Как следствие особенностей сварных соединений, сварные швы включают изменения сечения, приводящие к областям концентрации напряжений (см. Рис. 6.11).

Если сварное соединение рассматривается как надрезанный компонент, мы можем оценить соответствующий коэффициент концентрации напряжений $K_t = V_{\text{макс}}/V_{\text{ном}}$ ($V_{\text{макс}}$: максимальное напряжение на конце надреза, $V_{\text{ном}}$: среднее напряжение в сечении под нагрузкой компонента).

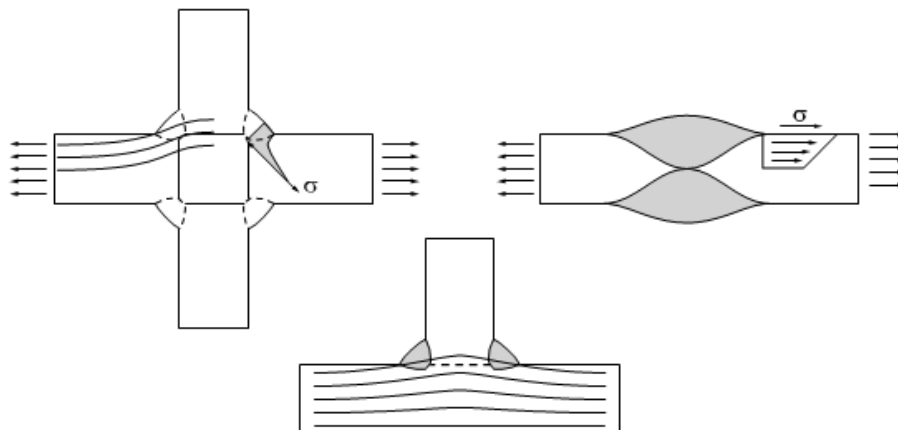


Рисунок 6.11. Зона концентрации напряжений в сварных соединениях

В случае угловых сварных соединений в точке между соединением основного металла и сварного шва были измерены значения коэффициента концентрации напряжений в диапазоне от 1,5 до 4,5. Этот коэффициент составляет около 3 для стыковых сварных швов. Эти измерения не учитывают дефекты, которые могут существовать в рассматриваемой точке и которые могут локально увеличить эту концентрацию напряжений.

Лучшее качество сварного шва приводит к значительному повышению усталостной прочности.

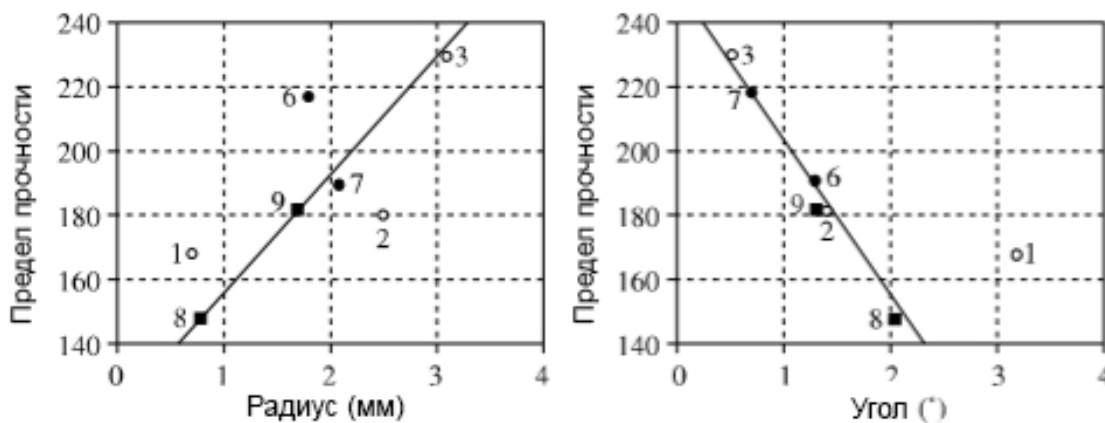


Рисунок 6.12. Корреляции между пределом выносливости Т-образных сборных соединений, подвергаемых изгибу ($R = 1$), радиусом сварного шва или углом боковой поверхности [HUT 94]

Например, в случае Т-образных сборных соединений, подвергнутых изгибающим нагрузкам, на рисунке 6.12 показаны корреляции между обычным пределом выносливости, циклами $\Delta\sigma_{2 \times 10^6}$ и радиусом $\bar{\rho}$ (при радиусе подошвы сварного шва) или углом боковой поверхности $\bar{\theta}$. $\bar{\rho}$ и $\bar{\theta}$ представляют средние измерения, записанные в каждой серии сборных соединений, произведенных всеми сварочными процессами в плоском положении [HUT 94].

Микрогеометрический эффект

В дополнение к концентрациям напряжений, вызванным изменениями сечения, поверхностные дефекты, такие как трещины, поднутрения, неровности и краевые дефекты и т.д., также могут вызывать неполадки в работе.

Например, на Рис. 6.13 показана роль поднутрения на усталостную прочность.

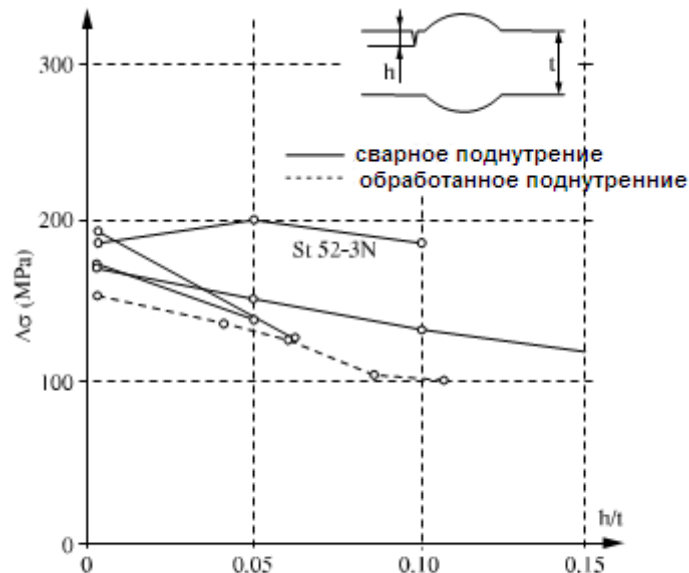


Рисунок 6.13. Влияние глубины поднутрения на предел выносливости

б) Толщина плиты

В геометрически схожих соединениях усталостная прочность может уменьшаться с увеличением толщины пластины [79 GUR]. На Рис. 6.14 представлена схема усталостной долговечности в зависимости от толщины Т-образных сборных соединений, подвергнутых изгибающим силам.

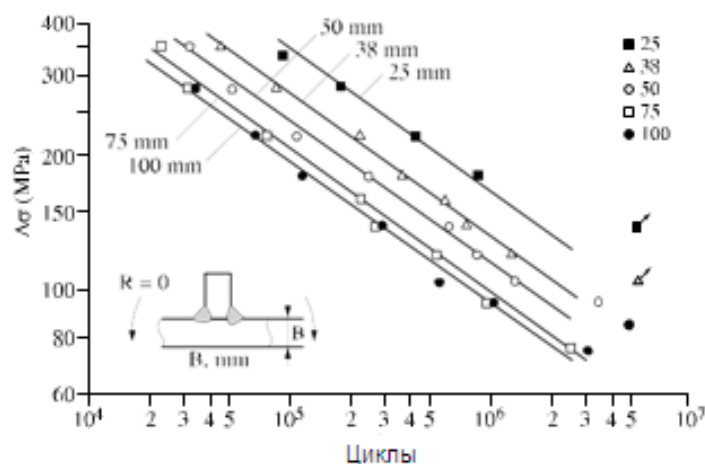


Рисунок 6.14. Влияние толщины пластины на усталостную прочность Т-образных сборных соединений; из [79 GUR]

Однако с помощью экспериментов для данной конфигурации трудно отделить влияние угла бокового наклона Т, длины сварного шва s и толщины пластины t; когда s/t уменьшается, $\Delta\sigma_N$ увеличивается, как показано на Рис. 6.15 [79 GUR].

Вместо s , несомненно, было бы целесообразно принять во внимание длину закладной плиты, предоставленную сборкой [MAD 98] ($2s + \text{толщина элемента жесткости}$).

с) Смещение

На Рис. 6.16 представлены различные осевые или угловые смещения, которые можно обнаружить в сварных соединениях. Эти дефекты приводят к вторичным изгибающим моментам, которые добавляются к номинальному напряжению.

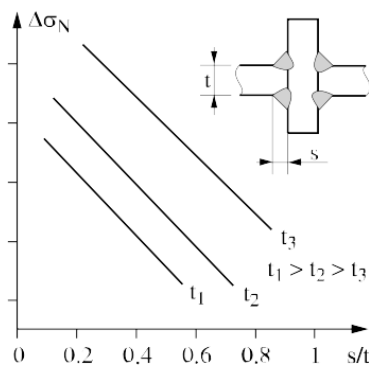


Рисунок 6.15. Схематичная роль s/t (s : длина сварного шва; t : толщина пластины) на усталостную прочность; из [79 GUR]

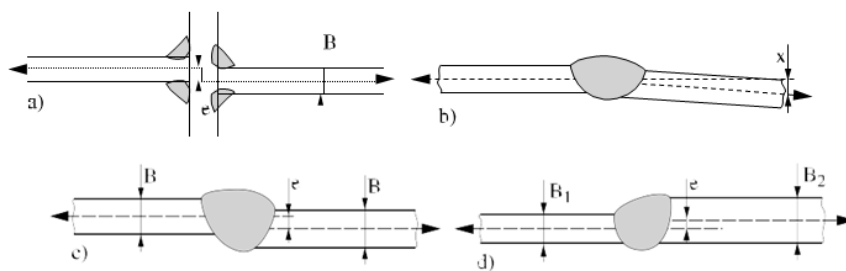


Рисунок 6.16. Смещения: а) осевые, в крестообразной сборке; б) угловой или в) осевой, из-за изменения толщины стыкового сварного соединения; из [MAD 80]

Увеличение номинальных ограничений из-за смещения можно оценить, используя различные аналитические выражения [MAD 80].

6.1.4.2. Металлургические факторы

а) Внутренние дефекты

В сварном шве могут появляться различные внутренние дефекты: шлаковые включения, пористость или неполное проплавление. Неполное проплавление обычно представляет высокий риск возникновения усталостной трещины в корне.

Касаемо включений и пористости шлака, в случае стыковой сварной сборки на Рис. 6.17 и 6.18 показано, что необходимо учитывать снижение усталостной прочности.

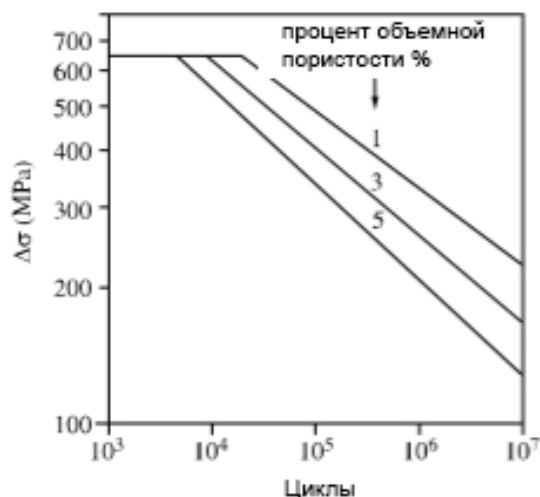


Рисунок 6.17. Влияние процента объемной пористости на прочность стыковых сварных соединений (испытание на растяжение, $R = 0$); из [79 GUR]

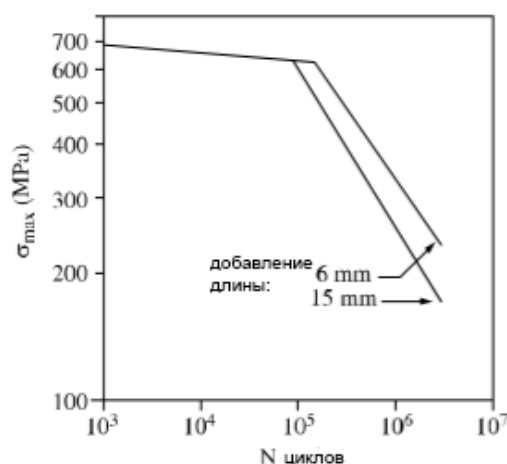


Рисунок 6.18. Влияние длины на предел прочности стыковых сварных соединений (испытания на растяжение); из [79 GUR]

б) Остаточные напряжения

По определению, остаточные напряжения образуют в равновесии систему внутренних напряжений, которые существуют при отсутствии внешней нагрузки. Эти напряжения, как правило, являются результатом постоянных пластических деформаций, которые производятся на месте [LIE 97].

В сварной конструкции эти деформации являются результатом локальных циклов нагрева и охлаждения, связанных со сваркой. Когда сваренный металл охлаждается от точки плавления, он имеет тенденцию к сжатию, но он сдерживается смежным основным металлом. Сжатие должно быть затем обусловлено пластической деформацией присадочного металла.

Эта ситуация дополнительно осложняется технологическими факторами, такими как тип и размер шва, используемый процесс сварки и способ нанесения присадочного металла. Тем не менее, принцип значительных остаточных напряжений, присутствующих в присадочном металле, остается тем же.

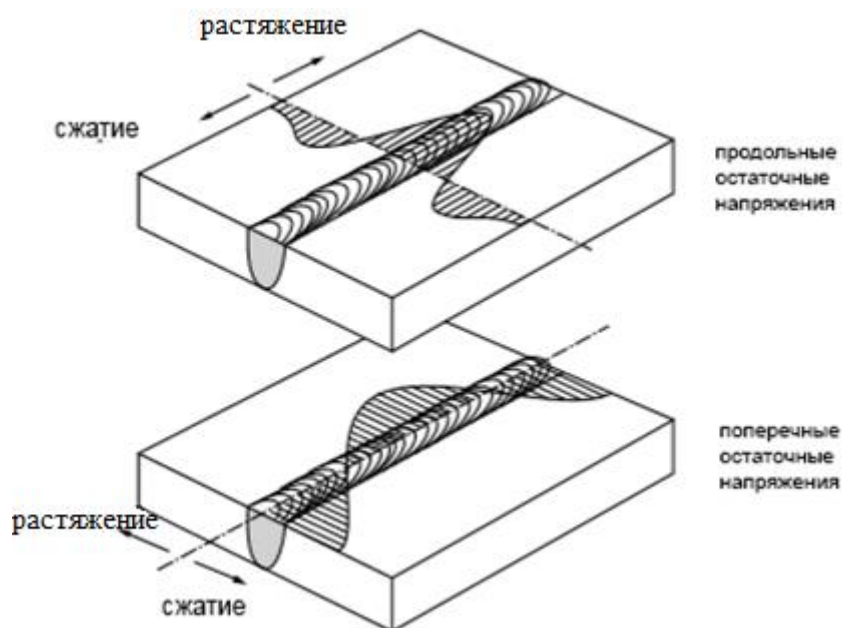


Рисунок 6.19. Остаточные напряжения, вызванные сваркой

В случае многопроходной сварки эти остаточные напряжения могут достигать предела текучести, близкого к точке образования трещины пластины.

На Рис. 6.19 приведен пример этих напряжений на стыковом сварном соединении. Когда сварной шов подвергается нагрузке, это поле остаточных напряжений добавляется к циклическим напряжениям, и, если оно находится под напряжением, выносливость конструкции уменьшается.

с) Сварочные процессы

Как правило, процесс сварки приводит к оптимизированной износостойкости при условии, что он становится причиной:

- небольших дефектов, которых также мало (аргонно-дуговая сварка, сварка под твердым флюсом),
- низких остаточных напряжений,
- подходящего сварного шва с низким углом боковой стенки (автоматическая сварка).

На рис. 6.20 показаны результаты испытаний, достигнутых на образцах из стали E36, сваренных вручную с образованием выпуклого валика, и на образцах из той же стали, полученных автоматической сваркой под твердым флюсом, с получением вогнутого валика. Усталостная прочность образцов, полученных автоматической сваркой, выше, чем у образцов, сваренных вручную, примерно на 40%.

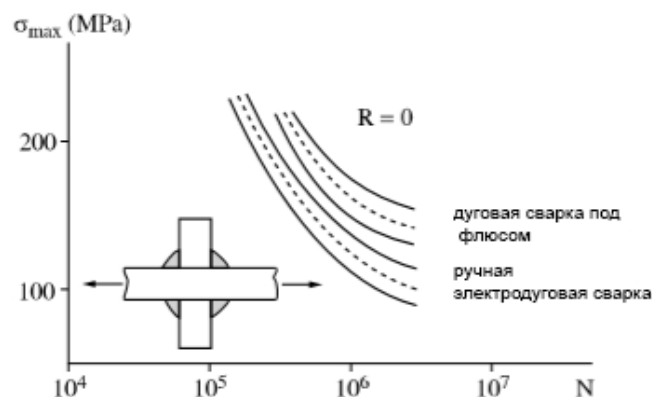


Рисунок 6.20. Влияние процесса сварки на усталостную прочность сварного соединения в стали E36; из [LIE 73]

По сути, именно установка сварочного процесса будет играть определяющую роль в усталостном поведении сборок больше, чем процесс. В частности, решающим фактором в отношении усталостных характеристик для автоматического процесса сварки является выбор оптимальных параметров сварки.

d) Свойства присадочного металла

Очевидно, что выбор присадочного металла зависит от свойств основного металла, подлежащего сварке. В рамках этого выбора необходимо принять во внимание следующие моменты.

Металлический наполнитель (электроды, проволока) должен обеспечивать механические характеристики расплавленного металла, совместимые с характеристиками основного металла, таким образом гарантируя хорошие свойства непрерывности.

В идеале будет выбран наполнитель, содержащий малое количество водорода или вообще его не содержащий (например, основные печные электроды).

Для крестообразных сборок достижение полного проплавления наполнителя в основной металл, идеальная непрерывность в центре и вогнутые валики приводят к усталостной прочности, близкой к прочности стыковых сварных швов. Эти условия могут быть получены путем выбора электродов с большим проплавлением для первых проходов и «профилированных» электродов с хорошим потоком для заключительных проходов.

e) Свойства основного металла

Некоторые соединения в сварном состоянии и из мягкой или высокопрочной стали приводят к аналогичным значениям $\Delta\sigma$ для средних низких напряжений. В этом случае относительная незначительность предела текучести обусловлена главным образом наличием высоких растягивающих остаточных напряжений, вызванных сварочным процессом (см. Рис. 6.21).

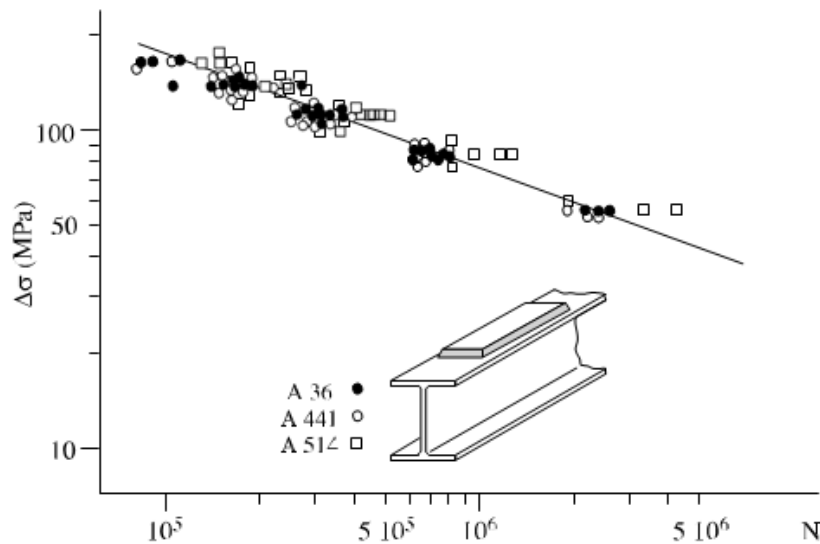


Рисунок 6.21. Усталостная прочность сварных балок, подвергаемых изгибу ($R > 0$) (A36: $YS = 240$ МПа; A44: $YS = 220$ МПа; A 514: $YS = 360$ МПа)

Однако преимущество использования сталей с более высоким пределом текучести очевидно в различных ситуациях, встречающихся в реальности.

Случай высоких нагрузок

Мы наблюдаем улучшение усталостного поведения сборок с увеличением предела текучести либо в диапазонах высоких напряжений (режим средних циклов), как показано на рис. 6.22, либо в случае высоких средних напряжений. Рис. 6.23 схематически показывает этот последний эффект: на диаграмме Гудмана-Смита результаты испытаний размещаются на линиях в зависимости от среднего напряжения σ_m ; когда σ_m низкий или равен нулю, результаты сравнимы. И наоборот, эффект предела текучести пластины проявляется при увеличении σ_m [COL 82]; в двух предыдущих случаях нагружения мы должны учитывать соотношение между σ_{max} и YS (σ_{max} : максимальное напряжение цикла нагрузки, YS : предел текучести основного металла).

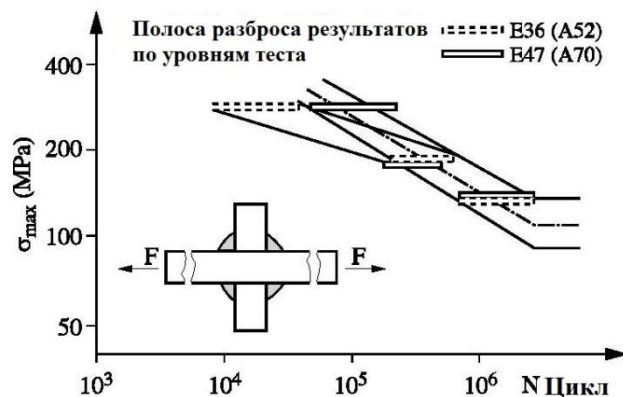


Рисунок 6.22. Сравнение усталостных характеристик сварных соединений E36 и E46 (испытание на растяжение-сжатие); от [LIE 73]

Случай переменной амплитудной нагрузки

Такая нагрузка, возникающая на работающей конструкции, обычно включает небольшое количество циклов с высоким диапазоном напряжений. В этом стандартном случае часто выгодно использовать стали с высоким пределом текучести.

Рис. 6.24 показывает благоприятное воздействие, достигаемое увеличением предела текучести базовой листовой стали на обычном пределе выносливости $\Delta\sigma_{2 \times 10^6}$ для сварного стыкового узла с небольшой избыточной толщиной [RAB 79].



Рисунок 6.23. Увеличение усталостной прочности, подверженной волнообразным нагрузкам, за счет использования стали с более высокими эксплуатационными характеристиками; из [COL 82]

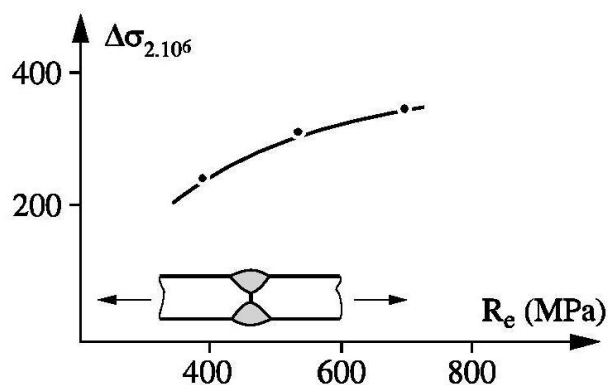


Рисунок 6.24. Влияние предела текучести листовой стали на предел выносливости стыковых сварных соединений ($R = 0$); из [RAB 79]

f) Чистовые обработки

Эффект чистовых обработок (шлифование, выколотка или переплавка валика сварного шва, дробеструйная обработка предварительно напряженной сварки и т.д.) подчеркивает существенные улучшения (вплоть до удвоения предела усталости) усталостных характеристик сварных соединений, увеличивающиеся предел текучести основного металла [LIE 91].

6.1.4.3. Свойства приложенных нагрузок

Шаблон нагрузки

В случае взаимопроникающих валиков сравнение полученных результатов, как при растяжении, так и при изгибе, определяет различные градиенты напряжений вблизи подошвы сварного шва. Влияние этих градиентов приводит к снижению усталостной прочности, например, на толщину заданной пластины, когда нагрузка переходит от изгиба к растяжению.

Например, в случае стального сварного соединения в стык E490 (толщиной 8 мм) усталостная прочность $\Delta\sigma_{2 \times 10^6}$, определяемая изгибом ($R = 0,1$), на 30% выше, чем при повторном растяжении.

Кроме того, сборка, подвергнутый изгибу, гораздо менее чувствительна к неполному проплавлению, чем та же сборка, подвергнутая растяжению. Это поведенческое различие объясняется разным распределением локальных напряжений, либо в границе наружной поверхности сварного шва, либо в основании сварного шва [LIE 92].

Коэффициент напряжения ($R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$)

Значение коэффициента напряжения (или среднее напряжение цикла нагрузки) оказывает определенное влияние на характеристики выносливости.

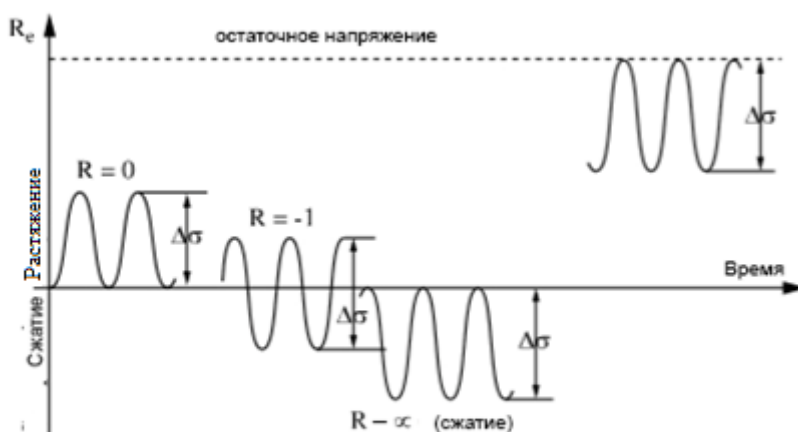


Рисунок 6.25. Эффективный уровень напряжения в результате наложения остаточных и внешних напряжений

Если $\Delta\sigma$ — это усталостная прочность для циклов 2×10^6 , соответствующих данному уровню R , можно записать следующее выражение:

$$\Delta\sigma_{-1} / \Delta\sigma_0 = 1,25 \text{ и } \Delta\sigma_{-0,5} / \Delta\sigma_0 = 0,85$$

Эти отношения были получены с использованием тестов, проведенных на небольших образцах, взятых из реальных структур. Следовательно, уровень остаточного напряжения в образцах был относительно низким (даже нулевым) по сравнению с уровнем, соответствующим реальной структуре.

На практике, когда ожидается наличие высоких остаточных напряжений (близких к Y_S) и невозможность их измерить или выполнить термическую разгрузочную обработку, принято (см. Рис. 6.25), что независимо от уровня R , максимальное напряжение равно пределу

упругости.

На диаграмме Гудмана ($\sigma_{\max}$ или $\sigma_{\min}$ как функция σ_m) эта практика сводится к рассмотрению степени допустимого напряжения, соответствующего максимальному напряжению, равному Y_S (см. Рис. 6.26).

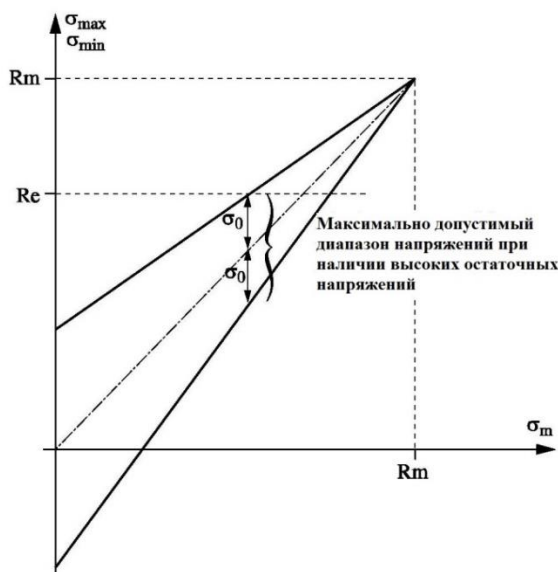


Рисунок 6.26. Определение на диаграмме Гудмана относительно сварного соединения максимально допустимого диапазона напряжений при наличии высоких остаточных напряжений [COL 82]

Комплексное значение нагрузки

Немногие результаты в литературе относятся к примерам комплексной нагрузки. Однако такие случаи предусмотрены в некоторых методах расчета. Как правило, мы рассматриваем максимальное главное напряжение, приложенное перпендикулярно к валику [СТІ 00].

6.2. Определение размеров соединений в механизированной сварке

Усталостное поведение является основной проблемой для разработчиков механизированных сварных конструкций. Несколько методов проектирования предложены в литературе [LIE 00a]. Преимущества и недостатки каждого метода представлены здесь. Принимая во внимание текущий контекст, два метода описаны более подробно: метод, основанный на степени номинального напряжения, и метод, основанный на геометрическом напряжении [LIE 00b].

6.2.1. Положение проблемы

Срок службы сварных конструкций действительно в значительной степени определяется циклической нагрузкой, которой он подвергается. Он должен быть оценен для каждой сборки, исходя из понимания приложенной нагрузки. На самом деле, было предложено несколько методов проектирования (см. Таблицу 6.1), имеющих свои преимущества и недостатки.

Более общий метод, основанный на концепции диапазона номинальных напряжений, ΔB_n - это тот, который в настоящее время рекомендуется в процедурах. Он основан на сети кривых S-N (или $S = \Delta B_n$ и N: число циклов до отказа), соответствующих основным используемым

деталю конструкции.

Метод геометрических структурных напряжений направлен на уменьшение количества кривых S-N, принимая во внимание эффекты жесткости, достигаемые геометрией данной сборки. Он требует расчетов методом конечных элементов или экстензометрических измерений для определения на каждой сборке конструкции соответствующего геометрического структурного напряжения. Этот метод упоминается в последних правилах.

Использование напряжения или деформации на вершине надреза требует точного определения не только геометрии сборки, но также и локальной геометрии прямо в потенциальной начальной точке усталостной трещины, такой как граница наружной поверхности сварного шва. Эта локальная геометрия изменяется вдоль подошвы сварного шва в зависимости от процесса сварки и делает такое определение проблематичным.

Таблица 6.1. Различные методы проектирования

	Методы				
	Степень номинального напряжения	Методы горячих точек		Механика разрушения	Диапазон локальных деформаций
		Геометрическое структурное напряжение	Напряжение на уровне отметки		
Преимущества	Утвержденные кривые S-N с учетом геометрических эффектов: <i>сборка сварка.</i>	Всего одна кривая для всех сборок. Включены изменения в качестве сварного шва.	Четкое определение напряжения. Кривая S-N учитывает влияние геометрии: <i>сборка сварка.</i>	Всего одной кривой трещины достаточно для всех сборок. Используется только на растрескавшихся конструкциях.	Для всех сборок достаточно одной кривой $\Delta\epsilon - N$.
Недостатки	Сложность применения для новых типов сборок. Сложности определения номинального напряжения в случае: <i>сложных структур комбинированных нагрузок.</i>	Геометрическое напряжение во многом зависит от используемого метода экстраполяции: <i>измерения по приборам конечно-элементные вычисления.</i>	Сложность в оценке максимального напряжения по причине локальных изменений геометрии сварки: <i>либо по калибру или методом конечных элементов.</i>	Неточный метод, поскольку он не учитывает влияние локальной геометрии сварного шва: ($N_{\text{ввода}} = 0$).	Трудность в оценке диапазона локальной деформации геометрии сварного шва.

Механика разрушения учитывает конструкцию после ее растрескивания и, следовательно, не учитывает фазу образования трещины, которая в значительной степени зависит от качества сварки. Таким образом, полученная долговечность будет по умолчанию.

В свете их текущей важности в этой главе мы разберемся с первыми двумя методами.

6.2.2. Общий метод (действующий регламент)

В современных нормативах по усталости (например, Еврокод 3, процедура для гражданского строительства) кривые S-N используются для определения размеров сварного

соединения [EURO 92].

Уравнением для этих кривых является $N=C.S^{-m}$, где N - число циклов, S - диапазон номинальных напряжений, а C , m - коэффициенты, зависящие от сварного соединения. Предоставлен подробный каталог кривых, позволяющий определить, к какому классу относится рассматриваемая сборка и какая кривая S - N применима. Класс в целом соответствует характеристическому значению (приемлемому) диапазона номинальных напряжений при 2×10^6 циклах (см. Рис. 6.27).

Кривые S - N , дающие количество приемлемых циклов для нагрузки с постоянной амплитудой, имеют следующее уравнение: $N=C.\Delta\sigma^{-m}$, с $m=3$ и обычным пределом напряжения, определенным для 5×10^6 циклов.

Для нагрузки с переменной амплитудой (в процессе эксплуатации) выбираемые кривые S - N с применением метода кумулятивных повреждений (правила Майнера) выражаются как $N=C.\Delta\sigma^{-m}$ с $m=3$ для $N < 5 \times 10^6$ циклов, $m=5$ для $N > 5 \times 10^6$ циклов и предел усежения для $N > 10^8$ циклов.

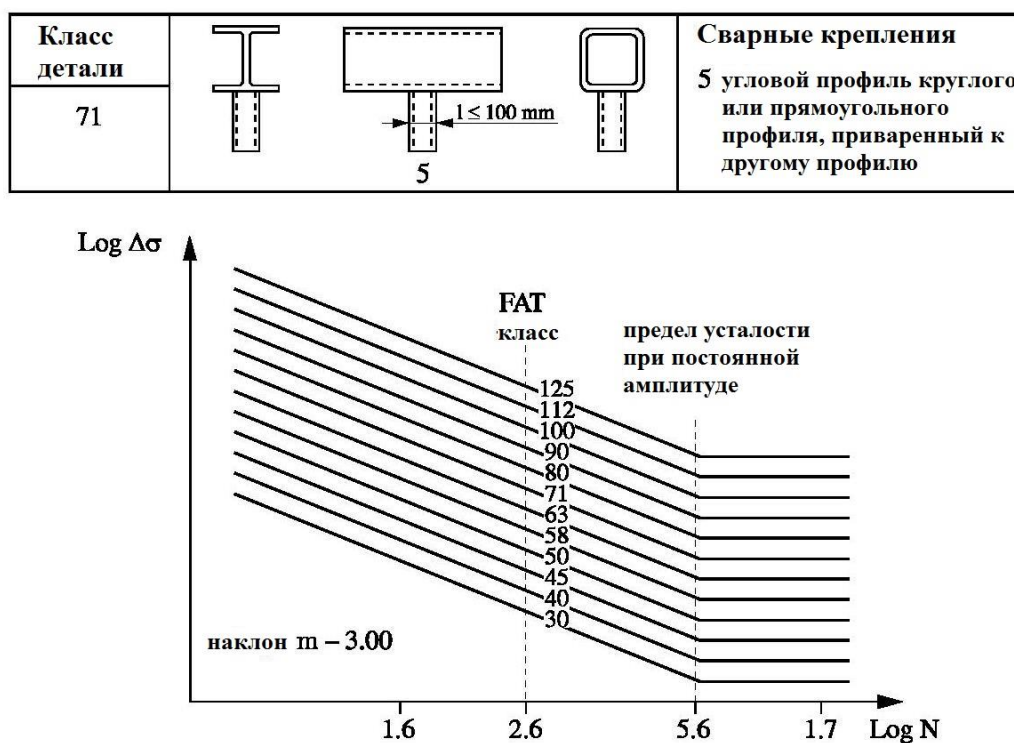


Рисунок 6.27. Выдержка из каталога и расчетная кривая S - N

Качество сварного шва должно соответствовать требованиям, предъявляемым действующими правилами сварки.

6.2.3. Методы проверки

В случае нагрузки с постоянной амплитудой проверка или определение размеров усталостной сварной конструкции сводится к проверке следующего выражения:

$$\text{(для данного числа циклов } n) \text{ зная, что: } \Delta\sigma_{S,k \text{ уФ}} \leq \frac{\Delta\sigma_{R,k}}{\gamma_M}$$

$\{\Delta\sigma_{S,k}$ диапазон напряжений, приложенных к конструкции
 $\{\Delta\sigma_{R,k}$ (нагрузки), коэффициент γ_F
 диапазон проектных напряжений, коэффициент
 безопасности γ_M

или проверить $p \leq N$, где p - число примененных циклов и N - число циклов до отказа для напряжения $\Delta\sigma_S$.

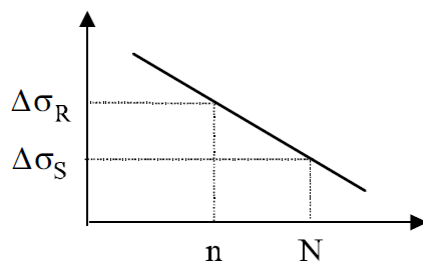


Рисунок 6.28. Проверка сварной конструкции в условиях усталости при постоянной нагрузке по амплитуде

Общая методология проверки на усталость описана на рис. 6.29.

Преимущества и недостатки

Этот метод относительно прост в использовании, если четко определено номинальное напряжение, а тип сборки указан в каталоге. С другой стороны, в общем случае (сложная структура/нагрузка) номинальное напряжение не всегда может быть определено в рамках сопротивления материалов, а система отсчета неизвестна.

Кроме того, номинальное напряжение не учитывает геометрию сборки. Например, в нем не учитывается наличие сварного крепежа или соответствующего сварного шва и, следовательно, жесткость, придаваемая ими. Вот почему имеется кривая S-N для каждого типа сборки и что для одной и той же сборки может быть несколько кривых в зависимости от размера сборки и типа нагрузки.

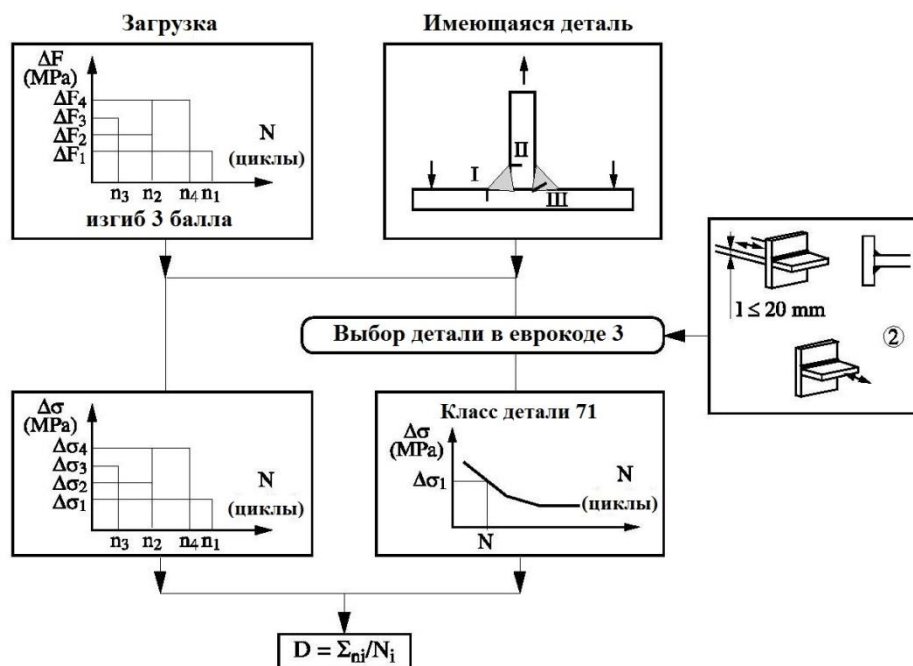


Рисунок 6.29. Логограмма общего метода

6.2.4. Метод геометрических структурных напряжений

6.2.4.1. Принцип метода

Таким образом, целесообразно использовать другое определение напряжения, которое учитывает геометрические эффекты сварного соединения, включающее не только общую геометрию сборки, но также форму сварного шва, профиль соединения этого шва с основанием листового металла и, возможно, металла с локальными надрезами (см. рис. 6.30).

Тем не менее определение локального напряжения связано с трудностями как экспериментально, так и в расчетах; кроме того, такое напряжение является случайным по значению ввиду локальных геометрических изменений, вызванных сварочными операциями. Однако, очевидно, что величина этого локального напряжения в определенной степени определяет усталостную долговечность сборки. Это напряжение особенно влияет на продолжительность возникновения усталостной трещины.

Следовательно, промежуточный этап состоит в принятии в качестве расчетного напряжения геометрического напряжения σ_G , которое зависит только от геометрии сборки и нагрузки.

Этот метод применяется только для запуска на подошве сварного шва, где концепция геометрического качества сварки имеет некоторое значение.

Преимущество построения кривых S-N для геометрических структурных напряжений по сравнению с существующими кривыми, установленными для номинальных напряжений, заключается в том, что мы можем использовать только одну кривую SN независимо от нагрузки и геометрии для одной и той же группы сборок (например, угловые швы). Более того, для реальных конструкций, где номинальное напряжение (удаленное) часто трудно определить, а именно из-за близости других соединений, геометрическое структурное напряжение может быть оценено, начиная с расчетов с использованием конечных элементов для всей рассматриваемой конструкции и сборки.

Кроме того, начиная с этих кривых S-N, можно определить размеры некоторых конфигураций сборки, которых в настоящее время нет в кодах. После этого использование геометрического структурного напряжения позволяет определять кривые S-N в соответствии с качеством сварки и тем самым учитывать локальную геометрию сварного шва.

Однако, сейчас не существует какого-либо общего способа определения геометрического структурного напряжения или соответствующей кривой S-N, который бы охватывал каждый тип группы сборки сварных пластин. С другой стороны, такой метод четко определен и используется с трубчатыми сборками при строительстве морской нефтяной вышки, а также с сборками из тонколистовой стали в автомобильной промышленности [FAY 95].

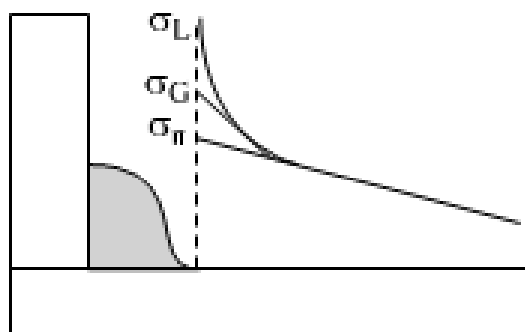


Рисунок 6.30. Определение локальных (σ_L), геометрических (σ_G) и номинальных (σ_n) напряжений (пример: сборка, подверженная изгибающему напряжению)

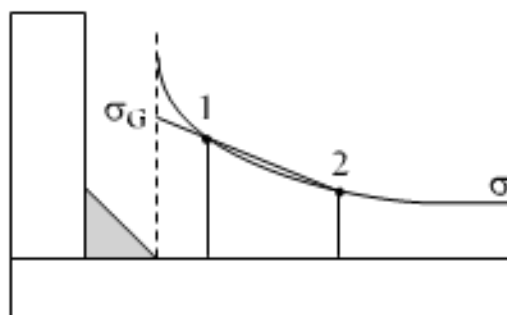


Рисунок 6.31. Градиент напряжения, экстраполяция

Определение геометрического напряжения

В Еврокоде 3 геометрическое напряжение определяется следующим образом: «максимальное основное напряжение в основном металле на подошве сварного шва с учетом влияния концентрации напряжений, обусловленной общей геометрией определенной детали конструкции, но исключая эффекты концентрации локальных напряжений из-за геометрии сварки и разрывов в валике и прилегающем основном металле».

Таким образом, геометрическое структурное напряжение является аспектом конструкции или размеров, учитывающем общую геометрию сборок и нагрузки; таким образом, он не имеет физического смысла, поскольку не учитывает фактическую геометрию сварного шва валика. Он определяется справа от подошвы сварного шва как характеризующий элемент напряжений на пересечении (см. Рис. 6.31).

Его можно получить численно с помощью метода конечных элементов. Преимущество метода конечных элементов заключается в том, что он позволяет определять не только максимальное значение напряжения, но и точку наибольшей нагрузки (горячую точку), а также конфигурацию поля напряжений во всей конструкции.

Возможные области применения

В случае структурного анализа, когда номинальное напряжение легко определить и где рассчитываемый объект имеется в производственных каталогах, можно использовать традиционный метод (кривая S-N в номинальном напряжении).

В других случаях геометрическое структурное напряжение должно определяться, начиная с расчета конечных элементов, и оно должно быть связано с кривыми S-N, определенными с таким же определением геометрического структурного напряжения.

Определение структурного геометрического напряжения

Используемый метод конечных элементов должен удовлетворять 2 критериям:

- оценка поля напряжений вблизи подошвы сварного шва как можно ближе к реальности,
- результат быстрого и недорогого применения.

Для этого тип выбранного элемента должен быть максимально простым. Все элементы, расположенные вдоль линии пересечения поверхности, должны иметь одинаковый размер или, по крайней мере, располагаться в направлении, перпендикулярном пересечению; таким образом, возможно, что на результаты нежелательно влияет размер ячейки. Кроме того, важно, чтобы точки, в которых рассчитаны напряжения (точки Гауссиона), были размещены правильно, т.е. вне зоны, имеющей трёхмерную структуру, и, если возможно, непосредственно связаны с подошвой сварного шва.

Практическое использование метода

Метод геометрического ограничения применяется к точкам, описанным ниже.

Определение расчетной кривой S-N в структурном геометрическом напряжении

Расчетная кривая S-N по структурному геометрическому напряжению может быть определена по результатам из испытаний, проведенных на сборках, для которых степень расчетного или измеренного напряжения выражается в геометрическом напряжении, а число циклов соответствует определенному для этого уровня диапазону напряжений в соответствии с критерием отказа [HUT 92].

На рис. 6.32 представлены этапы, которые следует выполнить для определения кривой S-N в структурном геометрическом напряжении.

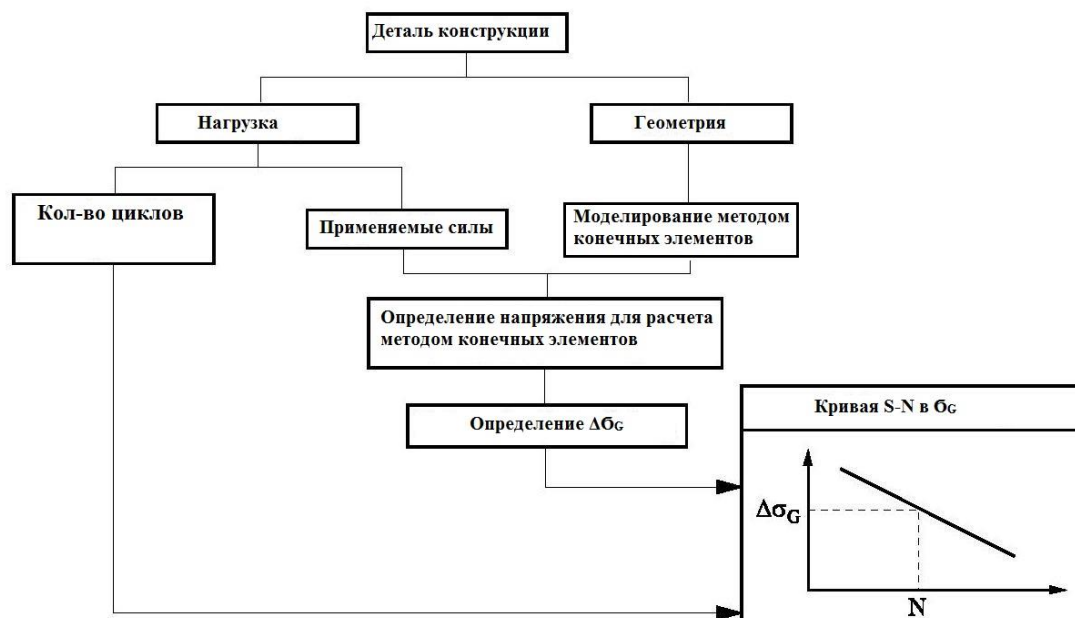


Рисунок 6.32. Процедура для определения кривой S-N в геометрическом напряжении

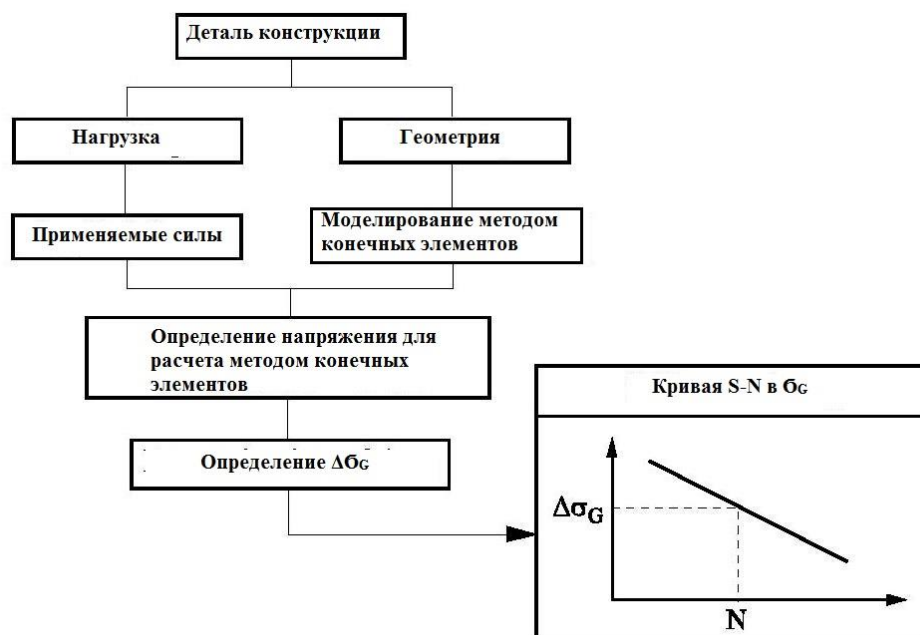


Рисунок 6.33. Процедура, используемая для определения долговечности сборки

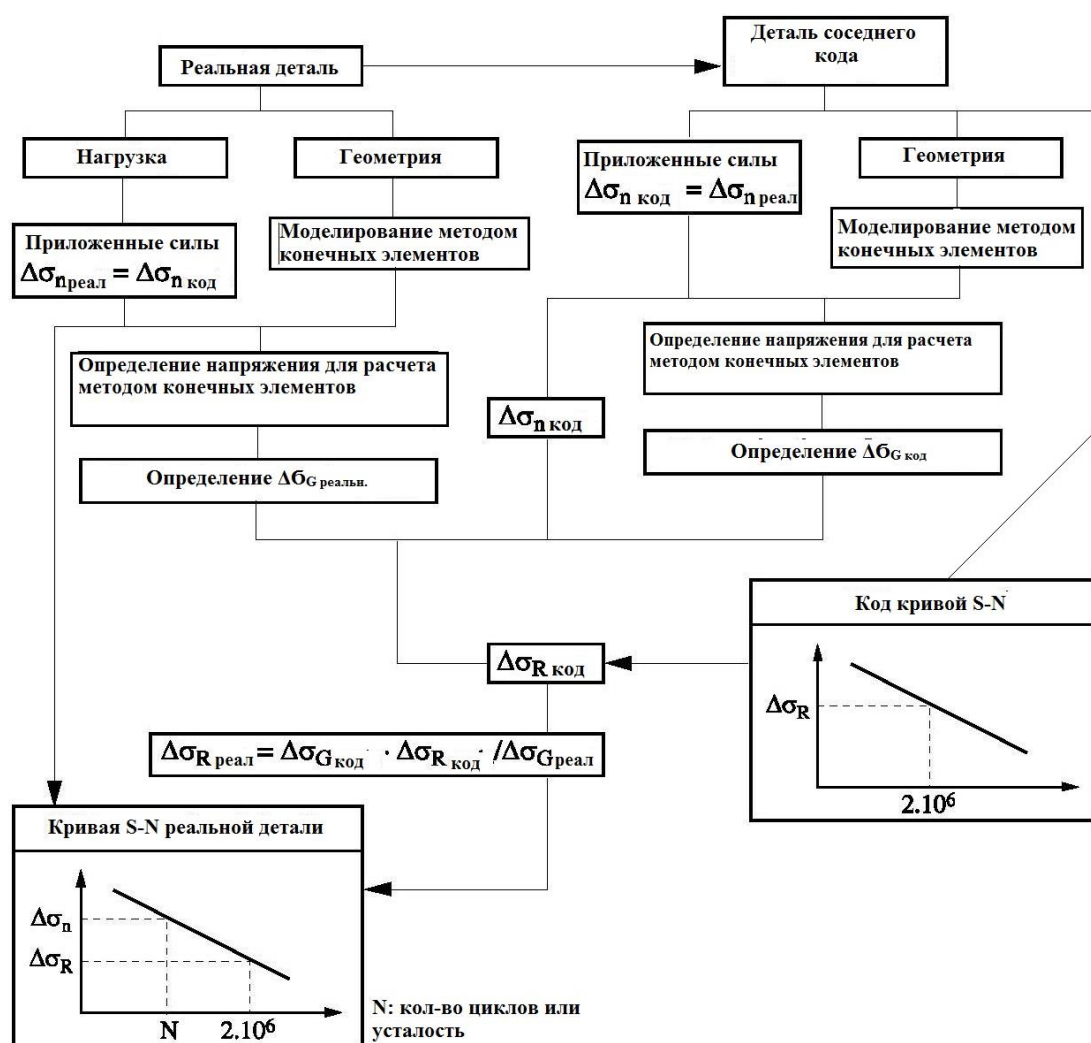


Рисунок 6.34. Процедура выведения новой кривой S-N рассматриваемого предмета

Зная кривую S-N геометрического (структурного) напряжения типа проверяемой сборки, метод геометрических напряжений позволяет определить усталостную долговечность сборки, N (см. Рис. 6.33).

Определение расчетной кривой S-N по номинальному напряжению новой детали конструкции

При отсутствии экспериментальных результатов метод геометрических (структурных) напряжений может применяться для определения расчетной кривой SN по номинальному напряжению строительного объекта, близкого к стандартному каталога или нормативным документам [HUT 92].

В этом случае мы сначала приступим к численному моделированию, как рассматриваемой сборки, так и каталога, прежде чем вывести новую кривую S-N рассматриваемого объекта (см. Рис. 6.34).

6.3 Список использованной литературы

- [COL 82] COLLECTIF, *La résistance à la fatigue des assemblages soudés à l'arc en acier de construction métallique*, Collection ATS-OTUA, 1982.
- [COL 85] COLLECTIF, *Guides pratiques sur les ouvrages en mer, Assemblages tubulaires soudés*, Editions Technip, 1985.
- [CTI 00] CTICM, *Recommandations pour la conception en fatigue des assemblages et des composants soudés*, IIS – Document XIII – 1539-96, CTICM, 2000.
- [EUR 92] EUROCODE, *Design of Steel Structures – Chapter 9: Fatigue EUROCODE 3* (1992).
- [FAY 95] FAYARD J.L., BIGNONNET A., DANG VAN K., “Fatigue design of welded thin sheet structures”, *Fatigue Design 95*, vol. II, September 1995.
- [GUR 79] GURNEY T.R., *Fatigue of Welded Structures*, Cambridge University Press, 1979.
- [HUT 92] HUTHER M., PARMENTIER G., HENRY J., *Hot spot stress in cyclic fatigue for linear welded joints*, IIS – Document XIII – 1466-92, 1992.
- [HUT 94] HUTHER I., PRIMOT L., LIEURADE H.P., JANOSCH J.J., COLCHEN D., DEBIEZ S., “Influence de la qualité de la soudure sur la résistance à la fatigue d'un acier HLE du type E460”, *Tôle en acier HLE, choix et mise en volume*, Publications CETIM, 1994.
- [HUT 99] HUTHER I., GORSKI S., LIEURADE H.P., LABORDE S., RECHO N., “Longitudinal nonloaded welded joints, geometric stress approach”, *Welding in the World*, vol. 43, no. 3, p. 20-26, 1999.
- [LIE 73] LIEURADE H.P., “La résistance à la fatigue des assemblages soudés”, *Journées “Métallurgie du soudage”* (Société Française Métallurgie), Marseille, 8-9 November 1973.
- [LIE 91] LIEURADE H.P., BIGNONNET A., “Les techniques d'amélioration de la tenue en fatigue des composants soudés”, *Traitements de surface et composants mécaniques*, Editions CETIM, p. 79-112, December 1991.

- [LIE 92] LIEURADE H.P., WYSEUR M., TOURRADE J.C., “Effet de traitements de parachèvement sur le comportement en traction ondulée ou en flexion ondulée d’assemblages bout à bout en acier E 490”, *La fatigue des composants et des structures soudés*, Publication CETIM, 1992.
- [LIE 97] LIEURADE H.P., “Rôle des contraintes résiduelles dans le comportement en fatigue des composants soudés”, *Revue Française de Mécanique*, no. 1997-3, p. 191-205, 1997.
- [LIE 00a] LIEURADE H.P., HUTHER I., “Introduction aux méthodes de dimensionnement à la fatigue des composants soudés”, *Mécanique et Industrie*, vol. 1, no. 5, p. 465-477, 2000.
- [LIE 00b] LIEURADE H.P., HUTHER I., “Dimensionnement des assemblages soudés en mécanosoudage, Calcul à la fatigue”, *Soudage et Techniques convexes*, p. 3-8, May-June 2000.
- [MAD 80] MADDIX S.J., Effect of misalignment on fatigue strength of transverse butt welded joints, IIS – Document XIII – 972-80, 1980.
- [MAD 98] MADDIX A., Private comm., 1998.
- [RAB 79] RABBE P., BLONDEAU R., CADIOU L., “Emploi des tôles à haute limite d’élasticité dans les constructions soudées sollicitées en fatigue”, *Actes du Congrès sur les aciers à haute limite d’élasticité*, Versailles, January 1979.

Вязкость разрушения сварных соединений

7.1. Пластичное и хрупкое разрушение

Как правило, производители измеряют структуры с целью избежания риска отказа в обслуживании, избегая, в частности, любого превышения, даже локального, предела текучести материала. Несмотря на это, сбои в работе происходят по разным причинам:

- исключительные условия нагрузки;
- прогрессирующее растрескивание, связанное с усталостью, коррозией под напряжением, водородной хрупкостью;
- изменение поведения, связанное с переходом пластично-хрупкого типа, который возникает в результате падения температуры.

Хрупкое разрушение, вызванное потерей пластичности, впервые было изучено еще во второй половине XIX века.

С развитием сварочных работ и их применением для строительства крупногабаритных конструкций произошло определенное количество крупных, часто катастрофических, отказов в работе. Среди наиболее известных примеров можно назвать отказы в работе мостов (в Берлинском зоопарке в 1936 году, в Рудесдорфе и Хасселте в 1938 году) и отказы в работе резервуаров. Из почти 5000 кораблей, построенных механизированной сваркой во время Второй мировой войны, четверть подверглись серьезным сбоям, а более 200 пострадали от катастрофических отказов в работе.

Нефтяной танкер *Schenectady* на якоре, без какой-либо особой перегрузки, однажды зимой 1942 года, является классическим примером (см. Рис. 7.1).

Сразу после войны была проведена крупная работа с целью изучить это явление и снизить риски. Команды военно-морской исследовательской лаборатории в Вашингтоне были задействованы в центре большой работы, особенно с В.С. Пеллини и Г.Р. Ирвин, чья работа до сих пор являются примером. Они сконцентрировались на изучении температуры вязко-хрупкого перехода и разработке концепций механики разрушения с учетом дефектов сварного шва.

Параллельно с исследованиями инженеров-механиков металлурги посвятили много сил следующему:

- разработка типов стали, которую легче сваривать (путем снижения углеродного эквивалента), предлагая более высокие уровни предела текучести при все более низкой температуре перехода из пластичного в хрупкое состояние;
- разработка сварочных процессов с целью снижения хрупкости и наличия дефектов.

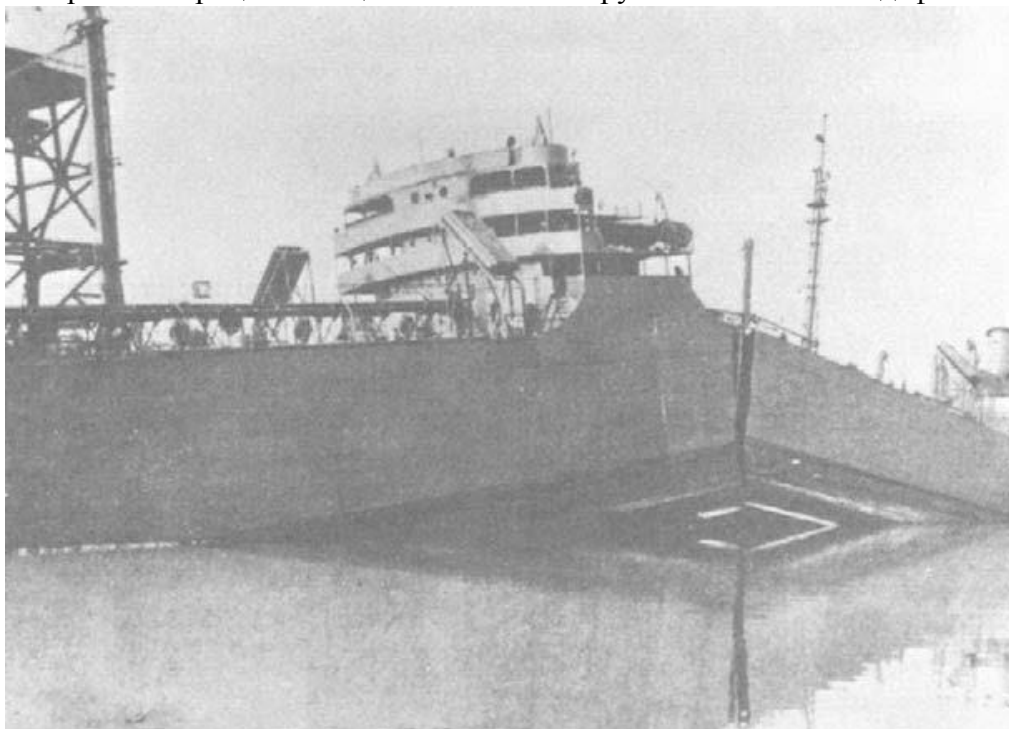


Рисунок 7.1. *Отказ в работе на якоре танкера «Schenectady»*

Несмотря на все эти усилия, продолжали возникать другие неисправности (мосты, трубопроводы, сосуды под давлением, суда и т.д.). Как показала Тойода [TOY 00], значительная часть ущерба, отмеченного во время землетрясений в Кобе и Северном мосту, была связана со следующими сопутствующими обстоятельствами:

- повышенные уровни нагрузки, к которым могут быть добавлены остаточные напряжения;
- наличие концентраций напряжений из-за геометрии сборок, возможно, с наличием дефектов в виде трещин;
- материалы с низкой устойчивостью к температуре эксплуатации.

В Международном институте сварки (о англ. IIW - International Institute of Welding), коллегия которого собирается ежегодно, существует комиссия X, работа которой посвящена изучению разрушения сварных конструкций. Основные затронутые темы касаются эксплуатационной пригодности с учетом неоднородностей между основным и расплавленным металлом (характеризующихся несовпадением) и ролью остаточных напряжений. Была создана рабочая группа с целью, помимо прочего, анализа причин разрушения механизированных сварных конструкций.

Работа IIW передается во Францию в рамках консультативного комитета по исследованию сварочного разрыва, зеркальное изображение комиссии X. Этот консультативный орган (CCRS) получает поддержку l'Institut de Soudure (Французский институт сварки) и La Société des Ingénieurs Soudeurs (от франц. SIS - Общество сварщиков).

7.2. Оценка риска разрушения металлических материалов

Оценка риска разрушения конструкционных сталей первоначально осуществлялась с помощью температуры вязко-хрупкого перехода. Позже, введение концепции ударной вязкости позволило судить о влиянии дефекта плоскости в зависимости от условий нагрузки. Во всех случаях были разработаны испытания для характеристики основных материалов.

7.2.1. Определение температуры перехода от пластичного к хрупкому состоянию

Первоначально исследования были связаны с пониманием вязко-хрупкого перехода основных материалов с использованием испытания Шарпи и образцов для испытания на ударную вязкость и испытаний Пеллини, Бателъ, Шнадта [SAN 74].

Испытание на изгиб при ударе, которое заменило испытание на удар или испытание по Шарпи, по-прежнему широко используется для оценки температуры перехода от пластичного к хрупкому состоянию. Как правило, образцы для испытаний представляют собой параллелепипедные бруски ($55 \times 10 \times 10$ мм³) с V-образной выемкой 45° глубиной 2 мм. Разлом получается с помощью маятника Шарпи (см. Рис. 7.2).

Некоторые образцы испытываются при различных температурах для построения кривых:

- энергия ударного изгиба (выраженная в Дж) в зависимости от температуры (см. Рис. 7.3),
- уровень кристалличности в зависимости от температуры,
- боковое расширение (связанное с пластификацией) в зависимости от температуры.

Из этих кривых мы можем, в частности, определить энергию изгиба, соответствующую пластической стадии, а также температуры, соответствующие:

- пластично-хрупкому переходу (T_i),
- 50% кристалличности,
- энергии разрушения при 28 Дж.

На самом деле температура перехода не является внутренним свойством материала. Установлено, что она увеличивается с:

- увеличением толщины детали,
- увеличением скорости загрузки,
- увеличением резкости/ угла на дне надреза.

К. Кална [KAL 00] дает формулу, позволяющую оценить влияние температуры перехода TT_h для структурного элемента толщиной h :

$$TT_h = T_{50\%} + 30 \ln \left(\frac{h}{10} \right)$$

где $T_{50\%}$ соответствует температуре перехода для образца для испытания на ударный изгиб толщиной 10 мм.

Между скоростью деформации $\dot{\epsilon}$ и температурой перехода имеется следующее выражение:

$$\dot{\epsilon} = A_{exp} \cdot \left(-\frac{Q_A}{RT} \right)$$

где A - это константа, Q_A - энергия активации явления, R - это константа идеальных газов,

а Т - абсолютная температура перехода.

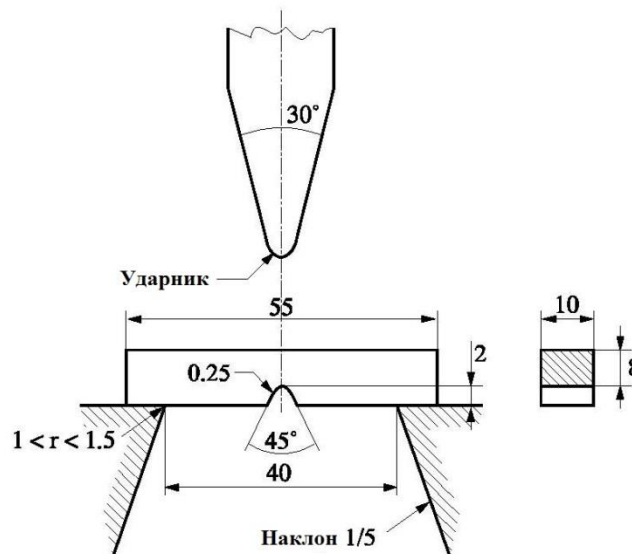


Рисунок 7.2. Образец для испытания на ударный изгиб; из [NF 90]

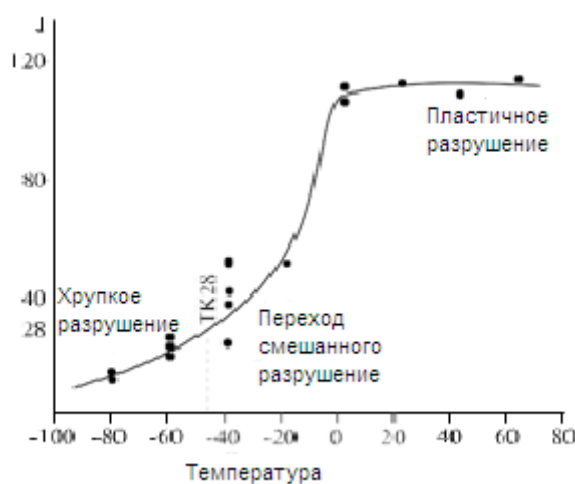


Рисунок 7.3. Кривая вязко-хрупкого перехода; из [BAL 97]

Сравнительно недорогое испытание Шарпи продолжает широко применяться и по прошествии 100 лет является объектом многих исследований, о чем свидетельствует конгресс, организованный в 2001 году по этой теме.

В начале 1970-х годов была проведена работа, касающаяся устройства для испытания на ударный изгиб с целью выделения различных фаз распространения разрушения путем анализа графиков силы-времени [SAN 69]. С 1995 года рабочая группа «Инструментальный Шарпи» SF2M провела исследование, целью которого было численное моделирование испытания на удар с помощью расчета методом конечных элементов в хрупком поле. Из этих результатов, используя локальный подход механического разрушения, можно оценить ударную вязкость материала. Работа Россола над сталью сосуда под давлением 16MnNiMo5 представляет интересный вклад в этой области [ROS 98].

Среди различных испытаний на разрушение, разработанных Пеллини [PEL 71], мы рассмотрим испытание падающим грузом, состоящее из сбрасывания массы с заданной

высоты на образец, имеющий зазубренное покрытие из хрупкого сварного шва (см. Рис.7.4). Образец подвергается изгибу и его деформация ограничена. Под воздействием удара валик разрушается, что создает мелкую трещину, пересекающую зону термического влияния (от англ. HAZ - heat affected zone). В зависимости от температуры, при которой проводится испытание, в основном металле трещина распространяется в большей или меньшей степени. С помощью каркаса мы можем определить самую высокую температуру, приводящую к разрушению образца для испытаний (см. Рис.7.5). Эта температура называется NDT (от англ. nil ductility transition - переход в состояние нулевой пластичности). С первоначальной целью формирования стали для корпусов судов и подводных лодок, он был затем применен к стали для судов в ядерных установках. Стандарт, определяющий испытание Пеллини, претерпел изменения в отношении метода нанесения валиков [AST 95].



Рисунок 7.4. Размеры образца Пеллини; от [LEI 71]

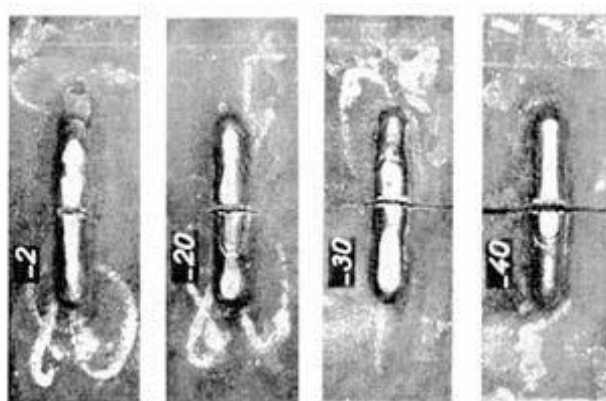


Рисунок 7.5. NDT [LEI 71] находится между -20 и -30°C; от [LEI 71]

Что касается испытания Шарпи, были проведены исследования с целью фиксирования изменения нагрузки во время удара [SAN 69], что позволяет более точно анализировать различные фазы разрушения [FRO 82, WIE 99].

К началу 1970-х годов IRSID провел систематическое сравнение результатов, полученных в ходе различных испытаний, с учетом широкого спектра типов стали. Установлены корреляции, показывающие, что классификация стали мало изменяется при выборе испытаний [SAN 70, SAN 74]. Таким образом, между температурой NDT, полученной с помощью испытания Пеллини, и температурой, дающей энергию 35 Дж/см² (ТК 35), исходя из 67

данных, получено следующее выражение:

$$(NDT) = -16 + 0,51(TK35)$$

хотя и с довольно низким коэффициентом корреляции (0,80).

7.2.2. Определение критерия разрушения в упругом линейном поле

Развитие концепции механики разрушения в начале 60-х годов в США позволило учесть размеры дефектов при оценке рисков разрушения. Она была достигнута путем введения понятия коэффициента интенсивности напряжений K_I по формуле:

$$K_I = \alpha \sigma \sqrt{\pi a}$$

где D - коэффициент, зависящий от геометрии детали и трещины, σ - номинальное напряжение и a - размер трещины.

Разрыв происходит, когда K_I достигает критического значения K_{IC} .

Летняя школа La-Colle-sur-Loup, открывшаяся в сентябре 1970 года, была посвящена процессу разрушения и отметила зарождающийся интерес различных секторов французской промышленности к этой новой отрасли механики. Тексты конференций, собранные Д. Франсуа [FRA 72], до сих пор используются в качестве справочного материала в этой области.

Определение критического коэффициента интенсивности напряжений K_{IC} [AST 97] было применено в различных отраслях промышленности с использованием стали с высоким пределом упругости. Во Франции стандарт NFA 03-180 [NF 81] для товаров из железа и стали, определяет образцы для испытаний, условия, при которых они отбираются, проведения испытаний и анализа результатов. Чтобы получить действительное значение K_{IC} , должны быть выполнены различные условия. В частности, когда речь идет о размерах пластичной зоны, она должна быть небольшой по сравнению с размерами испытываемого образца. В результате, в случае пластичных материалов, требуется использование крупногабаритных образцов. Действительно, необходимо, чтобы толщина B была следующей:

$$B \geq 2,5 \left(\frac{K_{IC}}{R_{p0.2}} \right)^2$$

$R_{p0.2}$ - предел текучести материала.

Собственно говоря, этот стандарт применяется только к однородной стали. Тем не менее, в отсутствие определенных документов, он также применяется к другим материалам, а также к сварным соединениям.

Среди наиболее часто используемых стандартных образцов для испытаний следует упомянуть образец для испытаний на изгиб и образец для компактного растяжения (от англ. CT - compact tensile), которые показаны на Рис. 7.6. Механическая выемка удлиняется усталостной трещиной для получения как можно меньшего радиуса на конце. Важно, чтобы трещина имела одинаковую длину на двух гранях образца и имела одинаковую внутреннюю конфигурацию.

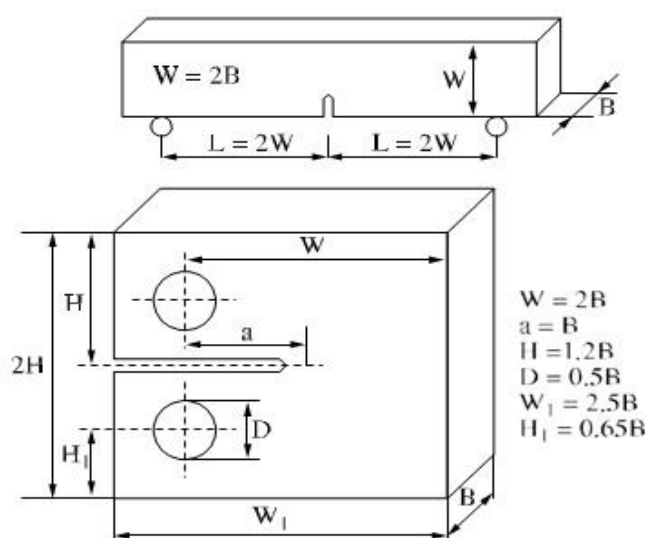


Рисунок 7.6. Испытание при трёхточечном изгибе и образцы CT; из [SAN 78]

Критический коэффициент интенсивности напряжений K_{IC} применяется в случае, когда пластическая зона на краю трещины мала по сравнению с размерами конструкции, и, таким образом, применяется в основном к материалам с низкой пластичностью или пластичным материалам значительной толщины.

Как и энергия ударного изгиба, жесткость материалов с центрированной кубической структурой изменяется в зависимости от температуры. Она уменьшается с понижением температуры; следовательно, для данного дефекта неисправность может возникнуть при более низком уровне нагрузки.

Немало работы показывает, что рабочая скорость приложения влияет на прочность. Кривая $K_{IC} = f(\text{температура})$ смещается вправо при увеличении скорости нагрузки, как показано на Рис.7.7 (взято из исследования Санца и Марандета), касающемся стали сосуда высокого давления 16 MnNiMo5 [SAN 78].

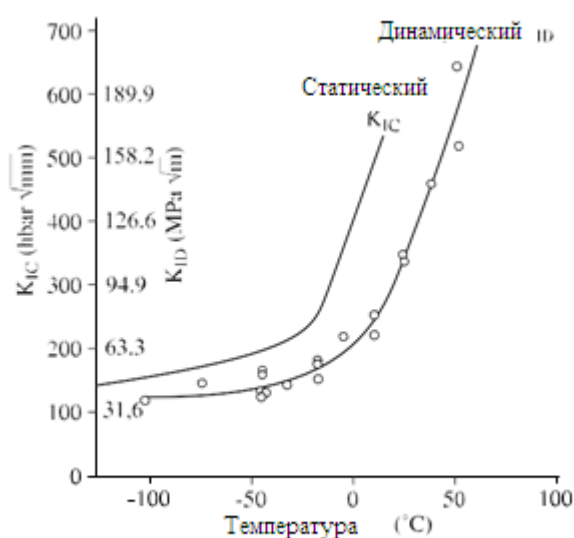


Рисунок 7.7. Влияние скорости и температуры нагрузки на ударную вязкость; из [SAN 78]

Нахождение эквивалентности между испытаниями на жесткость и ударную вязкость

Уже с первых испытаний на определение жесткости с использованием концепции механики разрушения были обнаружены корреляции, в частности, между значениями K_{IC} и значениями, полученными с помощью гораздо менее дорогостоящих испытаний на удар. Многие выражения представлены и проанализированы в [COL 97, MEE 88, SAN 78].

Например, в области пластичности мы можем процитировать выражения Рольфе и Новака, проверенные IRSID на широком диапазоне сталей, до предела текучести 1720 МПа. Он принимает следующую форму:

$$\left(\frac{K_{IC}}{R_e} \right)^2 = 6.4 \left[100 \left(\frac{KV}{R_e} \right) - 1 \right]$$

где $\left(\frac{K_{IC}}{R_e} \right)^2$ выражено в мм, KV в Дж и R_e в Н/мм²

Также существуют корреляции между K_{IC} и ударной вязкостью на нижнем плато переходной зоны.

IRSID установил два дополнительных типа корреляции:

- между температурой перехода, определенной испытаниями K_{IC} и ударной вязкостью,
- между значениями K_{IC} и KV.

Рассматривая следующие температуры как температуры перехода:

- TK_{IC} = температура, для которой $K_{IC} = 100 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$,
- $TK28$ = температура, для которой $KV = 28 \text{ Дж}$ ($KCV=35 \text{ Дж/см}^2$),

следующая корреляция может быть установлена для сталей, кристалличность которых при температуре $TK28$ всегда превышает 80-85%:

$$TK_{IC} = 1,40TK28 \text{ в } ^\circ\text{C}$$

Соотношение между K_{IC} и KV, полученное для значений KV ниже 80 Дж, для стали выражается следующим образом:

$$K_{IC} = 19 \left(\frac{1}{KV} \right)^{\frac{1}{2}}$$

где K_{IC} выражено в Мпа.м^{1/2} и KV в Дж.

Из кривой ударной вязкости в зависимости от температуры можно построить кривую K_{IC} в зависимости от температуры.

7.2.3. Критерии разрушения в упругопластической области

Для оценки рисков разрушения, связанных с наличием дефектов в пластичных материалах, были введены другие критерии. Среди наиболее часто используемых мы можем привести: J_{IC} , COD, CTOD, определения которых приведены в [FRA 96]. Для металлических материалов ASTM установил стандарты, они были использованы AFNOR для определения условий взятия и определения размеров образцов, условий предварительного растрескивания

при усталости, проведения испытаний и анализа результатов. Используемые образцы более или менее сопоставимы с теми, которые уже используются для определения критического коэффициента интенсивности напряжений K_{IC} .

J-интеграл Райса

J-интеграл, все еще называемый *интегралом Райса*, является контурным интегралом, позволяющим распространить понятия механики упругого линейного разрушения на материалы, представляющие значительную пластическую деформацию в точке трещины. Этот критерий разрушения широко используется в ядерной области для оценки риска вязкого разрушения. Условия испытаний описаны в [AST 96, NF 87].

Образцы содержат боковые выемки, облегчающие предварительное растрескивание, и, возможно, шевронный надрез, чтобы облегчить образование трещин. В случае образцов СТ отверстие надреза измеряется прямо вдоль линии нагружения. Во время загрузки, выполняемой с постоянной скоростью открытия, фиксируется сила, соответствующая открытию. Площадь под кривой $F-d$, вплоть до смещения, соответствующего прерыванию испытания, соответствует энергии (см. Рис. 7.8) и используется для вычисления J . В конце испытания образец для испытаний становится синим, под воздействием горячего окисления, прежде чем сломаться. Изучение топографии трещин позволяет оценить амплитуду стабильного распространения Δa . Точки $J-\Delta a$ переносятся в систему отсчета (см. Рис.7.9). После проверки условий допустимости линия dJ/da определяется линейной регрессией, а значения J_0 и J_{02} соответствуют началу пластичного разрушения.

Метод частичной разгрузки позволяет теоретически определить только один образец, критическое смещение J_{IC} , которое соответствует началу стабильного растрескивания.

Между J_{IC} и K_{IC} существует связь в форме:

$$J_{IC} = \frac{(1 - \nu^2) K_{IC}^2}{E}$$

где ν – коэффициент Пуассона, а E – модуль упругости материала.

J_{IC} выражено в Дж/м² и K_{IC} выражено в Мпа.м^{1/2}.

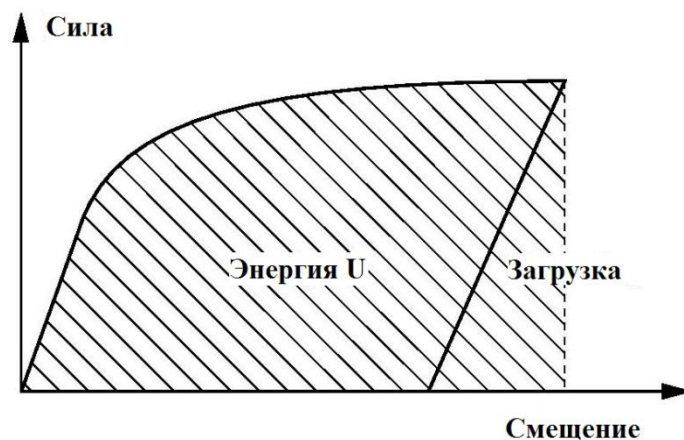


Рисунок 7.8. Кривая нагрузки и определение энергии U ; из [NF 87]

COD

Концепция COD (от англ. crack opening displacement – смещение раскрытия трещины) была разработана в Великобритании, она отвечает за безопасность при эксплуатации морских нефтяных вышек, построенных в Северном море. Используемые образцы сравнимы с используемыми в механике упругого линейного разрушения, и возникает усталостная трещина.

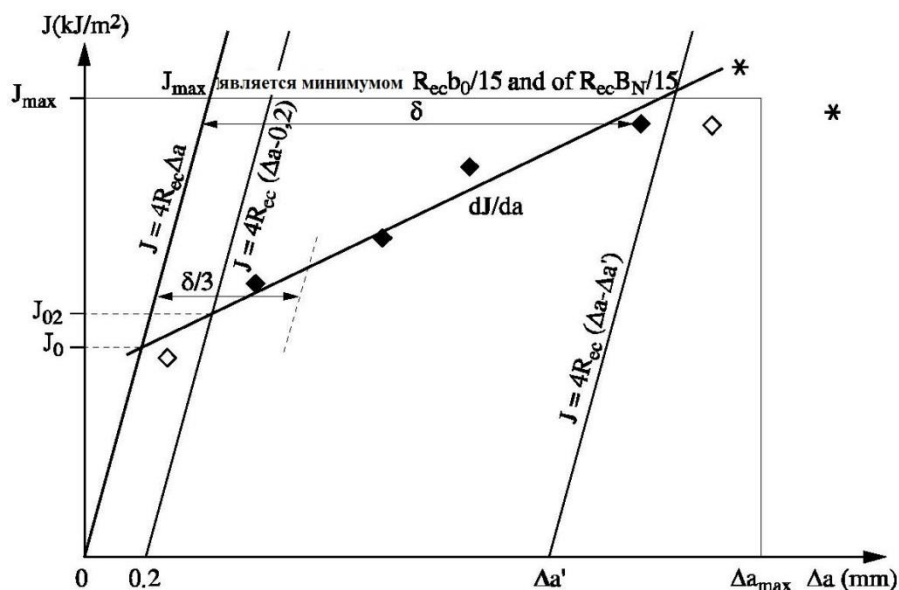


Рисунок 7.9. Определение условных значений $J_{0,2}$ и dJ/da ; из [NF 87]

Вначале испытание состояло в измерении отверстия в нижней части надреза δ в соответствии с приложенной нагрузкой. Принимая во внимание трудность проведения этого измерения, был предложен метод, состоящий из вычисления δ , начиная с измерения отверстия горловины трещины с помощью экстензометра с ножевой опорой. Этот метод основан на предположении, что существует центр вращения, и его будет трудно определить. Это приводит к неопределенности в отношении значения δ [SAN 78].

Предполагая, что у нас есть COD, размер критического дефекта в структуре можно рассчитать, исходя из выражения, предложенного Ф.М. Бурдекиным:

$$\alpha = C \left(\frac{\delta}{e_\gamma} \right)$$

$$\text{где } C = \frac{1}{2\pi \left(\frac{e}{e_\gamma} \right)^2} \text{ если } \frac{e}{e_\gamma} < 0,5$$

e - реальная деформация, которой подвергается структура вблизи дефекта, и e_γ - деформация при пределе текучести.

IRSID показал, что этот метод привел к чрезмерным резервным возможностям.

CTOD

Продолжалось дальнейшее развитие, особенно в англосаксонских странах и Японии, что привело к испытанию CTOD (от англ. crack tip opening displacement - смещение, раскрывающее трещину). Условия эксперимента определены в [AST 93, JWE 97, NF 87].

Кривая «сила-открытие» строится до тех пор, пока пробный образец не разрушится или, в случае неудачи, не остановится, когда выйдет за пределы кривой нагрузки. Кривая применяется в соответствии со стандартом BS 7448, часть 1 [AST 93, NF 87].

В зависимости от структуры материала могут быть получены различные типы кривых (см. Рис.7.10). Пластическая составляющая V_P полного отверстия V получается путем проведения прямой линии, параллельной линейной части кривой нагрузки. Этот компонент V_P обозначается как V_C , V_P , V_U или V_m в соответствии с рассматриваемой характеристической точкой.

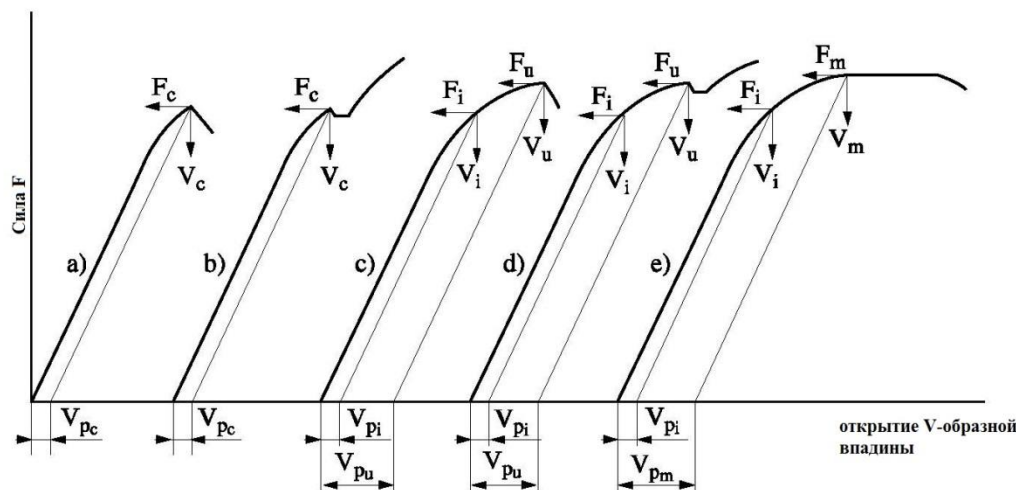


Рисунок 7.10. Различные типы фиксирования изменений силы, применяемой в соответствии с раскрытием трещины; из [NF 87]

Для кривых а и б прикладываемая сила устойчиво увеличивается с открытием горловины надреза, пока не начнется внезапный нестабильный процесс развития трещины, которому не предшествует ее устойчивое распространение. Значение G_C дается, начиная с точек координат (F_C, V_C) .

В трех других случаях, когда нестабильному распространению или максимальной силе пластической нестабильности предшествует определенное устойчивое распространение, критические значения G_U или G_m CTOD получают, соответственно, начиная с точек (F_U, V_U) или (F_m, V_m) .

Наличие стабильного распространения трещины, предшествующего возможному жестокому разрыву, может быть выявлено на основании опыта путем изучения геометрии излома.

Во всех случаях критические значения рассчитываются по следующей формуле:

$$\delta = \frac{K^2(1 - \nu^2)}{2E R_{p0.2}} + \frac{0.4(W - a_0)}{(0.4W + 0.6a_0 + z)} V_P$$

с:

$$K = \frac{F}{BW^{\frac{1}{2}}} \gamma$$

γ является функцией a/W , a_0 – полезная общая длина исходного дефекта и z - расстояние между лезвиями ножа и осью нагрузки в случае образца СТ. E , $R_{p0.2}$ и ν - соответственно являются модулем упругости, пределом текучести и коэффициентом Пуассона материала.

7.3. Оценка риска разрушения сварных соединений

Методы оценки, используемые для характеристики сварных соединений, сравнимы с методами, применяемыми для характеристики основных материалов, за исключением дополнительной сложности, связанной с отбором образца из-за неоднородности сварного шва.

7.3.1. Неоднородность сварного шва

Сборка одного или двух материалов сваркой с наполнителем или без него (например, электронно-лучевая или лазерная сварка) представляет собой сложную металлургическую операцию, которая порождает множество неоднородностей:

- *химическая*, наполнитель часто отличается по составу от материалов, подлежащих сборке. Эффекты разбавления в зонах связывания являются дополнительным фактором;

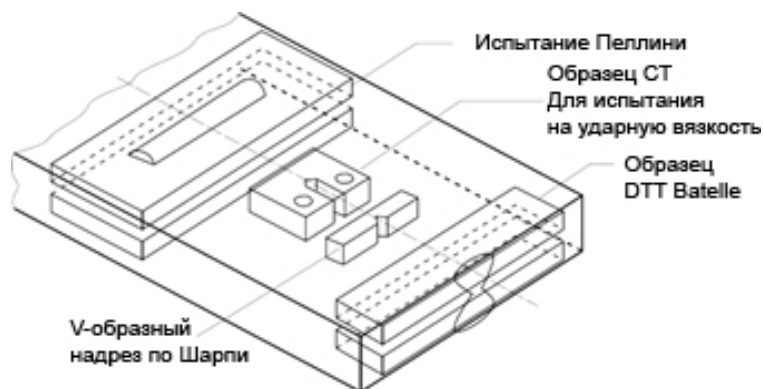


Рисунок 7.11. Взятие проб в сварном соединении; из [ANS 92]

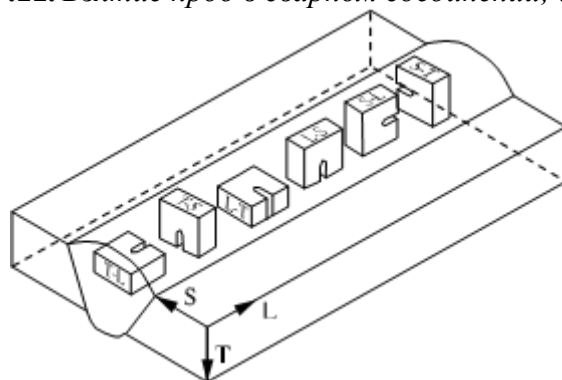


Рисунок 7.12. Различные возможные ориентации надрезов относительно сварного шва; из [ANS 92]

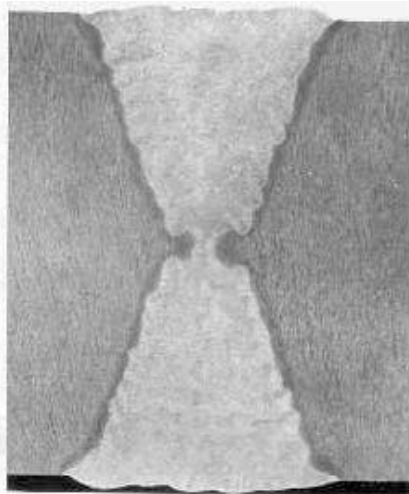


Рисунок 7.13. Х-образный сварной шов

- *металлургическая*, связана с количеством фаз нагрева и охлаждения в зависимости от количества проходов;
- *механическая*, характеристика валика отличается от характеристики основных материалов. Этот тип гетерогенности англосаксы называют несоответствием. Он характеризуется соотношением M между пределом текучести зоны плавления и пределом текучести основного материала:

$$M = \frac{\sigma_{YZ}}{\sigma_{YB}}$$

где σ_{YZ} - предел текучести HAZ и σ_{YB} - предел текучести основного материала.

Если $M > 1$, используемый термин является *превосходным* и, в противоположном случае, *несоответствующим*:

- геометрически; с учетом подготовки соединений и формы валиков (концентрации напряжений);
- с учетом возможных дефектов; плоские или объемные, внутренние или возникающие поверхности, которые уменьшают эффективное поперечное сечение.

К этим неоднородностям можно добавить остаточные напряжения, которые являются следствием наложения зон, доведенных до очень разных температур, металлургических превращений и ограничений различного значения из-за зажима.

7.3.2. Условия взятия образца

Перемещение предыдущих испытаний к сварным соединениям должно учитывать зоны, которые необходимо охарактеризовать: зона плавления или HAZ. Рис. 7.11 показывает наиболее часто используемые условия удаления образцов для оценки чувствительности к разрушению зоны плавления. Как правило, надрез расположен в середине корда с различными возможными ориентациями (см. Рис. 7.12).

Определение ударной вязкости в HAZ гораздо сложнее, учитывая геометрию сварного шва. Трещина, обработанная параллельно оси борта, охватывает более или менее значительные пропорции HAZ, остальная часть состоит из основного металла (см. Рис. 7.13). Чтобы смягчить этот недостаток, по крайней мере, для лабораторий можно взять образцы К или половину К-образной формы (см. Рис. 7.14), что позволяет получить трещину, полностью расположенную в HAZ.

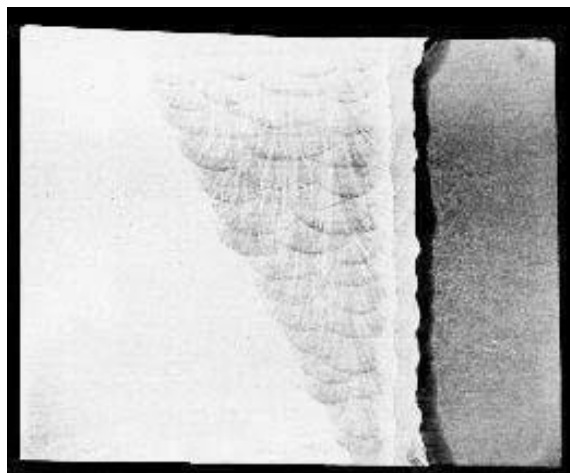


Рисунок 7.14. Валик половины К-образной формы

Однако, несмотря на этот метод, HAZ далеко не однороден, как это видно, например, из работы Тойоды [TOY 91]. Он состоит из более или менее хрупких микроструктур, образующихся во время различных тепловых циклов (см. Рис. 7.15), как будет наблюдаться позже (см. Раздел 7.4.4).

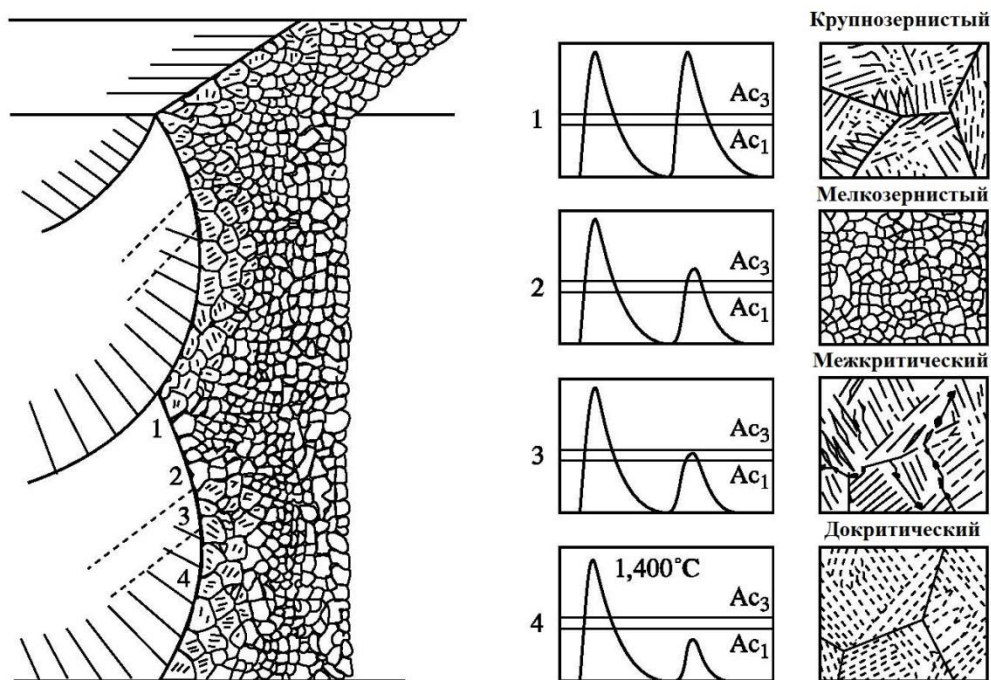


Рисунок 7.15. Различные типы микроструктур, обнаруженных в HAZ в соответствии с тепловыми циклами; из [TOY 89]

В некоторых случаях испытание проводится на сварном листе шириной 200 мм или более, причем усталостная трещина развивается либо в валике, либо в HAZ [KOC 00]. Такие образцы для испытаний, в частности, используются в рамках проекта Brite-Euram AS "Оценка качества сварных швов из балки POW" (от англ. ASPOW - Assessment of quality off Power beam Welded joints). Этот проект направлен на разработку рекомендаций по характеристике соединений, сваренных с помощью процессов с высокой плотностью энергии (электронный и лазерный луч), которые представляют собой узкий валик со значительными градиентами свойств: чрезмерное соответствие для конструкционных сталей и недостаточное соответствие для

алюминиевых сплавов.

7.3.3. Определение температуры перехода из вязкого состояния в хрупкое

Что касается определения энергии при испытаниях на ударный изгиб, стандарт NF IN 10045-1 [NF 90] определяет размеры и условия отбора проб (положение надреза по сравнению с FZ или HAZ). В целом, что касается характеристики основного материала, образец для испытания на ударный изгиб представляет собой параллелепипед ($55 \times 10 \times 10$ мм³) с V-образным надрезом 45° глубиной 2 мм. Стандарт предусматривает возможность использования испытательных образцов уменьшенной толщины (7,5 мм или 5 мм).

После отказов в работе, возникших во время землетрясений в Кобе и Северном мосту, результаты испытаний на ударный изгиб показали, что энергии разрушения составляют около 10 Дж при комнатной температуре в основном металле и зонах плавления, что является очень низким показателем [TOY 00]. Из редких пластин с кораблей Liberty, которые были исследованы, была найдена энергия от 8 до 9 Дж для температуры во время аварии, тогда как энергия в отдаленных зонах достигла 21 Дж [SAN 74].

Как правило, необходимо, чтобы температура перехода из пластичного в хрупкое состояние была ниже, чем минимальная рабочая температура. После работы группы экспертов, состоящей из членов Комиссии X из IIW под председательством Х.Х. Кэмпбелла, были сделаны рекомендации по механизированным сварным конструкциям, возведенным в зонах, где имеются сейсмические риски [CAM 00]. Самая простая процедура дает для различных уровней риска значения энергии ударного изгиба, которые должны быть достигнуты при температуре, соответствующей минимальной температуре использования (см. Таблицу 7.1).

В соответствии с условиями отбора образцов и положением дна надреза по отношению к FZ или HAZ результаты могут значительно отличаться, как показывают некоторые результаты испытаний на ударный изгиб, полученные при различных температурах Н. Губеляком [GUB 99].

Таблица 7.1. Оценка риска как функция уровня ударной вязкости; из [CAM 00]

KV (J) Температура испытания = минимальная температура эксплуатации	Риск хрупкого излома
$KV > 100$	Поломка маловероятна
$47 < KV < 100$	Низкий риск до коэффициентов
$27 < KV < 47$	Высокий риск
$10 < KV < 27$	Высокий риск. Необходимость жестких контрмер
$KV < 10$	Чрезвычайно высокий риск. Необходима структурная изоляция

В своем исследовании Губеляк использовал высокий предел текучести низколегированной стали для основного металла типа HT80 в закаленном состоянии толщиной 40 мм. Были оценены три сварных соединения X-образной формы, имеющих превышение прочности. Один из них имел однородную структуру (MF1). Два других сварных шва были выполнены с менее стойкими наполнителями в корне. Результаты испытаний на ударный изгиб приведены на Рис. 7.16.

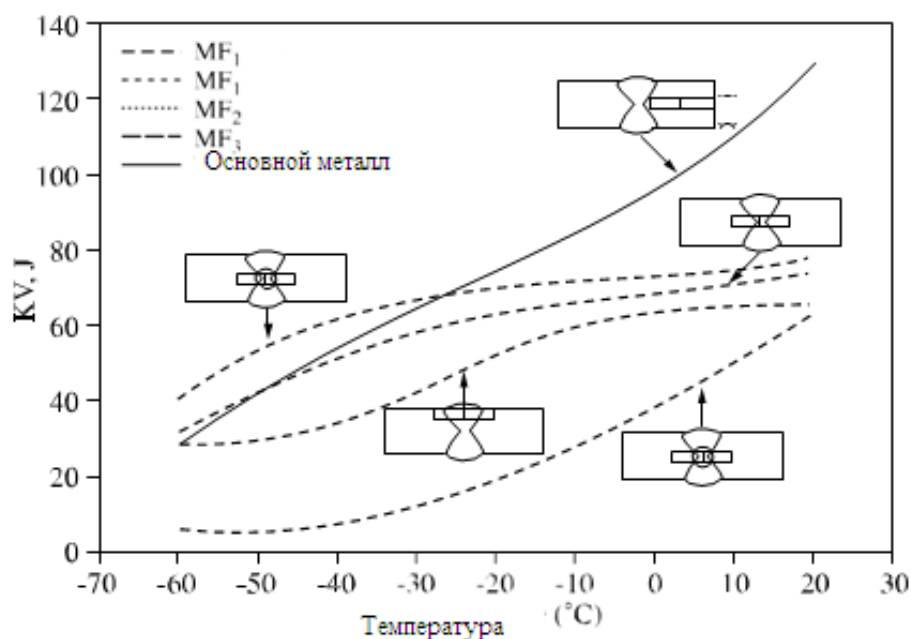


Рисунок 7.16. $KV = f(T)$ в соответствии с зонами удаления образцов; из [GUB 99]

7.3.4. Различные методы оценки прочности

Понятия механики разрушения также применимы к механизированным сварным конструкциям, что позволяет оценивать риски, связанные с наличием дефекта, и оценивать пригодность для применения. Для этого необходимо знать условия нагружения, ударную вязкость в точке растрескивания, а также геометрию и размеры дефекта.

Методы определения критериев разрушения, используемые для однородных материалов и описанные в Разделе 7.2, были перенесены на сварные соединения, в большинстве случаев без изменений.

Проблемы, связанные с предварительным разрушением

Какой бы метод не использовался, сначала необходимо произвести предварительно нанесенную усталостную трещину. Наличие остаточных напряжений, вызванных сваркой, может вызвать асимметричный фронт трещины. Чтобы смягчить этот недостаток, в некоторых исследованиях проводится обработка для снятия напряжения, которая изменяет микроструктуру HAZ и FZ. Даус, со своей стороны, использовал процедуру сжатия связок, чтобы перераспределить остаточные напряжения, что позволило получить прямой фронт трещины [DAW 76].

Критический коэффициент интенсивности напряжений K_{IC}

Как видно ранее, критический коэффициент интенсивности напряжений K_{IC} применяется к хрупким материалам. В случае сварных узлов обычно используются ковкие стали. Таким образом, этот критерий может быть подтвержден только при низких температурах, когда материал находится в хрупком состоянии.

Трещина в эластопластической области

При нормальных условиях эксплуатации материалы должны в теории иметь пластичную структуру. Для оценки риска разрыва, связанного с наличием дефекта, в условиях данной нагрузки мы используем критерии эластопластического перелома (J_{IC} , COD , $CTOD$).

П. Хорнет отметил, что кривая J-силы образца или структуры с дефектом, расположенным в середине сварного соединения, лежит между кривой идентичного образца основного металла и идентичного образца присадочного металла.

Относительное положение кривой J-силы зависит от ширины ролика. Если он широкий, пластификация в точке растрескивания остается ограниченной зоной плавления, и кривая аналогична кривой однородного образца присадочного металла. В случае узкого валика в поведении преобладает поведение основного металла [HOR 00].

Это расширение пластичности в неоднородных структурах имеет последствия для анализа результатов, определяющих прочность. В настоящее время предлагаются различные решения, состоящие из измерения прочности на испытательных образцах с глубокими трещинами ($a/W = 0,5$) с использованием отверстия горловины трещины, а не смещения точки трещины с применением силы. Это позволяет оценить количество энергии, приложенной в зоне трещины, без учета той энергии, которая рассеивается в основном металле.

Любые расчеты, направленные на оценку степени серьезности дефекта риска перелома, подразумевают возможность определения его размеров.

Принимая во внимание дефекты

В случае сварных соединений даже плоские дефекты имеют сложную геометрию. Также необходимо учитывать взаимодействие между соседними дефектами. Были разработаны методы для преобразования этих дефектов в эквивалентный двумерный геометрический дефект (a , b). Исходя из этого, можно даже перейти к одномерному параметру эффективного размера a . Такой шаг предлагается как для возникающих, так и для внутренних дефектов [COL 97, NOV 96].

Использование методов неразрушающего контроля, адаптированных к типам искомым дефектов, является основным. Эта потребность в испытаниях должна приниматься во внимание уже на стадии проектирования, что позволит избежать многих проблем после завершения строительства.

Анализ серьезности дефекта

Когда дефект обнаружен в элементе конструкции, можно рассмотреть три решения:

- сохраняйте его как есть, продолжая использовать материал;
- отремонтируйте его, зная, что ремонт может быть причиной возникновения еще более серьезного дефекта;
- замените неисправную деталь.

Существуют различные методы анализа серьезности дефектов, помогающие принимать решения, основанные на имеющихся методах для однородных конструкций и адаптированные в последние несколько лет к сварным соединениям. Среди наиболее известных выделяют следующие:

- модифицированный метод R6 (метод двух критериев),
- метод ЕТМ-ММ (*инженерная модель обработки несоответствующих сварных швов*),

- метод ЕМ (*метод эквивалентного материала*),
- рекомендация PD 6493 Британского стандарта «*Руководство по методам оценки приемлемости дефектов в сварных конструкциях методом плавления*».

Эти различные методы представлены для большинства в [BLA 97].

Рекомендация PD 6493 Британского стандарта

Рекомендация PD 6493 в ее последней версии (июнь 1991 года) применяется:

- к сварным узлам из алюминиевых сплавов, ферритных и аустенитных сталей,
- к плоским или объемным дефектам,
- к различным режимам отказа.

Обобщение этой рекомендации с ее преимуществами и ограничениями, а также применение к жидкостным каналам было выполнено Р. Батиссом [BAT 00].

Эта рекомендация применима к сосудам под давлением, трубопроводам, мостам, сооружениям, резервуарам для хранения, военно-морского строительству и морским работам и т.д.

Согласно этой рекомендации обработка приемлемости дефекта с точки зрения риска разрыва опирается на FAD (от англ. *failure assessment diagram* - диаграмма оценки разрушения) и требует вычисления двух параметров, соответствующих соответственно хрупкому риску разрушения Kr (ось y) и пластическому коллапсу Sr (ось X).

Предлагаются различные уровни исследования. Рис.7.17 показывает уровни 1 и 2. Уровень 1 является наиболее ограничительным. Это позволяет проводить быстрый анализ с минимумом данных.

Он не требует учета факторов безопасности, которые принимаются во внимание при увеличении напряжений и размеров дефектов и снижении механических свойств.

Уровень 2 допускает возможность образования предела пластичности до отказа и учитывает напряжения на уровне дефекта. Коэффициенты безопасности применимы к напряжениям, размерам дефекта и механическим свойствам.

Уровень 3 (см. Рис. 7.18) можно использовать, когда коллапсу предшествует значительная пластическая деформация.

Точка может быть размещена на диаграмме FAD, причем ее положение зависит от типа дефекта (его положения и размеров) и условий использования (нагрузка, температура и т.д.). В соответствии с ее положением, внутри или снаружи диаграммы, дефект либо приемлем, либо нет.

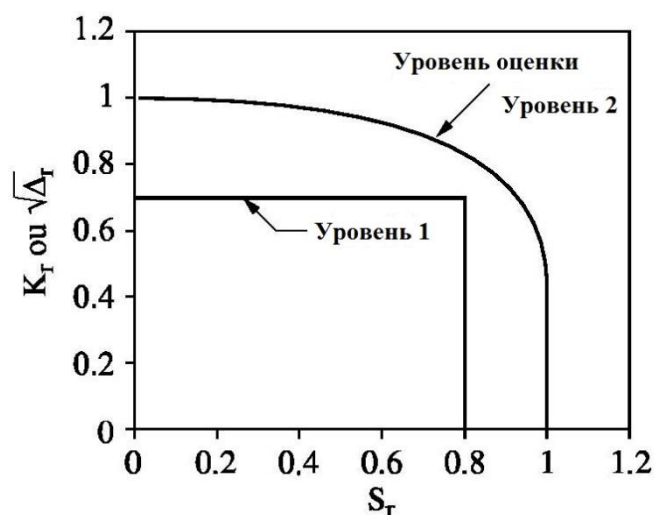


Рисунок 7.17. FAD. Уровни 1 и 2; из [KON 94]

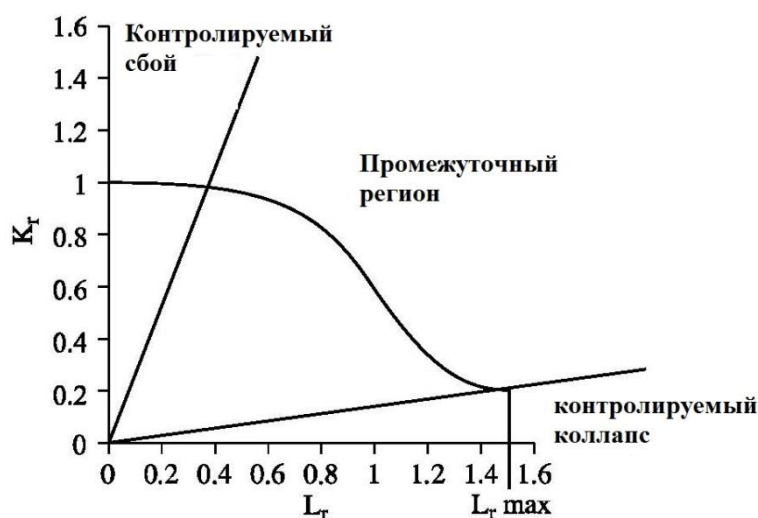


Рисунок 7.18. FAD. Уровень 3

Эта рекомендация разработана, чтобы быть простой, способной удовлетворить потребности в промышленности. Однако в некоторых случаях она приведет к результатам с ограниченной точностью в отношении определенных допущений, таких как:

- учет остаточных напряжений, равных пределу упругости,
- К-подход, основанный на механике линейного разрушения, плохо адаптированный для трещины, пластификация которой не ограничена,
- использование приближенных механических свойств.

Европейский проект SINTAP (от англ. *Structures INTegrity Assessment Procedures* - процедуры оценки целостности конструкций) обратил свое внимание на рекомендацию PD 6493 с целью ограничения таких результатов, предлагая определенное количество упрощенных решений.

7.4. Последствия неоднородностей при оценке рисков разрушений

Оценка риска разрушения в сварных соединениях будет основной проблемой в ближайшие годы, как для новых зданий, так и для тех, которые находятся в эксплуатации. Частота технического обслуживания, на которую следует рассчитывать при повышении

стоимости, и увеличение срока службы установки, - это постоянные проблемы, которые требуют лучшего понимания сварных конструкций.

Сварные соединения по своей природе неоднородны, и необходимо учитывать вероятностные аспекты.

7.4.1. Несоответствующие эффекты

В 1993 году на ежегодном совещании PW было принято решение учредить Подкомиссию X F в составе Комиссии X, которой было специально поручено учитывать эффекты несовпадения. Учитывая междисциплинарный характер проблемы, в эту группу были вовлечены специалисты, работающие в нескольких различных областях. За семь лет было представлено около 100 документов, список которых имеется в Президентском отчете [КОС 00], и они стали предметом обсуждения. Среди обсуждаемых тем были:

- учет несоответствий в процессах с высокой плотностью энергии,
- несоответствия, возникающее при сварке трением (трение с перемешиванием),
- последствия несоответствия при сейсмических нагрузках,
- несоответствие, связанное с покрытием или перекрытием.

В настоящее время коды не учитывают несоответствие. Они считают однородный материал, который имеет самые невыгодные характеристики среди тех, что вовлечены в сварные работы. Как правило, это приводит к консервативным результатам.

Две программы Европейского сообщества особенно учитывают последствия несоответствия. В дополнение к ныне несуществующей программе SINTAP, программа ASPOW (от англ. *Assessment of Quality of Power Beam Welded joints* - Оценка качества сварных швов балок) характеризует соединения, сваренные балками с высокой плотностью энергии. Эти применения, в частности, касаются использования лазерной сварки алюминиевых сплавов в авиации в рамках программы Airbus 380.

Лабораторные испытания, проведенные на сварных образцах с дефектом, расположенным в зоне плавления, подчеркивают влияние:

- несоответствия,
- размеров HAZ по сравнению с размерами испытываемого образца,
- схема нагрузки (растяжение или изгиб),
- положение конечной точки трещины по сравнению с валиком,
- эволюция пластичности в связке.

Во Франции было предпринято много исследований для решения проблем, возникающих в ядерной области. Хорнет [HOR 00] показал, что в случае перетекания пластичность развивается в основном в самом мягком металле, за исключением случаев, когда FZ довольно широка, и в этом случае пластичность ограничена (см. Рис. 7.19).

С другой стороны, общая характеристика неоднородной структуры узких валиков, по-видимому, мало зависит от существования FZ, независимо от длины трещины. Характеристика вблизи трещины, как и характеристика всей конструкции, по-видимому, контролируется основным металлом. Пластическая деформация, возникающая в точке растрескивания в расплавленной зоне, соединяется с зоной сцепления и затем образуется в основном металле (см. Рис.7.19). Пластичная зона в форме гриба, характерная для повышенной плотности, распространяется в основном металле, который определяет загрузку трещины.

Хорнет также показывает, что если отношение $h/(W-a)$ высокое, механическая прочность структуры контролируется расплавленным металлом, тогда как, если оно близко к 0, оно контролируется основным материалом.

Условия нагружения (растяжение или изгиб) также влияют на развитие пластичности и возможность выхода пластифицированной зоны из добавленного металла. Согласно Хорнету, изгибающая нагрузка способствует удержанию пластичности в расплавленном металле (см. Рис.7.20) больше, чем растягивающая нагрузка.

Аналогичные результаты получены в части проекта ASPOW, посвященной характеристике сварных соединений, выполненных с помощью лазерного или электронного луча на сталях с различными уровнями прочности, где важна степень перетекания. Было показано, что трещина, начавшаяся в валике, быстро меняет направление и развивается в более пластичном основном металле, и это явление хорошо подходит как для испытательных образцов, включающих широкие пластины или традиционных образцов для испытаний на разрушение, так и для образцов типа СТ или с тонким изгибом. Если толщина В образцов для испытаний увеличивается, трещина остается в расплавленной зоне, что приводит к снижению CTOD [КОС 99]. Тот факт, что трещина движется в направлении наиболее пластичной зоны, обнадеживает в случае процессов с высокой плотностью энергии.

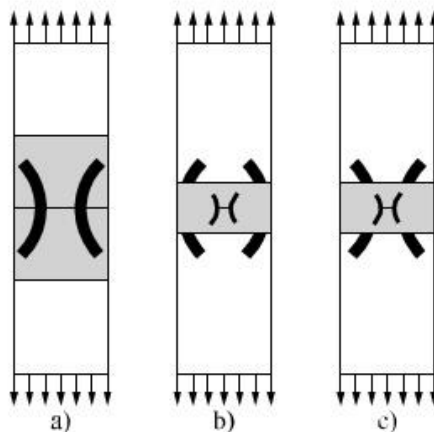


Рисунок 7.19 *Расширение пластифицированной зоны относительно ширины HAZ; из [HOR 00]*

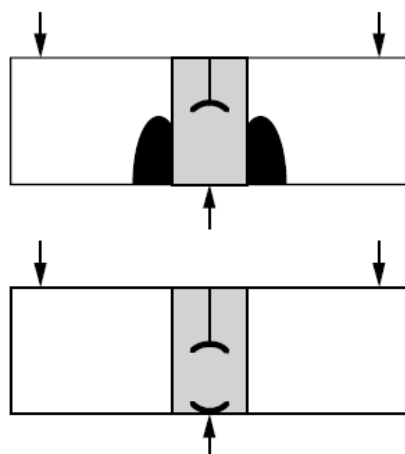


Рисунок 7.20. *Удержание пластифицированной зоны при изгибающей нагрузке; из [HOR 00]*

Последствия несоответствия на CTOD были изучены для различных материалов: алюминиевые сплавы, имеющие недостаточное соответствие, аустенитные нержавеющие стали, никелевые сплавы Inconel 625 и титановые сплавы.

В отношении последнего мы приводим работу М. Кочака, который во время диффузионной сварки титана и титанового сплава ТА6V произвел либо занижение, равное 0,36 (ТА6V/Ti/ТА6V), либо превышение, равное 2,5 (Ti/ТА6V/Ti) с переменной шириной и идеально прямыми связующими зонами. В первом случае трещина остается в самой пластичной зоне, а пластифицированная зона остается ограниченной; во втором случае трещина отклоняется в сторону наиболее пластичного материала или распространяется на уровень границы раздела.

Н. Губеляк изучил, что в случае Х-образной сборки, влияние положения вершины трещины на вязкость выражается в виде CTOD (см. Рис.7.21). Когда отношение a/W увеличивается, ширина расплавленной зоны уменьшается и достигает минимума на уровне корня. Сужение влияет на образование пластифицированной зоны на вершине трещины и, следовательно, на результаты, представляющие дисперсию. Чтобы уменьшить эту слабость, предлагаются корректирующие формулы [GUB 99].

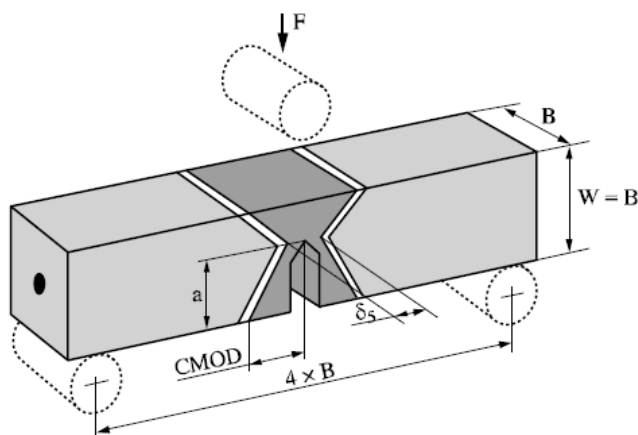


Рисунок 7.21. Влияние геометрии зоны расплава и положения дна усталостной трещины на определение CTOD; из [GUB 99]

7.4.2. Влияние основного материала

Условия изготовления

Основной материал, используемый для реализации механизированных сварных конструкций, должен иметь температуру пластически-хрупкого перехода ниже, чем минимальная температура при эксплуатации. В начале 1970-х годов французский стандарт NF A 36-201 определил три уровня качества (R, C и FP) для нелегированных листовых сталей или низколегированных свариваемых сталей (E 355, E 375, E 420 и E 460), гарантирующий минимальные значения ударной вязкости при более или менее низких температурах в соответствии с условиями использования.

Чтобы обеспечить пользователей сталью, которую легче сварить, но при этом, чтобы она стала более прочной и жесткой, производители стали снизили процентное содержание углерода (снижение эквивалентного углерода (C_{eq}), что приводит к снижению ТК 28 (см. Рис.7.22). Дальнейшие разработки также позволили улучшить качество продукта за счет снижения содержания примесей (сера, фосфор) или микроэлементов (мышьяк, сурьма, олово), что позволило снизить температуру перехода в зоне воздействия Cr-Mo для того, чтобы они стали чувствительны к явлению обратимого охрупчивания.

Вакуумные процессы, такие как дегидрирование, позволили снизить содержание водорода до менее чем 2 ч/млн, в частности в сталях для тяжелых плит. Кроме того, стало возможно получить низкое содержание азота, применяя методы, позволяющие избежать расплавленной

стали и окружающего воздуха во время литья.

При одинаковом содержании серы морфология сульфидов играет большую роль в ударной вязкости по толщине. Добавление церия или кальция заметно улучшает ударную вязкость за счет образования глобулизированных сульфидов (см. Рис.7.23).

Термомеханическая обработка

Термомеханическая прокатка с последующим ускоренным охлаждением привела к разработке сталей с высоким пределом текучести (от англ. HYS - high yield strength). Снижение процентного содержания углерода было компенсировано уменьшением размера зерна и осаждением дисперсоидных элементов, которые позволяют затвердеть ферритной фазе [DEF 94]. Это приводит к увеличению прочности и текучести при снижении температуры перехода.

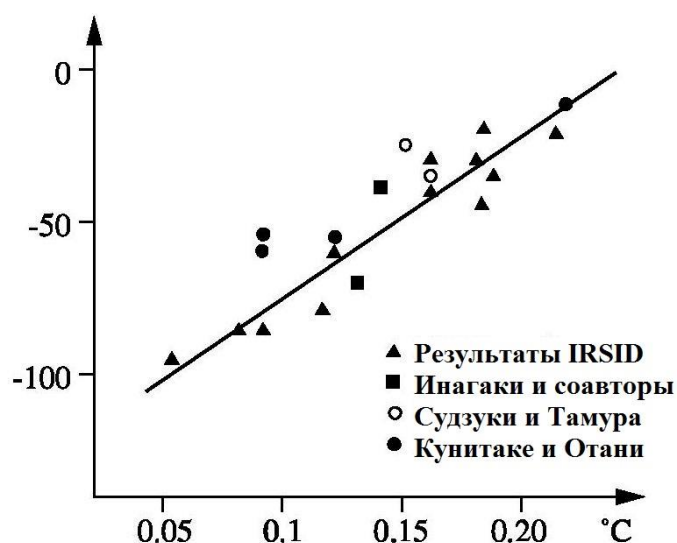


Рисунок 7.22. Влияние процентного содержания углерода на оптимальные ТК HAZ; из [DEV 88]

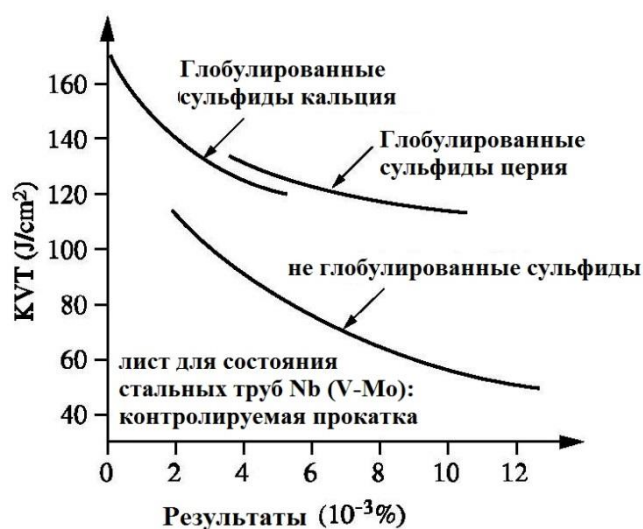


Рисунок 7.23. Ударная вязкость по толщине. Влияние содержания серы и морфологии сульфида; из [DEV 88]

В статье Бурге и др. [BOU 97] показано, что для стали, поставляемой в соответствии с тем

же обозначением, условия производства могут играть важную роль в условиях использования. Таким образом, раскисление стали алюминием без кремния оказало благотворное влияние, позволив ограничить чувствительность к старению после упрочнения при изгибе (см. Рис. 7.24).

В сталях с 0,080% С, 1,5% Мп и 0,5% Ni влияние содержания кремния также происходит на температуру ТК28 в HAZ, причем это проявляется тем более заметно, когда скорость охлаждения во время сварки медленнее, что имеет место в процессах с высокой плотностью энергии (см. Рис. 7.25). Снижение содержания кремния позволяет уменьшить долю остаточного аустенита в HAZ, что улучшает прочность в этой зоне.

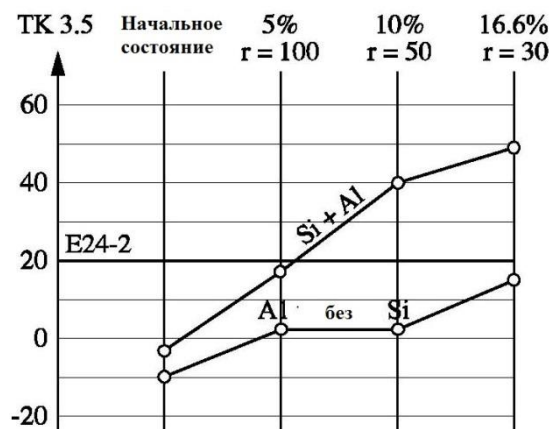


Рисунок 7.24. Эволюция уровня ТК35 в связи с деформацией и раскислением стали; из [BOU 97]

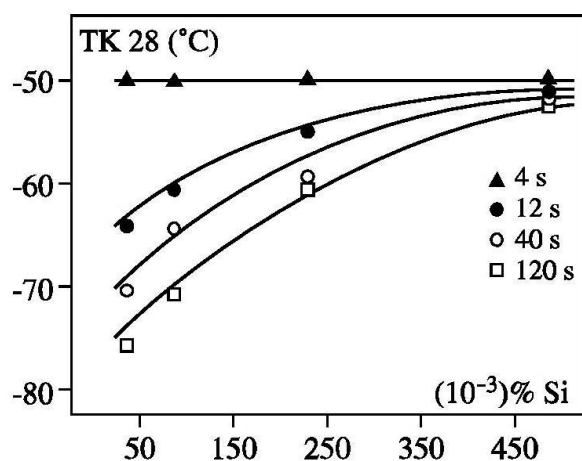


Рисунок 7.25. Влияние содержания кремния и скорости охлаждения в HAZ на ударную вязкость; из [BOU 97]

7.4.3. Влияние присадочных металлов

Оценка достигнутого прогресса с точки зрения материалов-наполнителей была представлена Бурге и др. [BOU 98]. Здесь проводится сравнение между основными и рутиловыми электродами. Основные электроды обладают наибольшим потенциалом благодаря своему химическому составу и позволяют получить высокий пластичный уровень ударной вязкости, а также имеют хорошую ударную вязкость при низкой температуре. Однако

основные провода имеют более низкие эксплуатационные характеристики, чем рутиловые.

В рутиловую проволоку были внесены значительные улучшения, этот тип проволоки использует эффект титана/бора путем тщательного отбора сырья с целью ограничить количество примесей и карбидообразующих элементов, которые отвечают за снижение ударной вязкости после обработки для снятия напряжений. Также следует добавить, что в некоторых проводах скорость диффузионного водорода достаточно низкая, чтобы классифицировать ее в категорию H5 (ниже 5 мл/100 г добавленного металла). Эти различные аспекты подробно описаны Бонне (см. Главы 4 и 5 этой книги).

7.4.4. Важность условий сварки

В случае многопроходной сварки каждый проход происходит в начале микроструктурных преобразований, которые варьируются в зависимости от максимальной достигнутой температуры. Таким образом, HAZ включает локальные хрупкие зоны (от англ. LBZ - local brittle zones), как указано в [DEF 94]. Сложность HAZ схематизирована на Рис.7.15.

Исследования, проведенные в последние годы, подчеркнули роль определенных микроструктурных компонентов, состоящих из мартенсита и остаточного аустенита (соединения М-А), на прочность. Морфология этих соединений влияет на ударную вязкость. Было показано, что это особенно крупные соединения М-А (более 2 мкм) и/или твердые массы (коэффициент формы менее 4), которые влекут за собой снижение ударной вязкости. Эти соединения составляют локальные зоны охрупчивания.

Рисунок 7.26 позволяет качественно судить о влиянии общей локальной хрупкой зоны на COD. LBZ - это сумма следующих составляющих:

- зона разогретого крупного зерна в докритическом поле,
- зона подогретого крупного зерна в межкритическом поле,
- нетрансформированная зона крупного зерна.

В начале 1990-х годов Каплан разработал программное моделирование, названное «Multipasses», которое в случае сталей С-Мп, позволяет оценивать, в зависимости от состава основной стали, наполнителя и параметров сварки (напряжение, интенсивность, скорость, коэффициент полезного действия, температура предварительного нагрева и температура между проходами), пропорции LBZ, непосредственно влияющие на ударную вязкость. Такие инструменты прогнозирования помогают как производителям стали, так и сварщикам [DEV 94].

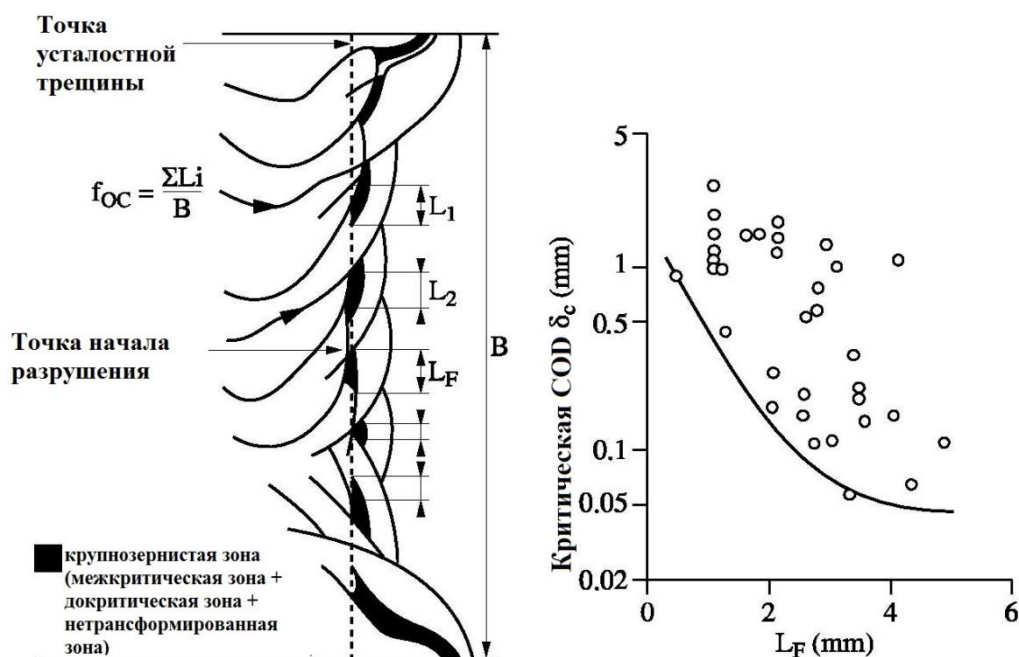


Рисунок 7.26. Соотношение между COD и долей LBZ, перехваченной усталостной трещиной; из [AII 88]

7.4.5. Оценка и учет остаточных напряжений

Сварочные работы и связанные с ними технологии включают быстрые фазы нагрева и охлаждения, которые влекут за собой деформации и создание остаточных напряжений. В отсутствие точных данных полезно учитывать, что их уровень равен пределу упругости материала, что в большинстве случаев невыгодно, если мы ссылаемся на результаты, полученные при моделировании.

Моделирование и симуляция в этой области начались во Франции в 1980-х годах с разработки программного обеспечения «SYSWELD», разработанного Дэво и Леблондом. Свои идеи касательно металлургических превращений они основывали на работе Р. Блондо [BLO 75] и команды А. Симона, краткое изложение которых приведено в [SIM 93].

Это программное обеспечение позволяет моделировать сварку, учитывая термические, металлургические и механические аспекты и работая с помощью последовательного анализа. Исходя из параметров сварки, термометаллургический расчет позволяет получить температуры и фазы, образовавшиеся в любой момент времени. Эта стадия учитывает изменения теплопроводности, удельной теплоемкости и объемной массы в зависимости от температуры.

Далее следует механический расчет, термоупругий по своей природе и требующий учета различных явлений, связанных с металлургическими превращениями. Механические характеристики зависят от соотношения фаз. Необходимо учитывать вариации объема и преобразования пластичности. Цифровое моделирование требует, чтобы у нас было много данных относительно материалов, которые доступны только для нескольких типов стали.

На Рис.7.27 приведен пример оценки продольных и окружных остаточных напряжений, полученных емкостным сварным швом ЕВ в стали 10CrMo9-10. Следует отметить наличие сжимающих напряжений на поверхности вблизи границы валика и внутренних

растягивающих напряжений. По обе стороны от бортов на поверхности имеются растягивающие напряжения. Качественно распределение напряжений было подтверждено дифракцией рентгеновских лучей и методом сверления отверстий (см. Рис. 7.28). Количественно различия между расчетными и экспериментальными методами были значительными и были объяснены с помощью 2D анализа [DEV 89].

Моделирование позволяет получить информацию, недоступную в других случаях традиционными экспериментальными методами.

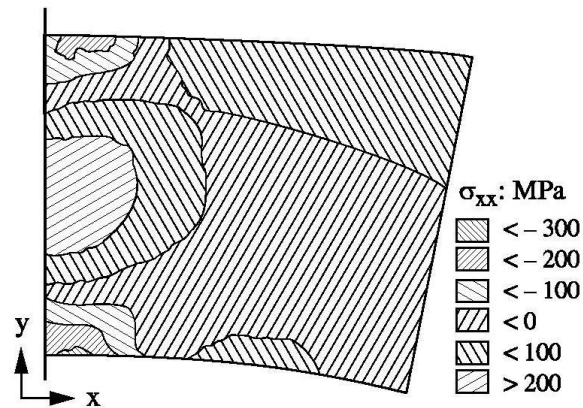


Рисунок 7.27. Распределение поперечных напряжений; из [DEV 89]

Эти данные, в частности поперечные остаточные напряжения по толщине, были приняты во внимание А. Карметом для оценки размеров допустимых дефектов с использованием различных критериев разрушения. Этот шаг позволил уменьшить в большинстве случаев серьезность различных правил принятия [CAR 90].

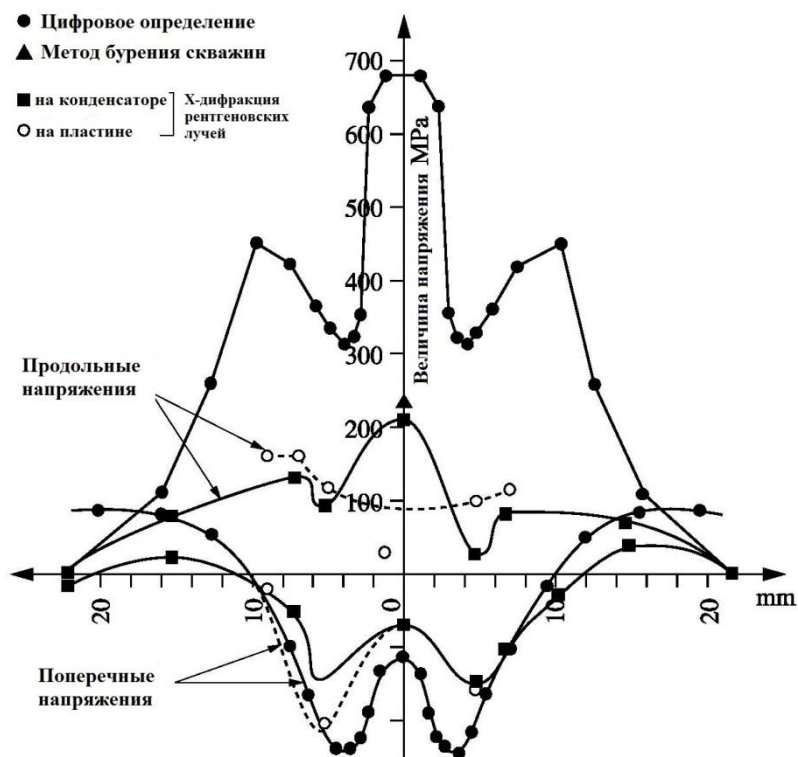


Рисунок 7.28. Остаточные напряжения. Расчет/ экспериментальное сравнение; из [DEV 89]

Бурдекин собрал вместе упражнения по оценке риска разрушения сварных соединений с учетом остаточных напряжений [BUR 96].

Примеры распределения остаточных напряжений для различных типов соединений можно найти в литературе. С 1996 года по инициативе Яноша была сформирована рабочая группа из членов комиссий X и XV IIW, что способствовало значительному обмену идеями. Названия документов, представленных с 1997 года, собраны в [JAN 00].

Совещание за круглым столом собрало десять команд, которые провели имитацию кольцевого соединения для сварки труб. Первые результаты показывают, что в соответствии с используемыми методами важные изменения могут наблюдаться даже при термическом анализе в данной точке. Целью данной работы является разработка рекомендаций по методам реализации с целью получения более согласованных результатов [KOP 00].

В рамках совместного исследования команды ECA, EDF и Framatome использовали разные коды (Castem 2000, Aster и Sysweld), чтобы получить однородные результаты в отношении распределения напряжений при многопроходной сварке цилиндра в аустенитной стали 316L. С этой целью были проведены эксперименты, особенно в отношении анализа теплового цикла во время различных сварочных проходов. Микрографическое исследование позволило внести некоторые коррективы. Расчеты согласуются с напряжениями, определенными экспериментальными методами [KIC 00].

7.5 Список использованной литературы

- [AIH 88] HAZE T., AIHARA S., “Influence of toughness and size of local brittle zone on HAZ toughness of HSLA steels”, *Proceedings of the 7th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE 1988*, ASME, Houston, USA, 1988.
- [ANS 92] American National Standards Institute and American Welding Society, Standard methods for mechanical testing of welds, ANSI/AWS B4.0-92, 29 June 1992.
- [AST 93] ASTM, Standard test method for crack tip opening displacement (CTOD) fracture toughness measurement, ASTM E 1290-93, 1993.
- [AST 95] ASTM, Standard test method for conducting drop-weight test to determine nilductility-transition temperature of ferritic steels, ASTM E208-95a, 1995.
- [AST 96] ASTM, Standard test method for J-integral characterization of fracture toughness, ASTM E 1737-96, 1996.
- [AST 97] ASTM, Standard test method for plane strain fracture toughness of metallic materials, ASTM E 399-90 (reapproved 1997), 1997.
- [BAL 97] BALLADON P., DI FANT M., PONSOT A., “Dureté, résistance et ténacité”, *Les aciers spéciaux*, Lavoisier, pp. 452-473, Paris, 1997.
- [BAT 00] BATISSE R., “Présentation de la recommandation PD 6493. Application aux conduites de transport de fluides”, *Séminaire sur la prévention de la rupture dans des joints soudés*, Institut de Soudure, 9 March 2000.
- [BLA 96] BLAUEL J.G., BURDEKIN F.M., “Case study collection on the assessment of the significance of weld imperfections”, *Welding in the World*, 37, no. 4, pp. 194-216, 1996.
- [BLA 97] BLAUEL J.G., Failure assessment concepts and applications, Doc. IIS – IIW X-1407-97, 1997.
- [BLO 75] BLONDEAU R., MAYNIER PH., DOLLET J., VIEILLARD-BARON B. “Prévision de la dureté, de la résistance et de la limite d'élasticité des aciers au carbone et faiblement alliés

- d'après leur composition et leur traitement thermique", *Mém. Scient. Rev. Métall.* pp. 759-769, November 1975.
- [BON 97] BONNEFOIS B., BOURGES P., MABELLY P., DEBIEZ S., BONNET C., ROUAULT P., MAGOARIEC A., TAILLARD R., KAPLAN. D. *et al.*, Quelques développements récents permettant une amélioration supplémentaire de la qualité des structures d'aciers soudées, Doc. IIS/IIW IX-1886-97, 1997.
- [BON 98] BONNEFOIS B., BOURGES P., MABELLY P., DEBIEZ S., BONNET C., ROUAULT P., MAGOARIEC A., TAILLARD R., KAPLAN. D. *et al.*, "Une amélioration supplémentaire de la qualité des structures soudées en acier", *Soudage et Techniques Connexes*, vol. 52, no. 1/2, January/February 1998.
- [BUR 92] BURDEKIN F.M., "Choix des aciers pour les constructions soudées", *Soudage et Techniques Connexes*, vol. 46, no. 11/12, November/December 1992.
- [BUR 96] BLAUDEL J.G., BURDEKIN F.M., "Case study collection on the assessment of the significance of weld imperfections", *Welding in the World*, 37, no. 4, pp. 194-216, 1996.
- [CAM 00] CAMPBELL H.H., Status of the IIW recommendations on fracture control in seismically affected steel structures, Doc. IIS/IIW X-1456-00, 2000.
- [CAR 90] CARMET A., SOCQUET J., "Influence des contraintes résiduelles de soudage sur les conditions de rupture d'appareils à pression", *Soudage et Techniques Connexes*, vol. 4, no. 11/12, November/December 1990.
- [CHE 70] CHEVIET A., GRUMBACH M., PRUDHOMME M., SANZ G., "Comparaison des résultats de divers essais de rupture fragile", *Revue de Métallurgie*, pp. 217-236, March 1970.
- [COL 97] COLLECTIF, Method of assessment for flaws in fusion welded joints with respect of brittle fracture and fatigue crack growth, Doc. IIS/IIW X-1428-98, 1997.
- [DAW 76] DAWES M.G., "Contemporary measurements of weld metal fracture toughness", *Welding Journal*, pp. 1052-1057, December 1976.
- [DEF 94] DEFOURNY J., "Soudabilité des aciers produits par laminage thermomécanique ou par refroidissement accéléré", *Soudage et Techniques Connexes*, vol. 48, no. 7/8, July/August 1994.
- [DEV 89] DEVAUX J.C., CARMET A., LEBLOND J.B., "Détermination numérique des contraintes et des déformations résiduelles dans un joint soudé par faisceau d'électrons", *Soudage et Techniques Connexes*, vol. 48, no. 9/10, September/October 1989.
- [DEV 94] DEVILLERS L., KAPLAN D., TESTARD P., "Prévision des microstructures et de la ténacité des ZAT de soudures", *Soudage et Techniques Connexes*, vol. 48, no. 7/8, July/August 1994.
- [FOR 00] FORGET P., "Modélisation de la rupture des liaisons soudées bimétalliques", *Séminaire sur la prévention de la rupture dans des joints soudés*, Institut de Soudure, 9 March 2000.
- [FRA 72] FRANÇOIS D., JOLY L., *La Rupture des Métaux. Ecole d'été de la Colle sur Loup, September 1970*, Masson, 1972.
- [FRA 92] FRANÇOIS D., Provisional definitive statement of significance of local brittle zones, Doc. IIS-IIW X-1246-92, 1992.
- [FRA 96] FRANÇOIS D., "Guidelines for terminology and nomenclature in the field of structural integrity", *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol. 19, no. 12, pp. 1515-1533, 1996.
- [FRA 00] FRANÇOIS D., "Aspects probabilistes de la rupture des joints soudés", *Séminaire sur la prévention de la rupture dans des joints soudés*, Institut de Soudure, 9 March 2000.
- [FRO 82] FROMM K., SCHULZE H.D., Pellini's theory of brittle fracture and the limits of its applicability, Doc. IIS – IIW 1011 – 82, 1982.
- [GRU 69] GRUMBACH M., PRUDHOMME M., SANZ G., "Essais dynamiques de rupture fragile avec enregistrement", *Revue de Métallurgie*, pp. 271-281, April 1969.

- [GUB 99] GUBELJAK N., “Estimation de la ténacité minimale s’assemblages soudés affectés d’une hétérogénéité mécanique (mismatch)”, *Soudage et Techniques Connexes*, vol. 53- no. 7/8, July/August 1999.
- [HOB 96] HOBACHER A., Recommandations pour la conception en fatigue des assemblages et composants soudés, Document IIS-IIW XIII-1539-96/ XV-845-96, 1996 (version française, publication CTICM, October 2000).
- [HOR 00] HORNET P., “Prise en compte de l’effet mismatch dans le comportement mécanique des structures soudées fissurées”, *Séminaire sur la prévention de la rupture dans des joints soudés*, Institut de Soudure, 9 March 2000.
- [JAN 00] JANOSCH J.-J., GORDON R., Residual stress and distortion prediction in welded structures, 4th annual report, Doc. IIS – IIW X-1455-00, 2000.
- [KAL 00] KALNA K., Design of steels structures against brittle failure in different European standards, Doc. IIS/IIW X-1465-00, 2000.
- [KIC 00] KIHENIN J., RAZAKANAIVO A., DESROCHES X., BOIS C., LEJEAIL Y., Tubular welding numerical simulation: Experimental validation, Doc. IIS/IIW X/XV-RSDP-56-00, 2000.
- [KIM 98] KIM Y.J., “Effets d’une hétérogénéité mécanique (mismatch) sur les contraintes locales”, *Soudage et Techniques Connexes*, vol. 52, no. 3/4, March/April 1998.
- [KOC 99a] KOÇAK M. *et al.*, “Recommendations on tensile and fracture toughness testing procedures for power beam welds”, *European Symposium on Assessment of Power Beam Welds*, 4-5 February 1999, Doc IIS – IIW X-1445-99, 1999.
- [KOC 99b] KOÇAK M., THAULOW C., “Special issue on strength of mismatched welded joints”, *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 64, no. 4, November 1999.
- [KOC 00] KOÇAK M., DOS SANTOS J.F., “Le soudage et l’assemblage au XXI^e siècle: Soudage laser: tendances dans les applications industrielles et dans l’évaluation de la qualité”, *Soudage et Techniques Connexes*, vol. 54, no. 5/6, May/June 2000.
- [KOC 00] KOÇAK M., 7th Annual Report of Sub-Commission X-F Weld Mis-Match Effect, Doc. IIS/IIW X-1457-00, 2000.
- [KOL 00] KOPPENHOEFER K., GORDON R., IIW Round Robin on residual stress and distortion prediction. Phase 1 results, Doc IIW X/XV-RDSP-55-00, 2000.
- [KON 94] KONECZNY H., “De l’utilité des calculs de mécanique de la rupture”, *Soudage et Techniques Connexes*, vol. 48, no. 7/8, July/August 1994.
- [KON 00] KONECZNY H., JANOSCH J.-J., DEBIEZ S., “Définition d’une base de données matériaux pour les constructions soudées lourdes par caractérisation expérimentale de ténacité/résilience”, *Revue Française de Mécanique*, no. 1997-1, pp. 17-25, 2000.
- [LAF 88] LAFRANCE M., POUPON M., DEVILLERS L., “Les outils et technologies modernes de production des aciers”, *Soudage et Techniques Connexes*, vol. 47, no. 11/12, November/December 1988.
- [LEI 62] DE LEIRIS H., BONIZEC R., “L’essai au mouton Pellini et les assemblages soudés”, *ATMA* 1961, pp. 669-684, 1962.
- [LEI 71] DE LEIRIS H., *Métaux et alliages*, Tome I, Cours ENSTA, Masson & Cie, 1971.
- [LEI 96] LEI W., YAO M., “The physical nature of drop weight test NDT”, *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 53, no. 4, pp. 645-652, 1996.
- [MEE 88] MEESTER DE B., “Choix des aciers selon leurs propriétés Charpy V en vue d’éviter la rupture fragile”, *Le Soudage dans le Monde*, vol. 26, no. 11/12, 1988.
- [MUH 98] MUHAMMED A., The effect of prior overload and its application in structural integrity assessments, SINTAP/TWI/014, TWI Report no. 88269/1/98, March 1998.
- [NF 81] NORME FRANÇAISE, Produits sidérurgiques. Détermination du facteur d’intensité de contrainte critique des aciers, NFA 03 180, June 1981.

- [NF 84] NORME FRANÇAISE, Assemblages plans et tubulaires soudés bout à bout – Essai de flexion par choc sur éprouvette bi-appuyée (entaille en V), NF A 89-202, July 1984.
- [NF 87a] NORME FRANÇAISE, Produits sidérurgiques – Mécanique de la rupture – Détermination de l'écartement à fond de fissure (CTOD), NF A 03 182, June 1987.
- [NF 87b] NORME FRANÇAISE, Produits sidérurgiques – Mécanique de la rupture – Détermination à partir de la courbe J- σ a des valeurs conventionnelles J0 et DJ/DACaractéristique de la résistance à la déchirure ductile, NF A 03 183, June 1987.
- [NF 90] NORME FRANÇAISE, Matériaux métalliques – Essai de flexion par choc sur éprouvettes Charpy – Partie 1: Méthode d'essai, NF EN 10045-1, October 1990.
- [PEL 71a] PELLINI W.S., "Principles of fracture safe design – part I", *Welding Research Supplement*, pp. 91-109, March 1971.
- [PEL 71b] PELLINI W.S., "Principles of fracture safe design – part II", *Welding Research Supplement*, pp. 147-162, April 1971.
- [ROS 98] ROSSOL A., Détermination de la ténacité d'un acier faiblement allié à partir de l'essai Charpy instrumenté, PhD Thesis, ECP 98-43, 1998.
- [SAN 74] SANZ G., *La rupture des aciers. La rupture fragile 1*, Collection IRSID OTUA, 1974.
- [SAN 78] SANZ G., *La rupture des aciers. La mécanique de la rupture 2*, Collection IRSID OTUA, 1978.
- [SIM 93] SIMON A., DENIS S., "Modélisation et calcul des transformations de phases et des contraintes internes en traitement thermique des aciers", *Les Entretiens de la Technologie*, 11 May 1993, Nantes, *Atelier Matériaux 6: Transformations microstructurales*, 1993.
- [SOU 97] SOULIGNAC P., BERANGER G., HENRY G., LABBE G., *Les aciers spéciaux*, Lavoisier, Paris, 1997.
- [TOY 89] TOYODA M., "Fracture toughness evaluation of steel welds", *Review Part II*, University of Osaka, 1989.
- [TOY 91] TOYODA M., Recommendation for understanding the significance of CTOD test, results for steel weld HAZ, IIS – IIW Commission X, 1991.
- [TOY 00] TOYODA M. *et al.*, Fracture mechanics approach for fracture performance evaluation of steel structures under seismic loading, Doc IIS – IIW X-1462-00, 2000.
- [WIE 99] WIESNER C.S., SMITH S.D., Pellini drop-weight testing to characterise structural crack arrest behaviour, Doc IIS – IIW X-1438-99, 1999.
- [WIL 99] WILSIUS J., IMAD A., NAIT ABDELAZIZ M., MESMACQUE G., ERIPRET C., "Analyse des modèles basés sur l'approche locale en mécanique de la rupture", *Soudage et Techniques Connexes*, vol. 53, no. 11/12, November/December 1999.
- [WIL 99] WILSIUS J., Etude expérimentale et numérique de la déchirure ductile basée sur des approches locales en mécanique de la rupture, PhD Thesis, Université des Sciences et Technologies de Lille, December 1999.
- [XU 97] XU W.G., "Diagrammes d'évaluation de la rupture en présence de contraintes résiduelles", *Soudage et Techniques Connexes*, vol. 51, no. 11/12, November/December 1997.

Сваривание стальных листов с обработкой поверхности и без нее

Автомобильный рынок является основным потребителем тонколистовой стали с покрытием и без покрытия. Принято считать, что тонкий лист имеет толщину менее 5 мм.

Постоянное стремление находиться в соответствии с условиями загрязнения окружающей среды за счет уменьшения веса транспортных средств привел к увеличению использования все более тонкой высокопрочной листовой стали. Уже несколько лет на рынок поступает листовая сталь с очень высокими техническими характеристиками, предел прочности при растяжении которых превышает 600 МПа и достигает 1500 МПа. Среди этих новых товаров мы находим двухфазную сталь (Usiphase D 600), сталь TRIP (Usiphase T 800), сталь многофазной структуры (Usiphase M 1000), а также стали мартенситной структуры, которые были термически обработаны в процессе штамповки (Усибор 1500).

Необходимость в повышении долговечности автомобилей также лежит в основе разработок листовых сталей с покрытием, предназначенных для значительного улучшения коррозионной стойкости. Покрытия металлические, иногда с добавлением тонкого органического покрытия. Сталь горячего цинкования (чистый цинк) является наиболее известным продуктом (Extragal), который может подвергаться обработке сплавлением (Galvallia) в целях улучшения его пригодности для точечной сварки. Для повышения коррозионной стойкости используется сталь, оцинкованная цинкоалюминиевым сплавом (Galfan).

Также используется электроцинковое покрытие (Usicar) с возможностью добавления тонкого органического покрытия (Usiplex). В Европе десять лет с 1990 по 2000 год ознаменовались ростом доли листовой стали с покрытием, используемой в автомобильной промышленности, с 39% до 84%.

Тонколистовая сталь - продукт постоянного развития. Достаточно знать, в качестве признака этого, что пять лет назад 50% продаваемой сегодня стали не существовало.

Эти разработки имеют важные последствия для функций стали и, в частности, ее соединение сваркой.

Данные вопросы обсуждаются в следующих разделах, которые освещают основные способы сварки, используемые для тонких листов:

- точечная сварка,
- шовная сварка,
- лазерная сварка,
- сварка порошковыми проволоками.

8.1. Точечная сварка

8.1.1. Принцип сварки

Точечная сварка относится к семейству контактной сварки, наряду с шовной сваркой, рельефной сваркой, или стыковым соединением. Она используется для скрепления двух (или более) листов, толщина которых обычно составляет от 0,5 до 10 мм. Обратите внимание, что эти два листа могут иметь разные характеристики (состав, покрытие) и не обязательно иметь одинаковую толщину.

Исторически сложилось, что именно Томсон в 1877 году задумал собрать два стальных листа, используя в качестве нагревателя эффект сильного электрического тока, проходящего через скрепление. На Рис. 8.1 показан принцип точечной сварки: два листа зажаты между двумя электродами для поддержания контакта. Затем через эту соединение пропускают сильный ток, который создает расплавленное ядро сварной точки в точке контакта листа с листом. При охлаждении это расплавленное ядро сварной точки соединит вместе два листа на месте.

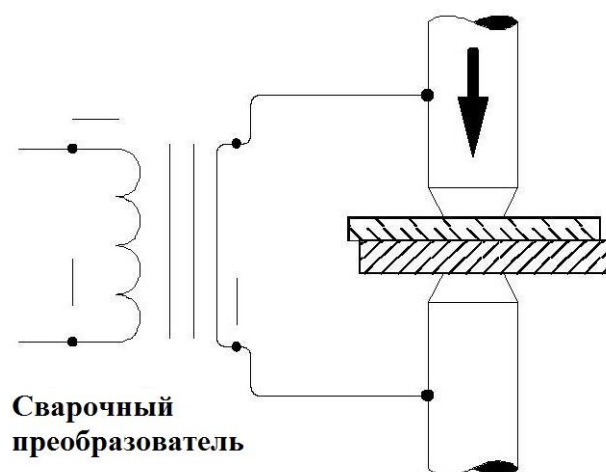


Рисунок 8.1. Принцип точечной сварки

Для того, чтобы иметь четкое представление об условиях сварки, важно учитывать следующие параметры:

- сварочный ток: кА, каждый В,
- усилие зажима: кН,
- продолжительность цикла: одна секунда.

8.1.2. Испытания свариваемости при точечной сварке

Под понятием свариваемости листа мы понимаем здесь изучение его пригодности для точечной сварки. Во Франции при рассмотрении вопроса об испытаниях на соответствие требованиям листовой стали для автомобильного производства, эти исследования обычно проводятся в соответствии с методом, рекомендованным стандартом NF A 87-001 [NOR 94]. Это вопрос определения для данного листа его *области свариваемости* и *стойкость электрода*, используемого для его сварки.

С точки зрения механической прочности, в обоих случаях критерием качества точечной сварки является *диаметр ядра сварной точки*. Определение термина *ядро сварной точки*, данное в стандарте NF A 87-001, следующее: «*Наклейка, остающаяся на одном или другом листе после разрушающего испытания точечной сварки*».

Согласно исследованию, это разрушающее испытание проводится разными путями. Однако во всех случаях важно отметить, что разрушающее испытание неизбежно не ставит под сомнение точечный сварной шов (разрыв в соединяющейся плоскости, *разрыв* сварной точки и т. д.).

Минимальный и максимальный диаметры сварного шва затем измеряются с помощью штангенциркуля. Критерий приемлемости относится как к минимальному диаметру (более 3 мм для толщины листа менее 1,5 мм и более 5 мм для более толстых листов), так и к среднему значению обоих (более 4 мм для толщины листа менее 1,5 мм и более, чем 6 мм для более толстых листов).

8.1.2.1. Область свариваемости

Образцы для испытаний, используемые для этого типа исследований, представляют собой образцы на растяжение крестообразной формы (см. следующий раздел).

Стандарт NF A 87-001 определяет область свариваемости как «*диапазон эффективного значения силы сварочного тока, позволяющий получить точечную сварку с пределом текучести, удовлетворяющим критериям, определенным ранее*».

Следует иметь в виду, что диаметр пятна и, поэтому механическая прочность варьируются в зависимости от эффективного значения тока. Если оно слишком слабое, точка слишком маленькая; если оно слишком высокое, то происходит выброс расплавленного металла. Это схематично показано на Рис. 8.2.

Под областью свариваемости мы понимаем интервал $\{I_{\min}, I_{\max}\}$, где $I_{\min}$ - наименьший ток, дающий приемлемый диаметр, а $I_{\max}$ - наибольший ток, не вызывающий выброса.

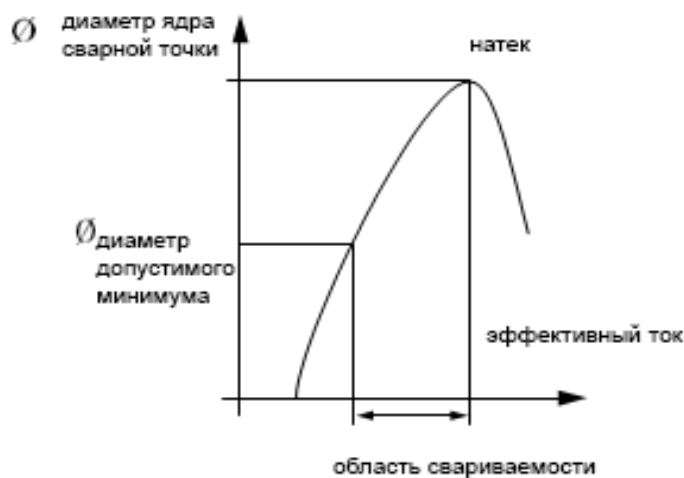


Рисунок 8.2. Качественное изменение диаметра сварного шва в соответствии с эффективной силой тока

Растегивание

Для измерения диаметра точечной сварки, соответствующий данному току, два образца сваривают вместе в конфигурации, показанной на Рис. 8.3. Они поддерживаются в этом положении до и во время сварки зажимным приспособлением. После сварки растегивание выполняется путем приложения двух противодействующих сил, целью которых является разделение двух частей (см. Рис. 8.3).

Применяемое тяговое усилие с течением времени увеличивается до разрыва сварного шва. Затем оператор отмечает, что настолько, насколько выступает кнопка на одном из двух листов, минимальный и максимальный диаметры, а также сила в деканьютонах, при которой скрепление не удалось [NOR 94].

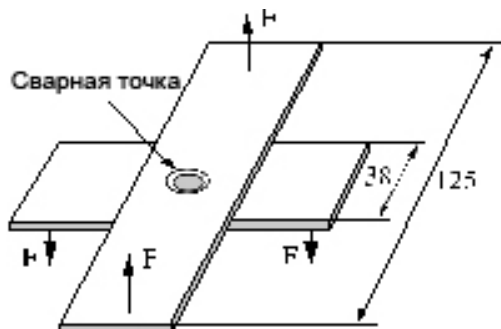


Рисунок 8.3. Крестовидные образцы для испытаний на растяжение

8.1.2.2. Стойкость электрода

Это испытание предназначено для оценки количества точечных сварных швов хорошего качества, которые могут быть выполнены с помощью набора электродов при сохранении тех же условий сварки.

Для этого используются новые, но приработанные электроды, и листы, называемые *износными полосами*, свариваются на верхнем краю области свариваемости. Учитывая *заранее* рассчитанную стойкость электрода, каждые 200, 100 или 50 точек изготавливают контрольную полосу из 10 точек для механических испытаний. В соответствии с диаметром пятна, полученным на этом контрольном диапазоне, оператор решает либо продолжить испытание, сохранив тот же эффективное значение тока, либо выполнить *сброс* этого тока. Действительно, если сварные точки больше не соответствуют стандарту качества, что связано с износом электрода, то износ, который обычно происходит с увеличением площади их активной поверхности (износ электрода напрямую влияет на область свариваемости изделия: он смещается к вершине и имеет тенденцию уменьшаться). Одним из способов лечения этого снижения тока является увеличение эффективного тока. Эта операция называется *сбросом*.

При выполнении сброса новое действующее значение тока соответствует новому верхнему пределу области свариваемости. Таким образом, необходимо снова определить максимальный ток без натека изношенными электродами.

Испытание будет остановлено по инициативе оператора, если, по его оценке, процентное увеличение тока слишком велико, а число швов сварного соединения на участок прерывистого шва слишком мало, или наглядно качество точки сварки является неприемлемым.

Измерение точечного диаметра

Для контроля качества сварки контрольной полосы используется устройство, которое одновременно снимает 10 точечных сварных швов [NOR 94]. Это устройство, более известное как «челюсти», схематично показано на рисунке 8.4.

Исходя из соображений симметрии, диаметры двух приварных концов не считаются важными.

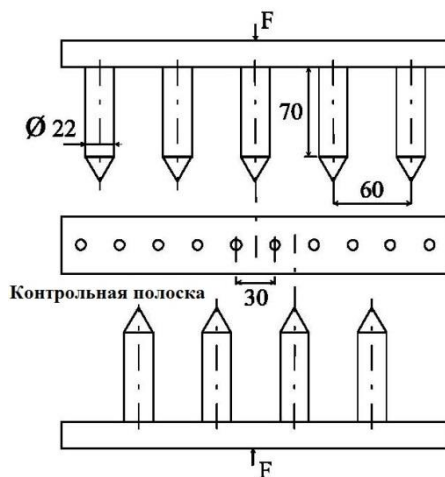


Рисунок 8.4. Устройство для одновременной разборки десяти точечных сварных швов

8.1.3. Свариваемость при точечной сварке тонких стальных листов

В этом разделе мы рассмотрим свариваемость различных семейств тонких стальных листов:

- стальной лист с металлическим покрытием,
- стальной лист с органическим покрытием,
- высокопрочный стальной лист.

Что касается части, посвященной свариваемости тонколистовой стали с металлическим покрытием, новый свет проливается на преимущество сварки этих изделий с использованием источника постоянного тока промежуточной частоты.

Стандарт NF A 87-001 учитывает только два параметра листа при рекомендации условий сварки: толщина и предел прочности при растяжении. Кроме того, число поверхностей с покрытием на границе раздела листов, а также толщина покрытия (выше, ниже или равного 10 мкм) также учитываются независимо от их состава.

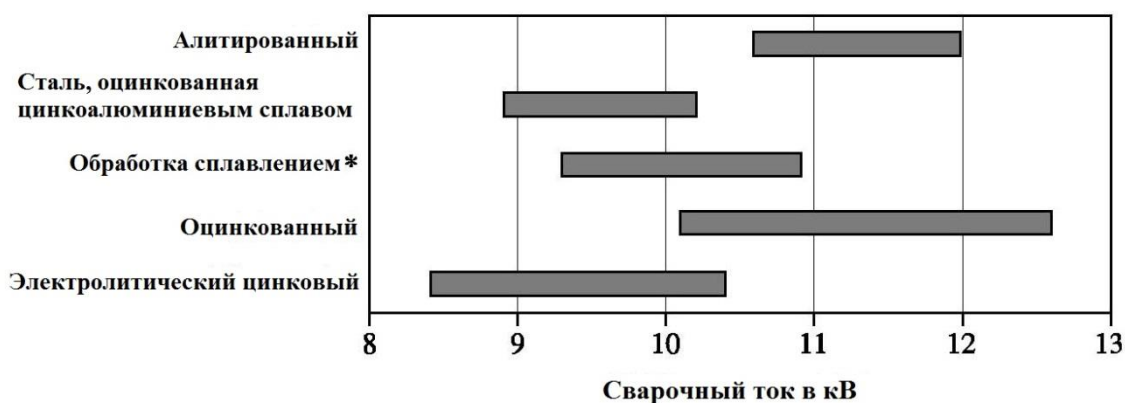
8.1.3.1. Стальные листы с металлическим покрытием

Мы найдем в разделах, которые следуют указаниям по результатам сварочных характеристик для нескольких изделий с металлическим покрытием, доступных в настоящее время на рынке. Стоит отметить, что подавляющее большинство этих покрытий имеют оцинкованное, гальваническое, электро-цинковое или железоцинковое покрытие.

Что происходит при замене чистого продукта на продукт с цинковым покрытием? Что касается параметров сварки, если усилие остается неизменным, необходимо увеличить время сварки на интервал для каждого слоя цинкового покрытия. Данное возрастание необходимо, потому что оно обеспечивает удаление цинка. Область свариваемости на оцинкованном листе смещается в сторону сильного тока, и он уменьшается. Срок службы электрода уменьшается.

Действительно, срок службы сокращается с нескольких тысяч точечных сварных швов с таким же набором электродов до нескольких сотен сварных швов. Механизмы разрушения электродов изменяются, тогда как на неотделанном листе происходит только механическое разрушение, на листах с покрытием происходят химические взаимодействия, которые быстро сокращают срок службы электрода.

Что касается цинковых, оцинкованных или электролитических цинковых покрытий, результаты лабораторных анализов и опыт, регулярно передаваемый промышленниками (в частности, производителями автомобилей, которые имеют показательную выборку), показывают, что электролитический цинковый лист обеспечивает более длительный срок службы электрода, чем оцинкованный. Может оказаться неожиданным, но объяснение, скорее всего, можно найти в структуре цинкового покрытия горячего нанесения: оно имеет очень тонкий слой поверхностного сплава Fe_2Al_5 на поверхности листа/покрытия. Этот сплав препятствует диффузии железа/цинка и, таким образом, предотвращает диффузию железной подложки в цинковом покрытии, что обеспечивает доступ к жидкому цинку дольше, чем в случае электролитического цинкового покрытия, который не имеет этого ингибирующего слоя. Время взаимодействия между жидким цинком и медью электрода увеличивается в случае оцинкованного листа, деградация электрода увеличивается, что приводит к увеличению стойкости электрода на электролитическом цинке, чем на цинке, имеющим гальваническое покрытие.



*Обработка сплавлением - Обработанный сплавлением

Рисунок 8.5. Области свариваемости на листах с металлическим покрытием

На Рис. 8.5 показаны примеры областей свариваемости, применимых к основным изделиям с металлическим покрытием. Следует отметить, что значения на графике соответствуют отдельному тесту и не могут рассматриваться как окончательные результаты.

Следует отметить, что наличие металлического покрытия не влияет на механическое сопротивление сварной точки. Результаты о стойкости электрода показаны на Рис. 8.6. Как и на Рис. 8.5, результаты, представленные ниже, представляют собой результаты отдельного теста.

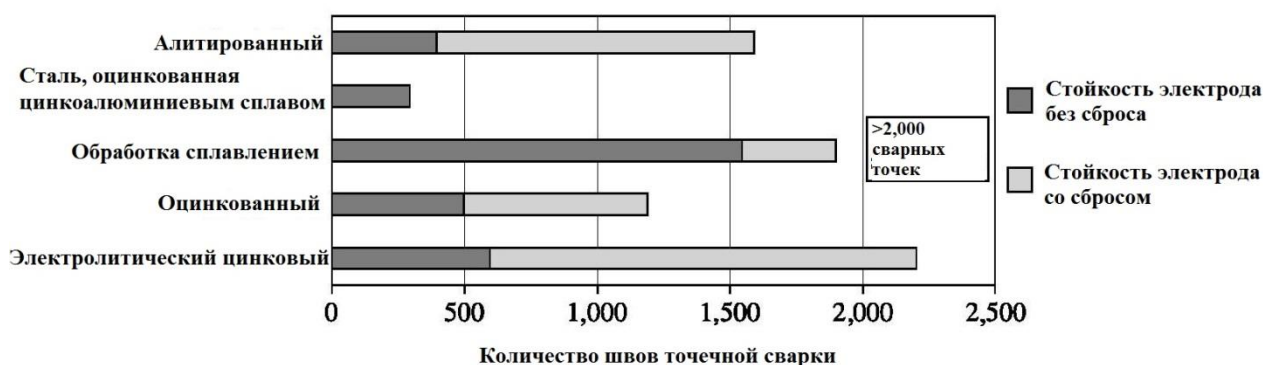


Рисунок 8.6. Стойкость электрода на листах с металлическим покрытием

8.1.3.2. Точечная сварка с помощью прямого тока (DC)

Генератор постоянного тока имеет преимущество в *эффективности*, поскольку для получения того же эффективного тока генератор переменного тока должен обеспечивать более высокие мгновенные значения тока.

Традиционные генераторы постоянного тока (такие как выпрямленная шестифазная) довольно дороги, поэтому была разработана альтернативная технология. Эти генераторы, известные под термином «средняя частота», поскольку они прерывают сигнал на частотах около 1000 Гц, имеют цену где-то между традиционными генераторами переменного тока и генератором постоянного тока.



Рисунок 8.7. Волновые диаграммы традиционного постоянного и среднечастотного выпрямленного переменного тока

С точки зрения свариваемости выдвигаются следующие преимущества.

Электрическая энергия, обеспечиваемая постоянным током, больше, чем у переменного тока, что позволило бы сваривать быстрее или при более низких уровнях тока, что, безусловно, выгодно [WES 93].

Наибольшая непрерывность в применении электрической энергии полезна для разработки расплавленного ядра сварной точки, например, благодаря предотвращению досрочного выброса из-за пиков тока, характерных для сигналов переменного тока [BOS 92].

Электротермический эффект Пельтье между листом и электродом (выработка или поглощение тепла в дополнение к эффекту Джоуля вследствие прохождения электрического тока на стыке), суммарный эффект которого отменяется в переменном токе, снова становится значительным в постоянном токе и может привести к возможности сваривать

диссимметричные крепления с большей легкостью при условии поляризации тока в правильном направлении. Тот же эффект может быть источником ассиметричного износа электрода [DRO 93].

Для точечной сварки оцинкованного листа переход на постоянный ток представляется выгодным и достигается за счет расширения полей свариваемости и явного улучшения стойкости электрода (см. Рис. 8.8 и 8.9).

Однако в зависимости от природы покрытия эти эффекты очень разные. Кроме того, определенное количество механизмов еще предстоит понять, прежде чем мы полностью освоим точечную сварку с использованием постоянного тока [DUP 00].

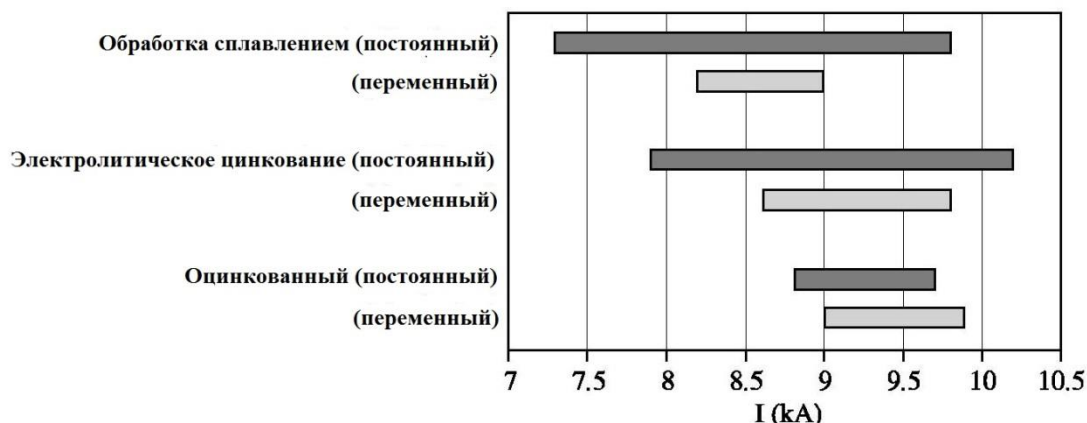


Рисунок 8.8. Положение областей свариваемости

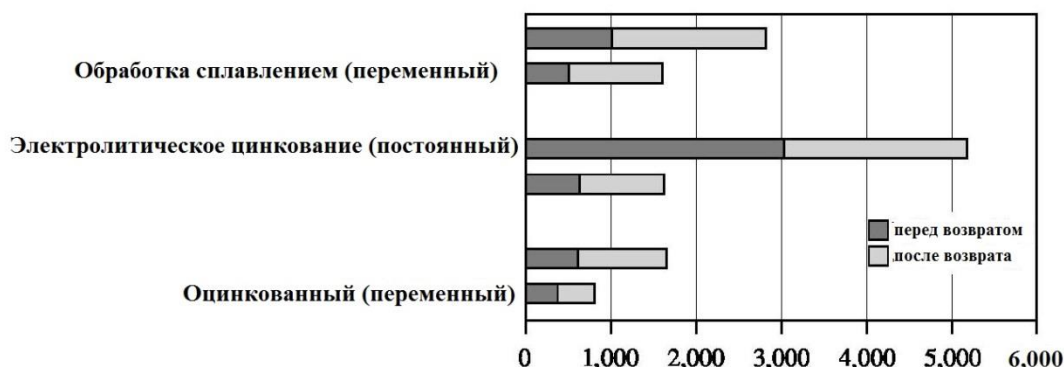


Рисунок 8.9. Стойкость электрода

8.1.3.3. Листовая сталь с органическим покрытием

Наличие органического покрытия приносит с собой специфические явления. Разрушение покрытия обычно сопровождается выделением запаха и, в некоторых случаях, возникновением резкого щелкающего звука, иногда связанного с искрой (пробой). Наблюдается нарушение сварочных сигналов в начале прохождения тока. Это связано со скачком напряжения и падением тока по сравнению с обычными рабочими показателями.

На механическую прочность точечных сварных швов не влияет наличие органического покрытия. С другой стороны, это приводит к увеличению *общего статического сопротивления* в 10 000 раз.

Что касается двусторонних продуктов, обычно присутствие органического покрытия приводило к сдвигу (от 2 до 3 кА) в сторону более низких порогов тока в области свариваемости. Добавление ТОС (*тонкого органического покрытия*) оказывает нейтральное или отрицательное влияние на ширину области свариваемости (см. Рис. 8.10).

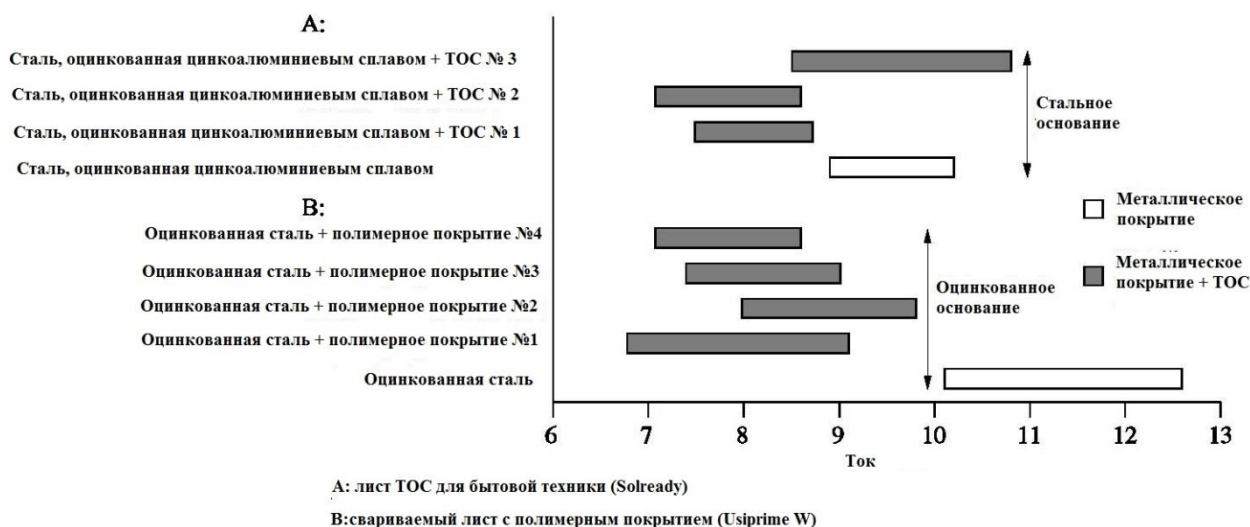


Рисунок 8.10. Сравнение полей свариваемости для изделий с органическим покрытием

Оптимизация покрытия позволяет получить заметное улучшение срока службы электродов по сравнению с тем, которое получают электроды с металлическими покрытиями. Однако с неоптимизированным покрытием срок службы электрода может быть значительно уменьшен.

8.1.3.4. Сверхвысокопрочные стали

Новые сверхвысокопрочные стали были разработаны для удовлетворения потребностей автомобильной промышленности с учетом безопасности, способности к деформации и снижения веса. Кроме того, должна иметься возможность скрепления этих сталей методами, обычно используемыми при производстве неотделанных каркасов кузова.

Ввиду своей прочности, простоты использования и низких затрат контактная сварка остается предпочтительным методом скрепления сверхвысокопрочной листовой стали для применений в конструкциях и опорах.

Одновременно существует несколько металлургических методов, в целях удовлетворения общих требований очень высокой прочности и улучшенной штампуемости, требуя аналитической адаптации и термомеханического *процесса*.

Наряду с традиционными металлургическими методами, такими как стали с дисперсоидами и бейнитные стали для горячих листов, одной из наиболее интересных разработок стали двухфазные стали: получение мартенситных областей в ферритной матрице (в пропорции от 5% до 20%), позволяя достичь превосходного компромисса между очень высокой механической прочностью и улучшенной формованием.

Типичным представителем двухфазного диапазона является Usiprime D 600: для этого

класса цель состоит в том, чтобы достичь минимальной прочности на растяжение 600 МПа при минимальном удлинении 20%. Можно обратиться к [BAV 99], чтобы найти дополнительную информацию о двухфазных сталях.

Свариваемость при точечной сварке Usiphasе D 600 исследовали на оцинкованном листе без покрытия, а также на оцинкованном листе с легированной обработкой (или Galvallia). Его пригодность для точечной сварки была засчитана при однородном совмещении в соответствии с параметрами сварки, описанными в стандарте NFA 87-001.

В таблице 8.1 следует обратиться к сводке протоколов и результатов испытаний для сваривания в нескольких форматах, толщинах и покрытиях, характерных для допустимого диапазона.

Таблица 8.1. Характеристики свариваемости при точечной сварке Usiphasе D 600

Состояние	Толщ. (мм)	Сила (даН)	Время сварки (пер.)	Время зажима (пер.)	Ток мин. (кА)	Ток Макс. (кА)	Область сварки (кА)	Стойкость электрода (до/ после сброса)
Без покрытия	1.2	400	14	14	7.1	8.6	1.5	Нд
Gz*	1.45	450	3* (9+2)	20	8.8	11.2	2.4	600/1,200
Ga**	1.5	450	3* (9+2)	20	8.4	11	2.6	1,800 (Нд)

* Gz: оцинкованный ** Ga: Galvallia = оцинкованный с легированной обработкой (отоженный) Нд: не определено

Результаты показывают хорошую свариваемость однородных сборных деталей со стандартными параметрами независимо от покрытий (оцинкованные и обработанные сплавлением). Во всех случаях области свариваемости выше 1,5 кА, что составляет общепринятое минимальное значение.

Стойкость электродов в сборных частях с использованием листа с покрытием Usiphasе D 600 удовлетворяет требованиям и не отличается по порядку величины от общепринятых значений, учитываемых для покрытий, нанесенных на подложки, в отличие от Usiphasе D 600. Более широкий анализ всех форматов показал, что срок службы электродов до сброса для оцинкованных листов и листов Galvallia Usiphasе D 600 варьировался в диапазоне от 600 до 1000 и от 1800 до 2400 сварных швов соответственно.

Характерным явлением, которое может возникнуть при точечной сварке высокопрочных сталей, является разрыв сварного шва при частичном расстегивании или на соединяющейся плоскости под воздействием стопроцентно растягивающих сил.

Данные заданные режимы разрыва отличаются от тех, которые получаются на сверхмягких сталях (разрыв при расстегивании). Они могут затруднять применение испытаний стандартных образцов, основанных на полном расстегивании для определения свариваемости изделий. В более общем смысле, эти конкретные режимы разрушения являются источником большой путаницы относительно их происхождения и их возможных последствий касательно механической прочности точечного сварного шва.

Происхождение этих конкретных разрывов происходит от сварных швов с очень высоким

содержанием твердых фаз: например, из-за чувствительности к термообработке точечные швы двухфазных сталей, в основном, состоят из мартенсита. Близость этих твердых ядер и дна выемки к листу/поверхности листа вызывает сильную концентрацию напряжений в сердечнике с очень низкой деформируемостью и разрыв при растяжении вдоль соединяющимися плоскостями.

Было установлено, что можно избежать проблем разрыва поверхности раздела и частичных разрывов и вернуться к нормальному расстегиванию путем увеличения времени и силы сварки. Получение более усиленной сварной точки дистанцирует дно надреза и мартенситное ядро и, таким образом, снижает концентрацию напряжения в ядре [FER 97].

Одновременное увеличение усилия и периода сварки приводит к отсутствию разрывов в соединяющейся плоскости за счет увеличения расстояния между дном надреза и ядра сварных точек.

Кроме того, анализ значений разрывной разрушающей нагрузки соединений, сваренных в Usiphasе D 600 Galvalla толщиной 2 мм в соответствии с двумя условиями (стандартные и временные параметры), показывает, что возникновение поверхностных или частичных разрывов не оказывает заметного влияния на механическую прочность точечной сварки. Увеличение нагрузки сваривания и времени сварки предотвращает разрыв на поверхности раздела (сварные швы с нулевым диаметром пятна) и ограничивает разброс прочности на разрыв на более низком уровне (см. Рис. 8.11).

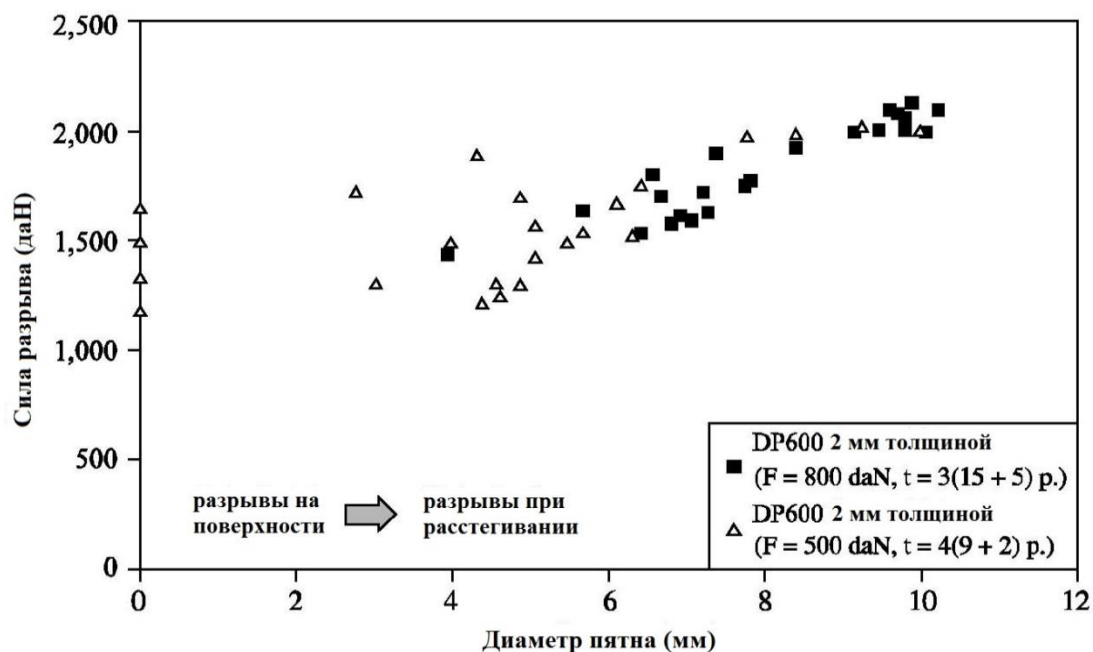


Рисунок 8.11. Образование нагрузки на растяжение в зависимости от диаметра пятна 2 мм толщиной для Usiphasе D 600 Galvalla

8.2. Шовная сварка

Шовная сварка - это процесс контактной сварки, обеспечивающий непрерывное сварное соединение между двумя стальными листами. Это сварное соединение получается после наложения листов путем прокатки с трением на их внешних поверхностях два медных электрода, соединенных с генератором напряжения. Эффект Джоуля, возникающий на

границе раздела листов, в сочетании с их смещением относительно электродов позволяет добиться непрерывной сварки.

Этот процесс, в соответствии с приложениями, представляет некие разновидности, принадлежащими к типам сварки продольным швом.

8.2.1. Роликовая сварка с раздавливанием кромок

Когда требуется непрерывное сварное соединение между двумя листами, чтобы сплюснуть вместе их поверхности, точечная сварка вкрест с раздавливанием – это используемая техника. Металлургическая промышленность постоянно использует этот процесс в начале процесса непрерывного отжига, электролитического цинкового покрытия, оцинковки, облужения или контроля. Это позволяет соединять катушки, что обусловлено непрерывностью производства. В автомобильной промышленности этот режим сварки используется для изготовления композитных заготовок, предназначенных для прессования за одну операцию. В автомобильной промышленности этот режим сварки используется для изготовления композитных заготовок, предназначенных для прессования за одну операцию. Используя этот процесс, производитель автомобилей стремится достичь двойных целей: сократить производственные затраты путем устранения лишних этапов и поддерживать постоянный привод относительно снижения веса автомобиля (нужной толщины в нужном месте).

На данный момент скрепление двух кромок с помощью точечной сварки с раздавливанием является только прямолинейным способом сварки. Таким образом, необходимо подготовить края склеивания, срезая их. Для этой операции достаточно простых ножниц в мастерской. Полученные таким образом края затем слегка перекрывают по всей своей длине. Поддержание постоянного перекрытия является основным требованием на этом этапе. Рис. 8.12 схематично показывает этот способ сварки.

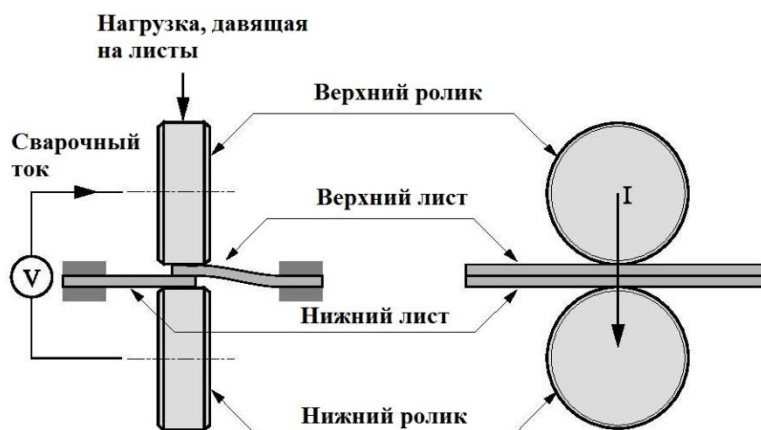


Рисунок 8.12. Роликовая сварка с раздавливанием кромок

После фиксации листов в этом положении, их надо плотно зажать вместе. Затем процесс сварки заключается в наматывании пары электродов (роликов) на поверхности внахлестку. Разница потенциалов между этими электродами вырабатывает сильный ток (несколько килоампер), который создает эффект Джоуля между соприкасающимися листами. Сжимающее усилие, которое прикладывается между электродами, сокращает объем стали между ними.

Таким образом, сварочная полоса сформирована в несколько миллиметров в ширину и

имеет меньшую толщину, чем сумма двух листов (см. Рис. 8.13).



Рисунок 8.13. Поперечное сечение сварного шва

8.2.2. Сварка шва внахлестку

Сварное соединение внахлестку между двумя листами достигается при помощи роликовой шовной сварки. Данный процесс сварки применяется в автомобильной промышленности при сборке топливных баков. Сегодня обычно используются два варианта этого процесса:

- сварка широким швом внахлестку;
- сварка узким швом внахлестку.

Эти два режима шовной сварки отличаются только профилем используемых роликов.

Рисунок 8.14 схематично показывает способ режима сварки широким швом внахлестку.

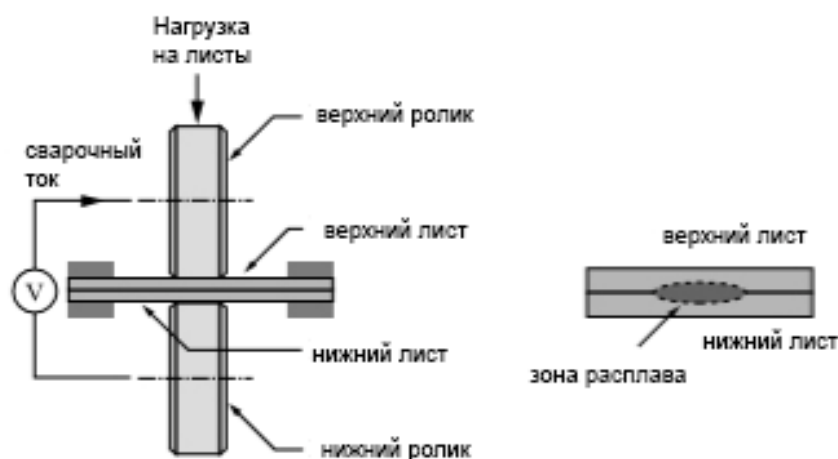


Рисунок 8.14. Сварка широким нахлесточным швом

Профиль ролика плоский, поэтому распределение сварочного усилия равномерное. Сварка узким нахлесточным швом приводит в действие ролики с определенным несимметричным профилем (см. Рис. 8.15).

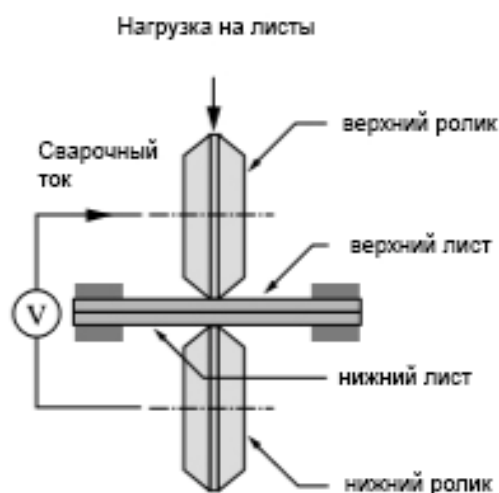


Рисунок 8.15. Сварка узким нахлесточным швом

Параметры, определяющие эти два режима сварки, это:

- сварочный ток,
- сварочное усилие,
- скорость сварки.

В отличие от точечной сварки вкрест с раздавливанием, можно добиться криволинейных сварных швов, используя этот способ наложения.

8.2.3. Примеры применения, исследуемые или выполняемые клиентами

Для таких применений, как цистерны, радиаторы, котлы и резервуары, воздухо- или водонепроницаемость сварного шва зависит от непрерывности расплавленных сердечников. Это можно легко оценить в лаборатории с помощью микрографических наблюдений (продольные разрезы) и визуального наблюдения за регулярностью поверхности сварного шва. Наконец, в промышленных условиях, испытания под давлением (гелий для бочек, вода под давлением - от 8 до 10 бар - для радиаторов и котлов, вакуум для резервуаров) осуществляется на производственной линии.

Для определенного применения, известного как продольная сварка, встречаются два режима сварки: точечная сварка вкрест с раздавливанием и узкое сварное соединение внахлестку.

В случае с точечной сваркой вкрест с раздавливанием, сварочный ток обычно представляет собой однофазный немодулированный ток. Скорость сварки часто колеблется от 10 до 15 м/мин. Последовательное перекрытие листов в большинстве случаев обеспечивается устройством под названием *Z-образное железо*. Его значение обычно составляет от 1,5 до 2 мм.

В дополнение к проблемам механической регулировки (регулирование перекрытия), проблемы, обычно встречающиеся для этого применения, связаны с изменениями в виде стали и ее влиянием на качество в начале и в конце сварки (зоны под высокими нагрузками во время опрессовки), вдоль с контролем износа активных поверхностей роликов.

В случае сварного соединения внахлестку, перекрытие может достигать 4–6 мм в зависимости от толщины сварного шва, а скорость сварки составляет от 1 до 3 м/мин.

Для *резервуаров, изготовленных из алитированных листов*, проблема, с которой мы сталкиваемся, главным образом, связана с наличием пористости в зоне расплава. Их размер может быть таким, что сварной шов перестает быть полностью герметичным. Катастрофическое ухудшение активных поверхностей электродов зачастую требует механической обработки активных поверхностей. Иногда необходима оптимизация параметров сварки (усилие, скорость, ток и модуляция). Для этого применения водяное охлаждение поверхности сварного шва (на двух поверхностях раздела электрода и листа) позволяет минимизировать разрушение активных поверхностей роликов.

В случае применения в *радиаторах и котлах*, на сварку используемых продуктов, в основном, без покрытия, могут влиять изменения в видах стали или последующих процессах (периодический отжиг, непрерывный отжиг). Таким образом, шовные сварные швы, изготовленные для закрытия радиаторных панелей, могут быть областью дефектов компактности. При этом параметры сварки должны быть адаптированы. Увеличение сварочного усилия и применение наклонов нарастающего или падающего тока (*наклон или спад*), в принципе, достаточно для того, чтобы гарантировать удовлетворяющий требованиям сварной шов и отсутствие пористости.

8.3. Лазерная сварка тонких стальных листов

Лазерная сварка хорошо приспособлена для сварки без покрытий и листов с покрытием, что позволяет производить сварные швы с характеристиками, вызывающими особый интерес:

- ограниченное испарение покрытия, таким образом, лучшая защита гальваническими анодами от коррозии;
- узкие и проникающие валики (проникновение до 10 мм с источником CO₂ 5 кВт, ширина валика порядка 0,8-2,5 мм для листов толщиной до 3 мм);
- очень малая деформация и чистая сварка (что позволяет, например, сваривать готовые детали без какой-либо обработки);
- отличные механические характеристики, обеспечивающие отличные характеристики штамповки и сопротивления усталости;
- высокая точность сварки и очень высокая скорость.

Лазерная сварка, которая все чаще используется в автомобильной промышленности, в настоящее время считается надежным промышленным инструментом. В отдельных случаях ею стремятся заменять определенные так называемые *традиционные* режимы сварки. Таким образом, сваривание является одним из основных производственных процессов, в которых лазер нашел активную область применения. На Рисунке 8.16 показано, как используются несколько типов скрепления.

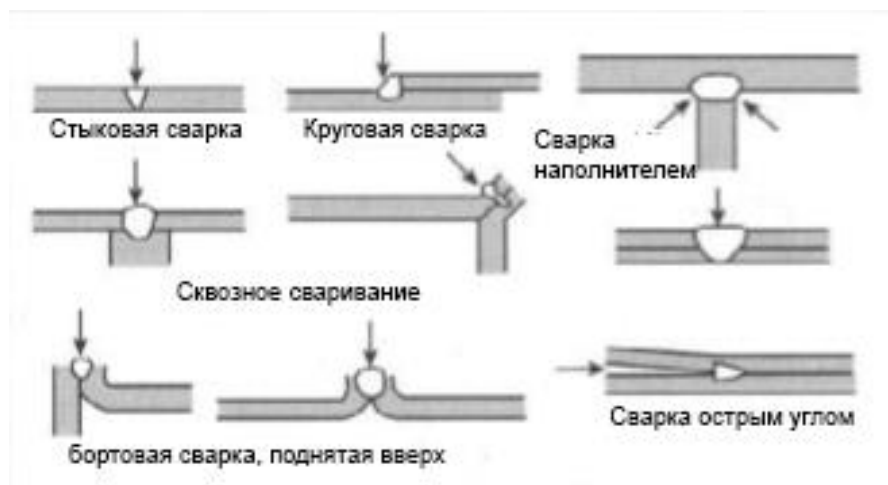


Рисунок 8.16. *Различные типы сборок при лазерной сварке*

В следующих разделах будут рассматриваться только два способа применения, стыковой шов и незаметная сварка (или сварное соединение внахлестку).

8.3.1. Принцип лазерной сварки сквозного проплавления [ВОІ92]

Начало: взаимодействие между лучом и материалом

Лазерная сварка "замочной скважиной" требует высокой плотности энергии, получаемой при работе в фокусном расстоянии оптической системы. Для плавления металла могут быть достигнуты достаточно высокие удельные мощности, примерно от 106 Вт/см^2 до 108 Вт/см^2 .

Луч лазера оптически реагирует с материалом, и степень его теплового взаимодействия с ним зависит от множества отражений, которые связаны с качеством и состоянием поверхности материала. При комнатной температуре и длине волны $10,6 \text{ мкм}$ отражательная способность материалов достигает не менее 90%. В точке плавления материал поглощает до 95% побочной энергии.

Сварка сквозного проплавления

Таким образом, луч, направляемый оптикой, фокусируется на обрабатываемой детали. С самого начала лазерный луч взаимодействует с материалом и нагревает его в целях создания сварочной ванны с последующим ее испарением. Как показано на рисунке 8.17, объем расплава постепенно увеличивается, а лазерный луч постепенно проникает в материю, образуя капиллярный канал или «замочную скважину».

После сварки видны три области, характеризующие сварку:

- зона расплава, ограниченная зоной сцепления,
- зона термического влияния,
- основной металл (не подвержен тепловому воздействию).

На Рис. 8.17 показаны поперечный и продольный разрезы сварного шва. Можно очень четко различить три области, указанные выше. Отогнутый край известен как *наплавленный валик*, и можно увидеть все области, которые играют роль в сварном шве: сварочная ванна, паровой капилляр в случае сварки "замочной скважиной" и околошовная зона.

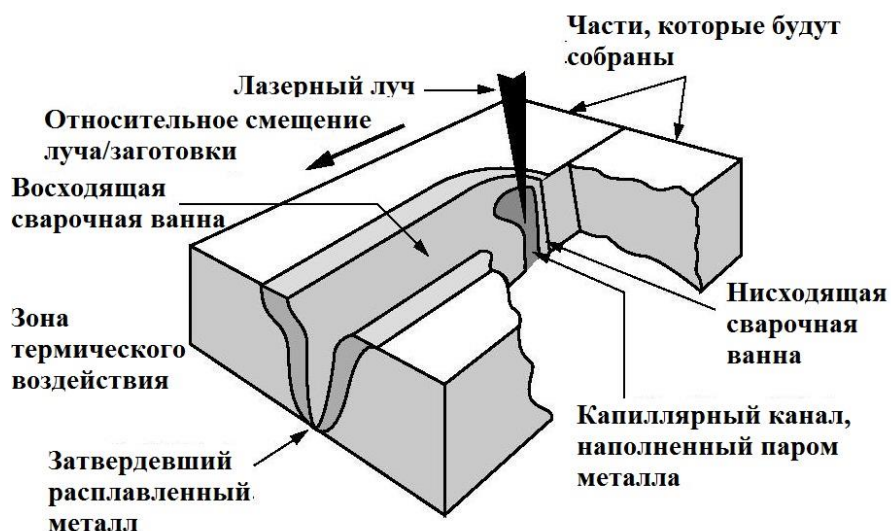


Рисунок 8.17. Поперечный и продольный разрезы сварного шва

Благодаря многокиловаттным CO_2 -лазерам, узкие и глубокие сварные швы на стальных деталях толщиной в несколько сантиметров достигаются без искажений. Эти сварные швы похожи на те, которые выполняются с электронными лучами. Преимущество лазера заключается, прежде всего, в высоких скоростях сварки в свободной атмосфере. Можно показать, что процесс начального проникновения зависит от мощности луча и поверхности свариваемого материала.

Появление и выдувание плазмы

Плазмообразование происходит во время сварки «замочной скважиной», что нежелательно, поскольку оно взаимодействует с лучом, и является существенным, поскольку оно сильно нагревает лист. Оно сформировано ионизацией паров металла и вспомогательного газа. Плазма может поглощать большую часть энергии фотонов (в некоторых случаях до 70%). Таким образом, он препятствует достижению хорошего проплавления, а его неустойчивый характер ограничивает скорость и вызывает дефекты. Таким образом, необходимо продуть или отклонять плазму, чтобы избежать поглощения луча. Этот выброс плазмы должен быть оптимизирован, поскольку он является источником дефектов, например, пористости. Диаметр трубы, направление выдувания и поток, а также высота выдувания должны тщательно контролироваться.

8.3.2. Стыковой шов

На Рис. 8.18 показаны различные явления, наблюдаемые при формировании лазерного сварного шва.

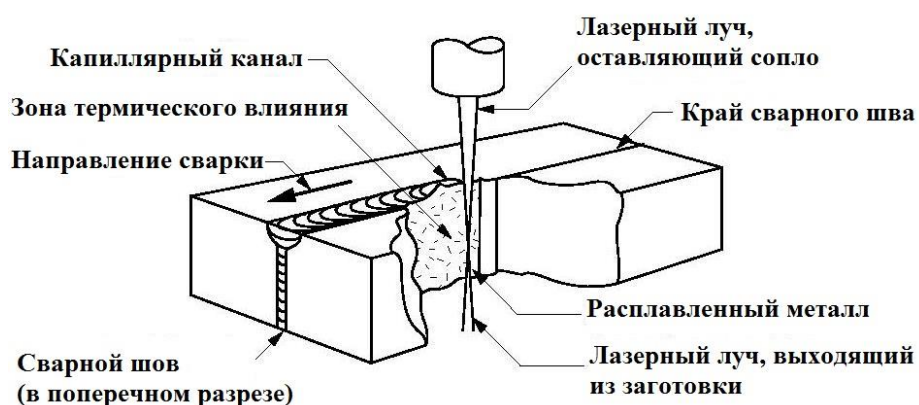


Рисунок 8.18. *Образование валика сварного шва*

Листы, подлежащие скреплению, размещаются край в край. Под сфокусированным лучом лазера образуется капилляр, который содержит газовую плазму и выстлан слоем расплавленного металла в динамической уравновешенности. Геометрия луча у выхода детали важна, поскольку она частично определяет профиль сварного шва.

При перемещении детали (или лазерного луча) в указанном направлении расплавленный металл перемещается спереди назад, под воздействием поверхностного натяжения и колебаний температуры. Затвердевание металла приводит к образованию сварного шва и приводит к появлению на поверхности шевронов, которые указывают на начало сварного шва.

Благодаря лазерному процессу достигаются высокие скорости охлаждения (от 100 до 400°C/с). На металлографическом уровне краткость взаимодействий создает микроструктуры с чрезвычайно мелкими, однородными зернами, содержащими мало примесей, и закаленные микроструктуры для сталей, содержащих легирующие элементы. Качество сварного шва в огромной степени зависит от баланса всех механизмов, участвующих в процессе. Любое нарушение этого баланса может вызвать дефект сварки.

8.3.2.1. *Влияние эксплуатационных параметров сварки*

Получение качественного сварного шва требует корректировки нескольких параметров, обеспечивающих его качество. Основные параметры - это:

- мощность лазера,
- скорость сварки,
- фокусирующая оптика,
- положение фокальной точки/поверхности листа,
- природа и давление замещающего газа,
- поляризация пучка.

8.3.2.2. *Ограничивающие условия в стыковом шве лазерного луча [VER99]*

При лазерной сварке двух листов, расположенных край в край, необходимо учитывать узость энергетического пучка, составляющего всего несколько сотен микрон в диаметре. Крайне важно, чтобы свариваемые кромки были как можно ближе. Это условие накладывает очень строгое ограничение на разрыв между двумя листами. Как правило, для листов толщиной менее 3 мм зазор между длинами свариваемых листов не должен превышать 10% от толщины при использовании CO₂-лазеров мощностью 6 кВт, доступных в настоящее время на рынке.

К этому начальному зазору, который носит чисто механический характер, необходимо добавить смещение листа в ходе проведения сварки из-за самого способа сварки. Быстрое охлаждение расплавленного металла приводит к появлению поля сжимающего напряжения, покрывающего само соединение, выше точки попадания лазера. Ниже точки попадания лазера, то есть в части, предназначенной для скрепления, это силовое поле раздвигает края, подлежащие сварке. Масштаб этого *термического отверстия* соединения больше 500 мм длины сварного шва делает способ сварки невозможным без сильного зажима листа, даже принимая во внимание безупречную подготовку кромок.

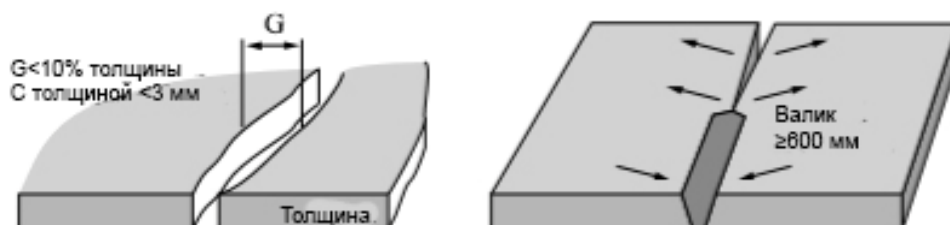


Рисунок 8.19. Разрыв между стальными листами: а) механический, б) термический

Другие ограничения связаны с расположением листов, подлежащих сварке, в горизонтальной плоскости, так что лазерный луч достигает линии соединения и не отклоняется от соединения. Как правило, допуск относительно положения фокального пятна по отношению к линии сварки соответствует 25% ширины зоны расплава, которая составляет около 0,1 мм. В целях соблюдения этого допуска в Y-расположении, новейшие сварочные аппараты оснащены сложными системами обнаружения стыков.

Многие решения были разработаны с учетом узости луча лазера для получения качественных сварных переходов. Ниже мы приведем наиболее широко используемые технические решения.

Эта точность между краями листа может быть достигнута путем точной резки с помощью прессы или лазерной резки перед сваркой. Эти решения, как правило, довольно дорогие.

Принцип технического решения, запатентованного и разработанного Usinor, заключается в том, чтобы удерживать края листа друг против друга с помощью давления, действующего в поперечном направлении в плоскости заготовки, перпендикулярной плоскости соединения. Эти силы, приложенные в поперечном направлении, удерживают края листа друг против друга и оказывают давление на края листов, что приводит к локальному уменьшению видимого зазора между листами. Таким образом, процесс сварки лазерным лучом облегчается, если начинать с листов, полученных традиционным резанием.

Использование бифокальной сварочной головки, двойного YAG-лазера или лазера смешанной сварки плюс плазменный позволяет повысить приемлемые допуски между свариваемыми листами. Это последнее решение может быть дополнением к двум другим, упомянутым выше.

8.3.2.3. Лазерная сварка сталей с очень высокими механическими свойствами

Типы стали с очень высокими механическими характеристиками представляют большой исследовательский интерес для автопроизводителя, который ищет лучший компромисс

между безопасностью и весом автомобиля. Однако свариваемость этих сталей ухудшается из-за повышенного химического состава этих сталей.

Кинетика охлаждения, присущая лазерной сварке, приведет к образованию твердой мартенситной структуры в зоне сварки высокопрочных сталей. Это ограничит штампуемость этих лазерных сварных соединений. На Рис. 8.20 приведена в качестве примера мартенситная микроструктура и результаты определения твердости по сварному шву, наблюдаемые на лазерном соединении, сваренном из 0,2% углеродистой стали.

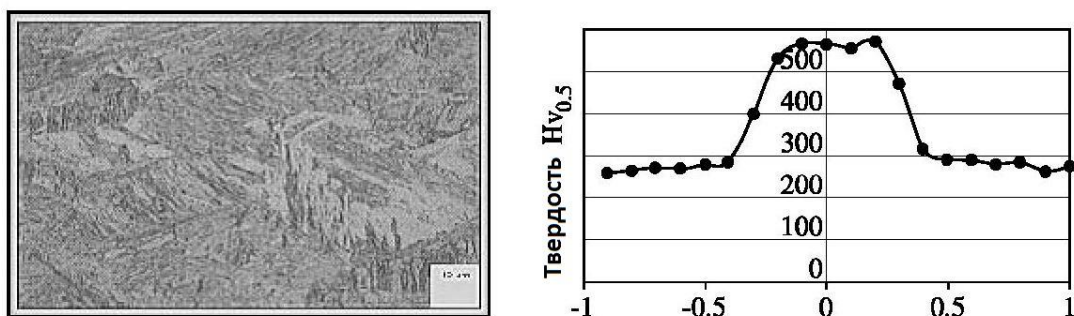


Рисунок 8.20. Микроструктура **наплавленного** металла и образование твердости, сталь с 0,2% С

Как показано на рисунке 8.21, механическая прочность (высота штамповки сварного разрывного соединения связана с высотой штамповки листа в его самой тонкой части: рассчитанный таким образом процент называется *эволюцией штампуемости по Эрихсену*) сварных швов, полученных лазером, зависит от среднего содержания углерода в двух собранных листах. При среднем содержании углерода более 0,17% минимальный показатель штампуемости по Эрихсену составляет 70%. Однако при неоднородной сварке (наиболее частом способе создания заготовок, сваренных встык с помощью лазера), добавление штампованного типа низкоуглеродистой стали к типам стали HS приведет к снижению среднего содержания углерода в зоне сварки и, таким образом, очень существенно повысит характеристики выдавливания сварного соединения (показатель штампуемости по Эрихсену для Usiphasе T800/XES: 85%).

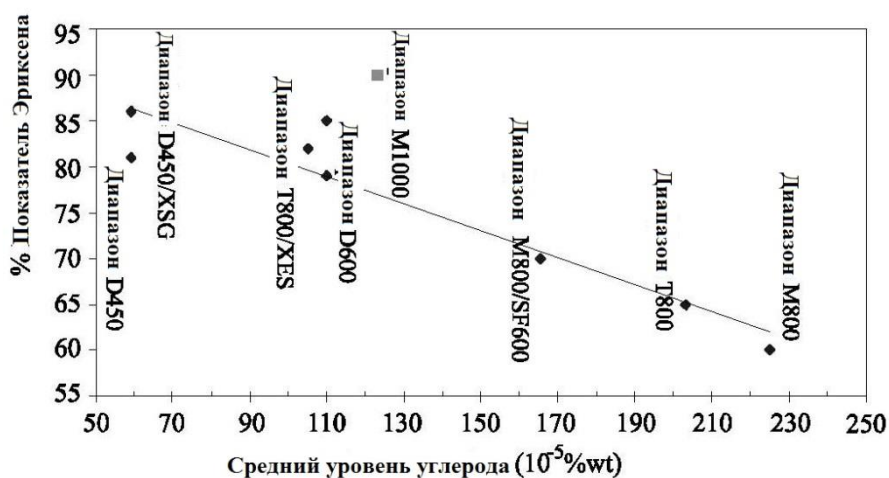


Рисунок 8.21. Эволюция штампуемости по Эрихсену со средним содержанием углерода в зоне расплава

8.3.2.4. Сварка сталей с покрытием

Свойства используемого материала (отражательная способность, плотность, теплопроводность, температура испарения, энергия ионизации) влияют на поглощение энергии лазером. Монохроматический свет, например, излучаемый лазером, более или менее поглощается материалами. Уровень поглощения также зависит от конкретной длины волны лазера ($\text{CO}_2 = 10,6 \text{ мкм}$ и $\text{Nd: YAG} = 1,06 \text{ мкм}$). Так, в частности, качество покрытия может изменять поверхностное поглощение энергии лазерного луча. Обычно говорят, что существует вариант взаимодействия лазер/материал. Это может привести к важным изменениям мощности лазера от 5% до 20% при комнатной температуре.

Это приведет к изменению приемлемых максимальных скоростей сварки или изменению допусков при расположении листа под лазером (более или менее проникаемое и широкое соединение в зависимости от мощности лазера).

К примеру, более матовый аспект покрытия Usiplex Zn 3000 (органическое покрытие) обеспечивает очень широкую область свариваемости по сравнению с тем же стальным узлом с электроцинковым покрытием. На Рис. 8.22 сравниваются области свариваемости оцинкованной сборки (10/10)/ Usiplex Zn и (10/10) электролитической цинковой сборки.

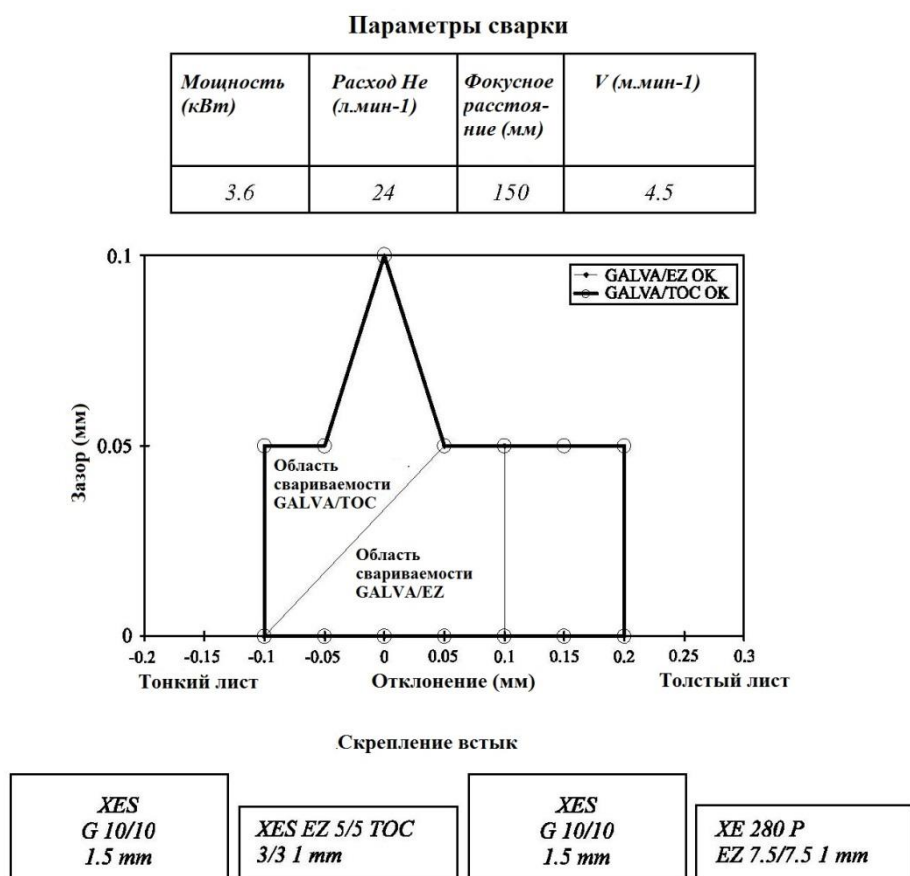


Рисунок 8.22. Область лазерной сварки (допустимый зазор между листами в зависимости от отклонения лазерного луча)

В более общем смысле следует напомнить, что лазерная сварка - это процесс сварки без контакта. Таким образом, нет никаких изменений в процессе сварки, вызванных покрытием

листа.

Кроме того, низкое испарение поверхностного слоя (от 0,8 до 2,5 мм) обеспечивает гальваническую защиту конструкцию от коррозии. Результаты коррозионных испытаний после обработки поверхности (фосфатирование) и окраски (катафорез) показывают, что швы, сваренные лазером, имеют те же коррозионные свойства, что и основной металл. И более того, в зоне контакта можно наблюдать протекторную защиту стального листа без покрытия под действием оцинкованного материала. Ширина зоны защиты составляет порядка 5 мм.

8.3.2.5. Лазерная сварка заготовок в автомобильной промышленности [VER 99]

Заготовка, сваренная лазером, представляет собой скрепление встык из двух или нескольких отдельных металлических деталей различной толщины, характеристик или поверхностей с помощью лазерной сварки. Эти заготовки предназначены для прессования, а затем сборки в автомобильном производстве, в частности, корпусов и дверей без покрытия.

Компонентами, изготовленными с использованием сварных заготовок, являются, например, элементы шасси, полы, внутренние брызговики крыла, двери, пороги и т.д. (см. Рис. 8.23).

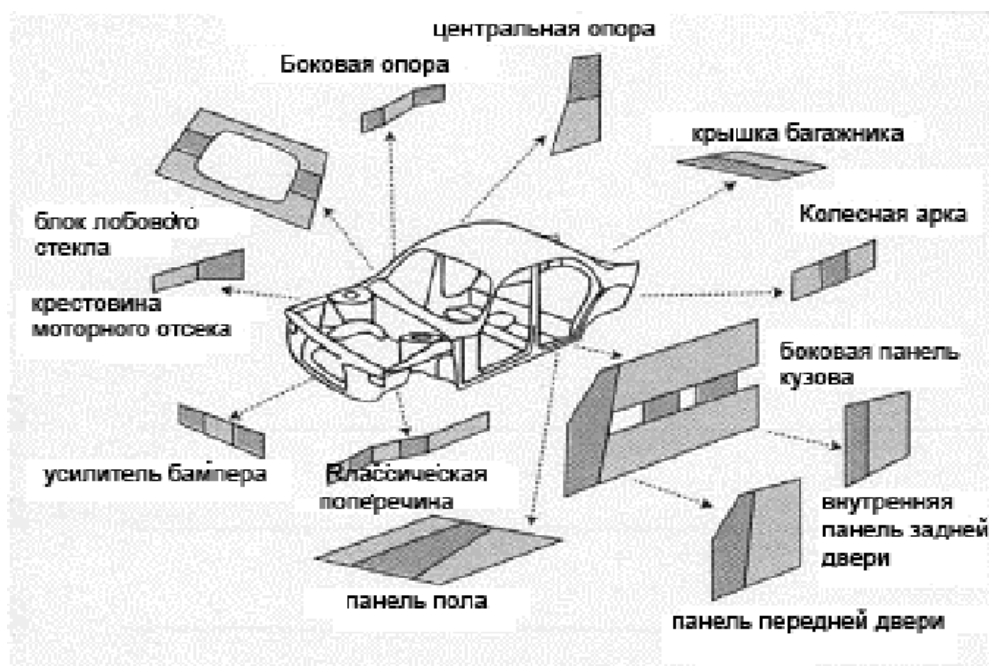


Рисунок 8.23. Примеры деталей из сварных заготовок

Первые промышленные заготовки были собраны методом роликовой шовной сварки. На протяжении последних лет разрабатывалась лазерная сварка, которая лучше подходит для листов с покрытием.

Основными преимуществами для производителей при использовании сварных заготовок являются следующие:

- уменьшение веса; сварная заготовка позволяет укладывать толстую сталь только там, где это строго необходимо. Возможна экономия веса от 20% до 40% в зависимости от типа компонента и используемой технологии (линейные или криволинейные сварные швы);
- повышение безопасности благодаря лучшей ударопрочности и лучшим динамическим свойствам массы компонента для веса. Использование заготовок, сваренных лазером, дает

возможность размещать зоны смятия для поглощения энергии в случае удара;

- повышение сопротивления усталости путем замены точечных сварных швов непрерывными сварными швами;
- уменьшение количества компонентов и, следовательно, сокращение способов и этапов производства, обеспечивающих повышение производительности при одновременном снижении капиталовложений и затрат на штамповку и формование металла;
- улучшение коррозионных характеристик транспортных средств за счет локальной оптимизации покрытия, а также за счет уменьшения количества армирующих элементов, что позволяет избежать подверженности коррозии элементов коробки. На самом деле следует отметить, что когда стремятся к снижению затрат, рентабельность сварных заготовок, как правило, обусловлена сокращением инвестиций в штамповочные инструменты и формование металла, и что она дополнительно увеличивается за счет экономии толщины, нанесения покрытий и множества других преимуществ.

Как правило, видно, что сварные заготовки позволяют придать требуемые свойства конкретной части компонента. Они позволяют снизить массу элементов, избегая лишней толщины там, где это не нужно, и повышают безопасность и долговечность благодаря оптимизированной ударной вязкости, усталостной прочности и коррозионным характеристикам.

8.3.3. Сварное соединение внахлестку

В автомобильной промышленности сварка внахлестку находится в стадии разработки. Он все больше используется для 3D-сварки корпусов кузова без покрытия. Это позволяет, помимо использования заготовок, сваренных лазером, повысить жесткость транспортного средства или облегчить конструкцию, что приводит к повышению безопасности и снижению веса транспортного средства. При этом, большинство сталей, используемых в производстве автомобилей, имеют цинковое покрытие для лучшей коррозионной стойкости.

Тем не менее, лазерная сварка внахлестку вызывает определенные проблемы. Действительно, температура испарения цинка (906°C) определено ниже, чем температура плавления стали (1540°C). Испарение цинка на границе раздела между листами включает в себя выдувание расплавленного металла, создание пористостей в расплавленном металле и загрязнение расплавленного металла цинком.

Хорошо известное решение, которое позволяет сварщикам избегать этой дегазации цинка в зоне сварки, заключается в создании зазора между листами перед сваркой. Эмпирическое решение, предложенное Akhter и соавторами [АКН 88] показывает, что необходимый зазор (g) между листами связан с толщиной листа (ep) и толщиной покрытия (r) по следующей формуле:

$$g = \frac{AVr}{\sqrt{ep}}$$

где V - скорость сварки, A - постоянная функция характеристик луча.

Обычно для листов толщиной от 0,8 мм до 3 мм зазор между листами составляет порядка от 0,1 мм до 0,2 мм.

Однако это решение не всегда легко реализовать на прессованных листах при 3D-сварке. Зазор между листами должен строго контролироваться. Важно добавить, что чрезмерное

расстояние между листами приведет к разрушению сварочной ванны и плохому качеству сварного шва. Кроме того, расстояние между листами приведет к снижению усталостной прочности скрепления. Например, зазор 0,2 мм между листами толщиной 1 мм приводит к снижению усталостной прочности примерно на 20%.

С учетом вышесказанного, для листов с кольцевым сварным швом без зазора разрабатываются новые *технологические решения* [BON 00, HON 00, XIE 99]. Различные авторы предлагают сварочные решения: бифокальная сварка, наклонная сварка или смешанная сварка (лазер + диод, лазер + плазма и т. д.). Все эти решения направлены на то, чтобы:

- предварительно нагреть листы, чтобы полностью или частично удалить покрытие между листами перед сваркой;
- ограничить взаимодействие лазерного луча со сварочной плазмой;
- увеличить поверхность расплавленного металла, чтобы облегчить удаление паров цинка;
- уменьшить скорость охлаждения, чтобы оставить время для распыления паров цинка.

Необходимо адаптировать технологические параметры от одного изделия к другому.

8.4. Дуговая сварка

В работе над сварными узлами значительную роль играют процессы дуговой сварки, в частности, газвольфрамовая сварка (*вольфрам в атмосфере инертного газа*), плазменная сварка и механизированная аргонодуговая сварка плавящимся электродом (*металлический активный газ*), процесс, наиболее часто встречающийся в промышленности. Поскольку описание и процедура этих процессов были подробно описаны в главе 1, мы опишем здесь только несколько правил, необходимых для достижения успешных сварных швов на тонких стальных листах.

Области применения тонких изделий, в основном, в общей промышленности, где мы находим производителей радиаторов, бытовых систем водоснабжения, кондиционирования воздуха, и, само собой, автомобильной промышленности.

Разработка изделия связана со сталью с высоким пределом текучести (HYS), с высоким сопротивлением (HR) и изделиями с покрытием цинком.

8.4.1. Дуговая сварка вольфрамовым электродом в среде инертного газа

Данный процесс сварки полностью адаптирован под очень тонкие изделия, что позволяет получать сварные швы высокого качества с низкой производительностью. Скорость сварки обычно составляет от 15 до 50 см/мин; при автоматической сварке возможны более высокие скорости [COL 94].

Для сварки стали всегда используется прямая полярность (отрицательный электрод) с аргоном в качестве защитного газа. Рекомендуемые соединения указаны в таблице 8.2.

Таблица 8.2. *Типы подготовки к дуговой сварке вольфрамовым электродом в среде инертного газа*

Толщина	Подготовка к дуговой сварке
0.5 - 2 мм	Без подготовки и без разрыва; без наполнителя
<5 мм	Фаска под углом 60 ° или отсутствие заготовки с зазором, равным половине ее толщины
>5 мм	Фаска 70° – зазор = 2.5 мм

Привариваемые края должны быть чистыми и обезжиренными. Для облегчения проникновения при толщине более 2 мм может быть использована медная опора.

Параметры сварки определяются качеством, составом и толщиной основного металла, подлежащего скреплению, и способом крепления. Параметры, указанные в Таблице 8.3, могут быть приняты в качестве первоначальных значений для подгонки механических устройств.

Таблица 8.3. *Параметры дуговой сварки вольфрамовым электродом в среде инертного газа*

Толщина (мм)	Электрод (мм)	Прут (мм)	Скорость сварки (см/мм)	Ток (А)
0.5	1.6	нет	15 - 25	15 - 30
1.0	1.6	0.8	30 - 50	45 - 60
1.5	1.6	1.2	50 - 60	70 - 100

В случае сварки без сварочного металла важно обратить внимание на основной металл. На самом деле, при этом типе сварки в создании соединения принимает участие только основной металл. На конвективные движения, которые воздействуют на расплавленный металл, влияют оставшиеся уничтожающие элементы, содержащиеся в сталях, в частности сера и алюминий. В целях обеспечения правильного демпфирования и проникновения расплавленного металла необходимо ограничить содержание серы до 0,015%, а алюминия - от 0,015 до 0,035%.

8.4.1. Дуговая сварка плавящимся электродом

Для тонких стальных изделий стандартная сварка MAG является наиболее распространенной технологической обработкой. Она идеально подходит для толщины, превышающей или равной 2 мм. Для более тонких материалов традиционную обработку MAG сложнее использовать; в этом случае импульсный режим позволяет получить удовлетворительную эксплуатационную свариваемость. Провод углеродно-марганцевого типа в соответствии со стандартом NF EN 440 для одинарного провода с допустимым добавлением легирующих элементов: молибдена, никеля и хрома, главным образом, для получения свойств механической прочности в расплавленном металле. Провод выбирается в соответствии с основным металлом и, главным образом, механическими свойствами, которые должен гарантировать сварной шов.

Защитный газ — это, прежде всего, смесь аргона и CO₂ с переменным содержанием от 2,5

до 20% для улучшенного переноса металла в дуге. Иные возможности бинарных смесей $\text{Ag} + \text{O}_2$ или тройного $\text{Ag} + \text{CO}_2 + \text{O}_2$ существуют для специальных областей применения, таких как вертикальный шов, накладываемый сверху вниз ($\text{Ag} + \text{O}_2$), дуговая сварка плавящимся электродом в импульсном режиме (состоящий из трех частей) или для соответствия качеству проволоки. Действительно, чистый CO_2 не позволяет переносить металл в дуге путем осевого распыления (или *распылительной дуги*); с другой стороны, это позволяет получить сварные швы с отличной слитостью (без пористости). На сегодняшний день разработка генераторов и ввод импульсных токов позволяли использовать только газовые смеси и снизить свариваемую толщину до нескольких десятых миллиметров, например, для панелей кузовного ремонта.

8.4.1.1. Типы перехода

При дуговой сварке плавящимся электродом, тип переноса металла в дуге зависит от напряжения, тока и используемых газов. Основными способами передачи являются следующие:

- короткое замыкание (*короткая дуга*),
- шаровидный или крупнокапельный (*свободный полет*),
- осевое распыление (*распылительная дуга*).



Рисунок 8.24. Типы переноса в дуговой сварке плавящимся электродом

Перенос металла путем короткого замыкания

Этот метод дополняется короткой дугой, слабым током и низким напряжением (ниже 20 В). Капля, образованная на конце провода, подходит близко к детали. Когда она касается его, то возникает короткое замыкание, которое благодаря эффекту электромагнитного самостягивания отсоединяет каплю от провода. Цикл начинается занова. Отделение капли порождает рельефы. Частота коротких замыканий составляет от 50 до 200 Гц.

Этот режим хорошо приспособлен для сварки тонких листов во всех положениях.

Перенос металла путем осевого распыления

Этот режим существует с длинной дугой, сильным током (выше 250 А/мм^2 поперечного сечения провода) и высоким напряжением (выше 20 В). Затем провод плавится в форме очень мелких капелек, спроецированных на деталь, без создания короткого замыкания, но с некоторыми рельефами. Этот режим нельзя использовать с чистым CO_2 .

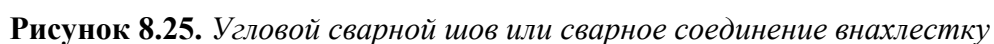
Обычно используется в плоском положении для толстых листов (более 6 мм).

Шаровидный перенос

Режимы переноса наполнителя в дуге находятся в прямой зависимости от электрических параметров, качества проволоки, ее химического состава и защитного газа. В случае сварки тонких листов перенос с помощью осевого распыления трудно использовать, принимая во внимание необходимую энергию, за исключением использования опор медных соединений, которые поддерживают ванну с расплавленным металлом.

Недавний прогресс в электронике источников питания позволил разработать генераторы, которые обеспечивают импульсные токи с высокой стабильностью, которые регулируются в диапазоне от 30 до 300 Гц и идеально подходят для толщины менее 2 мм; они дают возможность получить постоянный перенос путем осевого распыления в области очень тонких листов.

Продукты с покрытием, такие как Usicar и Extragal, требуют адаптированного процесса сварки [COL 94]. Сложность сварки изделий со сплошным цинковым покрытием заключается в различных точках испарения и плавления Zn, по сравнению со сталью. На рисунке 8.25 показано, что происходит в сварном шве. Пример рассматривает наиболее задающий шов валиком или шов внахлестку, потому что цинк в парообразном состоянии не может выходить.



255

«загрязнена» цинком в его парообразном состоянии. Это приводит к нестабильной и неустойчивой дуге, значительным рельефам и довольно небольшому количеству пористостей в наплавленном валтке. Первое решение состоит в том, чтобы поддерживать постоянный зазор между собираемыми листами, что позволило бы цинку выйти. Однако такую вещь б66 гарантировать в условиях реалий производства.

Другое решение состоит в ограничении объема цинка в его парообразном состоянии путем воздействия на параметры сварки; адаптированы низкие проволоки и скорость сварки, то есть, это так называемый перенос при *коротком замыкании*, что обычно означает значительное количество практически примыкающих рельефов.

Были разработаны специальные наполнители для покрытых цинком изделий. Они обычно содержат дополнительные элементы, такие как титан и/или алюминий в одинарном проводе. Было изучено иное решение. Оно состоит из использования проволоки, плавление которой достигается с очень низкой энергией сварки. В настоящее время некоторые провода с наполнителем соответствуют режиму плавления Sadual ZN, который позволяет сваривать изделие с оцинкованным покрытием 650 г/м² (толщина приблизительно 50 мкм).

Последнее решение состоит в использовании изделий с наполнителем с температурой плавления ниже, чем у стали, в процессе, *называемом сваркой припоем*. Он назван так, потому что он связывает технику пайки (плавление наполнителя без плавления основного металла) с техникой сварки. Провода на основе меди, Cu + 8% Al, Cu + 3% Si и Cu + 0,8% Sn, являются наиболее часто используемыми продуктами. Газ, используемый для защиты дуги, и расплавленный металл обязательно обеспечиваются нейтральным или инертным газом, таким как аргон или смесь Ar + He.

8.4.1.3. Корпус сталей HYS и HS

Все нелегированные или низколегированные стали свариваются *заранее* с помощью сварочной проволоки, на которую наносят валик с техническими и металлургическими характеристиками, по меньшей мере эквивалентными характеристикам основного металла. Тогда возникает проблема с продуктами типа Soldur 355-700 (стали с дисперсоидами), Solform 600 и 800 (ферритовые/бейнитные стали) или UHSS (стали сверхвысокой прочности). Чем выше класс, тем больше химическое содержание подходящих наполнителей для того, чтобы можно было получить технические характеристики, которые, по меньшей мере, эквивалентны основному металлу. Условия эксплуатации становятся более проблематичными. Действительно, риск холодного растрескивания зависит от наполнителя, а не от основного металла. Соразмерно толщине (более 5 мм), можно реализовать специальные условия эксплуатации, такие как предварительный нагрев, в зависимости от степени крепления.

В случае, приведенном ниже, при твердости валиков проводились опилки на стали Soldur 700, то есть предел текучести 700 МПа, с различными мощностями сварки. Данный тест позволяет определить максимальный предел мощности сварки, применимый к этой стали, не опасаясь слишком большого размягчения зоны термического влияния. Действительно, слишком длинный термический цикл при высокой температуре может разрушить технические свойства, полученные при термомеханической прокатке.

8.4.1.4. Усиление твердости наплавленного валика

Напльвы валика (на сплошном листе с использованием МАДП с одинарным проводом), выполненные при различных энергиях, позволяют определить максимальный предел энергии, который можно использовать с помощью Soldur 700.

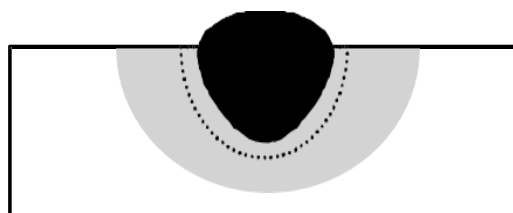


Рисунок 8.26. Происхождение твердости наплавленного валика на стали Soldur 700I

Измерение твердости HV10, на 6 точках зоны термического влияния, выполняются на линии провара + 1 мм. Таблица 8.4 представляет результаты измерений.

Таблица 8.4. На основании твердости наплавленного валика Soldur 700

Энергия сварки (кДж/см)	ЗТВ6	ЗТВ 11	ЗТВ 14	Основной металл
Минимальная твердость HV10	262	257	244	275
Максимальная твердость HV10	278	267	250	283
Средняя твердость HV10	270	262	248	280

С увеличением энергии сварки твердость быстро уменьшается. Максимально допустимая энергия быстро достигается в диапазоне от 5 до 10 кДж/см. Необходимо избегать чрезмерного нагрева. Эта рекомендация можно определять для изделия, полученного термомеханической прокаткой, максимум 2 кДж/см на миллиметр толщины.

8.5. Список использованной литературы

- [AKH 88] AKHTER R. et al., “Laser welding of zinc coated steel”, Lasers in Manufacturing, Cotswold Press Ltd, UK, 1988.
- [BAB 99] BABBIT M., CANTINIEAUX P., “Les aciers HR et THR: offre, mise en oeuvre et performances”, Symposium auto et carrosserie automobile, Cannes, 1999.
- [BOI 92] BOISSELIER D. et al., Le soudage laser de faibles et moyennes épaisseurs, Centre Technique des Industries Mécaniques, 1992.
- [BON 00] BONSS S. et al., Innovations in laser hybrid technology: the combination of CO₂- laser and high power diode laser, Section C-ICALEO, 2000.
- [BOS 92] BOSCH, Avantage du soudage en courant continu, Documentation commerciale, 1992.
- [COL 94] COLLECTIF, Le livre de l’acier, Techniques et documentation, Lavoisier, Paris, 1994.
- [DRO 93] DROUART C., Soudage par résistance, Publication du soudage et de ses applications (IS), 1993.
- [DUP 00] DUPUY T., FARDOUX D., “Spot welding zinc coated steels with medium frequency direct current”, Sheet Metal Welding Conference IX, Detroit, October 2000.

- [ELI 89] ELIOT D., Le soudage par faisceau laser, Publication de la Soudure Autogène, 1989.
- [FER 97] FERRASSE S., VERRIER P., MEESEMAECKER F., “Resistance spot weldability of high strength steels for use in automotive industry”, The IIW 50th Annual Assembly, San Francisco, Doc. no. III-1076-97, 1997.
- [GEY 93] GEYSEN M. et al., Tolérances en soudage laser de forte puissance, Institut de Soudure, 1993.
- [GRE 78] GREGORY E.N., Welding zinc-coated steels, Welding Institute Publication, 1978.
- [HON 00] HONGPING G., A New Method of Laser Lap Welding of Zinc-coated Sheet, Section C-ICALEO, 2000.
- [NOR 94] NORME FRANÇAISE A 87-001, Caractérisation de la soudabilité par résistance par points de produits plats revêtus ou non, December 1994.
- [PRA 88] PRANGE W. et al., “Utilisation de la soudure par laser des tôles fines”, Revue de Métallurgie, 1988.
- [VER 99] VERRIER P., “Fabrication et utilisation des flans raboutés pour l’industrie automobile”, Revue de Métallurgie, 1999.
- [WES 93] WESTGATE S., LEWIS C., “Current voltage waveform developed in typical AC/DC resistance welding power sources”, Int. Inst. Weld., Doc. no. III-1022-93, 1993.
- [WES 93] WESTGATE S., LEWIS C., ”Comparison between electrical efficiency of AC and DC power sources for spot welding zinc coated steels”, Int. Inst. Weld., Doc. no. III-1020-93, 1993.
- [XIE 99] XIE J. et al., “Laser lap welding of galvanized steel with no gap”, International Body Engineering Conference, September 1999.
- [XIE 99] XIE J. et al., Single-sided Laser Welding of Galvanized Steel, ,Cooperative Research Program EWI, 1999.

Сварка стальных механических деталей

9.1. Введение

В этой главе приводится описание основных методов сварки стальных механических деталей с использованием примеров из автомобильной промышленности, помимо панелей кузова, и обсуждаются конкретные пределы свариваемости ввиду функциональных потребностей и массового производства.

Чтобы определить эти потребности, их можно сравнить со стальными конструкциями (см. Главу 10). Последнее относится, в частности, к одиночной конструкции или к ограниченному множеству и требует простого скрепления и относительно грубых соединений с точки зрения позиционирования и законченного вида. Именно при этом условии сварка, например, заменила клепку балок или пластин железнодорожной станции для судостроения и т. д. Кроме того, для предельных значений упругой деформации (например, для предела провисания балки) необходимы особые геометрические размеры (моменты инерции) и, как правило, эти ограничения вступают в силу до ограничения прочности в граничных зонах сцепления.

Для механических деталей отношение усталостных характеристик к массовой доле часто имеет первостепенное значение и требует сложных механических характеристик, которые возможны только для легированных сталей и поэтому не поддаются сварке.

При этом, у механических деталей, как правило, имеются особые требования в обслуживании:

- геометрическая точность: например, многие параметры, которые характеризуют зубья шестерни, измеряются в микрометрах,
- износостойкость и трибология поверхностей трения обосновывают весьма требовательное состояние поверхности: шероховатость, давление Герца, внешние покрытия, физико-химическая стойкость,
- стойкость точечной коррозии в определенных зонах контакта,
- различные виды усталостных характеристик: контакт, надрез, коррозия и т. д.

По всем этим причинам стали, использующиеся для механических деталей, часто обрабатываются до уровней прочности выше 1000 МПа, а соответствующие сборные узлы обычно должны:

- быть сварены с высокой степенью точности при их взаимном расположении,
- их механические свойства слегка снижены, особенно в зонах с ограниченной нагрузкой,
- быть в состоянии подвергнуться термической обработке или дополнительным отделочным процессам.

Очевидно, что эти условия должны модулироваться в соответствии с типом соответствующего компонента. Например, в автомобильной промышленности требования к сварке различны для деталей подвески и механических деталей.

Наружные детали, такие как подрамники и узлы подвески, обычно изготавливаются из низколегированных сталей с довольно низким содержанием углерода-марганца (менее 0,2% С, 1% Мп), часто без какой-либо чистовой обработки. Эти детали подвергаются точечной сварке (для тонких листов) или с помощью сварного шва, без существенных металлургических сложностей.

С другой стороны, механические детали, такие как силовой агрегат или трансмиссия, изготавливаются из сталей, состав и термообработка которых специально адаптированы к необходимым для использования свойствам. Например, при производстве автоматических коробок передач часто используются мягкие стали, локально азотированные в зонах трения, а также среднеуглеродистые стали (т.е. класс ХС 42), подверженные частичной индукционной закалке, а также более легированные азотированные стали для наиболее сильно трущихся деталей. Что касается характеристик изгиба и разрушения растрескиванием в основании зубчиков, их можно выполнить с помощью таких довольно мелких карбонитритных и стальных сплавов, как 27 Мп Сг 5 или 30 Сг Мо 4, для нынешних автомеханических требований, хотя для шестеренных валов грузовых автомобилей очевидно, необходимы более глубокие термохимические обработки и высоколегированные стали. Как правило, несущие элементы символической марки 100 Сг в крайнем случае, изготавливаются без какой-либо возможности сварки!

Критерии оценки эксплуатационной свариваемости зависят от рассматриваемых **деталей**, в частности, от возможной протяженности зоны переплавленных швов. Поскольку в данной зоне требуется присадочный материал или несколько проходов, и она остается относительно большой (в том порядке, как было представлено для стальной конструкции), большинство довольно ограничительных металлургических и механических соображений (эквивалент углерода, ограничения зажима, водород и т. д.), изложенные в предыдущих главах, остаются в силе. С другой стороны, чем уже зона переплавки (пучки высокой энергии), тем жестче требуются допустимые пределы, которые могут быть полностью уменьшены при некоторых контактных соединениях (сварке трением, контактной сварке сопротивлением или диффузионной сварке в твердой фазе).

В этой презентации адаптация условий дуговой сварки к легированным сталям [CAZ] и металлургии сварного соединения [AWS, GRA] будет изложена кратко. Мы сосредоточим внимание на возможностях процессов ограниченного плавления, используемых в сварочных работах для массового производства механических **деталей**. Мы покажем, что для требований массового производства в механическом строительстве необходимы роботизированные сварочные процессы, соответствующие времени цикла и процедурам контроля на конвейерной линии сборки.

Эту главу продолжают следующие технологические вопросы:

- требования к специфичности соединения, эксплуатационные стандарты и свариваемость легированных сталей, используемых в механических компонентах;
- основные виды сварочных процессов, применяемых для механических **деталей**, и примеры этих процессов в автомобильной технике;
- спецификации и контроль качества сварных швов этих деталей;
- разработки и тенденции в области сварки механических **деталей**.

9.2. Особенности сварных соединений в механических компонентах

9.2.1. Стандартные сварочные процессы и общие рекомендации

При сборке мягкой тонколистовой стали в панелях кузова точечная сварка берется за правило, потому что захват стальных листов и роботизация точечной сварки уже не первый день работают с общепризнанной производительностью и легкостью использования.

Что касается механических **деталей**, то прежняя практика обработки, которая раньше

соединяла рабочие поверхности с меньшим количеством запасных деталей, более или менее простых в сборке, редко рекомендовала сварку.

Тем не менее, диапазон разработки этих деталей обусловлен многими условиями выполнения и стоимости (простотой механической обработки, сборки, разработки и т. д.), при которых возможность сварки, по сравнению с другими способами соединения, не всегда является решающей.

Изначально термического или механического истирания металла может быть достаточно, как отдельно, так и с дополнительными защитными вспомогательными средствами, такими как адгезионное связывание, фиксация, соединение шипами или дополнительная точечная сварка. Следует шлифовать или оттачивать поверхности деталей, нуждающихся в дополнительной термохимической обработке, а в зонах с остаточными напряжениями можно ожидать замедленного разрушения.

В некоторых других случаях традиционная сборка с помощью болтов или винтов обеспечивает достаточно точное соединение без изменения свойств готовых **деталей**. Таким образом, обеспечивается дополнительная «возможность разборки» при ограниченных дополнительных затратах на обработку и соединение.

Без необходимости дальнейшей разборки, технического обслуживания или замены, процедура сварки может быть привлекательной в ракурсе собираемых деталей. Что касается процесса сварки, то он позволяет экономить время цикла, пространство или персонал для сборки, и производственные затраты, особенно если он выполняется на роботизированных многопостовых механических устройствах, сочетающих позиционирование, сварку и, зачастую, процесс снятия напряжения менее чем за одну минуту. Этот метод широко используется при сборке таких **деталей**, как автоматические коробки передач, в которой стальные валы или малолегированные кромки должны быть прочно присоединены с минимальными препятствиями для размеров к корпусам муфты, изготовленным из сверхмягкой стали.

С другой стороны, риски начального повреждения в результате холодного растрескивания остаются значительными при различных видах дуговой сварки, как только *углеродный эквивалент* расплавленного металла (в зависимости от состава компонентного материала и состава возможного присадочного материала) превысит 0,47% [AWS, GRA 95], а выбор основного металла не может быть изменен. Адаптированный предварительный нагрев, а то и пост-термическая обработка могут затем стать необходимыми в соответствии с геометрическими и термическими показателями собранных деталей. Приемлемым вариантом также может стать сваркопайка твердым припоем, если полученная конструкция не подвергается чрезмерным нагрузкам, или, если площадь паянной поверхности достаточно велика (с возможным добавлением подготовленных кромок) для распространения статической и динамической нагрузки.

Хорошая конструкция детали может способствовать ограничению нагрузки, которой подвергается сварной шов, или уменьшению функциональных последствий конкретной конфигурации сборки. Следовательно, сварка лазерным лучом с точным позиционированием может быть удовлетворительной, например, потому что, в противном случае, у собранной детали будет чрезмерно сложная или сильно нагруженная геометрическая конфигурация.

Для некоторых осесимметричных деталей, таких как биметаллические клапаны,

высокоскоростная сварка трением с последующей обработкой валика, но часто без какой-либо последующей обработки, полностью оправдывает экономию затрат на материал детали.

Наконец, для большинства деталей с высокой нагрузкой изменение механических свойств после сварки не является проблемой, поскольку термические обработки, необходимые для достижения свойств, требуемых для будущего использования, обычно проводят после сварки. Тем не менее, из-за проблем усталости или ударного воздействия необходимо избегать недопустимых дефектов валика: пористости и надрезов на вершине сварочного шва [LIE 82, DER 8 1].

Для любой сварочной операции необходимы некоторые технологические рекомендации:

- в типе разделки шва необходимо сбалансировать массы с обеих сторон и избегать любых слабых зон (небольшой участок, острый угол) вблизи сварного шва;
- осевой сварной шов имеет тенденцию, если он не зажат, расходиться раструбом в наилегчайшей части, в то время как радиальная сварка предусматривает скошенное затвердевание. Вставка одной части в другую вместо зазора между деталями уменьшает эти дефекты;
- радиальный сварной шов предпочтительнее осевого сварного шва в случае сложного материала или деформации;
- допустимый зазор в соединяющихся плоскостях, установленный в соответствии с допусками на обработку, позиционный зазор и перпендикулярность соединяемых поверхностей по отношению к их оси должен быть ограничен до 0,10 мм;
- чистота поверхности пригнанных кромок ограничена 10 мкм, и на этих поверхностях, как правило, запрещены заусенцев;
- необходимо удалить любые следы ржавчины и жира, а также высушить детали после мытья.

Эти неисчерпаемые рекомендации, касающиеся соединения, основаны на опыте и практически не зависят от металлургических факторов, влияющих на прочность соединений.

9.2.2. Металлургические дефекты в зоне расплава и зоне термического влияния

Различные возможные дефекты в сварных швах можно классифицировать на две основные категории:

- технологические дефекты, такие как дефекты, связанные с геометрическим согласованием, или недостаточным сплавлением,
- металлургические дефекты, такие как посторонние включения, пористость, трещины.

Фактически, металлургическое состояние сварного шва зависит, прежде всего, от хорошего выбора технологических параметров: геометрии и подготовки соединения, режима сварки, мощности линейной энергии и скорости сварки, параметров предварительного и последующего нагрева. Расплавленная зона и зона термического влияния являются критическими зонами ввиду их чувствительности к внутренним трещинам, несоответствующим микроструктурам и неблагоприятным остаточным напряжениям.

К тому же, дефекты могут уменьшить поперечное сечение соединения и привести к концентрациям напряжений, которые могут привести к местному разрушению при непредвиденных нагрузках.

9.2.2.1. Дефекты в зоне расплава

Наиболее типичные дефекты в зоне расплава после сварки:

- пористость из-за растворенных газов, пойманных во время затвердевания или возникающих в результате химических реакций в жидком металле;
- отсутствие проплавления шва или между двумя последовательными валиками;
- горячее или холодное растрескивание в чувствительных деталях, в зонах с (временными или постоянными) напряжениями с высокой прочностью на разрыв.

Наложение поля остаточных напряжений на приложенные напряжения может еще больше снизить рабочую нагрузку дефектного сварного соединения.

Условия выплавки стали (раскисление, сульфиды, содержание остаточного азота) могут повлиять на риск пористости и формы гранул (смачиваемой способности расплавленного металла), но главная проблема связана с риском растрескивания ввиду неподходящего выбора рабочих параметров.

Дуговая сварка с довольно высоким содержанием присадочного металла и переплавкой может привести к геометрическим дефектам (острые угловые соединения, отсутствие проникновения), металлургическим дефектам (трещинам) или усиленным скрытым дефектам (разрывы на крупных включениях).

Геометрические дефекты в основном касаются расположения свариваемых поверхностей и практики эксплуатации. Глубина сварного шва может оказаться проблемой, в частности, для сварки энергетическими пучками высокой плотности лазерного типа, при которой сложно превышать 10 мм стали с номинальной мощностью до 10 кВт.

Тем не менее, серийно производимые механические компоненты обычно имеют ограниченные размеры и нуждаются в точной подготовке интервалов автоматизированной сварки, которые, ввиду этого, весьма повторяемы.

9.2.2.2. *Различные типы растрескивания*

В качестве одного из рисков металлургического растрескивания может возникнуть образование горячих трещин, связанное с конкретными составами расплавленного металла (например, содержание серы или свинца выше 0,025% для улучшения обрабатываемости), и ухудшенное из-за плохой конфигурации сварного шва. Растрескивание с образованием продольных трещин из-за плохого уровня деформируемости в сквозном направлении остается необычным для механических **деталей**, тщательно сваренных последовательно после целого ряда проверочных испытаний.

Очевидно, что холодное растрескивание в зоне термического влияния, связанное с грубыми закаленными конструкциями, остаточным натяжением и следами водорода, остается наиболее значительным препятствием для сварки в больших зонах переплавки в стальных конструкциях.

Что касается легированных сталей, трещины являются наиболее частыми металлургическими дефектами: образование горячих трещин в расплавленной зоне, холодное растрескивание в ЗТВ, растрескивание при повторном нагреве:

- *Образование горячих трещин*: особенно касается сталей с аустенитным затвердеванием. Оно происходит в результате отторжения серы и фосфора с соответствующим снижением солидуса. Напряжения в конце затвердевания валика могут вызвать разрывы в месте последнего расположения зон жидкости. Это оправдывает ограничение содержания

дефицитных элементов в металлах, сваренных плавлением, типа $S + P < 0,04\%$.

– *Образование холодных трещин*: условия водородного охрупчивания (остаточное натяжение) обнаруживаются как в зоне термического влияния, так и в расплавленном металле, поскольку последний обогащен водородом даже с более разбавленным составом, чем зона термического влияния. Оценку чувствительности сварных сталей можно вывести из различных традиционных формул для процентного содержания углерода, типа $Se = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Cu + Ni)/15$ и т. д. [DEB 84]. Существенное влияние чистоты, не учитываемое в данном типе формулы, в случае затрудненной сварки предусматривает рекомендацию о низком содержании примесей (S, P, Sn, As, Sb). Для серы также существует риск образования продольных трещин, который требует одновременного контроля содержания сульфида и его морфологии (образование шейки сквозь волокна); например, содержание серы в механических компонентах автомобилей ограничено 0,025%.

– *Растрескивание при повторном нагреве*: об этом иногда сообщается на примере низколегированных сталей для сосудов под давлением и плохо устойчивых нержавеющей сталей. Это пример образования межкристаллитных трещин, которые могут появиться во время последующего нагревания из-за осаждения карбида и примесей.

Помимо риска образования трещин, требуемые эксплуатационные свойства сварных сталей могут предъявлять частные требования к зоне сварки: сопротивление ползучести аппарата под давлением в рабочих условиях горячих цехов, усталостная прочность в определенных условиях, устойчивость к различным типам коррозии под напряжением и т. д. Осаждение межзеренного карбида хрома в ЗТВ во время сварочного цикла может нарушить, например, коррозионное поведение нержавеющей стали при растяжении.

И, наконец, сварка в уже обработанной зоне может привести к растрескиванию из-за локализации сильных остаточных напряжений (например, на закаленных деталях) или из опасной присадки легированных металлов (термохимически обработанных деталей). В последнем случае было бы лучше обойти зону, которая будет сварена в результате термохимической обработки или последующей механической обработки (шлифования).

9.2.3. Допуски свариваемости при сварке с переплавкой и без нее

Металлургические трудности при сварке возникают в результате структурных реакций сварных металлов с особыми термоциклами процедуры.

9.2.3.1. Основные последствия сильной переплавки

В случае переплавки, усадка при затвердевании вначале происходит в расплавленной зоне, в зависимости от интервала затвердевания металла и, более того, смеси сваренного металла и присадки. Размер зоны расплава, степень усадки и реологические свойства металла при охлаждении определяют распределение остаточных напряжений в зоне сварки.

Как правило, термомеханические сварочные эффекты (усадка при затвердевании в расплавленной зоне, расширение и деформация при аллотропных превращениях, растяжение остаточных напряжений) зависят от режима сварки, геометрии соединения и металлургического характера поведения металла.

Очевидно, данное поведение изменяется для легированных сталей вследствие множества различных термических обработок: обработка на твердый раствор, кинетика преобразования и кристаллизации при охлаждении, осаждения во время последующего нагрева.

Для предсказания такого поведения требуется внедрение фазовых диаграмм (например, диаграммы Шеффлера для нержавеющих сталей) и диаграмм превращения при непрерывном охлаждении вслед за специальными условиями аустенизации, преобладающими в зоне термического влияния (при особой растворимости карбида и величине зерна металла). Эти эффекты, оказывающие большое влияние на внутреннюю прочность и эксплуатационные свойства сварных швов, были предметом довольно сложного программного моделирования (хорошо известным примером является SYSWELD). Зачастую по каждому типу сварки и геометрической конфигурации соединения необходимо обращаться к диаграммам тепловых данных, которые позволяют визуализировать циклы в наиболее критических точках ЗТВ (см. Главу 3). Рассмотрев соответствующие диаграммы преобразования стали, можно легко предсказать эволюцию структур и их свойств.

Весьма полезно максимально уменьшить расширение зоны расплавления, в целях уменьшения вероятности появления дефектов на валиках, водородного охрупчивания, распространенности и опасности грубозернистого мартенсита в ЗТВ, повреждения остаточных напряжений и т. д. На основании этой точки зрения, повышение мощности теплового источника выгодно, поскольку оно увеличивает температурные градиенты (закон Фурье). В крайнем случае, сварка трением без переплавки позволяет соединять, без дополнительного нагрева, биметаллических клапанов выпуска, часть которых изготовлена из мартенситной нержавеющей стали марки Z 45 Cr Si 9.

Даже если трудно избежать переплавки и сопутствующего риска появления водородного охрупчивания (только одной ч/млн уже слишком много...), то хрупкость неуравновешенных структур, возникающих в результате реаустенитизации крупнозернистых областей, остается проблемой.

Принимая во внимание относительно высокую прокаливаемость сталей, используемых в механических деталях, часто трудно замедлить охлаждение в конце сварки и, таким образом, избежать мартенситных структур, чья твердость, хрупкость и чувствительность к следам водорода увеличиваются с локализованным содержанием углерода. Хрупкость некоторых бейнитов с более высоким содержанием углерода или некоторых аустено-мартенситных агрегатов также может стать проблемной (см. пример стали марки 15 Cr Mo V6).

9.2.3.2. *Устранение хрупкости зоны термического влияния*

Отпуск термообработкой после сварки имеет две специфичные функции, которые часто оптимизируются самостоятельным путем: снятие остаточных напряжений и/или снижение хрупкости с закаленных металлургических конструкций.

Как только состав стали исключит любую возможность построения микроструктуры, менее чувствительной к водороду, во время эксплуатации параметров наплавки необходимо либо уменьшить вредность водорода путем предварительного нагрева, либо ускорить диффузию этого газа из зоны сварки путем последующего нагрева (как правило, с более высокой температурой, чем температура предварительного нагрева).

Предварительный нагрев имеет основной эффект уменьшения скорости охлаждения после сварки и, как следствие, увеличения времени десорбции водорода при охлаждении, в то время как последующий нагрев выполняет только последнюю функцию. Цикл зависимости «температура-время» при постнагревании определяется кривой трещины, определенной по результатам испытаний на имплантирующей примеси, и приводит к понятию *критической*

температуры постобогрева для заданного режима сварки и состава материалов.

При многопроходной сварке критическая температура после нагрева, очевидно, также соответствует минимальной температуре, которая должна поддерживаться между проходами и вслед за последним проходом.

Во избежание холодного растрескивания сварных деталей, особенно с высоким содержанием углерода, иногда можно использовать аустенитный присадочный металл (часто аустенитную нержавеющую сталь): если разбавление позволяет сохранить аустенитную структуру после охлаждения до комнатной температуры, оно не склонно к хрупкому разрыву, и, следовательно, к холодному растрескиванию. Более того, водород относительно растворим в аустените, что способствует его улавливанию в зоне расплава и предотвращению образования трещин в ЗТВ. Однако необходимо принять хрупкость мартенситной ЗТВ и низкие механические характеристики расплавленного металла.

Что касается **деталей** из нержавеющей стали, для сварки некоторых сортов (например: выпускных труб) требуется уделить внимание их составу, например, стабилизирующая обработка титана или ниобия - улавливание углерода из самого производства сырья в очень стабильном карбиде, предотвращает осаждение хрома и потерю нержавеющей свойств в ЗТВ, способствуя контролю крупности зерна. Сварка неоднородных сборных конструкций, таких как нержавеющая сталь + низколегированная сталь, требует некоторых мер предосторожности [FAB 83]: мер предосторожности в отношении расплавленного металла, неоднородности расплавленной зоны после разбавления и нестабильности микроструктуры при эксплуатации. При аустенитной стали гипер-охлаждение в условиях, близких к обработке при доставке, позволяет одновременно достичь мелкозернистого и нержавеющей металла, не испытывающего напряжения.

9.2.3.3. *Сварка без переплавки*

От этого процесса сварки необходимо ожидать следующие характеристики:

- отсутствие дефектов пористости, усадочной рыхлости или газовой десорбции, связанных с различием в растворимости газов (H, N, O) между жидкой и твердой фазой,
- меньше усадочных напряжений,
- менее грубые и хрупкие конструкции.

С другой стороны, проблемы геометрического выравнивания и приведения свариваемых поверхностей в тесный контакт являются намного острыми и требуют лучшей подготовки поверхности, а также минимальной работы поверхностного натяжения [HOU 91].

В течение минутного создания диффузионно-сварных соединений механизмы рекристаллизации после работы поверхностного натяжения содействуют устранению начальной границы раздела, но в микрометрическом масштабе. Более того, средняя длина свободной диффузии в течение одной секунды в аустенитном состоянии железа составляет всего около одного микрометра при 1400°C, поэтому микрографические наблюдения межзеренных границ, пересекающих предшествующую границу раздела, зависят от перекристаллизации гетерогенного аустенита с закрепленными межзеренными границами в примесях.

Поскольку отражающее эхо не может быть обнаружено на границе раздела, то когда ультразвуковое исследование проводится на длинах волн в стали около 10 микрометров, теоретически возможно гарантировать отсутствие микрометрических дефектов на этой

поверхности. В таком масштабе также появляются эхо-сигналы, соответствующие примесям.

9.3. Основные виды сварки механических деталей

Различные тепловые источники предлагают практические средства для получения прочных соединений менее чем за одну минуту из дециметровых деталей.

Наиболее традиционной является *электрическая сварочная дуга*. Плавление способствует соединению и заполнению механически обработанного шва. Объем расплавленного металла может быть увеличен за счет внешнего вклада: дуговая сварка покрытыми электродами, сварка MIG (*инертный газ металла*) или TIG (*инертный газ вольфрама*). Этот вклад расплавленного основного металла иногда невозможен, как при электронно-лучевой сварке. Однако его можно выполнить с использованием металлического покрытия, температура плавления которого ниже, чем у не расплавленного основного металла.

В случае *пайки* тугоплавким припоем именно процесс смачивания обеспечивает соединение и преемственность поверхностей впритык, тогда как при сварке пайкой широкое соединение заполняется присадочным металлом. Мы рассмотрим эти два последних метода очень кратко в этой главе.

Очень тесный контакт твердого тела с двумя чистыми металлическими поверхностями также может обеспечить скрепление и преемственность: такое близкое совпадение может быть результатом пластической деформации под механическим давлением и повышения температуры, поддерживающего взаимную диффузию и рекристаллизацию поверхности раздела (*сварка трением, сварка сопротивлением*).

Иногда появляется летучая расплавленная фаза, но она быстро удаляется (как в случае с *искровой сваркой*).

Наконец, сварка трением основывается на сварке плавлением, как *сварка взрывом* или *ультразвуковая сварка*.

Наиболее частые классификации этих различных процессов зависят от качества подачи энергии и режима защиты металла, нагретого до высоких температур (шлак, инертный газ или вакуум). Тем не менее, в нашей презентации будет принят порядок уменьшения используемых линейных мощностей или, что еще лучше, относительный размер расплавленной зоны. Для конкретного введения в сварку различных механических деталей будет использоваться следующий порядок:

- электродуговая сварка и ее производные,
- сварка узкими высокоэнергетическими пучками (лазером, электронным лучом, плазмой),
- сварка трением (в твердой фазе с ограниченным проникновением расплавленных областей),
- стыковой шов по эффекту Джоуля (с ползучестью и без значительного переплава),
- диффузная сварка в твердой фазе (еще не в промышленных масштабах).

9.3.1. Электродуговая сварка и альтернативы [CAZ 95, COL 83]

9.3.1.1. Различные категории

Одной из самых старых типов сварного шва является ручная сварка с покрытым

электродом, используемая для опытных образцов или небольших серий с деталями ограниченного размера. Присадочный материал состоит из стержня из легкоплавкого металла с порошковым покрытием, который при плавлении способствует распространению расплавленного металла и защитного шлака. Очевидно, что эта технология не совместима с автоматизированными сварными швами массового производства в автомобильной промышленности.

Процесс дуговой сварки под флюсом в порошковом флюсе используется в исключительно автоматизированных процедурах для сварки существенной толщины при производстве котлов или некоторых других механизированных сварок.

Процессы MIG/MAG с электродом в виде проволоки, расходуемым от катушки, и защитой от газа полезны, с точки зрения гибкости и производительности [BOU 89]. Процесс TIG с тугоплавким вольфрамовым электродом и защитой от инертного газа, прежде всего, используется для нержавеющей стали с особенно хорошей конечной чистотой зоны расплава.

Что касается сварки конструкционных сталей, параметры сварки (эквивалентная энергия, скорость, температура возможного предварительного нагрева) регулируются с помощью диаграмм данных типа, представленного в главе 3.

Для элементов обеспечения безопасности, таких как подвесные части или передающие крутящий момент двигателя к колесам, сварные швы всегда шлифуются во избежание влияния надреза. В целях устранения риска отложенного отказа выполняется небольшой отпуск для снятия остаточных напряжений, а каждая серия деталей металлургически проверяется путем отбора проб. Для такой разновидности детали различные неразрушающие испытания на производственной линии являются систематическими: для выявления дефектов - магнитоскопия, а также для выявления основной пористости - рентгенографическая или ультразвуковая проверка. При серийном производстве автомобилей средства контроля особо задействованы во время квалификационного испытания для данного диапазона **деталей** (см. Раздел 9.4).

Для завершения верхнего валика шва, при создании предварительного напряжения на сварных швах часто проводится обдувка металлической дробью, чтобы подвергнуть сжатию зоны, в которых могут возникнуть усталостные трещины. Процедуры обезжиривания и дегапирования на нержавеющей сварных швах позволяют нормализовать коррозионные характеристики деталей.



Рисунок 9.1. Внешний вид карданного вала и CV корпуса (переднее колесо), соединенных дуговой сваркой

9.3.1.2. *Пример: дуговая сварка приводного вала и корпуса*

Ведущий шпиндель и корпус (см. Рисунок 9.1) являются внешней **деталью** шарнирного соединения, выполняющего роль полуоси, приводимого в движение полуосью.

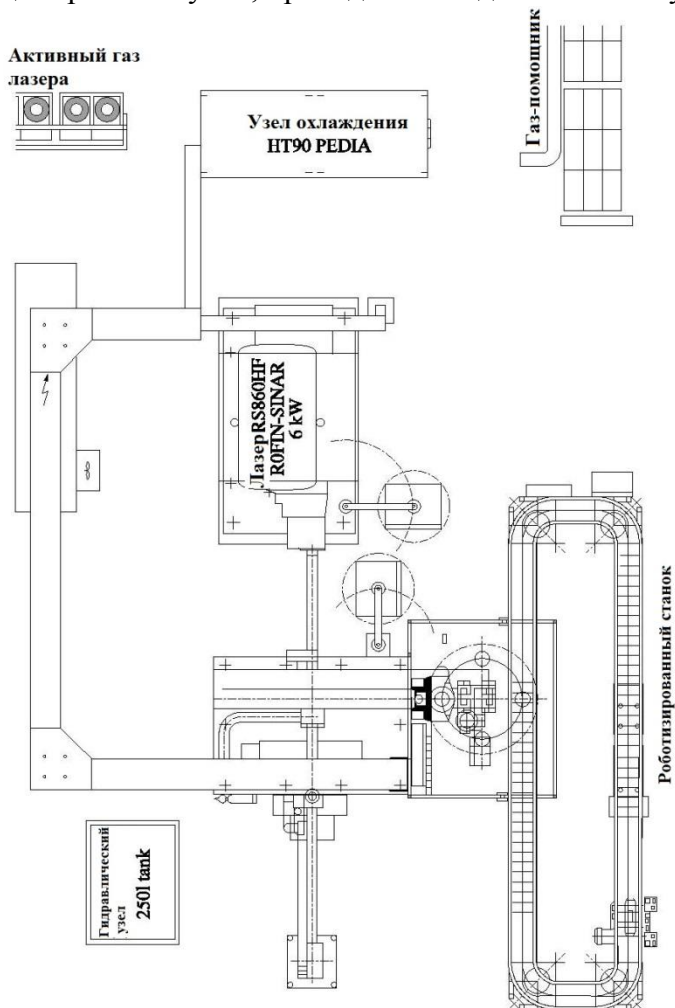


Рисунок 9.2а. *Проект лазерной установки для производства в автомобильной промышленности*

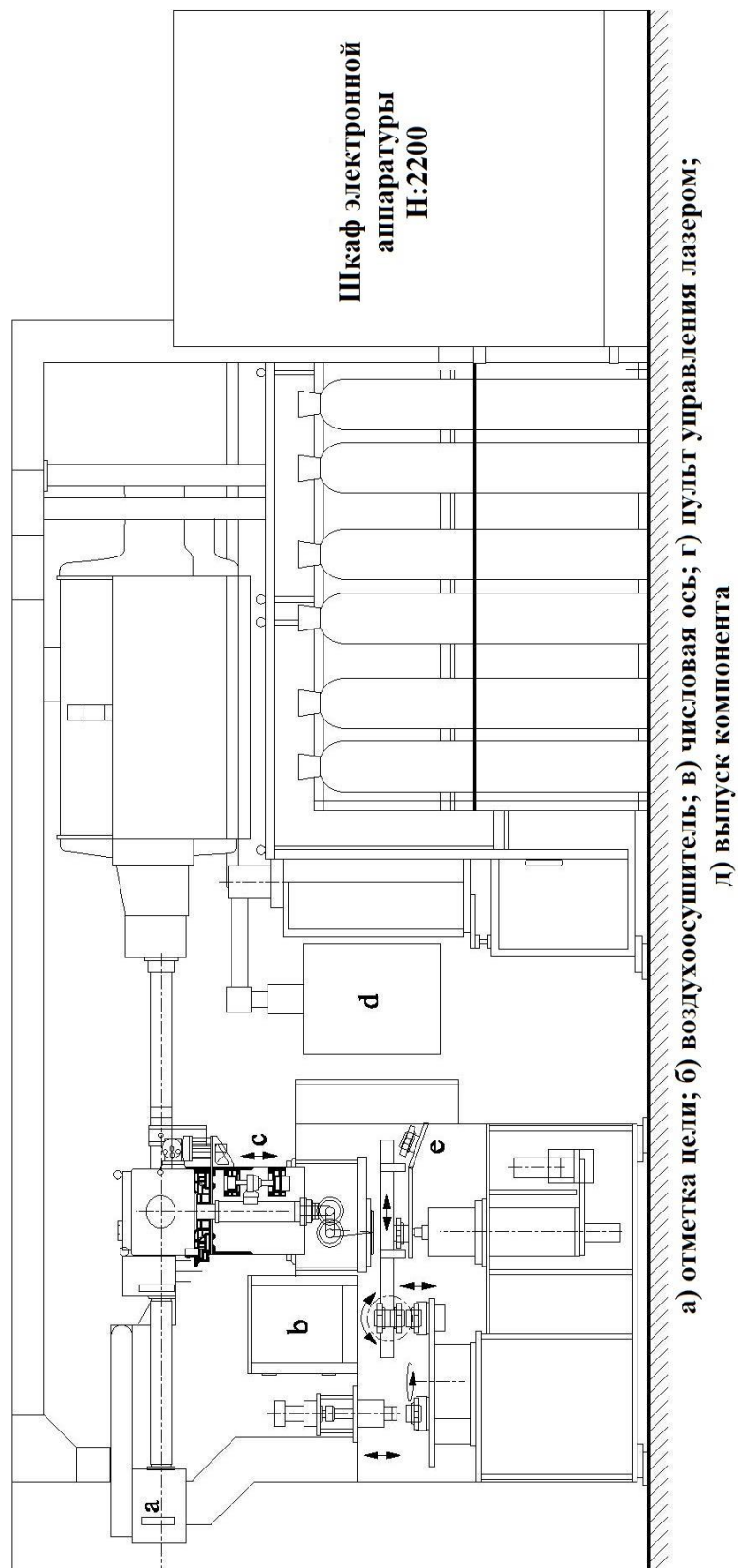


Рисунок 9.2б. Проект лазерной установки для производства в автомобильной промышленности

Корпус CV изготовлен из низкоуглеродистой стали, отвержденной в осадке (HES 400), зубчатый вал в ХС 42, позволяющий позднее индукционное упрочнение шлицев и опорных

поверхностей подшипников.

Дуговая сварка вала к CV корпусу осуществляется на станке с поворотным столом и автоматической загрузкой корпусов и валов. Сварка выполняется на двух станциях: вертикально, в токарном патроне, с присадочной проволокой, доставляемой с катушки; и под защитным газом (92% аргона + 8% CO), подаваемым под давлением 3 бара.

После сварки выполняется внутренняя чистка корпуса для устранения заусенцев, затем снимаются детали для естественного охлаждения. Присадочная проволока (GS2) диаметром 1 мм с покрытием 2 мкм разматывается во время сварки со скоростью 15 м/мин, тогда как скорость цилиндрического зажимного патрона составляет 0,8 м/мин. Параметры электросварки следующие: 295А, 31 В. Временной цикл составляет 0,26 млн., что соответствует суточному производству 12 000 единиц. «Свежая» сварка, а также основание корпуса, обработанное индукционным нагревом, в режиме реального времени подвергаются процессу отпуски с максимальной температурой 275-300°C, контролируемой инфракрасными пирометрами. Проверка 100% соединения корпуса с валом осуществляется ультразвуковым контролем.

9.3.2. Сварка при уменьшенной зоне термического влияния ЗТВ с использованием источников энергии высокой плотности: лазерного луча, электронного луча, плазмы

9.3.2.1. *Различные категории*

В целях уменьшения объема под воздействием остаточных напряжений, полезно уменьшить толщину расплава путем применения концентрированных пучков энергии высокой плотности, поскольку температурные градиенты от поверхности пропорциональны падающему потоку.

Быстро развивающийся процесс — это *лазерный луч* [BOU 92, CAZ 94, COL 83, MAZ 82] с учетом его удобства в использовании и доступности все более экономичных источников с точки зрения капиталовложений и расходов на техническое обслуживание.

Например, на севере Франции на заводе по производству автоматической трансмиссии для новой коробки передач установлено десять установок лазерной сварки на гидротрансформаторе и механизмов за счет пяти источников мощностью 6 кВт (лазерам высокочастотного возбуждения), каждый из которых работает со скоростью 200 частей в час.

На Рисунках 9.2a и 9.2b представлен горизонтальный и боковой вид этой установки.

В новейших конфигурациях плоских лазерных источников (слябов) оптический резонатор расположен между двумя зеркалами и двумя параллельными радиочастотными электродами: поскольку тепло возбужденного газа рассеивается в этих двух водоохлаждаемых электродах, традиционные системы газа циркуляция больше не нужны, что приводит к уменьшению габаритных размеров, низкому расходу газа и повышению производительности при снижении затрат на электроэнергию и обслуживание.

Как правило, CO₂-лазер с эффективной выходной мощностью 6 кВт стоит около €4*10⁵. Чтобы приблизительно представить цену таких лазерных сварок, мы можем представить себе автоматическую установку двух лазеров с поперечным потоком этого типа, потребляющих 120 кВт, и производительности сварки 200 деталей в час (например, размер **деталей**

автоматической коробки передач): общая себестоимость (технические затраты + косвенные затраты + амортизационные отчисления) интегрированной операции составляет менее €0.5 за компонент.

СО₂-лазеры, работающие на длине волны 10,6 мкм, остаются наиболее широко используемыми из-за их высокой выходной мощности (до нескольких кВт), хотя у элементов питания YAG-лазеров или лазерных диодов с длиной волны около одного микрометра лучшие абсорбционные характеристики, и они могут использовать волоконную оптику в качестве волновода. Все более популярными становятся лазерные диоды с выходной мощностью, близкой к одному кВт, и сварочными роботами для сварки небольших партий различных **деталей** (см. Раздел 9.5).

Лазер имеет ограничения по толщине, которую он может сваривать, а глубина проникновения луча обычно составляет менее 10 мм. Область его применения для механизированной сварной конструкции, по-прежнему, очень широка, где вспомогательные связующие детали должны быть приварены к основной конструкции (например: штифты, проушины, приводные вилки и т. д.). Эти сварные швы могут подвергаться опасным надрезам на поверхности расплавленной зоны, особенно в специальных сталях с низкой ударной вязкостью ($K_{1c} < 50 \text{ МПа} \cdot \text{м}$), и этих рисков можно избежать до и после прохождения расфокусированного пучка

Электронно-лучевая сварка получила широкое распространение в промышленном масштабе в обслуживании котельных в нефтехимической промышленности или на атомных электростанциях. В этой связи сварка касается определенных марок легированных сталей и толстой листовой стали. Преимущества процесса заключаются в следующем [BOU 95, GRA 81, VAL 83]:

- лучшая производительность, чем при традиционных сварочных процессах при той же толщине,
- ограниченная деформация узлов,
- нет загрязнения атмосферы.



Рисунок 9.3. Изображение кулачковой муфты, приваренной к шестерне, с нарезанными зубчиками или без них.

Недостатки, в основном, пористость и низкая ударная вязкость расплавленной зоны, относятся только к толстоватым деталям.

Пучок электронов с модуляцией мощности можно легко использовать для предварительного или последующего нагрева, и, следовательно, можно получить высококачественные многопроходные сварки. Ограничения для вакуумных технологий (подготовка, промывание и дегазация свариваемых поверхностей, частые поломки под вакуумом и т. д.), необходимость размагничивания **деталей** перед каждой сваркой и довольно высокие инвестиционные затраты ограничивают массовую сварку мелких деталей. Это, по-прежнему, используется в автомобильной промышленности для коробки передач.

При *сварке плазменной горелкой* с помощью дуги с выдуванием (реже с дугой прямого действия) используются высокие температуры источника плазмы, особенно ценные для сварки или покрытия нержавеющей сталью; эти перенесенные плазменные процессы могут справляться со значительной глубиной сварки, используя относительно недорогие горелки (менее €5.10⁴ за несколько кВт), экономящие пространство и универсальные. Этот тип горелки довольно часто используется на специализированных сварочных установках для небольших партий относительно крупных механических **деталей**.

9.3.2.2. *Качество металлургии*

Мы видели, что электронно-лучевая сварка позволяет создавать очень узкие и относительно глубокие валики, что приводит к общей низкой деформации и эффекту зажима, небольшой усадке расплавленной зоны, уменьшению остаточных напряжений и узкой зоне термического влияния со сниженными металлургическими характеристиками.

Хотя пористость неизбежна, можно легко вернуть ее разумные размеры и плотность. Они, как правило, большие и круглые на дне и сбоку расплавленной скважины, но в других местах маленькие (см. Рисунок 9.5). Эти дефекты могут быть сведены к минимуму путем уменьшения скорости сварки или колебаний валика (турбулентность). Можно избежать образования холодных трещин, которое может появиться в течение длительного времени после сварки, путем предварительного нагрева и снижения скорости сварки.

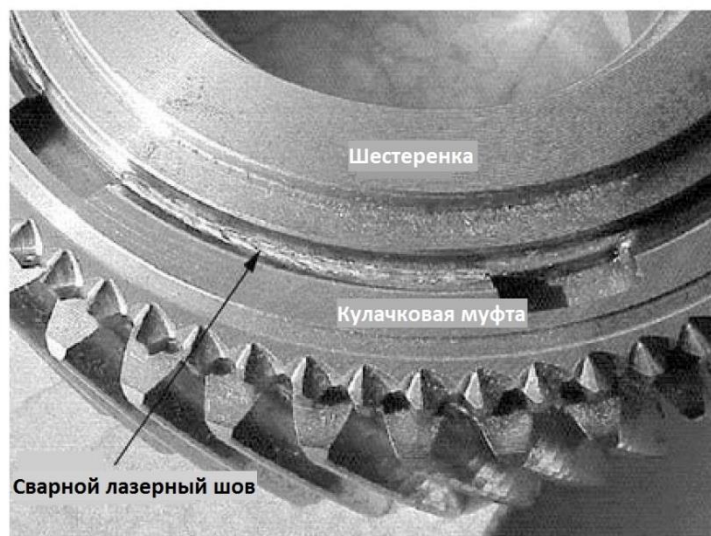


Рисунок 9.4. Вид валика, приваренного лазерной сваркой, и кулачковой муфты на шестерне

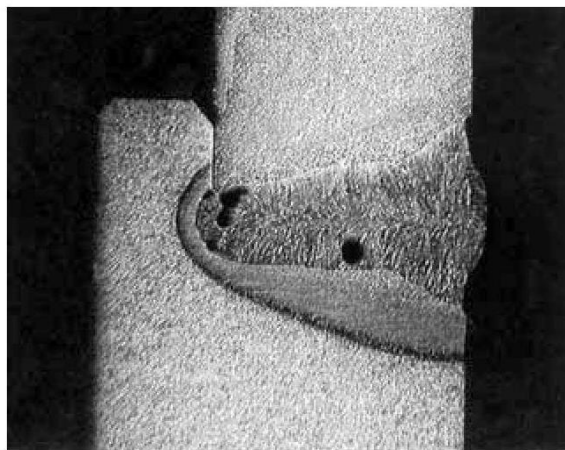


Рисунок 9.5. *Микрографический разрез сваренного лазером корпуса (из мягкой стали 3 мм) на муфте (в 16 млн. Cr 5) автоматической коробки передач*

В автомобильной промышленности механические компоненты, применяемые при сварке с помощью высокоэнергетического пучка, часто бывают круглыми, малого размера и состоящими из (в сочетании разных сортов стали): кольца кулачковой муфты для шестеренок механической коробки передач (см. Рис. 9.4), коробки передач, вилок и т. д. Как правило, лазерные сварные швы имеют сложную геометрию валиков и глубину менее 10 мм. Плотность энергетического пучка составляет от 1 до 10 кВт/см² (в 10 раз больше, чем у электрической дуги).

При использовании СО₂-лазеров значительная часть луча отражается прежде, чем начнется процесс синтеза (95%, затем 20%), а поглощение необходимо улучшить за счет использования черной краски или фосфатирования. Также при подготовке стыковых соединений необходимо избегать скошенных кромок, поскольку через отсвечивание они вызывают значительную потерю проникающей способности.

9.3.2.3. *Примеры сварных деталей*

Тюльпановидные детали обозначают скользящие трансмиссионные соединения, выступающие в качестве CV-соединения на внешней стороне коробки передач. Как показано на Рисунке 9.6, они состоят из корпуса, распорки и втулки, несущих три опорные поверхности, на которые опираются игольчатые подшипники трансмиссии (скользящее движение). Часто корпус и гильза находятся в ХС 42 (для локальной индукционной закалки), в то время как прокладка выполнена из низколегированной стали типа 10 Mn Cr 5.

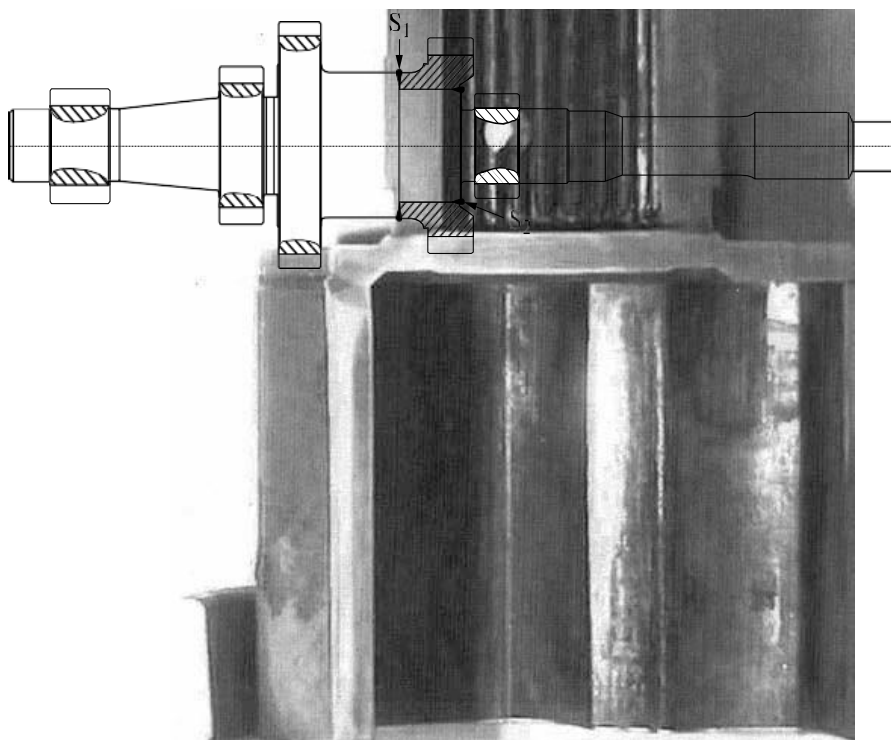


Рисунок 9.6. Пример сварного скользящего трансмиссионного соединения, сваренного лазером производимого в серийном производстве

Корпус может быть приварен электронным лучом или лазером к распорной втулке, а внутренняя втулка - к распорке. Например, на заводе в Ле-Мане Рено два сварных шва из одного и того же тюльпановидного типа свариваются CO₂-лазером мощностью 5,5 кВт со скоростью несколько тысяч в день.

Финальное локальное упрочнение за счет индукции рабочих поверхностей подшипника должно быть остановлено на расстоянии 7 мм от зоны сварки во избежание растрескивания. Сварка осуществляется вращением зажимного патрона, сначала для корпуса, затем для муфты с перекрытием при сварке около 10 мм. Время цикла составляет 1,3 минуты, в то время как глубина расплавленной зоны составляет около 5 мм на корпусе и 2,5 мм на втулке. Качество сварки контролируется с частотой двух или трех разрушающих микрографических тестов за смену.

Другой пример лазерной сварки состоит в *экранировании тюльпанов* с геометрической формой, близкой к рассмотренной выше. Это экранирование достигается сваркой тонкого листа нержавеющей стали 18/10 на верхней части втулки, изготовленной из ХС 42. Для сквозного сварного шва 1 мм на противоположной стороне удара лазерного луча требуется только один источник мощностью 800 Вт, и, очевидно, без абсорбирующего покрытия, для скорости сварки около 1 см в секунду.

Сравнительные испытания сварного соединения с использованием лазерного или электронного луча при тех же производственных затратах в размере €5*10⁵ и скорости в 400 деталей в час, откровенно говоря, не могли отдать предпочтение тому или иному из этих методов. Почасовая оплата в обоих случаях составляла около €2 на эксплуатационные расходы и 8 евро на техническое обслуживание.

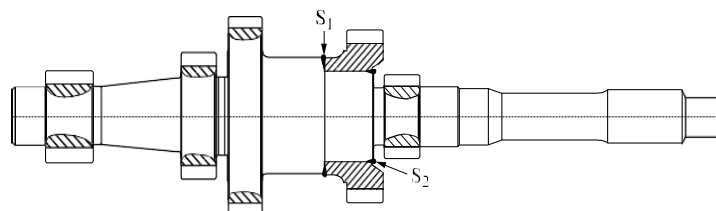


Рисунок 9.7. Установка шестерни на вал редуктора с помощью осевых и радиальных сварных швов

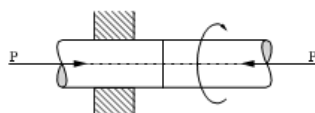
Третий пример лазерной сварки: шестерня 27 Мп Cr 5 на входном валу редуктора в 27 Мп Cr 5 (см. Рис. 9.7). Учитывая проблемы исривления зубчиков во время применения карбонитрации в конце диапазона, нужно было выполнить осевую и радиальную сварку двух частей. В зоне расплава содержание углерода составляло от 0,23 до 0,39%, а серы - от 0,040 до 0,060%.

Свариваемость зависит от рабочей конфигурации. Следовательно, радиальная сварка со скоростью 2 см/сек не представляла никаких проблем, тогда как осевая сварка, выполняемая на том же половинном валике, должна была выполняться сразу после этого (с меньшим искажением зубьев шестерни) и со скоростью сварки в два раза меньше во избежание нежелательного растрескивания.

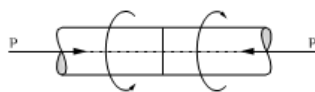
9.3.3. Сварка трением

9.3.3.1. Принцип работы

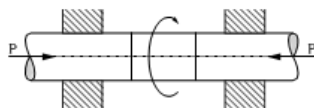
Процесс состоит из сборки двух частей путем взаимного вковывания в твердом или полутвердом состоянии, причем тепло для ковочно-диффузионной связи, возникающее в результате предварительного трения между подлежащими сварке поверхностями, получается путем приведения одной детали в быстрое вращение и последующего прессования ее к другой детали. Вырабатываемое тепло увеличивает температуру поверхности раздела без достижения точки плавления металла [CAZ 96, COL 83].



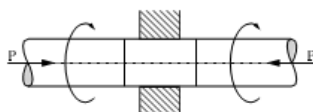
вращение одного компонента, удерживаемого вторым неподвижным компонентом



вращение в противоположных направлениях обоих компонентов против друг друга



сварка двух неподвижных деталей к третьей, удерживаемой между ними и приводимой во вращение



сварка двух компонентов, вращающихся против третьего неподвижного компонента

Рисунок 9.8. Различные способы сварки трением

Фактически существуют различные методы сварки трением, как показано на рисунке 9.8. В элементарной компоновке двух деталей одной за другой, одна из которых является фиксированной, можно наблюдать четыре фазы в процессе сварки:

- приведение подвижного компонента во вращение с постоянной скоростью: обычно несколько сотен оборотов в минуту для достижения приблизительно 2 м/с на внешнем крае компонента;
- приведение двух **деталей** в осевой контакт: при контакте происходит нагрев, возрастает момент сопротивления, но нет заметного уменьшения длины деталей;
- поддержание осевого усилия до тех пор, пока соединяющиеся плоскости не достигнут температуры ковки. Металл, вытесненный в крайних случаях полужидкого состояния, формирует валик, в то время как детали укорачиваются путем пластификации нагретых зон. Потеря материала начинается с металлического солидуса: под действием сжимающего усилия этот полужидкий металл вытекает наружу, как смазка. Продолжительность этого пластического трения адаптируется, с одной стороны, к механическим характеристикам свариваемых металлов и, с другой стороны, к сокращающим допускам сборки;
- после внезапной остановки вращающейся части, в течение разумно выбранного времени прикладывается дополнительная осевая нагрузка для осуществления соединения посредством встречной диффузии **деталей**. Валик увеличивается в объеме, сборка сокращается, и температура падает более или менее быстро в соответствии с потерями вследствие теплопроводности.

Как правило, в начале трения сварка низколегированных сталей требует мощности порядка 5 CV на см² сечения, а при постоянном вращении -половину этого порядка. Для профиля из среднеуглеродистой стали диаметром 20 мм приложенное давление составляет около 60 МПа в течение 5 секунд трения с нагреванием и 100 МПа на стадии ковочного потока.

Геометрическое решение, адаптированное под этот тип сварки, обычно представляет собой цилиндрические детали одинакового диаметра в месте сварки, трубы, цилиндрические поверхности на плоских поверхностях, поверхности при разделке кромок и т. д.

Металлургическая непрерывность получается путем встречной диффузии ползучести и может включать в себя совершенно разные сорта стали. Движущийся компонент сразу же прижимают к неподвижному компоненту на стадии вращательного нагрева. Получаемая структура зависит от размера деталей и прокаливаемости используемых сталей, но они, в основном, представляют собой закаленные конструкции из-за достигнутых высоких температур. Почти всегда сварные детали нуждаются в окончательной термообработке.

Преимущества процесса можно суммировать следующим образом:

- возможность сварки деталей из разных металлов и форм,
- без наполнителя или газовой защиты,
- повторяющиеся допустимые пределы,
- равномерный нагрев по окружности внутри солидуса самого легкоплавкого металла,
- возможность автоматизации и оперативной работы,
- нет тщательной подготовки поверхности (токарная обработка + обезжиривание),
- ограниченная мощность и низкий уровень обслуживания машины.

Ограничения процесса следующие:

- необходимо дать возможность для вращения одной из сборочных частей,
- сложность нагрева металлов с низким коэффициентом трения (чугун, латунь и т. д.),

- максимальный диаметр сварки: 150 мм для стержней, 250 мм для трубчатых профилей.

Необходимо отметить, что многие металлические пары могут быть сварены трением, в частности: сталь-алюминий, сталь-медь, сталь-никель и т. д.

Этот режим сварки в основном используется для механических **деталей** в автомобилях:

- валы коробки передач перед механической обработкой и науглероживанием (16 млн. Ст 5) или карбонитрированием,
- карданные валы в ХС 42 для окончательной закалки индукцией,
- биметаллические клапаны со штоком из мартенситной нержавеющей стали и головкой из жаропрочной аустенитной нержавеющей стали.

9.3.3.2. Несколько примеров производства

Связывание кованных заготовок

Можно проще или дешевле обрабатывать на станке некоторые кованные заготовки путем разделения на две части из двух различных сортов стали или соединением деталей, изготовленных различными способами (горячей, теплой, холоднойковки и т. д.).

Если эти детали являются осесимметричными, сварка трением необходима для достижения прочной связи между деталями, особенно, когда они имеют разные и сложные составы.

Как правило, этот процесс используется для сварки ведущего вала коробки передач, таких как представлен на рисунке 9.7 (вес 1,5 кг). В этом случае аппарат для сварки трением (типа SCIAKY, представленный на рис. 9.9) работает со скоростью 180 деталей в час с осевым усилием 250 кН (максимальное ковочное усилие).

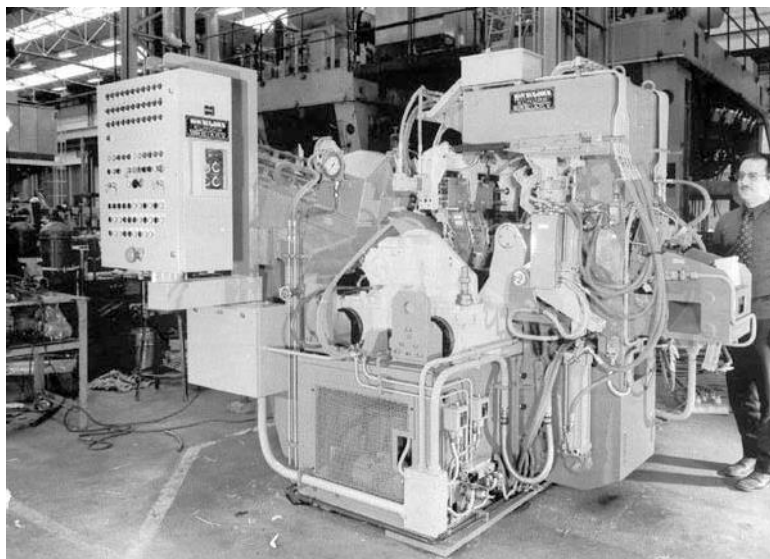


Рисунок 9.9. Вид установки для сварки трением

Деталь со сложной геометрической формой (зубья шестерни) подвергается горячей обработке и механической обработке, тогда как другая часть подвергается прямой холодной штамповке. Укорочение сварного вала во время сварки составляет 3 мм при длине детали 135 мм.

Вал тюльпановидной формы

Другим примером сварки трением является сборка полуоси трансмиссии на головку в форме тюльпана со скоростью 12 000 деталей в день: центральная часть шарнир равных угловых скоростей переднего привода должна примыкать к ведомому колесу (см. Рисунок 9.10).



Рисунок 9.10. Вал, сваренный в форме тюльпана

После автоматической загрузки и проверки длины в сборе, головка вала вставляется в зажимной патрон, а трубчатый вал блокируется тисками. Головка приводится во вращение при 2400 об/мин, а трение двух **деталей** обеспечивается регулированием осевой нагрузки. После торможения в течение 0,7 с усилиековки сохраняется до тех пор, пока не будет достигнута желаемая конечная длина, с постоянным контролем потребляемой мощности. Станок заказывает обработку сварного шва только в том случае, если оба из двух предыдущих параметров находятся в пределах допуска; если нет, деталь автоматически откладывается на конвейер бракованных деталей. Также проводится периодический визуальный контроль за круговой регулярностью валика. Помимо этих элементов управления, качество конечного продукта обеспечивается при соблюдении параметров механической установки.

9.3.4. Стыковой шов согласно эффекту Джоуля

9.3.4.1. Принцип

Соединение, полученное при стыковой сварке расплавлением (FRW), или стыковая сварка состоит из скрепления двух частей друг к другу без металлического присадочного материала, использования электрического тока для нагрева поверхности раздела, а затем приложения усилияковки между ними [CAZ 93, COL 83, NEG 95].

Механическая часть сварочного аппарата для стыковой сварки (см. Рисунок 9.11) состоит, прежде всего, из двух зажимов, в которых находятся компоненты, подлежащие сборке. Подвижный зажимной патрон управляется кареткой, приводимой в движение авторегулируемой системой перемещения, управляющей этапами сближения и контактного давления.

Понижающий трансформатор способен обеспечить выходной ток в несколько тысяч ампер при напряжении от 5 до 15 вольт. После подачи тока детали медленно сближаются, чтобы сохранить электрическое сопротивление на границе раздела. Неровности контакта испаряются, и когда части соединяются вместе с контролируемой скоростью, это приводит к тому, что новые неровности расплавляются и изгоняются в виде снопов искр.

Таким образом, поверхность раздела покрыта пленкой расплавленного металла, поэтому взрывная фаза играет тройную роль:

- нагрев деталей, более или менее контролируемый продолжительностью мигания,
- согласование стыковочных поверхностей по их длине без особых потерь металла,

- ограничение риска окисления испарением с поверхности раздела.

Сварка заканчивается быстрым контактом с высоким давлением с отключением питания. В дополнение к тесному контакту свариваемых поверхностейковка вытесняет с поверхности раздела расплавленную металлическую пленку, содержащую примеси и окисленные элементы. Скорость так же важна, как и давление, в частности, на толщину валика, который подлежит обработке.

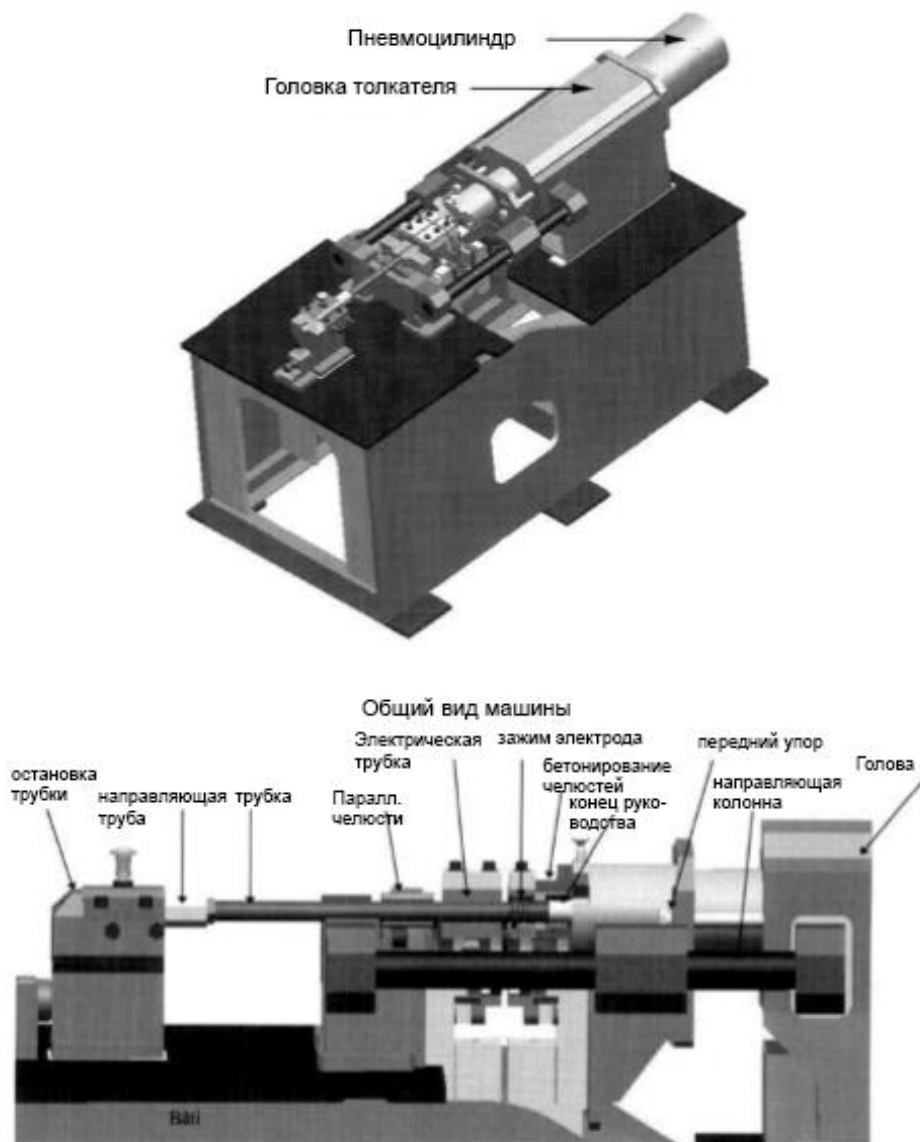


Рисунок 9.11. *Общий вид стыковой сварочной машины*

Этот вид сварки может предшествовать этапу предварительного нагрева, чтобы уменьшить силовое питание (обычно: $0,05 \text{ кВА/мм}^2$) и контактное избыточное давление (около 5 гбар).

В процессе сварки трением недостаточное на предварительной стадии выравнивание поверхностей, подлежащих сварке, позволяет им нагреваться до порога плавления, в то время как более поздний контакт под давлением позволяет боковым образом вытеснить поверхностный расплавленный металл и оксиды, а затем создать связь путем диффузии в твердой фазе. Не всегда легко оценить продолжительность вспышки и устранить все следы оксидов или обезуглероживания на границе раздела.

Таким образом, большинство легированных сталей, включая аустенитную нержавеющую сталь, можно сваривать без дополнительного нагрева, хотя эта процедура возможна для относительно небольших **деталей**, нагреваемых на небольшую длину.

В случае стыковой сварки эффектом Джоуля без взрывной фазы, предварительный нагрев ограничивается путем подгонки геометрии контактных поверхностей. Тогда скорость, с которой применяется сварочное давление, обеспечивает постепенное распределение пластических деформаций и температур, совместимых с конечной геометрией и желаемыми качествами соединения. В данном процессе можно представить определенное число альтернатив в зависимости от: скорости приложения давления к деталям, скорости пластификации и развития рекристаллизации вблизи сварного шва, несмотря на основные процессы, происходящие в твердой фазе. Толщина металла, связанная с пластификацией-перекристаллизацией и, следовательно, изменение размеров детали, может быть уменьшена до минимума, так же, как и размер мартенситного слоя и зоны вредных остаточных напряжений. Обычно необходимо удалять валики механической обработкой, но умеренная хрупкость мартенситных зон при отсутствии водорода не обязательно требует дополнительной обработки, если содержание углеродного эквивалента на границе раздела является разумным.

9.3.4.2. *Пример: приварка наконечника на распределительном валу*

Распределительные валы нового поколения состоят из стальных кулачков, собранных на тянутой трубе, со стальным концом, предназначенным для приведения в движение. Хотя труба (26 Мп 5) и конец (кованая сталь С25 или точеная сталь С35) изготовлены из сортов стали, относительно легко свариваемых с помощью лазерного луча, для повышения производительности стыковая сварка с помощью эффекта Джоуля может быть более предпочтительной.

В сварочной машине, представленной на рисунке 9.12, две медные зажимные губки находятся на расстоянии нескольких сантиметров от плоскости сопряжения, одна – это кромка концевой части, другая - это трубка. Последняя имеет конусообразную механическую обработку, которая при контакте с кольцевой поверхностью трубки локализует начальное электрическое сопротивление контакта. Тяговая нагрузка около 1500 даН постоянно прикладывается к подвижному зажимному патрону, удерживающему трубу, тогда как зажимы, удерживающие конец, зафиксированы.

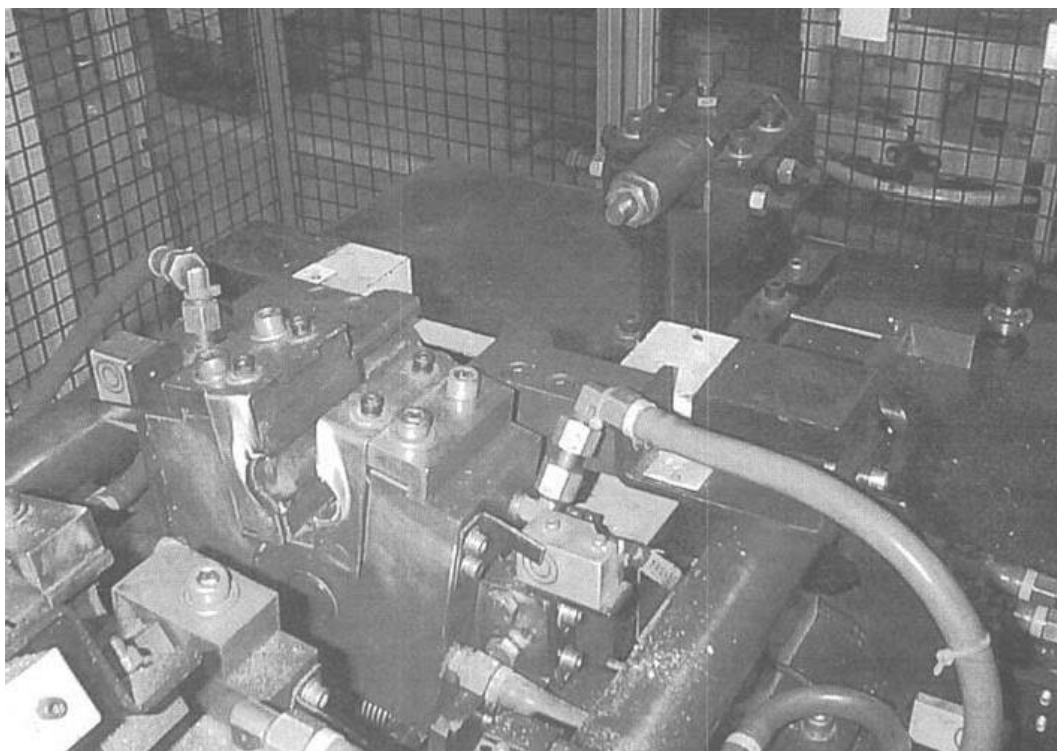


Рисунок 9.12. Деталь механических тисков представлена на рисунке 9.11

Многоступенчатая программа электрических входов может быть очень разнообразной, с током в несколько тысяч ампер, подаваемым в несколько периодов.

В течение 12 секунд типичный цикл включает следующие фазы:

- приведение двух частей в контакт под нагрузкой 1500 даН,
- предварительный нагрев в течение 0,25 секунд при 15 000 А, до 500 °С на границе раздела,
- первая вспышка 0,5 секунды при 28 500 А,
- термическая регомогенизация в течение 1 секунды, в то время как ползучесть на поверхности раздела увеличивает прохождение тока до номинала трубки,
- вторая вспышка длительностью 1 секунда при 13 500 А, в конце которой температура на поверхности раздела достигает 1200°С, а давление остается на уровне около нескольких МПа,
- 2-секундное время диффузии, когда завершается сварное соединение на границе раздела,
- шесть циклов нагрева по 0,5 секунды при 11 500 А с промежутком между каждым 0,5-секундным циклом. Эта фаза предназначена для замедления охлаждения аустенитных участков, уменьшения степени мартенсита и улучшения прочности швов.

В конце сварки на валике выполняется токарная обработка во избежание риска раннего возникновения усталостной трещины. Длина собранного вала после охлаждения должна быть точной до одной сотой миллиметра.

Качество сварки также контролируется отсутствием капель расплавленного металла, которые могут оставаться в трубке и отрываться в процессе эксплуатации с риском воспрепятствования смазке компонента.

Было доказано, что данный тип сварки обеспечивает большую гибкость за счет различных концевых деталей (в зависимости от типа двигателя) для сборки производственной линии и

хорошую воспроизводимость относительно геометрической точности сборки и усталостной прочности при изгибном скручении. Предел прочности при изгибе, определенная с помощью испытаний Болдуина, подтвердила металлургическое состояние, наблюдаемое в микрографических образцах: непрерывность при ультразвуковом исследовании, отсутствие окисления на начальной границе раздела и мартенситная толщина в несколько миллиметров. Отсутствие статического охрупчивания и большой усталостной прочности этих участков, даже вплоть до концов в повторно сульфированной стали С35, подтверждают, что неотпущенные мартенситы при 650 HV не представляют риска растрескивания, возникающего при переплаве (водород, остаточные напряжения).

9.3.5. Диффузионная сварка в твердой фазе

Различные технологии сборки в твердой фазе [COL 83] требуют одинаковых рабочих параметров: температуры, давления, времени действия, и можно наглядно представить области изменения этих параметров на одном графике (см. Рис. 9.13) для наиболее часто используемых методов.

Следует особо отметить, что график демонстрирует, как диффузионная сварка может быть наименее деформирующим и наименее разрушительным процессом по отношению к исходной структуре (соответствующий объем и степень повреждения).

Данная разработка является слишком молодой для того, чтобы достичь уровня перевода в промышленное производство, сопоставимое с предшествующими процессами [HOU 91]. Тем не менее, он все больше используется в передовых технологических отраслях: атомная энергетика, вооружение, авионавтика, электроника, биомедицина и т. д. Этот процесс также имеет в будущем перспективные результаты для таких сложных соединений, как чугун из стали, высоколегированные стали и неуглерожненное железо. Более производительная версия, динамическая диффузионная сварка, поместила бы этот процесс в рабочий диапазон традиционной промышленности.

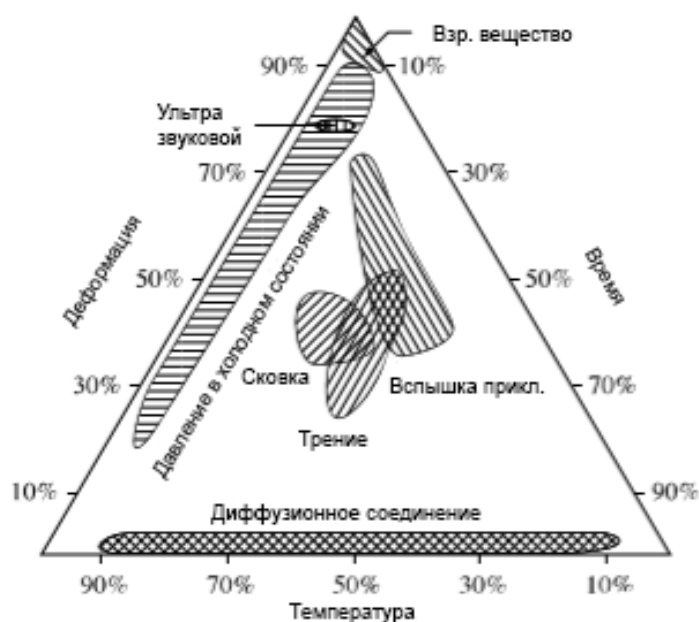


Рисунок 9.13. Расстановка на графике работы по температуры-давления-времени для различных способов твердофазной сварки

9.3.5.1. Описание и характеристики

Такая сварка требует тщательной подготовки свариваемых поверхностей с точки зрения превосходного выравнивания поверхности раздела, микрогеометрии, шероховатости и физико-химического состояния (устранение поверхностных оксидов). Затем они собираются в вакуумном резервуаре или в подходящей защитной среде, возможно, оснащенной средствами дополнительной очистки посредством ионного *распыления*, радиационного нагрева, а также зажимом, позволяющим поддерживать давление сжатия (несколько десятков МПа) просто ниже предела потока участвующих металлов при выбранной температуре. Эта температура всегда ниже, чем солидус свариваемых сплавов, обычно значительно ниже, чтобы избежать чрезмерной ползучести, влияющей на точность размеров свариваемой детали. Время сварки зависит от используемых сплавов. Если D - коэффициент взаимной диффузии, а W - длительность взаимодействия в условиях ограничения, то принимаются меры, когда средняя длина диффузии $\lambda = (Dt)^{1/2}$ превышает несколько микрометров. Фактически, создание металлического соединения зависит не только от встречной диффузии и горячей рекристаллизации, но также от поглощения дефектов контакта по механизму, аналогичному механизму спекания.

Динамическая диффузионная сварка состоит из нагревания **деталей** до температуры сварки как можно раньше (индукционный нагрев) путем модуляции контактного избыточного давления на уровне чуть ниже *предела текучести* наименее стойкого материала.

Таким образом, очень быстрый поверхностный контакт достигается очень быстро, и через несколько минут может быть установлена прочная металлическая связь. Таким образом, соединения между серым чугуном и сталью стали промышленно возможными, с общей прочностью выше, чем у чугуна [CAL 86].

Макроскопическое деформирование деталей можно ограничить на 2% от нагретой длины, и последующей механической обработки часто можно избежать, тем более что детали, собранные в защитной среде, не окисляются.

Локальное выделение тепла из конструкций во время сварки не всегда требует дополнительной термической обработки сварного соединения.

Качество сварного шва, прежде всего, связано с чистотой и близостью контактов поверхности. Легкое трение снажимом (относительное микроскольжение) позволяет улучшить этот контакт.

9.3.5.2. Области применения

Данный тип соединения следует, главным образом, развивать в микромеханике и для соединений из стали, чугуна или высоколегированных сталей, которые трудно сваривать другими способами. Так, например, можно сваривать науглероженные или азотированные детали, удаляя обработку только с поверхностей соединений, либо маскируя их, либо механической обработкой. Также возможно вставить тонкий никелевый лист перед тем, как привести в контакт стальные поверхности.

Диффузная сварка может использоваться на деталях, уже подвергнутых термохимической обработке. Преимуществом может быть упрощение диапазонов и гибкость производственной линии. Таким образом, он использовался для карбонитридных валов привода

тюльпановидной формы в 27 Cr Mo 4 [LEP 92], так как сварка трением не дает хороших результатов в этих конструкциях.

Принятые условия сварки могут быть следующими:

- тщательная механическая полировка ($R_{\max} = 1$ мкм) с последующим обезжириванием,
- давление соединения: 300 МПа, циклически повторенное в течение времени применения,
- пятисекундная сварка при температуре около 1050°C *в вакууме*.

Однако следует отметить, что:

- необходима хорошая шероховатость на поверхности раздела, независимо от того, сохраняем ли мы карбонитрированный слой на границе раздела;
- твердость карбонитрированного слоя теряется на высоте, на которую воздействует реактор;
- лучше работать с сортами с содержанием серы менее 0,020%, чтобы не затрагивать вязкость на поверхности раздела;
- свойства поверхности раздела можно в дальнейшем улучшить путем перекристаллизации, возникающей, например, в результате механического упрочнения из-за относительных угловых колебаний или колебаний образцов во время повышения температуры;
- на границе раздела остаются микропористости размером около 20 нанометров, стабилизированные диффузией элементов основного металла (S, P, N) около границы раздела во время сварки.

При почти таких же условиях эксплуатации могут быть получены характеристики сильного механического соединения путем диффузной сварки сочетаний: чугун SG/перлитный чугун и чугун/сталь со вставкой никелевой полосы толщиной 10 мкм.

9.4. Спецификации и контроль сварки этих деталей

Очевидно, что различные режимы сварки являются объектом эксплуатационных требований и контроля качества [NOR 83], а также нормой для любого массового производства механических **деталей**.

Эти спецификации и соответствующий процесс прослеживаемости основаны, главным образом, на предыдущем опыте и на систематическом документировании тепловых циклов или параметров теплового источника, позволяющих управлять этими циклами.

В небольших механических цехах с небольшими объемами сварные швы могут быть проверены по отдельности с помощью различных методов неразрушающего контроля: испытания проникающего красителя и магнитоскопии для выявления дефектов, рентгенографии и ультразвука для определения внутренней пористости.

В крупносерийной автомобильной и машиностроительной промышленности контроль качества производства должен быть строгим, гибким и простым, как мы кратко покажем в качестве примера безопасности в процессе сварки.

Предварительное изучение (стадия испытаний опытного образца) должно изначально определить методы и диапазон средств управления, которые легко реализовать на производственной линии; это один из ключей к успешному контролю качества

изготавливаемых деталей. Спецификации различных дефектов, которые могут повлиять на сварной шов, должны быть установлены очень точно, чтобы быть практичными и эффективными. План по *обеспечению качества*, применяющий и проверяющий эти спецификации, должен быть простым и, в частности, должен позволять разработку без риска для частоты контроля, чтобы подгонять их в процессе производства. Этот план также должен предоставить возможность сократить хранение частей в корпусе между двумя проверками контроля.

Поскольку эти два документа имеют юридическое основание, необходимо иметь в виду, что все упомянутые процедуры должны поддаваться проверке. Это подтверждает строгую очевидность, которой они должны обладать, чтобы их можно было применять реальным способом.

9.4.1. Спецификации качества сварки

9.4.1.1. *Содержание*

В этом документе необходимо перечислить всевозможные дефекты сварного шва (макро и микро) и указать уровень их приемлемости; он также определяет средства, которые будут использоваться для осуществления контроля.

Необходимо точно определять и учитывать приемлемые уровни дефектов:

- металлургические риски: появление микро-дефектов, таких как трещины, пузырьки, усадка и т. д.,
- статико-механические свойства сборки: тяговая мощность, сдвиг, разрыв, кручение и т. д.,
- динамические свойства: удар, усталость.

Металлургические риски сводятся к минимуму благодаря предварительному выбору материала (в спецификациях должен быть указан допустимый уровень содержания углерода, серы, фосфора и т. д.) и, если трудно избежать трудных сортов стали, по диапазону и параметрам сварки (предварительный нагрев, последующий нагрев, повторный нагрев *на месте* и т. д.); в спецификациях будут подробно описаны средства управления производительностью этой операции, а именно, с помощью распечатки следов параметров сварки машины.

Механическая прочность сборки обеспечивается ограничением макродефектов и правильной геометрией сварного шва: в технических характеристиках следует указать, что во всех направлениях сварного шва размер соединения должен быть больше, чем толщина самой тонкой части.

Благодаря литью или условиям сварки, предотвращающим чрезмерную хрупкость сварного шва, динамические свойства сборки сводятся к минимуму по отношению к ударному воздействию; что касается усталостной прочности, то они улучшают свойства путем ограничения всех присущих геометрических особенностей, которые могут привести к возникновению трещины.

Например, рекомендации на рисунках с 9.14 по 9.16 показывают, как можно лучше контролировать статическое и динамическое поведение сварного шва с помощью геометрических ограничений шва.



Рисунок 9.14. Возникновение усталостной трещины

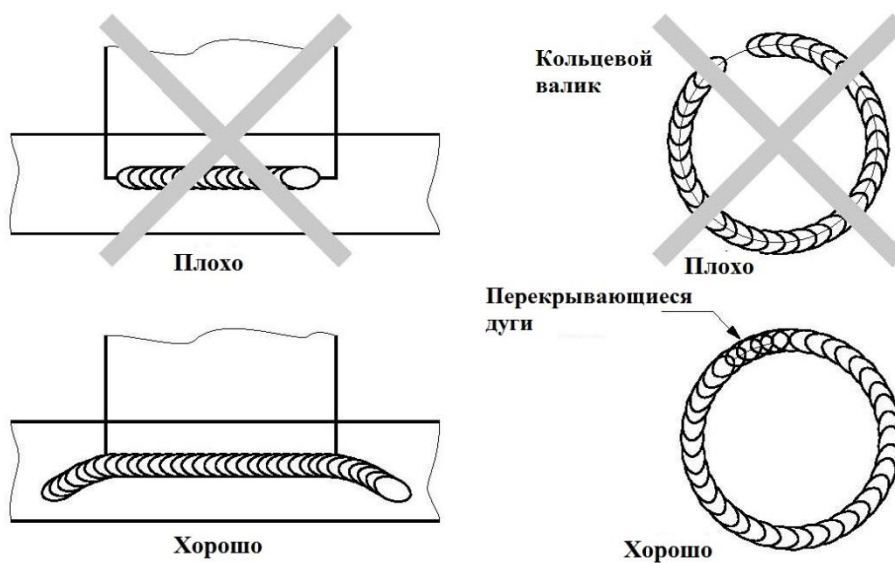


Рисунок 9.15. Пример разработки плана мониторинга

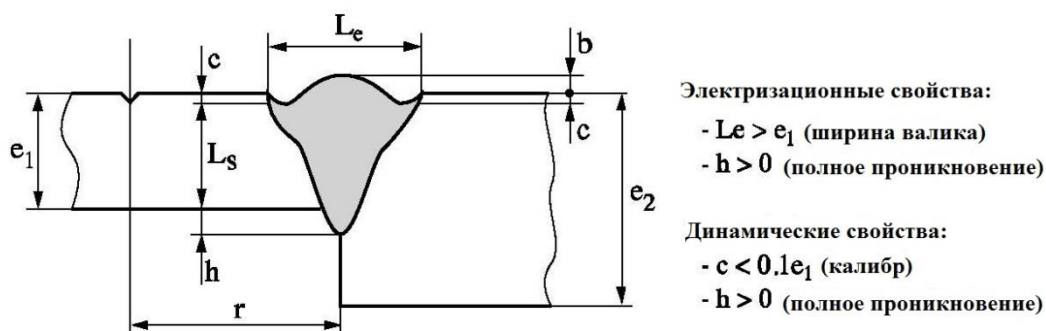


Рисунок 9.16. Валик при лазерной сварке

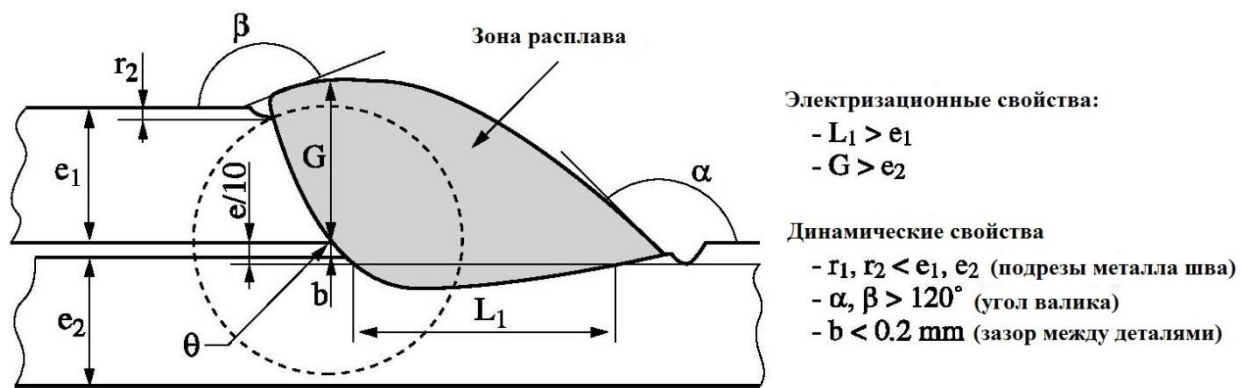


Рисунок 9.17. Валик при дуговой сварке

Внутренние микродефекты: их возникновение, в основном, связано с различными металлургическими рисками, о которых уже говорилось.

Пример приемки для лазерной или электронной сварки показан ниже.

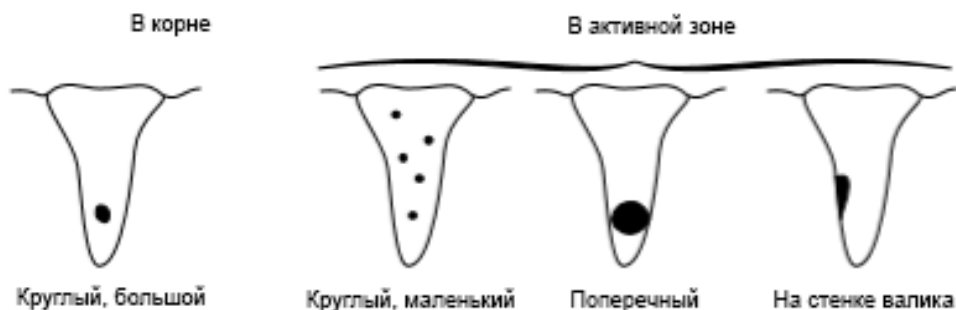


Рисунок 9.18. Пористость

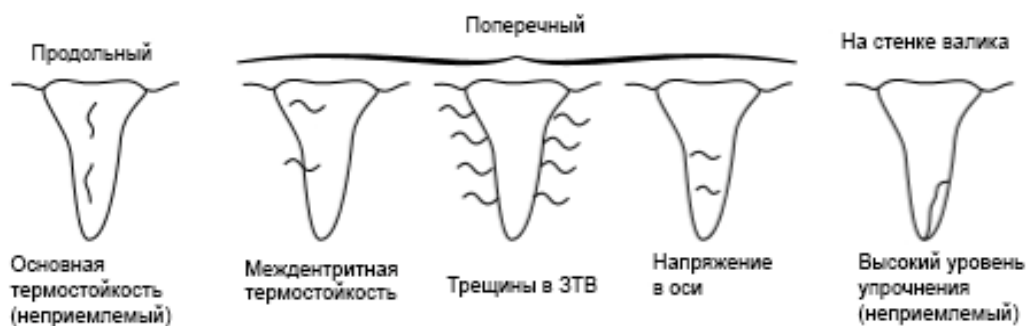


Рисунок 9.19. Трещины

Методы контроля таких дефектов (статистики по определенному количеству микрографических разрезов, ультразвуку и т. д.) сложно реализовать при массовом производстве.

Часто признается, что при точном подборе **деталей** вред от дефектов, не требующих немедленного вмешательства, остается в приемлемых пределах. В случае же, если они прослеживаются на поверхности, как в приведенных примерах, их появление более не допустимо.

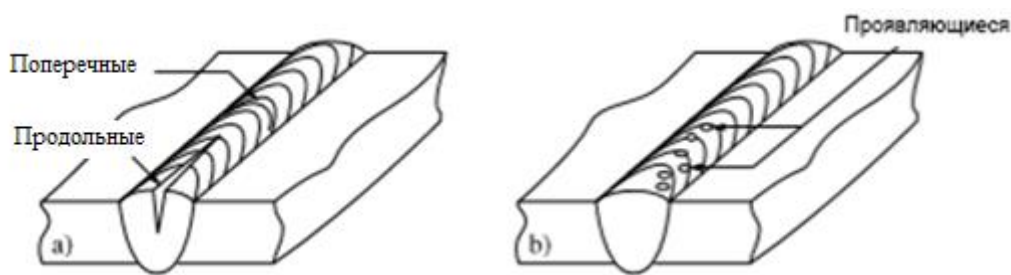


Рисунок 9.20. (а) Трещины и (б) внезапно появляющаяся пористость

Способ уменьшения и упрощения контроля продукции состоит в допущении всех микродефектов, если их не могут обнаружить при визуальном наблюдении за валиком (невооруженным глазом или методом умеренного увеличения). Несомненно, такое одобрение внутренних дефектов должно быть обосновано предварительным проверочным испытанием деталей.

9.4.1.2. График основной спецификации

Для производства **деталей**-прототипов определяется предварительный график спецификаций, учитывающий все вышеперечисленные принципы. Этот документ важен в качестве образца; он позволяет изготавливать детали с хорошо известными характеристиками, тем самым облегчая возможные будущие усовершенствования.

В большинстве случаев рекомендации этого предварительного графика позволяют получить качество сварки, удовлетворяющее требованиям к характеристикам компонента во время проверочных испытаний.

Однако возможно, что в ходе этих испытаний нагрузки, превышающие предусмотренные, приводят к разрушению сварного шва. Детальная оценка перерывов позволяет уточнить уровни допусков, чтобы установить окончательный график спецификаций.

Обычно поправки касаются геометрии соединения или более строгого допуска к дефектам, приводящим к началу усталостного растрескивания.

9.4.1.3. Окончательный график спецификаций

Это документ для применения **деталей** в массовом производстве. Включая изменения, полученные в результате анализа проверки опытного образца, данный документ будет включать:

- Список и описание дефектов,
- Уровень приемки дефектов,
- Описание средств для оценки данного уровня приемки.

Метод контроля дефектов не задают, но его следует выбирать среди тех, что упомянуты и проверены в графике спецификаций. Выбор этих средств и их периодичность применения является предметом плана обеспечения качества сварного шва.

9.4.2. План по обеспечению качества сварного шва

С его помощью применяются и проверяются методы выборки технических характеристик для каждого сварного шва собранного компонента.

9.4.2.1. Содержание

Для каждого дефекта, указанного в списке технической характеристики, будет указано:

- метод контроля, используемый для проверки этого дефекта (точная проверка параметров сварки, визуальная, макрографическая и др.);
- частота для каждого из этих элементов управления (100%, каждая n -я часть и т. д.),
- решение, принятое в случае несоответствия (сигнал тревоги, отказ от детали или партии, ректификация и т. д.); в этом последнем случае процедура ректификации должна быть описана и подтверждена,
- действия, выполняемые при регистрации результатов контроля (журналы, графики и т. д.) и для облегчения проверок (стандартные детали, хорошие и плохие примеры **деталей** имеются на рабочем месте и т.д.).

Можно использовать архивную таблицу, подобную представленной на Рисунке 9.21.

План по обеспечению хорошего качества учитывает, что выбранные методы контроля должны быть максимально простыми. Необходимо настоятельно рекомендовать проверку параметров сварки сварочной машины и заключение по любому отклонению при появлении общеизвестных дефектов сварного шва. Следует приветствовать системы непосредственного наблюдения за валиком после сварки (камера и т. д.), поскольку следующие средства управления часто значительно сокращаются. Необходимо одобрить методы неразрушающего контроля, чтобы минимизировать общие затраты на контроль. С каждым контролем рекомендуется точная регистрация измеряемых параметров. Хранение партий в режиме ожидания в ожидании результатов контроля должно быть сведено к минимуму, исходя из соображений потока продукта; отслеживание параметров, приведенных ранее, является хорошим средством обеспечения хорошего качества потока с помощью системы порогов оповещения с немедленным корректирующим воздействием на параметры сварки без блокировки партии. Частота каждого контроля должна быть гибкой: близко друг к другу в процессе разработки, часто в начале производства, цель состоит в том, чтобы расположить эти элементы контроля в процессе производства с целью снижения затрат. Это решение должно приниматься только на основе надлежащего учета.

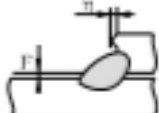
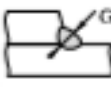
Описание дефекта		Метод контроля	Решение о приемке валика		Рабочая станция по принятию мер
Трещины, появляющиеся трещины					
Пустоты в литье, возникающие пористости					
Подрезы					
Недостаточное проникновение					
Канальная пора Чрезмерное проникновение					
Дефект шва, свернутый валик					
Недостатки позиции, отклонение валика					
Волнистый валик					
Отверстие, неоднородность валика					
Плохое наложение швов					
Слишком низкое сечение валика Недостаточная толщина шва					
Зазор между частями J слишком большой					

Рисунок 9.21. Бланк для архивной записи

Это демонстрирует важность последующего контроля и регистрации результатов контроля. Таким образом нужно писать порядок изменения частотности («после n проверок, предоставляющих удовлетворительное качество, контроль частоты будет ...»). Поскольку эффективный частотный интервал может быть определен только с учетом надежности материала, то только пользователи данного материала могут установить это.



Рисунок 9.22. Методы контроля

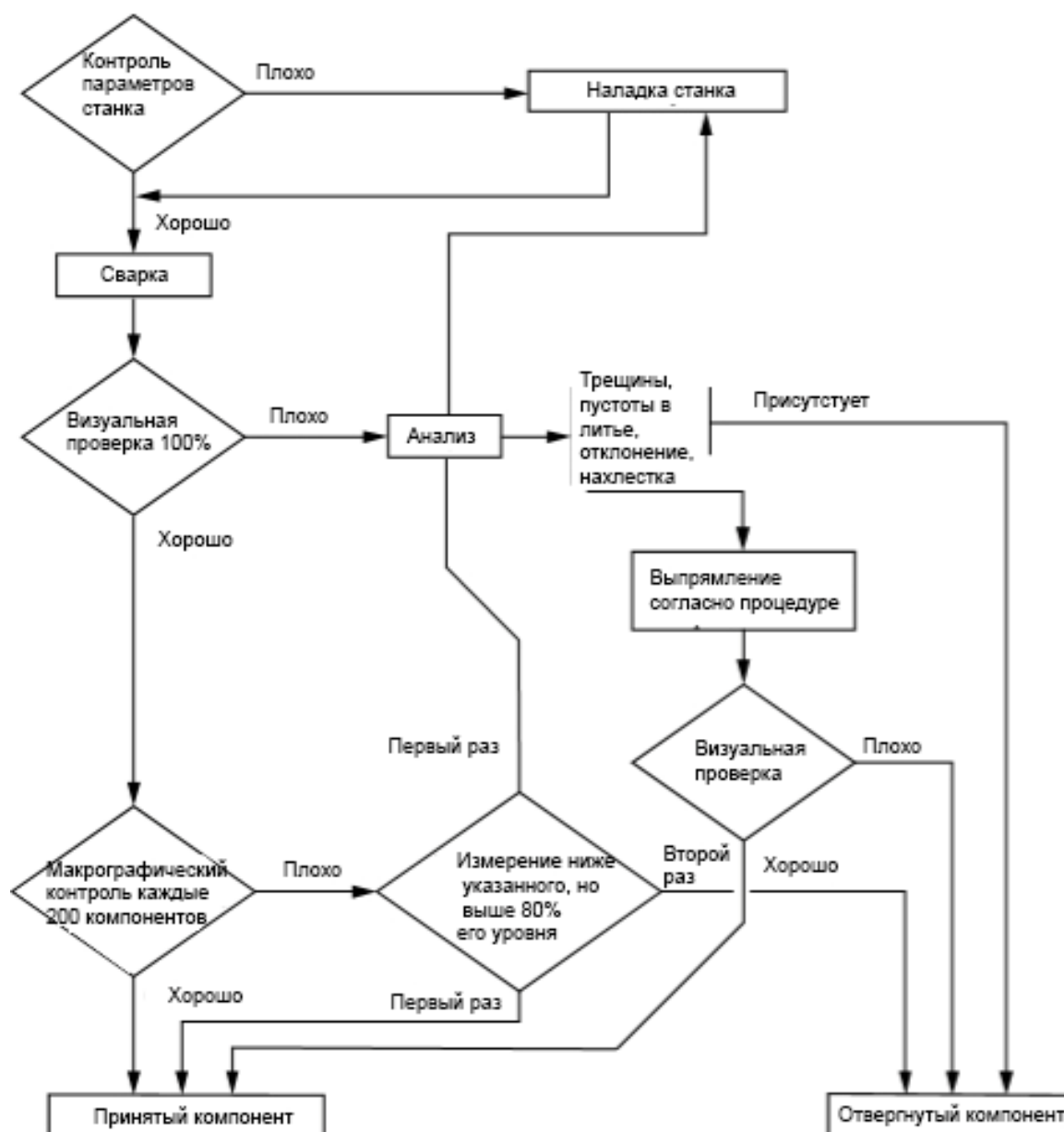


Рисунок 9.23. Пример плана по обеспечению качества

Разработка плана обеспечения качества: перечислив все дефекты, подлежащие контролю, в соответствии с графиком спецификаций шва сварного соединения, методы контроля должны использоваться в порядке, указанном на рисунке 9.22. При отсутствии обнаружения дефектов, план контроля прекращает свое существование.

9.4.2.2. Пример плана по обеспечению качества

На рисунке 9.23 приведен пример плана по обеспечению качества, созданного для лазерной сварки «собачек» на зубчатом валике коробки передач.

9.5. Развитие и общие направления

9.5.1. Эволюция контекста

Можно предугадать, что увеличение интервалов между периодами разборки для

технического обслуживания, тенденция к взаимозаменяемости модулей, снижение себестоимости и нормы времени на соединение приведут к росту влияния автоматической сварки. Для серийно производимых механических **деталей** необходимо позаботиться о:

- гибкости установки: одна и та же машина должна быть способна сваривать все варианты одного и того же или родственного компонента и, следовательно, будет иметь роботизированное перемещение и средства с допустимым пределом регулировки траектории;
- время цикла, которое должно быть адаптировано под длительность обработки;
- задержки смены инструмента и профилактического обслуживания, которые не снижают эксплуатационную эффективность установки;
- требования к оперативному контролю.

Эти *технологические* ограничения устраняют некоторые мелкомасштабные процессы сварки или пайки твердым припоем, используемые в механизированной сварке стальных конструкций, а также некоторые техники, для которых еще не существуют подходящие станки.

9.5.2. Положительные процессы

Сварка с тепловым потоком высокой плотности кажется наиболее перспективной для неосесимметричных деталей, не подходящих для сварки трением или контактной сварки, поскольку затронутые конструкции применяются только к небольшой части компонента относительно воспроизводимым образом. Пример биметаллических клапанов, сваренных трением в полосу из нескольких десятых миллиметров неотпущенного мартенсита при 650 HV, представляет преимущество значительного уменьшения толщины переплавленного слоя. Так или иначе, уменьшенная зона влияния должна сопровождаться уточненным выравниванием поверхности раздела и достаточной пластификацией для того, чтобы обеспечить тесный контакт между свариваемыми поверхностями. Удачный компромисс между точностью контакта, локализацией температур, близких к расплавлению основного металла, и пластификация-рекристаллизация поверхности контакта играют ключевую роль для автоматических установок для сварки легированных (или нелегированных) стальных **деталей**.

Следует ожидать многого от компактных лазеров, с точки зрения развития производства (YAG или диодные батареи), так как они не предполагают дорогостоящего технического обслуживания.

Напомним, что основу мощного лазерного диода составляет ряд диодов ($0,1 \times 0,6 \times 10$ мм), которые излучают очень расходящийся пучок (90° и 20°). Как правило, такой ряд излучает 30 Вт при длине волны около 900 нм. Чтобы увеличить общую мощность на выходе, ряды накапливаются, а расхождение луча корректируется с помощью соответствующей микрооптики, непосредственно связанной с рядами. Таким образом, можно создать очень мощные, но компактные устройства, размером с зажигалку, с мощностью около 300 Вт.

В настоящее время непрерывная мощность до 4 кВт может обеспечить плотность мощности $3,104 \text{ Вт/см}^2$ в фокальной точке. Общая электрическая эффективность составляет 30% при продолжительности от 10 до 20 000 часов. В настоящее время в Институте Лазерной Техники в Экс-ла-Шапель ведется работа по достижению плотности мощности 106 Вт/см^2 при мощности в несколько кВт и продолжительностью более 25 000 часов.

Таким образом, возможность сбыта на рынке очень большая. Такие тепловые источники соединяются с роботизированными устройствами, выполняющими стадию контакта и

пластификацию границы раздела с высокой точностью, для широкого диапазона геометрических структур и с процессом контролируемой дисперсии. Такая автоматическая станочная машина зачастую намного дороже, чем лазерный источник.

Кучность, уменьшенные капиталовложения и эксплуатационные затраты также препятствуют использованию плазменных горелок с дугой прямого действия, точность позиционирования дуги которых, безусловно, выше, чем у дуговых горелок с обдувом.

С другой стороны, расширение технологии диффузионной сварки за пределы микромеханики и сплавов, которые трудно сваривать иными способами, остается маловероятным в ближайшем будущем.

Сварное соединение встык с помощью эффекта Джоуля остается ограничением для сварки скреплений на трубах, но должна улучшить знания о том, что именно необходимо для создания сварного металлического моста с перекристаллизацией или без нее, с получением выгоды от пластичного превращения и хорошей вязкости в мартенситах TRIP.

И наконец, перспективы развития многоцелевых роботизированных установок могут заставить нас пересмотреть определенные металлургические решения для механических **деталей** или поставить под вопрос традиционное соединение частей.

Первый пример: сваренный механизированный сваркой передний треугольный рычаг подвески из листовой стали

Рычаг подвески соединяет ось колеса с кузовом автомобиля, допуская вертикальные перемещения через шаровое соединение. Он связан с жесткостью подвески в отношении продольных сил (ускорение, торможение) и боковых сил на сгибах. При разработке экономичного рычага подвески решения из листовой стали предпочтительнее закаленных кованых сталей, но труднее воспользоваться преимуществами более высокой механической прочности новейших сортов стали (высокопрочные листы или нержавеющая сталь), поскольку усталостные трещины систематически начинаются с пяты сварного шва. При проектировании необходимо отодвинуть валики от высоконапряженных зон, что часто бывает сложно для **деталей** повышенной нагрузки. Особенно предпочтительной была бы установка, связывающая наиболее локализованную сварку и отверждение.

Второй пример: сварка и плавление с твердым припоем шестеренок на валах

С точки зрения снижения веса и экономичности была бы интересна возможность замены механически обработанного вала с шестеренками, которые с трудом закаляются без излишних искажений, на соединение предварительно изготовленных и закаленных шестерен, которые могут быть приварены или спаяны к полый оси. Ввиду системы винтового зацепления, нагрузки на оси и изгибы в процессе работы оправдывают особое внимание к испытанию на прочность границ сваренной или спаянной лицевой поверхности шва. Во избежание размягчения при пайке, данная процедура должна предшествовать цементации и происходить при несколько более высокой температуре.

Наконец, во всех случаях сварки мы сталкиваемся с двумя альтернативами. С одной стороны, мы имеем сложное выравнивание поверхностей раздела из-за недостатков (по техническим или экономическим причинам) в геометрической точности или подготовки свариваемых поверхностей. С другой стороны, обильная подача металла и энергии к швам приводит к риску охрупчивания из-за дефектов и структур, возникающих в них. Повышенная точная механическая обработка деталей приводит к тому, что сварка в твердой фазе

приобретает все большее значение.

9.6. Выводы

Мы подчеркнули различия, исходя из потребностей сварки, между машинной сваркой конструкционных сталей, которая изучалась в предыдущих главах, и сборкой механических **деталей**, часто из легированной стали, непригодной для традиционной сварки с обширными переплавленными зонами. Мы также выявили требования массового производства с точки зрения продолжительности цикла, автоматизации и контроля качества.

При этом условии сварочные процессы, в которых используется минимум расплавленного металла, совместимы с точным выравниванием поверхностей раздела и механической отделкой. Они часто кажутся наиболее подходящими с точки зрения металлургии (воспроизводимость, низкий уровень усадки и пористости, лучший контроль остаточных напряжений и т. д.), с точки зрения *процесса* (автоматизация) и облегчения проверки качества. В этих категориях деталей окончательная термообработка часто уменьшает риск образования холодных трещин, связанного с довольно высоколегированными сплавами.

Сварка трением - это типичнейший процесс для всех **деталей** цилиндрической формы в относительно высоколегированных сталях или сложных сплавах. В его распоряжении имеются калиброванные производственные станки, способные обрабатывать крупные партии. Пример биметаллических клапанов, сваренных трением, с тонким слоем очень твердого мартенсита, не подвергнутого термической обработке, демонстрирует металлургическое преимущество существенного уменьшения толщины переплавленного слоя.

В последнее время стыковая сварка с помощью эффекта Джоуля стала возможной на автоматизированных станках, также позволяющих комбинировать другие операции на трубчатых деталях.

Диффузионная сварка является слишком недавней разработкой, чтобы предлагать ее использование на стандартных станках. Тем не менее, ее можно рассматривать в качестве последнего средства при особенно затруднительных случаях сварки, где высокая степень точности в выравнивании поверхностей контакта и очистке допускает достаточную рекристаллизацию, встречную диффузию и микроскопическое вдавливание при ползучести. Кажется, она является потенциально интересным решением для сборки железных сплавов, вообще не поддающихся сварке.

Среди определенных методов, только что представленных, и традиционной дуговой сваркой, малоприспособленной к высоколегированным сталям, мы находим сварочные процессы, основанные на высокоэнергетических пучках: они могут ограничить «металлургическое повреждение» в зоне влияния настолько узким слоем, что это не имеет никаких последствий для общего проявления качеств. Новые лазеры, работающие с наименьшей длиной волны (для благоприятного поглощения излучения), компактные, не особенно требуют больших затрат, простые в настройке и экономичные в обслуживании - обычно считаются наиболее перспективными. При этом условии электроннолучевая сварка должна быть предназначена для более толстых деталей, длинных сварных швов или нанесения покрытия на сосуды под давлением. Кроме того, плазменная пушка с дугой прямого действия подойдет для механических **деталей** и сварных соединений среднего размера.

9.7 Список использованной литературы

- [AWS] American Welding Society, *Welding Handbook*, 8th edition, Section 1.
- [BON 87] BONNET C., “Traitements thermiques associés au soudage des aciers”, *Techniques de l'ingénieur*, B 7810, 1987.
- [BOU 82] BOURGEOIS P., *Soudage à l'Arc Tome 3, Procédés avec fil électrode fusible, procédés avec électrode réfractaire*, Publication de la Soudure Autogène, Paris, 1989.
- [BOU 92] BOURGES P., BERNIOLLES J., “Laser beam welding of high hardness steels: applications to armoured vehicles”, *ICALEO' 92*, Laser Institute of America, p. 574-583, 1992.
- [BOU 95] BOURGES P., CHEVIET A., “Soudage par faisceau d'électrons d'aciers au chromemolybdène de forte épaisseur pour application en pétrochimie”, *Colloque AFIAP 1995*, Paris, 17 October 1995.
- [CAL 86] CALVO F.A., “Soldadura por diffusion de materiales ferreas”, *Soldadura*, 16, 3, p. 125, 1986.
- [CAZ 93] CAZES R., “Soudage par résistance”, *Techniques de l'ingénieur*, B 7720, 1993.
- [CAZ 94] CAZES R., “Soudage par faisceaux à haute énergie: faisceau d'électrons et laser”, *Techniques de l'ingénieur*, B 7740, 1994.
- [CAZ 95] CAZES R., “Soudage à l'arc”, *Techniques de l'ingénieur*, B 7730, 1995.
- [CAZ 96] CAZES R., “Soudage par fiction”, *Techniques de l'ingénieur*, 7745, 1996.
- [CAZ 97] CAZES R., “Soudage automatique”, *Techniques de l'ingénieur*, BM 7750, 1997.
- [COL 83] COLLECTIF, Welding, Brazing and Soldering Arc Welding of Low-alloy Steels and Ferrous Metals, *Metals Handbook* no. 6, ASM, 1983.
- [DEB 84] DEBIEZ S., “Détermination des conditions de soudage des aciers faiblement alliés pour prévenir le risque de fissuration à froid”, *Soudage et Techniques Connexes*, May- June 1984.
- [DER 81] DE ROO P., DEVILLERS L., MARANDET B., “Conditions d'amorçage et de propagation d'un défaut localisé dans le métal fondu d'un joint soudé”, *Quatrième réunion SFM-SIS*, May 1981.
- [FAB 83] FABER G., GOOCH T., “Assemblages soudés entre aciers inoxydables et aciers faiblement alliés”, *Soudage et Techniques Connexes*, March-April 1983.
- [FEN 84] FENN J., “Solid phase welding: an old answer to new problems”, *Metallic Materials Technologies*, vol. 16, no. 7, p. 341, 1984.
- [GRA 81] GRANJON H., “Travaux sur le soudage par faisceau d'électrons”, *Soudage et Techniques Connexes*, January-February 1976, May-June 1981.
- [GRA 95] GRANJON H., *Bases métallurgiques du soudage*, Publications de la Soudure Autogène, Eyrolles, 1995.
- [HOU 91] HOURCADE M., “Le soudage-diffusion à l'état solide”, *Traitement Thermique – 250-1991*, p. 21-29, 1991.

- [LEP 92] LE PAGE G., Soudage-diffusion de l'acier 27 Cr Mo 4 et de l'acier 100 Cr 6, PhD Thesis, CNAM, 1992.
- [LIE] LIEURADE H.P., "Application de la Mécanique de la Rupture à la fatigue des joints soudés", *Communication IIS*, Ljubljana, September 1982.
- [MAZ 82] MAZUMDER J., "Laser welding, state of the art review", *Journal of Metals*, p. 16- 24, July 1982.
- [NEG 95] NEGRE J., *Le Soudage Electrique par Resistance*, Publication de la Soudure Autogène, Paris, 1995.
- [NOE 84] NOEL L., "Brasage", *Techniques de l'ingénieur*, B 5195, 1984.
- [NOR] NORME FRANÇAISE NF E 83-100: "Construction d'ensembles mécanosoudés – Techniques de soudage", – Partie 1: "Généralités – terminologie – classe de qualité desoudure – étendue des contrôles", – Partie 4: "Fabrication – Contrôle".
- [VAL 83] VALETTE G., CHEVIET A., "Soudage F.E. de l'acier à 2,25%Cr-1% Mo en forte épaisseur", *3e CISFFEL*, Lyon, 5-9 September 1983.

Сварка стальных конструкций

10.1. Введение

10.1.1. История

Хотя электросварка датируется концом 19-го века, она является сравнительно недавним способом возведения стальных конструкций. Судостроительная, автомобильная, авиационная и котельная отрасли быстро переняли ее, потому что это дало значительные преимущества в снижении веса или решило проблемы водо- или воздухопроницаемости. Титаник был запущен в 1911 году, а первый экземпляр сварных корпусов датируется 1912 годом.

В строительной отрасли первыми полностью сварными металлическими конструкциями были здания, построенные в США в 1924 году, за которым последовали два железнодорожных моста, один из которых простирался на 19 м над Тертл-Крик в Питтсбурге в 1928 году, а другой - на 27 м над Слюдвией в Лович в Польше в 1929 году.

Во Франции первые сварочные объекты гражданского строительства датируются 1936 годом: 40-метровый автодорожный мост в Ауэрскампе в Уазе и 80-метровый железнодорожный мост в трех пролетах (два наружных пролетных участка 22,5 м и центральный пролет 35 м) в Париже, Порт де ла Шапель. Следует отметить, что до того никогда во Франции не строили полностью сварные стальные здания.



Рисунок 10.1. *Пешеходный мост в Бильбао, архитектор Сантьяго Калатрава, фотоснимок из CTICM*

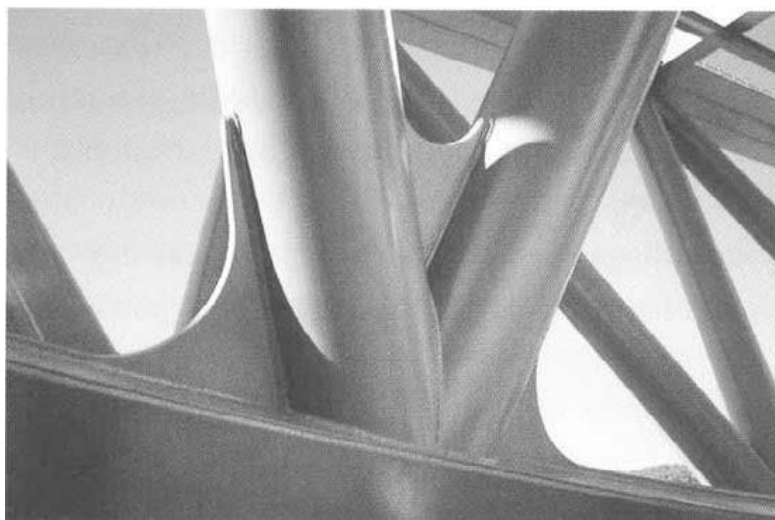


Рисунок 10.2. *Виадук де Арк, TGV Méditerranée – деталь узла. Архитектура: SNCF & GAUDIN Architects, фотоснимок от OTUA*

Эти ранние крупномасштабные сварные конструкции вскоре столкнулись с проблемами, в частности, из-за явления хрупкого разрушения (см. Раздел 10.5.2).

Американское общество по сварке (AWS) опубликовало первое *Руководство по сварке* в 1922 году, затем *Кодекс для сварки плавлением и газопламенной резки в строительстве зданий* в 1928 году и *Спецификации для проектирования, строительства, реконструкции и ремонта автомобильных и железнодорожных мостов сваркой плавлением* в 1936.

Первый циркуляр во французской строительной промышленности, касающийся *временных инструкций по выполнению стальных конструкций и мостов, сваренных электрической дугой*, был опубликован в июле 1934 года. Год спустя, в свете убедительных результатов опытных данных, в пересмотренном циркуляре был удален термин «временный» и были увеличены допустимые нагрузки для сварных соединений, что эффективно ознаменовало первую разработку этой техники.

10.1.2. Области применения

Прежде чем приступить к работе со сварными стальными конструкциями, необходимо расширить области, в которых они используются.

Очень трудно дать точное и исчерпывающее определение из-за большого разнообразия конструкций.

В качестве примеров мы можем рассмотреть:

- каркасы сельскохозяйственных строений, теплиц и зернохранилищ;
- промышленные объекты;
- каркасы зданий, используемых в качестве офисов или жилых помещений;
- дорожные или железнодорожные мостовые конструкции и пешеходные мостики;
- морские платформы, такие как буровые нефтепромысловые установки;
- опоры высоковольтных линий, телекоммуникационные опоры, подъемные установки и дымоходы.

Эти конструкции различного уровня сложности подвергаются самым различным воздействиям (постоянным дополнительным нагрузкам, статическим или динамическим нагрузкам, климатическим и термическим воздействиям, возможно, сейсмическим явлениям и воздействию огня), также различным требованиям в отношении личной безопасности, что дополнительно расширяет это разнообразие, а также может характеризоваться внутренними особенностями конструкции на рабочем участке.

И наконец, необходимо принимать во внимание особенности в соответствии с использованием в одной и той же структуре горячекатаного сортового проката (в основном, I, H и U-образной подготовке кромок), труб, листов или широкополосных элементов из стали (частей сборки и сварных двутавровых профилей или коробчатых сечений).

Это подчеркивает фактическую невозможность сформулировать общие положения, которые действительны для конструкции в целом; только конкретные правила позволяют иметь дело с различными аспектами.

Необходимо отметить, что действующие правила приведены в проспекте 61, заголовок V (Проектирование и расчет металлических мостов и конструкций) и в буклете 66 (Выполнение сооружений гражданского строительства из стали) для металлических мостов, а также в МС 66 (Правила расчета стальных конструкций) и строительные нормы серии NF P22-XXX для зданий и других работ. Эти документы, несомненно, будут заменены европейскими стандартами, соответственно, Eurocode 3 (стальные конструкции) и Eurocode 4 (композитные стальные и бетонные конструкции) для проектирования и расчета, а также стандартом EN 1090, касающимся исполнения конструкций, включая общие положения и особые указания для зданий, мостов, полых профилей и нержавеющей стали.

10.2. Сталь для стальных конструкций

10.2.1. Сорт и качество

Сорт конструкционной стали в стальной конструкции, прежде всего, определяется тремя основными механическими характеристиками: пределом текучести (основной критерий, используемый для проверки прочности элемента), пределом прочности на разрыв и силой растягивания до разрушения. Эти характеристики относятся к одноосным нагрузкам.

При известных обстоятельствах, состояние многоосных напряжений может создавать риск хрупкого разрыва для значений, значительно меньших, чем напряженность, считающихся приемлемыми при традиционном расчете прочности материала. Кроме того, в дополнение к стабильности необходимо, в соответствии с рассматриваемой конструкцией и ее технологическими условиями, и предполагаемыми условиями эксплуатации (такими как температуры до 30°C в холодильных камерах или на мостах), обеспечивать безопасность путем контроля этого риска.

В пределах одной и той же марки и с почти идентичными основными механическими характеристиками определяются *качества*, которые предлагают дополнительные гарантии против рисков, которые могут быть вызваны конкретными условиями использования и обслуживания.

Основным критерием сопротивления хрупкости, то есть ударной вязкости, является чувствительность к влиянию надреза. Это оценивается, исходя из большей или меньшей

подверженности материала деформации вследствие поглощения энергии под действием нагрузки или удара. Это определяется в экспериментах в ходе испытания на отклонение при ударе, известным как *тест Шарпи*.

10.2.2. Используемая сталь

В подавляющем большинстве конструкций используются нелегированные стали, соответствующие стандарту NF EN 10025-2, механические характеристики которого следующие:

- предел прочности при разрыве в диапазоне от 235 до 355 Н/мм²,
- прочность на растяжение в диапазоне между 340 и 630 Н/мм²,
- деформация растяжения до растрескивания более 20% для текущих толщин,
- недостаточная энергия KV 27 Дж при +20°C или -20°C.

Мы также используем стали с улучшенными характеристиками коррозии для специального применения, в соответствии со стандартом NF EN 10155; их механические характеристики эквивалентны.

Кроме того, мелкозернистые стали используются, в частности, для строительных проектов в соответствии со стандартом NF EN 10025-3, которые характеризуются следующим образом:

- предел прочности между 275 и 460 Н/мм²,
- прочность на растяжение между 350 и 720 Н/мм²,
- деформация растяжения 17 и 24%,
- недостаточная энергия KV 40 Дж при -20, даже 27 Дж при -50°C.

В целях особого применения (см. Раздел 10.5.1.1) все эти стали можно получить с улучшением деформационных свойств, перпендикулярных поверхности изделия, в соответствии со стандартом NF EN 10025-5.

Используемые стали имеют предел текучести 235 Н/мм²; они в основном используются в строительных конструкциях, таких как балки, арматура и плоские листы.

Стали с высоким пределом текучести (HSS) имеют предел, превышающий или равный 355 Н/мм². Это, прежде всего, стальные листы.

В соответствии со стандартом NF EN 10025-4, мелкозернистые стали, полученные в результате термомеханической прокатки, все чаще используются в гражданском строительстве и на морских нефтяных платформах в высших сортах и при значительной толщине (более 80 мм) под воздействием следующих факторов:

- лучшая способность к сварке по сравнению с нелегированными сталями во всех процессах (кроме MAG-процесса с твердой проволокой), используемых в стальной конструкции, и без предварительного нагрева. -- Ограничение присутствия водорода (см. Раздел 10.5.1.2 о предотвращении холодного растрескивания) достигается предварительным нагревом (см. Раздел 10.5.3.1);
- улучшенная пластичность (повышенная энергия ударного разрушения при очень низких температурах).

10.3. Процесс и способы сварки стальных конструкций

Существует множество сварочных процессов, и у каждого из них есть применение. В приведенной ниже таблице представлены различные типичные процессы и их характеристики, а технические подробности можно найти в главе 1 этой книги.

10.3.1. Таблица типовых процессов

Сварочные процессы Согласно ISO 4063	Объект		Процедура				Продуктивность выход	Данные наблюдений
	Мастерская	На объекте	ручная	Полуавтомат.	авто	робот		
111: Дуговая сварка метал.электродом с покрытием	X	X	X				+	Рутиловое покрытие (текущее использование) или основное покрытие (HSS)
135: MAG-сварка	X			X	X	X	++	Чувствительность к обжатию Риск нехватки расплава
136: Трубчатая дуговая сварка с экранированием активным газом	X			X	X		+++	Чувствительность к обжатию Использование во всех положениях
114: Самозащитная дуговая сварка трубчатым сердечником		X		X			+++	Использование с узкой разделкой кромок Обильные пары
121: Дуговая сварка под флюсом однопроходным электродом	X	X			X		++++	Хорошее проникновение Только по горизонтали

Другие сварочные процессы, такие как точечная, аргонодуговая TIG или лазерная, обычно не используются, так как толщина элементов слишком велика.

10.3.2. Предварительная обработка: технологический шов

Этот технологический процесс состоит в соединении частей, которые должны быть скреплены короткими прерывистыми валиками перед формированием самого сварного шва. На самом деле, это деликатная операция, кажущаяся простой, но требующая большой осторожности. Более того, ее необходимо выполнять с теми же мерами предосторожности, что и при первом проходе (присадочный материал, проверки, предварительный прогрев или послесварочная термообработка и т. д. (см. Раздел 10.5.3)).

Особая сложность сварки «прихваткой» в стальных конструкциях связана с тем, что детали могут быть очень длинными (от нескольких метров до нескольких десятков метров) или очень жесткими.

10.3.3. Особенности методы сварки

10.3.3.1. Сварка Н-образного сечения при горизонтальном расположении стенки

Сборка для изготовления двутавровых балок с одинаковой или слегка регулируемой высотой, состоящая из скамьи, в которой плоский лист выполнен в виде стенки, а два вертикальных буртика расположены вертикально по ее краям, оснащена двумя сварочными головками для создания двух валиков на той же стороне стенки (процесс 121). Два других валика приваривают после переворачивания сборки. Такое оборудование требует достаточно много площади под оборудование, ограничивает размеры несущего настила столом и не позволяет изготавливать изогнутые детали.

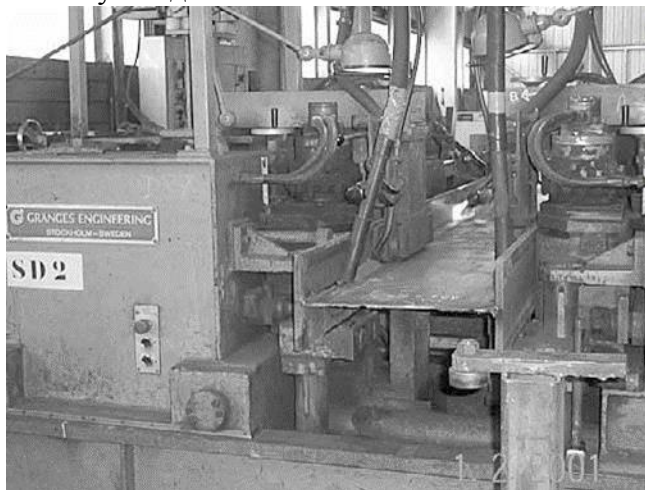


Рисунок 10.3. Строительство I секции на горизонтальном стенде, фотоснимок из Baudin-Châteauneuf

10.3.3.2. Сварка Н-образного сечения при вертикальном расположении стенки

Это машина для изготовления прямолинейного или изогнутого (в плане) сечения I постоянной или переменной высоты: на скамье вверх по потоку укладывается буртик, причем полотно удерживается вертикально при помощи рычагов; этот узел проходит под порталом, оборудованным гидравлическим домкратом и двумя сварочными головками, для создания шва между швом и буртиком (процедура 121). Т-образный узел, сформированный таким образом, переворачивается, укладывается на второй буртик и приваривается, как при первой процедуре.



Рисунок 10.4. Строительство I секции на вертикально стенде, фотоснимок из Baudin-

10.3.3.3. Приварка штырей

Этот прием используется в мастерской или на объекте в композитной железобетонной конструкции для сварки элементов соединения (диаметром от 6 до 22 мм) на стальных балках, предназначенных для образования единого целого с твердым бетонным полом. Это осуществляется с использованием *сварочного пистолета*, в котором штырь вдавливается в сварочную ванну после подачи электрического тока, образуя дугу.



Рисунок 10.5. Приварка штырей: сварка элементов соединения – фотоснимок из Боден-Шатонеф

10.3.3.4. Аллюминотермия

Этот прием используется на объекте для соединения рельсовых нитей для мостовых кранов.

Присадочный материал, полученный в результате восстановления оксида железа алюминием, высвобождается в жидком состоянии подходящей формы для образования соединения.

10.3.4. Типичные положения при сварке

С точки зрения сварного соединения встречаются различные типы сварных швов.

В мастерской чаще всего используются угловые и стыковые швы (см. Рисунок 10.6), в наиболее часто встречающихся позициях:

- плоский валик (шов на относительно горизонтальной поверхности с нанесенным сверху присадочным металлом);
- угловой горизонтальный валик (относительно вертикальная поверхность, расположенная на относительно горизонтальной поверхности).



Рисунок 10.6. Обычно используемые сварные швы

На объекте мы также столкнемся (Рисунок 10.7):

- вертикальный валик (относительно вертикальная ось);
- верхний валик (относительно горизонтальная поверхность и присадочный материал, нанесенный снизу).

10.3.5. Разделка кромок

Как только достигается определенная толщина, в соответствии с выбранной процедурой, необходимо выполнить подготовку кромок листа путем создания скошенной кромки, чтобы обеспечить хорошее проплавление сварного шва.



Рисунок 10.7. Общепринятые позиции монтажной сварки

В случае стыковых сварных швов в основном используются две формы заготовки в зависимости от толщины свариваемой заготовки:

- V-образной формы для диапазонов низкой толщины, то есть от 6 до примерно 12 мм,
- двойная V-образная форма для средних и значительных толщин, примерно от 12 мм до 100 мм и более.

Углы V-образной или двойной V-образной заготовки варьируются в зависимости от толщины деталей и процесса сварки. Эти препараты обычно включают притупление корня.

Разделка кромок с двойной V-образной формой может быть ассиметричной, чтобы свести к минимуму сварку потолочным швом, особенно на рабочем участке.

K-образная разделка кромок (симметричная или нет) может рассматриваться как альтернатива разделке кромок с двойной V-образной формой, преимущество в том, что требуется только подготовка одного края.

Для угловых сварных швов, тот же тип подготовки, V или двойной V, обнаруживается, когда необходимо восстановить сечение или обеспечить полное проплавление сварного шва.

Такая разделка кромок выполняется, главным образом, путем шлифования тонких деталей, или с помощью ручной или автоматической термической резки в других случаях.



Рисунок 10.8. Подготовка кромки

10.4. Сварочная деформация

Как упомянуто выше, толщина, подлежащая сварке, имеет относительно значение. В результате происходит значительная подводимая теплота, что, учитывая хорошую проводимость металла, влечет за собой нагревание деталей.

Необходимо ограничить влияние этой теплоотдачи, поскольку она создает напряжения, которое приводят к искажениям, требующим последующей коррекции.

Различают следующие искажения:

- перенос, производящий поперечную и продольную усадку,
- вращательный, с эффектом разглаживающего эффекта и выгибанием/сгибанием.

Следует помнить, что недостаточная пластичность металла, поглощающего эти напряжения, может привести к разрушению вследствие растрескивания.

10.4.1. Исполнение мер предосторожности

Чтобы свести к минимуму искажения и их последствия, доступны несколько решений, которые можно объединить при необходимости:

- выбор процесса сварки с низколинейной подводимой теплотой, например, механизированной аргонодуговой сварки плавящимся электродом, предпочтительно с трубчатой металлической дуговой сваркой;
- ограничение до минимума в соответствии с правилами расчета и надлежащей практикой, длины и сечения сварных швов (что также имеет хороший экономический смысл);
- поиск симметричных схем сварки; противонаправленная усадка избегает искажений;
- выполнять противоположные сварные швы одновременно во избежание дисбаланса;
- оптимизировать порядок выполнения сварки, обозначенный термином *последовательность сварки*, который регулируется следующими правилами:
 - сварка со свободной поперечной усадкой,
 - сварка симметрично, с несколькими операторами, работающими одновременно или поочередно только с одним оператором, соблюдая симметричные (или приблизительно симметричные) схемы,
 - зажать деталь в жесткой сборке с противонаправленным предварительным искажением.



Рисунок 10.9. Мостовая балка с подготовкой двойной V-образной кромки - фотоснимок из Боден-Шатонёф

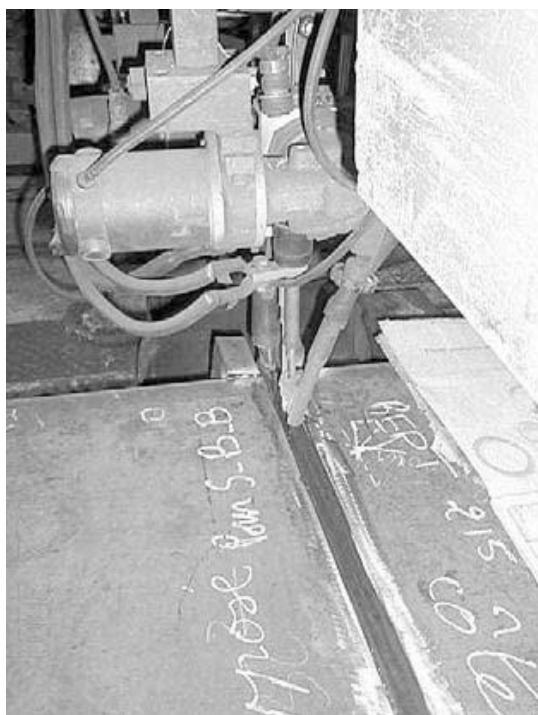


Рисунок 10.10. Стыковой сварной шов – фотоснимок из Боден-Шатонёф

10.4.2. Выпрямление

Если необходимо исправить искажение, несмотря на принятые меры предосторожности, оно может быть выполнено с помощью пламенного выпрямления или механическим способом с помощью гидравлического натяжения арматуры или с помощью прессы.

Локальное применение тепла часто является единственным средством устранения дефектов искаженного элемента. Оно состоит из очень локализованного сильного нагрева, около 600 °С, генерирующего силы сжатия во время охлаждения, которые выпрямляют элемент. Эта процедура требует знания температурных пределов при нагреве, которые зависят от сортов и толщины стали, а также с учетом того, что стали сорта HYS требуют более строгих мер предосторожности при использовании этого способа.

10.5. Дефекты и их предотвращение

Мы вспоминаем обычные дефекты сварного шва, такие как пористость, трещины, полости, примеси, неслитины и проникновения, или дефекты в форме, только в качестве памятки о предмете, широко обсуждаемой в других местах данной работы.

Однако необходимо обратить внимание на высокий риск пористости, связанный с предварительно окрашенными сталями, часто используемыми в стальных конструкциях. Такое использование требует особой осторожности, особенно для швов валиком восприимчивых сборок, где краску необходимо удалить заранее.

Мы упоминаем, в первую очередь, металлургические дефекты в стальной конструкции и указываем меры предосторожности, необходимые для предотвращения этих рисков.

10.5.1. Трещины

Можно выделить два типа: трещины, вызванные образованием продольных трещин и образованием холодных трещин.

10.5.1.1. Трещины, вызванные образованием продольных трещин

Такие трещины возникают параллельно обшивке проката, в части сварного шва, которая создает нагрузку на материал в направлении толщины.

Предотвращение этого риска в основном достигается путем:

- конструирования швов для облегчения свободной усадки, избегая нагрузок, перпендикулярных к наружной обшивке продукции;
- выбора присадочного материала наполнителя с пределом текучести, близким к основному металлу, и рабочими условиями, которые могут уменьшить напряжения, перпендикулярные к наружной обшивке;
- использования листов с безусловным улучшением деформационных свойств перпендикулярно поверхности, зная, что уменьшение толщины не связано с соответствующим снижением риска.

10.5.1.2. Холодное растрескивание

Они обычно расположены параллельно линии сплавления и принимают различные формы в зависимости от их положения: в корне, в соединении или соединении между проходами, под валиком. Прежде всего, для этого есть три причины:

- значительные сжимающие и усадочные напряжения в месте сварки; конструкция сборки и выбор последовательности наложения сварных швов обычно позволяют свести их к минимуму;

- отпуск металла в непосредственной близости от линии плавления; ограничение скорости охлаждения в ЗТВ является одним из важных параметров для снижения этого риска;
- наличие водорода в валике; чистые и сухие детали, запеченные присадочный материалы, электроды с очень низким содержанием водорода и среда с избыточной влагой - все это снижает риск.

10.5.2. Разрушение

10.5.2.1. Хрупкое разрушение

Хрупкое разрушение происходит без пластической деформации, в отличие от пластического разрушения, и развивается медленно после значительной предварительной пластической деформации.

Чувствительность шва к этому явлению зависит от:

- используемой стали: ее предела текучести и истинной вязкости;
- толщины компонентов;
- скорости приложения нагрузки, уровни и характер напряжений;
- самой низкой рабочей температуры.

В дополнение к этим соображениям ограничение риска включает в себя:

- ограничение работ по затвердеванию кромок, поскольку это предполагает снижение пластичности;
- операция сварки с дефектами вдавливания, такими как подрезы;
- низкоэнергетическую сварку;
- при необходимости, снижение остаточных напряжений с помощью адаптированной механической обработки сварного шва, такой как ударное воздействие.

10.5.2.2. Усталостный излом

Он происходит, когда соединение подвергается штатным стрессовым воздействиям, с циклическими нагрузками, внезапно трескается и ломается, при сильно уменьшенном удлинении или деформации детали.

Характеристики усталости зависят, прежде всего, от тщательности формы сварного шва и финишной обработки. Это явление рассматривается в главе 6.

10.5.3. Другие термические и механические меры предосторожности

Меры термической предосторожности позволяют ограничить определенные риски, обусловленные удельной теплоемкостью в момент сварки.

10.5.3.1. Низкий предварительный нагрев

Он заключается в поддержании температуры компонента между 40 и 80°C во время сварки, чтобы ограничить риск хрупкого разрушения.

10.5.3.2. Предварительный нагрев

Он помогает ограничить скорость охлаждения, нагревая компонент до температуры от 100 до 200°C, чтобы снизить риск отверждения под валиком и холодного растрескивания в сталях, чувствительных к закалке. Это может способствовать снижению уровня остаточных напряжений и предотвращает разрывы после усадки.

10.5.3.3. Последующий нагрев

Последующий нагрев должен выполняться сразу после сварки, без охлаждения компонентов. Это усиливает эффект предварительного нагрева при одинаковой температуре, поддерживаемой достаточно долго, чтобы добиться выравнивания температуры различных частей.

Поддержание постоянной температуры также позволяет откачивать водород и способствует его диффузии в массе, что снижает риск холодного растрескивания.

10.5.3.4. Термическая обработка

Этот метод очень мало используется в стальных конструкциях из-за размеров компонентов. Однако для снятия напряжений обычно используются сборные трубчатые узлы в морских буровых конструкциях.

Наконец, механическая обработка после сварки, такая как проковка или дробеструйная очистка, иногда используется для повышения усталостной прочности сварных соединений.

10.6. Особенности неразрушающего испытания стальных конструкций

Основные методы неразрушающего испытания сварного шва, а именно визуальный контроль, ПВК, испытание по методу магнитных частиц, рентгенография, гаммография или ультразвуковое испытание, безусловно, применимы к стальным конструкциям. Понимая, что эти сварные швы характерны для конструкций из основного металла, тем не менее, следует отметить, что рентгенодефектоскопический контроль не подходит для исследования сварных швов валиком и что при ультразвуковых испытаниях неконтролируемая зона может оставаться в корне шва.

10.7. Перспективы развития

Использование сварки в стальных конструкциях быстро развивается и имеет много многообещающих перспектив благодаря своим многим специфическим качествам. Наиболее важными являются:

- хорошая надежность конструкции, поскольку сварка выполняется с использованием как технологических инструкций по сварке (WPS), так и протокола аттестации технологии сварки (WPQR);
- упрощение соединений, которые, в противном случае, очень чувствительны к атмосферной коррозии;
- обеспечение непрерывности элементов конструкции с помощью жесткого упора или фиксированных соединений;
- сборка замкнутого профиля;

- оптимизация профилей благодаря более простым соединениям и, следовательно, значительная экономия на материалах;
- возможность экономного изготовления сложных форм.

Сварка тяжелых конструкций в атомной промышленности

11.1. Общая презентация сосуда высокого давления водо-водяного реактора

Как таковая ядерная часть реакторов с водой под давлением (PWR) или ядерных сосудов высокого давления состоит из всех систем, участвующих в генерации пара, который затем подается на турбины и электрогенераторы.

Основные конструкции этого котла следующие (см. Также Рисунок 11.1):

- корпус реактора, в котором энергия, выводимая из ядерного топлива, передается холодильному теплоносителю, известному как первичный контур, с водой под высоким давлением (154 бар), и где температура может достигать 350°C. Этот сосуд представляет собой цилиндр высотой около 12 м, диаметром 5 м и толщиной 250 мм, закрытый двумя полусферическими куполами. К сосуду подключено определенное количество сварных отводов разных размеров, некоторые из которых представляют собой сопла, соединяющиеся с основными первичными трубами;
- парогенераторы, где энергия жидкости первого контура преобразуется через трубы теплообменника в пар, предназначенный для приведения турбин во вращение. Парогенераторы имеют высоту около 20 м и диаметр в диапазоне от 3,5 до 5 м; их толщина составляет около 100 мм.

ПРИМЕЧАНИЕ: циркуляция воды в парогенераторах и системе подачи пара в турбины происходит в стальных трубах C-Mn марок A42 и A48, аналогично сортам, используемым в обычных электростанциях. Эти материалы не обсуждаются в этой главе.

Компенсатор давления позволяет первичному контуру достигать рабочего избыточного давления во время фаз запуска. Эта конструкция высотой около 13 м, диаметром 2,5 м и толщиной 120 мм. Эта конструкция также имеет различные соединительные сопла.

Насосы с приводом от двигателя обеспечивают циркуляцию жидкости в первичном контуре.

Трубы с наружным диаметром 900 мм и толщиной около 80 мм соединяют различные конструкции, перечисленные выше.



Рисунок 11.1. **Конструкции** силового переключателя

11.2. Основные материалы, используемые в производстве

11.2.1. Принцип выбора материалов – строительная норма

Большие герметичные **конструкции** ядерной установки должны быть рассчитаны на то, чтобы выдерживать высокое давление при температуре до 350 °С в контакте с жидкостью первичного контура. Кроме того, корпус реактора подвергается нейтронному излучению.

В дополнение к аспекту безопасности, сложность и стоимость возможных операций по ремонту или замене, связанных с предполагаемым сроком службы 40 лет, означают, что старение должно учитываться уже на стадии проектирования как для основных материалов, так и для сварных швов, используемых для сборки различных элементов.

Очень четкие юридические требования появились во Франции в приказе министерства от 26 февраля 1974 года «О применении правил, касающихся водо-водяных энергетических ядерных реакторов». Этот указ накладывает на изготовителя юридическое обязательство составлять *массив данных на материалы* для всех деталей, подвергающихся давлению в основном первичной цепи, включая сварные швы этих деталей.

Технические и нормативные ограничения лежат в основе критериев выбора материала и режимов сборки. Этот выбор является результатом постоянной и постоянной оптимизации стальных сплавов и идеально контролируемых процессов. Правила содержатся в кодексе проектирования и строительства (RCC-M), совместно разработанном EDF и FRAMATOME в рамках AFCEN (Французская ассоциация строительных норм и правил, касающихся водо-водяных энергетических ядерных реакторов).

11.2.2. Низколегированная сталь для сосудов высокого давления

Первые сосуды с водяными реакторами под давлением, введенные в эксплуатацию в 1960-

х годах в США, были изготовлены из листов толщиной 175 мм из углеродисто-марганцевой стали. Однако, как только речь шла о производстве высокопроизводительных реакторов (первоначально 300 МВт, а теперь до 1450 МВт), стали из С-Мн больше не могли гарантировать достаточную вязкость для рассматриваемых толщин сосуда под давлением. Последующие разработки привели к формированию марганцево-молибденовых стальных листов или заготовок (ASME SA 302 В), а стальных затем заготовок из Мн-Ni-Mo (ASME SA 533 класс В cl 1 или SA 508 cl 3). Этот последний класс был использован для всех французских водо-водяных энергетических ядерных реакторах с дополнительными требованиями, описанными ниже. Он обозначен 16 MND 5 в RCC-M и подпадает под действие указанных технических спецификаций.

16 MND 5 - марганец-никель-молибденовая низколегированная сталь с бейнитной структурой, закаленная и отпущенная. Он представляет собой отличный компромисс между относительно высокими механическими характеристиками, позволяющим ограничить толщину сосудов под давлением, и хорошей ударной вязкостью. По сравнению с требованиями Свод правил по сосудам, работающим под давлением Американского общества инженеров-механиков (ASME), материалы, используемые во Франции, характеризуются более ограниченным содержанием углерода, серы, фосфора и меди. Более низкое содержание углерода позволяет улучшить свариваемость. Вязкость улучшается за счет сокращения углерода, серы и фосфора. Для оболочек активной зоны, подвергающихся облучению, дополнительные требования касаются содержания меди и фосфора, химических веществ, ответственных за упрочнение и повышение хрупкости нейтронной радиацией.

Заданные характеристики стали 16 MND 5 представлены в Таблицах 11.1 и 11.2.

Таблица 11.1. Химический состав основных материалов установок PWR

Материал	C%	Mn%	Si%	P%	S%
16 MND 5	d0.22	1.15/1.60	0.10/0.30	d0.020	d0.012
	Ni%	Cr%	Mo%	Fe%	B%
	0.50/0.80	d0.25	0.43/0.57	баланс	-
16 MND 5 (обечайки сердцевины)	C%	Mn%	Si%	P%	S%
	d0.22	1.15/1.60	0.10/0.30	d0.008	d0.008
	Ni%	Cr%	Mo%	Fe%	B%
Z2 CN 19-10 (N-усиленный)	0.50/0.80	d0.25	0.43/0.57	баланс	-
	C%	Mn%	Si%	P%	S%
	d0.035	<2.00	<1.00	<0.040	<0.030
Z2 CND 18-12 (N-усиленный)	Ni%	Cr%	Mo%	Fe%	B%
	9.0/10.0	18.5/20.0	-	баланс	d0.0018
	C%	Mn%	Si%	P%	S%
NC 15 Fe (Сплав 600)	d0.038	<2.00	<1.00	<0.040	<0.030
	Ni%	Cr%	Mo%	Fe%	B%
	11.5/12.5	17/18.2	2.25/2.75	баланс	d 0.0018
NC 15 Fe (Сплав 600)	C%	Mn%	Si%	P%	S%
	<0.10	<1.00	<0.50	<0.015	<0.015
	Ni%	Cr%	Mo%	Fe%	B%
NC 30 Fe (Сплав 690)	t72.0	14.0/17.0	-	6.0/10.0	-
	C%	Mn%	Si%	P%	S%
	0.01/0.04	<0.50	<0.50	<0.015	<0.010
NC 30 Fe (Сплав 690)	Ni%	Cr%	Mo%	Fe%	B%
	t58.0	28.0/31.0	-	7.9/11.0	-
	C%	Mn%	Si%	P%	S%

Таблица 11.2. Заданные механические свойства основных материалов водо-водяных энергетических реакторов

Материал	RP 0.2 (20°C) (МПа)	Rm (20°C) (МПа)	До%	Испытания по Шарпи	RP 0.2 (350°C) (МПа)
16 MND 5	t400	550/670	t20	Поперечное направление: KU при 0°C t40 Дж Продольный прямой:	t300
16 MND 5 (обечайки сердцевин)	t400	550/670	t20	Поперечное направление: KU при 0°C t40 Дж Продольное направление:	t300
Z2 CN 19-10 (N-усиленный)	t210	t510	t35	KU при 20°C t60 Дж	t130
Z2 CND 18-12 (N- усиленный)	t210	t510	t35	KU при 20°C t60 Дж	t130
NC 15 Fe (Сплав 600)	t240	t550	t30	-	t190
NC 30 Fe (Сплав 690)	275/ 375	t 630	t30	-	t215

Сталь сорта 16 MND 5 используется для всех деталей корпуса реактора (корпуса, кромок, куполов, сопла). Для листов компенсатора давления и листов парогенератора, кованной головки и трубного листа используется очень плотный сорт стали.

11.2.3. Каналы аустенитной нержавеющей стали

Из-за их общей коррозионной стойкости и простоты аустенитные нержавеющие стали с самого начала использовались для изготовления твердых деталей (трубы, корпуса насосов и обшивки отводных труб, внутрикорпусные устройства ядерного реактора) или для покрытия низколегированных сталей крупных **конструкций** в зонах контакта с охлаждающей жидкостью. Основным преимуществом является уменьшение продуктов коррозии, которые могут быть активированы при прохождении в активную зону реактора. Первые американские конструкторы выбрали марки AISI 304 (18% Cr - 10% Ni) и AISI 316 (17% Cr - 12% Ni - 2,5% Mo) и производные отливки (CF8 и CF8M).

Во Франции с самого начала ядерной программы были выбраны низкоуглеродистые аустенитные сорта, несмотря на проблемы, возникающие в таком случае при приобретении таких сортов. Идея состояла в том, чтобы уменьшить, и даже устранить, риск чувствительности к межкристаллитной коррозии, вызванной дехромизацией границ зерен во время сварочных операций или снятия напряжений. По этой причине, в сотрудничестве с EDF, FRAMATOME и «Creusot-Loire» были созданы две конкретные категории (см. Таблицы 11.1 и 11.2):

- закаленная азотом марка Z2 CN 19/10 с очень низким содержанием углерода, но с механическими свойствами, эквивалентными маркам с высоким содержанием углерода типа AISI 304,
- закаленная азотом марка Z2 CND 18/10, эквивалентная AISI 316.

Аустенитно-ферритные альтернативы этих двух аустенитных сортов, предназначенные

для отливок (корпуса насосов, трубные колена первичного контура), представляют собой Z4 CN 20-09 M (CF8) и Z4 CND 19-10 M (CF8M).

Аустенитные и аустенитно-ферритные нержавеющие стали подвергают обработке отжигом при высокой температуре с последующим охлаждением в воде (*гиперупрочнение*). Это придает им однородную структуру, свободную от карбидов и оптимальную с точки зрения коррозионной стойкости. Вязкость и внезапная разрывное усилие этих материалов чрезвычайно высоки. Их характеристические свойства при растяжении являются слабыми (см. Таблицу 11.2), что исключает их использование для крупных **конструкций** под давлением.

Эти стали легко свариваются с соответствующими аустенитно-ферритными присадочными материалами. В отличие от примера с низколегированной сталью, они не требуют ни предварительного нагрева, ни дополнительного нагрева, ни обработки рельефа и, как таковые, представляют собой идеальные материалы для сборки на рабочем участке. По этой причине низколегированные крупные стальные **конструкции** имеют безопасные соединители из аустенитной нержавеющей стали, чтобы облегчить соединение с системой трубопроводов на рабочем участке.

Кованые или катаные нержавеющие стали используются для первичных трубопроводов. Формованные аустенитно-ферритные стали используются для корпусов насосов и некоторых **конструкций** труб первичного контура.

11.2.4. Детали никелевого сплава

Сплавы на основе никеля типа никель-хром-железо имеют отличную коррозионную стойкость, включая хлориды, в отличие от нержавеющей сталей. Если добавить их хорошие характеристики теплопередачи, то можно легко понять причины выбора этих материалов в трубопроводах парогенератора.

Выбран сплав 600 (NC 15 Fe), сплав с 75% Ni, 15% Cr и 8% Fe, коррозионные свойства которого приводятся в качестве примера. Сплавы Ni-Cr-Fe обладают еще одним интересным свойством: коэффициент расширения объема относительно близок к подобному коэффициенту для низколегированных сталей. По этой причине сплав 600 также использовался для поперечных сечений, отводов труб и внутренних опор **конструкций** крупных сосудов под давлением. Кроме того, процедуры и присадочные материалы (сплав 82 и 182) для сварки сплава 600 были хорошо установлены.

Чувствительность сплава 600 к коррозионному растрескиванию в воде из первичного контура выявляется постепенно. С конца 1970-х годов французские и международные производственные программы были посвящены определению параметров замещающего сплава, сплава 690 (NC 30 Fe), содержащего приблизительно 30% Cr, а также соответствующих продуктов для сварки (сплавы 52 и 152). Около 15 лет испытаний во многих лабораториях, включая лаборатории CEA (Французская комиссия по атомной энергии), EDF и Framatome, позволили подтвердить коррозионную стойкость этого материала в водной среде первичного контура. В настоящее время в большинстве случаев его применения этот материал систематически используется во Франции для замены сплава 600 на чисто профилактической основе. Соответствующие химические составы этих двух сплавов представлены в таблице 11.1.

Что касается аустенитных нержавеющей сталей, термическая обработка состоит из отжига при высокой температуре с последующим упрочнением. Упрочнение должно быть не так быстро, чтобы избежать определенной сенсibilизации межзеренных границ. В целях получения несенсибилизированного материала, в течение времени, достаточного для повторной зарядки хромовых межзеренных границ, проводят дополнительную обработку при 715 °C.

Пластичность и прочность на разрыв сплавов Ni-Cr-Fe чрезвычайно высоки. Их характеристики при растяжении в горячем состоянии заметно выше, чем у аустенитных нержавеющей сталей (см. Таблицу 11.2).

Эти материалы не так просто сваривать, как аустенитные нержавеющей стали. Они проявляют заметную склонность к горячему микрорастрескиванию либо во время затвердевания металла, добавляемого сваркой, либо в зоне термического воздействия. Для борьбы с этой тенденцией необходима очень тщательная оптимизация химического состава, при этом особое внимание уделяется низкому содержанию примесей и высокому соотношению Nb/Si.

Сплавы на основе Ni используются для труб парогенераторов и разделительных перегородок, а также для кожухов механизма привода стержней системы защиты и управления ядерного реактора, труб КИП и опорных площадок активной зоны.

11.3. Сварка крупных деталей из низколегированной стали

Крупные детали состоят из заготовок или катаных деталей, собранных при сварке.

Основными частями этих деталей являются:

- для сосуда высокого давления: верхний купол, фланец крышки корпуса, фланец сосуда, корпус сопла, обе наружные стенки корпуса сердечника, переходное кольцо и нижний купол;
- для парогенератора: верхняя головка, две наружные стенки верхней части, сопла воды питания котла, люки, коническая оболочка, три наружные стенки нижней части, трубная решетка, головка с соплами и люками;
- для компенсатора давления: верхняя головка с соплами, три корпуса, нижняя имеет свое сопло.

11.3.1. Намеченные параметры

Требования относительно технических свойств сварных швов крупных деталей, указанные в RCC-M, идентичны требованиям к основным материалам, приведенным в таблице 11.2. Что касается химических требований, определенные величины зависят от ограничений свариваемости, например, стойкости к горячему растрескиванию в аустенитных сплавах, таких как нержавеющей сталь или никелевые сплавы. Эти химические составы указаны в таблице 11.3.

11.3.2. Процедурное описание

Сварка деталей, из которых состоят крупные детали (сосуд под давлением, парогенератор, компенсатор давления), выполняется методом автоматической электросварки под порошковым флюсом с проволочным электродом в узкой разделке (примерно шириной около 22 мм) с отложением двух валиков на слой.

Таблица 11.3. Химический состав сварных швов для крупных деталей

Материал	C %	Mn %	Si %	P %
Низколегированная сталь Mn-Ni-Mo	d0.100	0.80/1.80	0.15/0.60	d0.015
	S %	Ni %	Cr %	Mo %
	d0.025	d1.50	d0.30	0.35/0.65
	Co %	Cu %	Fe %	B
		d 0.25		
	V	Nb + Ta	Ti	
Аустенитно-ферритовая нержавеющая сталь	d0.04			
	C %	Mn %	Si %	P %
	d0.030	1.00/2.50	d1.0	d0.030
	S %	Ni %	Cr %	Mo %
	d0.030	9.00/11.00	18.00/22.00	d0.50
	Co %	Cu %	Fe %	B
	d0.20			
Никелевый сплав с 15% Cr	V	Nb + Ta	Ti	Феррит G %
				5/15
	C %	Mn %	Si %	P %
	d0.100	5.00/9.50	d1.00	d0.020
	S %	Ni %	Cr %	Mo %
	d0.015	t59.00	13.00/17.00	
	Co %	Cu %	Fe %	B
Никелевый сплав с 30% Cr	d0.10	d0.50	6.00/10.00	
	V	Nb + Ta	Ti	
		1.00/2.50	d1.00	
	C %	Mn %	Si %	P %
	d0.045	d5.00	d0.65	d0.020
	S %	Ni %	Cr %	Mo %
	d0.010	Баланс	28.00/31.50	d0.50
	Co %	Cu %	Fe %	B
	d0.10	d0.50	8.00/12.00	
	V	Nb + Ta	Ti	
		1.20/2.20	d0.50	

Используются два вида сварных швов:

- сварка только на одной стороне (внешней стороне) с утолщением, расположенным к внутренней части для устранения проходов корня сварного шва (см.Рисунок 11.2),
- сварка с обеих сторон (снаружи и внутри) с устранением проходов корня сварного шва спомощью шлифовки или механической обработки (см.Рисунки 11.3 и 11.4).

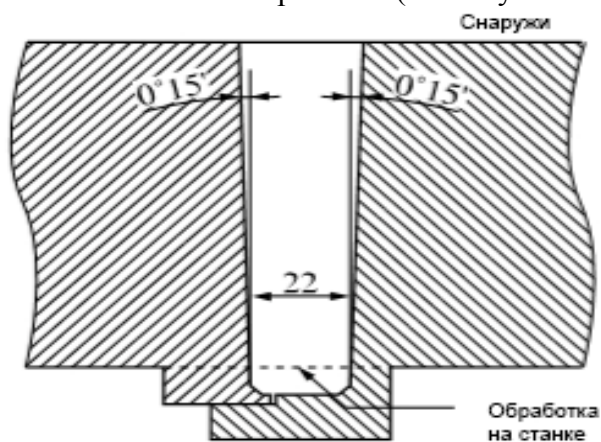


Рисунок 11.2. Соединение сварено только с одной стороны

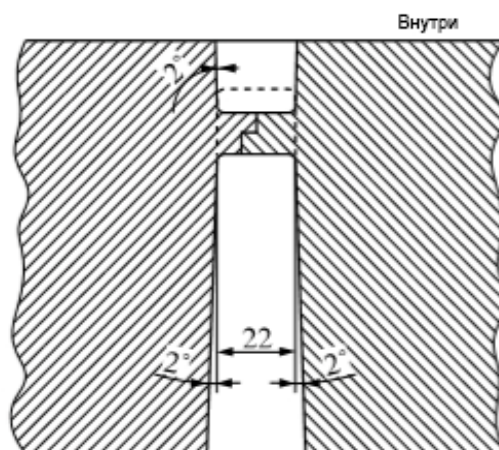


Рисунок 11.3. Сварка с обеих сторон с приваркой

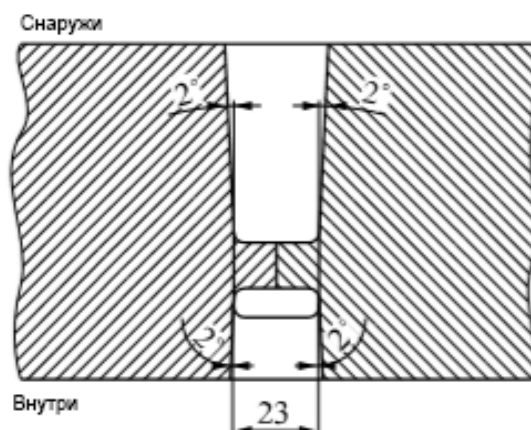


Рисунок 11.4. Сварка с обеих сторон без приварки

На протяжении всего процесса сварки скорость сварки контролируется, и система наведения также обеспечивает правильное положение головки относительно сварочной ванны, а также скошенных кромок.

Этот высокопроизводительный процесс, обеспечивающий превосходные механические характеристики, особенно в отношении ударной вязкости, позволяет достичь шва с *отсутствием дефектов* благодаря его полной автоматизации и регулярной и симметричной разбивке проходов в скошенной кромке (см.Рисунок 11.5).

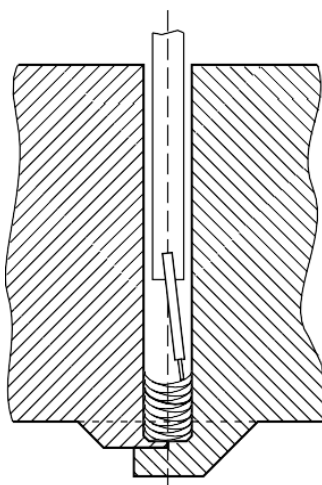


Рисунок 11.5. Эскиз узкого сварного шва

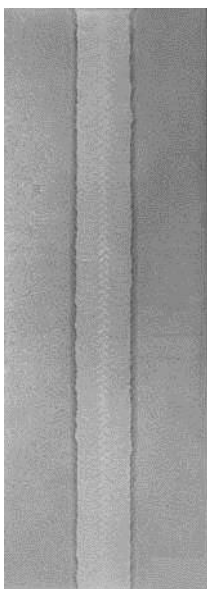


Рисунок 11.6. Макрографический разрез сварного шва, выполненный методом проволоки/флюса

Рисунок 11.6 демонстрирует регулярное наращивание проходов, которое стало возможным благодаря процессу скашивания кромки узкой проволокой /расплава.

С целью способствования обеспечению очень высокого качества сварных швов, строительные нормы (RCC-M, ASME и т. д.) обязывают соблюдать точный процесс, который включает:

- проверку химического состава и механических характеристик присадочных материалов,
- законную процедуру сварки,
- квалифицированного сварщика или оператора,
- изготовление испытательных образцов сварных швов,
- неразрушающий контроль сварных соединений.

Сварочные процедуры узаконены перед внедрением. Срок действия процедуры зависит от:

- сорт основного металла,
- форма и размеры основного металла,
- процесс сварки,
- присадочные материалы,
- тип сварного шва,
- положение сварки,
- параметры сварки,
- термообработка.

Для проверки химического состава при макрографических и микрографических исследованиях проверяется законность, и отбираются образцы.

Каждая сварка выполняется в соответствии с процедурой, описанной в карточке данных о режиме сварки, и сварщиками, прошедшими квалификационные испытания.

Все сварные швы отслеживаются рентгенографией и/или ультразвуком. Любые дефекты сварных швов ремонтируются и проходят вторичную процедуру контроля.

Пилотные образцы для испытаний производятся с помощью тех же присадочных материалов и теми же сварочными станками, что и соединения, которые они представляют, а затем контролируются рентгенографией и/или ультразвуком. Из этих образцов для испытаний отбираются пробные образцы для макрографических исследований, проверки химического состава и технических характеристик.

Предпринимаются меры предосторожности во избежание *холодного растрескивания*:

- порошковые флюсы подлежат обжигу при контролируемых температурах,
- сварка низколегированной стали Mn-Ni-Mo требует предварительного нагрева до температуры выше 150°C и термической обработки после нагрева.

После сварки сварные швы подвергаются термической обработке для снятия напряжений при 610°C, которая направлена на снижение уровня остаточных напряжений.

11.3.3. Сварка покрытыми электродами

Электродуговая сварка электродами с легкоплавким покрытием используется для локального ремонта, например, при сборке небольших труб или аксессуаров.

Процесс, критерии, касающиеся механических характеристик, контроль и, в более общем смысле, требуемое качество соединения, являются такими же, как и для соединений, сваренных автоматизированным процессом с помощью проволоки/флюса.

11.4. Плакирование

В предотвращении коррозионных явлений особое значение играет технология корпуса реакторов высокого давления (RPV) с водой под давлением. Это изначально важно в связи с тем, что весь первичный контур содержит воду с высокой температурой, в которой борная кислота и литин помещаются в раствор. Материалы, из которых состоят внутренние поверхности оборудования первичного контура, помещаются в среду, которая допускает их общую коррозию. Ограничение распространения коррозии требует использования нержавеющей сталей или сплавов с высоким содержанием никеля для поверхностей, контактирующих с первичной жидкостью. Низколегированные стали без покрытия фактически имеют типичную интенсивность коррозии в среде первичного контура, которая остается низкой (около 30 микрон в год), но считается неприемлемой из-за продуктов, которые она выделяет.

Таким образом, опасения по поводу распространения коррозии сталей связаны не с медленным разрушением металлических поверхностей, а с образованием химических составов, которые, при помещении в раствор или суспензию в первичной жидкости, могут ограничить использование сосуда из-за следующих явлений:

- снижение коэффициентов теплопередачи из-за коррозионных продуктов, осаждаемых на поверхностях теплообменника (трубы парогенератора, топливные гильзы),
- увеличение потерь давления,
- увеличение активности, индуцированной во всем первичном контуре активацией в активной зоне реактора агрессивных продуктов в растворе или суспензии в среде первичного контура,
- ускорение локальной коррозии,
- износ деталей и фитингов клапана,
- неисправность приборов КИПиА,

- нарушение контрольных проверок из-за присутствия коррозии на поверхностях.

Таким образом, получение низкого уровня выбросов коррозионных продуктов было главным приоритетом при выборе материалов, используемых для поверхностей, контактирующих с жидкостью первичного контура.

Вследствие чего, поиск материалов с низким уровнем выбросов вполне закономерно привел к материалам с очень низкой обобщенной скоростью коррозии в жидкости первичного контура, что привело к выбору нержавеющей сталей и сплавов на основе никеля.

Для крупногабаритных сосудов - сосудов, находящихся под давлением, парогенераторов, герметизаторов, - учет рассматриваемой толщины предупреждает использование коррозионно-стойких материалов, поэтому низколегированная сталь является предпочтительным материалом. Чтобы получить низкий уровень выбросов, поверхности выстилаются нержавеющей сталью (308 л или Z 2 CN 20-10) или сплавами на основе никеля при дуговой сварке. Что касается материала, используемого для пучков труб парогенераторов, было необходимо использовать сплав на никелевой основе с очень хорошей общей коррозионной стойкостью как в среде первичного, так и вторичного контура, а также обладающего превосходной локальной коррозионной стойкостью в этих средах. Вот почему нержавеющая сталь заменяется сплавом никель-хром-железо на поверхности трубчатого листа. Таким образом, сварка труб из сплава никель-хром-железо может проводиться в лучших условиях, между совместимыми материалами и во избежание риска горячего растрескивания.

11.4.1. Способ плакирования

Плакирование наносят с использованием автоматического процесса сварки порошкообразным флюсом, стыковой сварки расплавлением стальных полос в непрерывных линиях с обрезкой концов полос или электродуговой сваркой плавкими электродами с покрытием.

Для автоматической сварки полосы используются две основные процедуры сварки:

- сварка с помощью твердого флюса,
- сварка под электропроводящим флюсом.

Полоса шириной от 30 до 60 мм для сварки твердым флюсом и шириной от 50 до 75 мм для сварки электропроводящим флюсом. Ширина полосы может быть приспособлена, например, для соответствия коническому **конструкций** (соединительные детали различной толщины).

Обработка электропроводного потока используется для цилиндрических оболочек. В зоне соединения обработка электропроводного потока не может быть использована в головках, и ее заменяют обработкой потоком с твердыми частицами.

Оболочка из нержавеющей стали состоит из двух или трех слоев в зависимости от ожидаемой толщины, причем первый слой, выполненный с использованием полосы с 24% Cr и 12% Ni, приводит к осаждению с учетом разбавления с химическим составом порядка 20% Cr и 10% Ni. Второй слой и, возможно, последующие слои изготавливаются с полосой типа 20% Cr и 10% Ni.

Во избежание образования холодных трещин и трещин при повторном нагреве предпринимаются особые меры предосторожности в отношении условий термической сварки, параметров сварки и относительного положения валиков.

Покрытия с использованием электродов используются в случае ремонта и на небольших площадях поверхности, или для соединения покрытий, выполняемых автоматической сваркой. Для нанесения первого слоя требуется электрод с 24% Cr и 12% Ni, тогда как для следующих слоев используется электрод с 20% Cr и 10% Ni.

Что касается автоматической сварки полосой/флюсом, необходимо принимать меры предосторожности, касающиеся условий термической сварки и параметров сварки, необходимых для предотвращения образования холодных трещин.

11.4.2. Контроль плакирования

Покрытия из сплава Ni-Cr-Fe и нержавеющей стали проверяются ультразвуковым испытанием на предмет отсутствия дефектов на границе раздела. Химические анализы проводятся на поверхности плакированного покрытия из нержавеющей стали для того, чтобы проверить, что процентное содержание углерода ниже 0,035%.

11.5. Сварка контуров из нержавеющей стали

Контурные, изготовленные из аустенитной нержавеющей стали, используются для соединения различных элементов, работающих под давлением, описанных выше. Основные первичные трубы имеют размеры до 900 мм в диаметре и 80 мм в толщину; отводы и трубы меньшего диаметра соединены с этими первичными трубами; они называются вспомогательными трубами.

Поскольку глава 12 посвящена сварке нержавеющей сталей, здесь достаточно упомянуть особенности ядерных установок. Определенное количество сварных соединений *заводского изготовления* выполняется в цеху с переносом участков на рабочую площадку: чаще всего используются традиционные электродуговые процессы с электродами с плавким покрытием или автоматическая электросварка порошковым флюсом и проволочным электродом (проволока/флюс). На рабочей площадке для сварки небольших труб или отводов используются электроды с покрытием или ручная TIG-сварка (с электрической дугой в инертной атмосфере и вольфрамовыми электродами).

Для сборки самых крупных труб на рабочей площадке изначально использовалась ручная сварка электродами с покрытием, но спрос на качество и производительность привел к прогрессивному развитию. При этом, при работе в облученных зонах данные ручные способы обработки не могут быть легко использованы во время ремонта или замены компонентов. Для такого случая были разработаны автоматические сварочные процессы, такие как орбитальная TIG-сварка в различных положениях, сначала с традиционными фасками, аналогичные тем, которые используются при ручной сварке с покрытыми электродами (см. Рисунок 11.7), затем с узкой фаской (см. Рисунок 11.8).

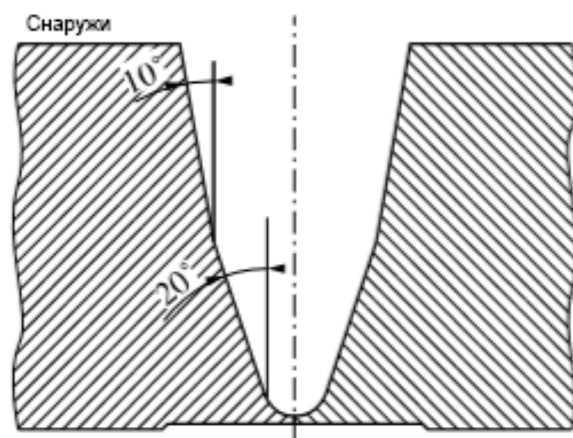


Рисунок 11.7. Традиционная скошенная кромка для орбитальной дуговой сварки вольфрамовым электродом в среде инертного газа

Принцип орбитальной TIG-сварки с узкой фаской представлен на рисунке 11.9. Это односторонний многослойный процесс сварки рутем прохода проволокой с использованием холодной проволоки диаметром 1 мм сорта 316L в узком зазоре шириной от 7 до 10,5 мм. Этот процесс позволяет выполнять сварку в различных положениях, включая вертикальную ось (2GT), горизонтальную ось (5GT) и наклон на 45° (6GT).

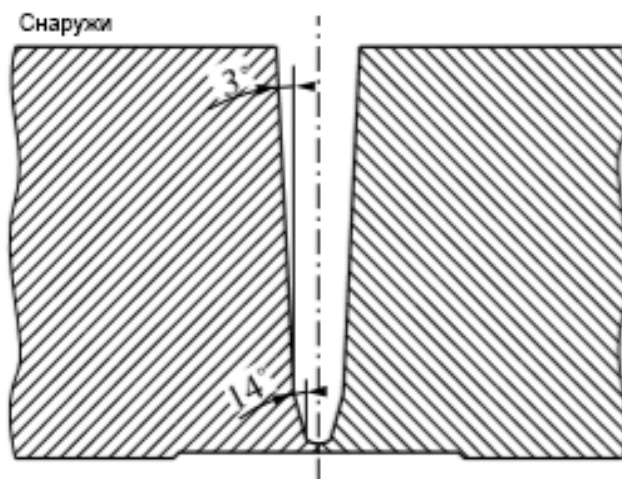


Рисунок 11.8. Узкая скошенная кромка для орбитальной дуговой сварки вольфрамовым электродом в среде инертного газа



Рисунок 11.9. Принцип подготовки узкой скошенной кромки для орбитальной дуговой сварки вольфрамовым электродом в среде инертного газа

Прежде всего, преимущество орбитальной TIG-сварки с помощью узкой фаски заключается в упрощении работы и в повышении производительности. Выигрыш времени и присадочного металла составляет от 1 до 4, когда сварка с помощью узкой фаски сравнивается с другими сварками с широкой фаской, как отмечается в таблице 11.4. Понятно, что эти выигрыши являются прямым следствием узости фаски.

Данный процесс также повышает надежность и металлургическое качество. Благодаря простоте процесса и обеспечению стабильных параметров от корня шва до конечного заполнения, получается однородная сварка, состоящая из абсолютно идентичных проходов, как можно видеть на рисунке 11.10. Кроме того, этот тип сварки демонстрирует отличные механические характеристики.

Таблица 11.4. Производительность узкой скошенной кромки по сравнению с другими процессами сварки

Процесс	Вес металла для наплавления	Число проходов	Необходимое время
Электрод с покрытием	50 кг		250 ч на станке
Электрод с покрытием (корень шва) + вольфрамовая сварка	Электрод с покрытием 6 кг + вольфрамовая сварка 44 кг	180 вольфрамовых сварок	70 ч на станке + 150 ч на станке
Вольфрамовая сварка с узкой скошенной кромкой	14 кг	43	50 ч на станке



Рисунок 11.10. Макрографический профиль узкой скошенной кромки вольфрамовой сварки, выполненной в положении 5GT

11.6. Поверхности раздела разнородных металлов

Тяжелые **конструкции** (сосуд, находящийся под давлением, парогенератор, герметик) изготовлены из низколегированной стали, полностью покрытой нержавеющей сталью, тогда как первичные трубы фактически изготовлены из нержавеющей стали. Конструкция такого типа требует сварки сопел из низколегированной стали с аустенитными или аустенитно-ферритными трубами из нержавеющей стали. Такая сборка обязательно требует сварочных работ на рабочем месте.

Чтобы выполнить эту процедуру сварки с помощью холодного аустенитно-ферритного материала, на концах труб на заводе выполняется плакирование кромок разделки нержавеющей стали, на которую почти всегда приварен предохранительный концевой фитинг из нержавеющей стали.

Из-за этого соединение между трубой и трубопроводом состоит из следующих материалов (см.Рисунок 11.11):

- основной металл трубы из низколегированной стали,
 - внутреннее покрытие трубы из нержавеющей стали,
 - плакирование кромок разделки конца трубы из сплава Ni-Cr-Fe или нержавеющей стали,
 - сварной шов с предохранительным торцевым фитингом из нержавеющей стали или сплава Ni-Cr-Fe,
 - плакирование кромок разделки предохранительного наконечника сплавом Ni-Cr-Fe.
- Эта смазка не требуется, если сварка выполняется из нержавеющей стали,
- основной металл концевой фитинга из нержавеющей стали,
 - сварка соединения между концевым фитингом и трубой из нержавеющей стали,
 - основной металл из труб из нержавеющей стали.

Плакирование кромок разделки сопловой части из нержавеющей стали образует интерфейс из разнородного металла. Когда материал сварного шва изготовлен из нержавеющей стали, сварка выполняется либо методом TIG-варки с горячей проволокой, либо вручную с покрытыми электродами, причем первый слой состоит из 24% Cr и 12% Ni, а последующие слои - из 20% Cr и 10% Ni. Когда сварка выполняется с помощью сплава Ni-Cr-Fe, она выполняется TIG-сваркой с применением горячей проволоки. Все слои добавленного металла, которые могут термически воздействовать на основной металл, выполняются с предварительным нагревом и последующим нагревом. Эта мера предосторожности максимально обеспечивает защиту от риска образования холодных трещин.

Эти разнородные металлические поверхности обязательно подвергаются термической обработке для снятия напряжений. Они проверяются с помощью рентгенографического и ультразвукового контроля.

TIG-сварка с узким зазором с присадкой из Ni-Cr-Fe, без смазки трубы и концевой фитинга, должен заменить существующий процесс в будущем.

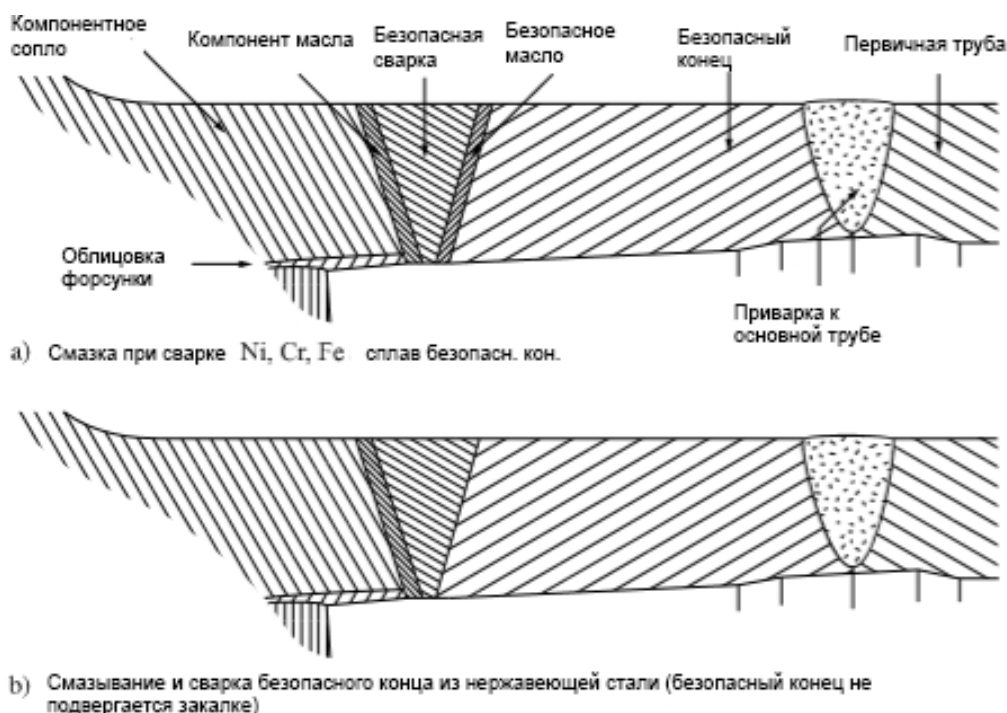


Рисунок 11.11. Эскиз соединения сопел/трубы

11.7. Сварка парогенераторных труб

Трубки трубчатого пучка, через которые протекает жидкость первичного контура, приварены к трубному листу, предварительно покрытому сплавом Ni-Cr-Fe.

Трубы диаметром около 20 мм с толщиной около 1 мм, состоящие из сплава Ni-Cr-Fe с 30% Cr, свариваются с помощью автоматической TIG-сварки без присадочного материала в два последовательных оборота и с использованием импульсного сварочного тока. Этот ток способствует поддержанию сварочной ванны во время работы и позволяет получить хорошую компактность и прочную поверхность сварного шва (отсутствие оксидных слоев).

Образцы испытаний проводятся регулярно, сварные швы проверяются с помощью макрографии и микрографии (см.Рисунок 11.12). В особенности, критерии приемлемости учитывают значение толщины шва и размер прямых микропористости.

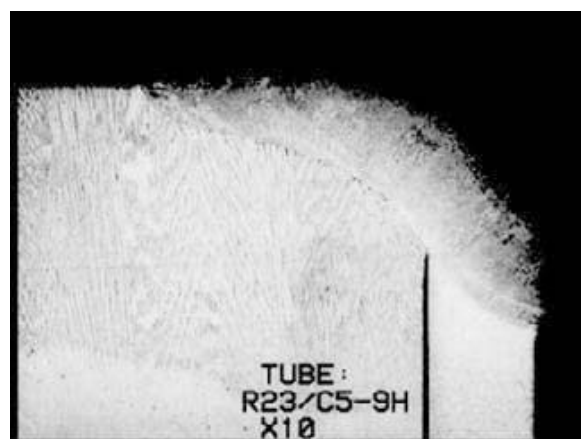


Рисунок 11.12. Макрографический разрез сварного шва трубы/ трубной решетки

Эти сварные швы проходят множество неразрушающих испытаний, особенно выделяются следующие: визуальный контроль, контроль замеров, проникающий краситель, рентгенография и водонепроницаемость (гелиевый тест).

Перед сваркой трубы соединяются механическим расширением по короткой длине (<25 мм), целью которой является обеспечение правильного расположения трубы для процедуры сварки. Правильно выполненное центровка предотвращает формирование отслаивания на уровне корня шва, которая не соответствует критериям строительных норм. Кроме того, это центровка не должна быть слишком сильной во избежание нарушения водонепроницаемости при гелиевом испытании, проводимом после сварки труб. На Рисунке 11.13 приведено представление сборки сразу после сварки.

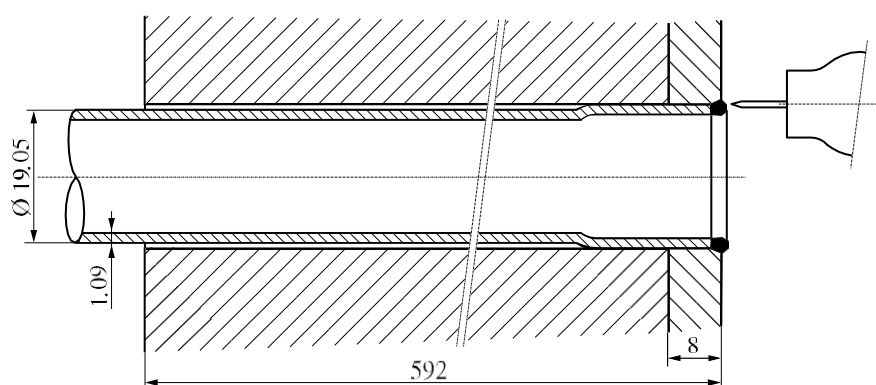


Рисунок 11.13. Эскиз сборки трубы/трубной решетки

После сварки и неразрушающих испытаний, полное расширение трубы в пластине гарантирует следующие функции:

- защита сварного шва трубы от сил, действующих на трубчатый пучок при сварке,
- механическое сопротивление,
- закрытие зазора трубки/отверстия на вторичной стороне ограничивает проникновение вторичной жидкости в междоузлия трубки/отверстия.

Расширение заключается в увеличении диаметра трубки в отверстии для получения остаточного давления на границе раздела между поверхностью трубки и отверстия после

возврата пружины.

Расширение можно получить:

- либо гидравлическим процессом повышения давления жидкости в трубе; необходимо очень высокое давление (2000 бар),
- либо путем расширения, представляющего собой механический процесс с вращающимися роликами.

11.8. Выводы

Из-за высоких ставок как с точки зрения безопасности, так и промышленности, при изготовлении **конструкций** для ядерных водо-водяных энергетических реакторов используются материалы и процессы сборки, прошедшие испытания и получившие доказательства.

Поскольку первые решения, выполненные проектировщиками, оказались в значительной степени разумными, все последующие разработки были несущественными в отношении материалов: диапазоны химического состава были сужены, а содержание примесей уменьшилось; знание их свойств значительно улучшилось, и была создана обширная база данных, начиная с испытаний, проведенных в целях аттестации материалов, использованных для изготовления 70 ядерных установок в течение последних 25 лет.

Что касается процессов сборки, то здесь были постоянные улучшения эффективности и качества за счет применения, когда это возможно, хорошо контролируемых автоматических процессов.

Конечной целью всех этих улучшений остается демонстрация эксплуатационных способностей **конструкций** при любых условиях эксплуатации и для срока службы реактора.

Сварка нержавеющей стали

12.1. Определения

Определение из *Краткого Оксфордского Словаря*, «нержавеющая сталь: разновидность хромисто-стального сплава, не подверженного ржавчине и коррозии», не является особенно подходящим описанием для этих металлов.

Лучшее определение будет выглядеть следующим образом:

- сталь называется *нержавеющей*, если в окружающей атмосфере, естественным образом, она почти мгновенно покрывается очень тонким слоем непроницаемого оксида хрома из-за воздействия атмосферных явлений в окружающей среде,
- нержавеющая сталь тогда называется *пассивной*;
- сталь называется нержавеющей, если она содержит не менее 12% хрома (10,5% в соответствии со стандартами).

12.2. Основные группы из нержавеющей стали

Нержавеющие стали можно разделить на пять основных групп по их составу и металлургическому строению (см. Таблицу 12.1).

Промежуточные структуры или аналитические особенности порождают подгруппы, расположенные между основными группами или добавленные к ним. В частности, это, как правило, мартенситно-ферритные стали и мартенситные или аустенитные стали с дисперсионным упрочнением.

Таблица 12.1. Пять основных групп нержавеющей стали

Группа	Основные элементы	Элементы присадок	Возможные стабилизаторы
1 – Мартенситная сталь	Cr 10.5 – 17% C > 0.1%	Mo – V	
2 – Ферритная сталь	Cr 10.5 – 29%	Mo – Al	Ti – Nb – (Zr)
3 – Аустенитная сталь	Cr 16 – 18% Ni 8 – 13%	Mo – Cu Mn – N	Ti – Nb
4 – Жаростойкая сталь (аустенитная)	Cr 20 – 25% Ni 10 – 20%	Si	
5 – Аустенитно-ферритная сталь	Cr 20 – 25% Ni 4 – 7% N 0.1 – 0.3%	Mo – Cu	

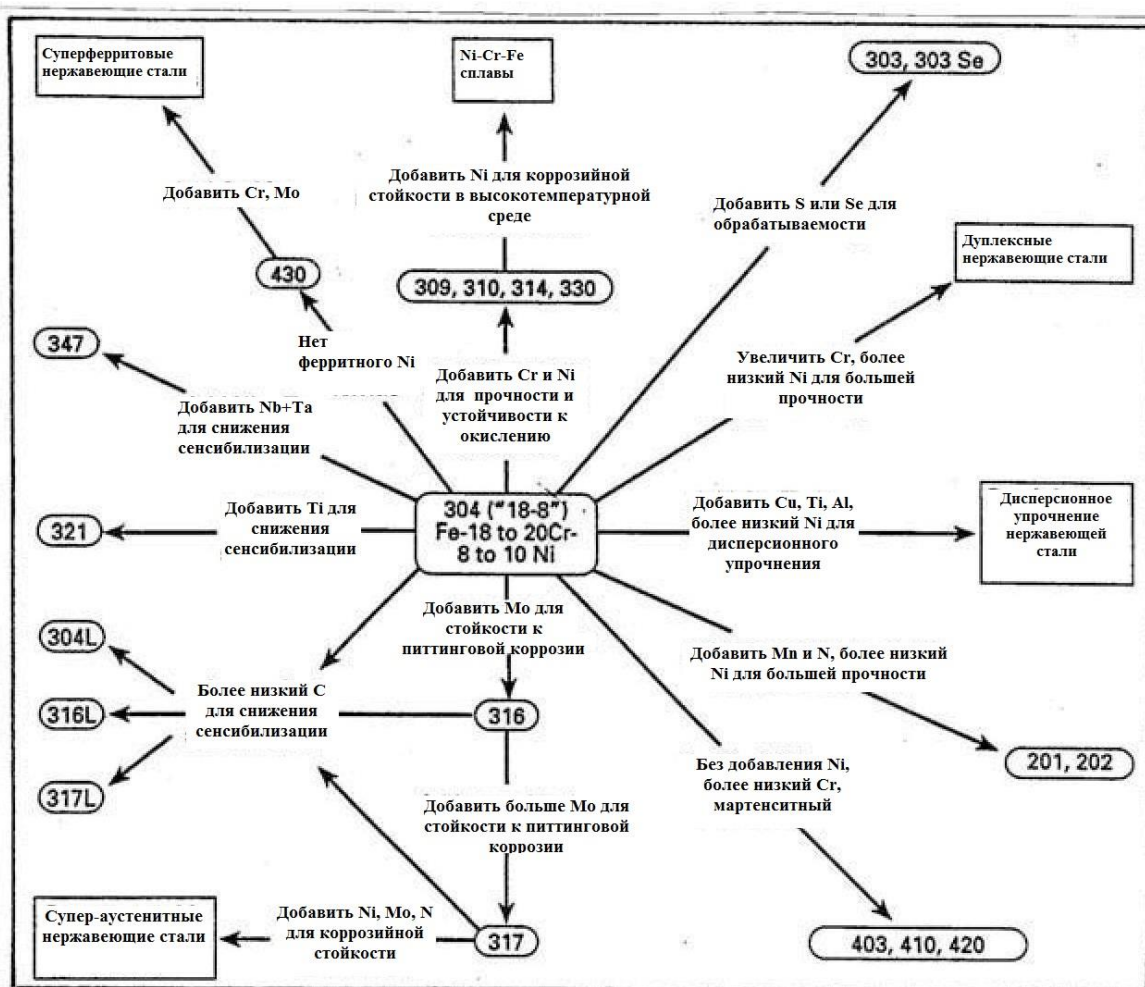


Рисунок 12.1. Классификация нержавеющей сталей

Все эти нержавеющие стали могут быть получены из основной аустенитной стали AISI 304 (EN 1.4301) путем введения присадок или вычитания одного или нескольких элементов для достижения определенного свойства по сравнению с другим. Это ясно описано в Рис. 12.1 (американская классификация).

12.3. Строение металлов

Нержавеющие стали представляют три основные структуры, из которых они берут свое название, а также четвертую, не очень устойчивую, но важную именно для явлений упрочнения при холодной деформации.

– Для аустенитов:

- гранцентрированная кубическая структура (ГЦК-структура),
- немагнитная,
- мягкая, но чрезвычайно упрочняемая,
- ковкая и умеренно поддающаяся обработке.

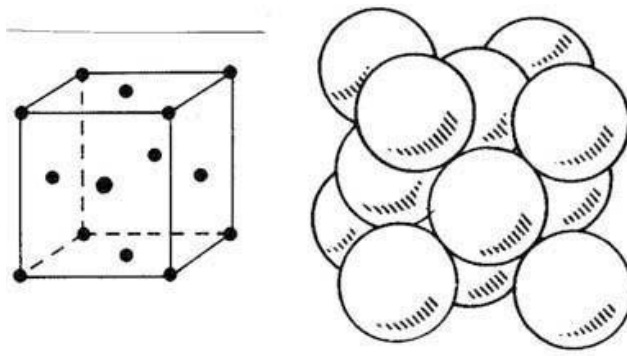


Рисунок 12.2. Аустенит

– Для ферритов:

- объёмно-центрированная кубическая структура (ОЦК-структура),
- ферромагнитная,
- мягкая и не очень закаливаемая в заготовке,
- ковкая и умеренно поддающаяся обработке.

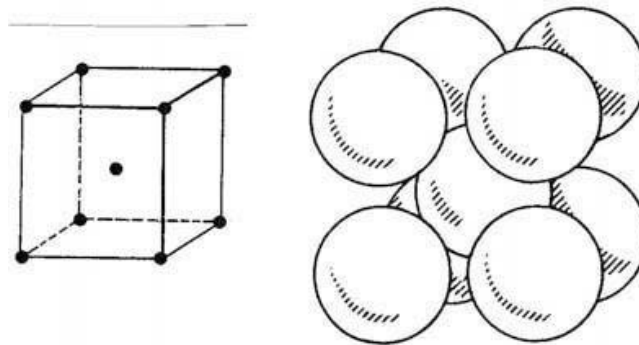


Рисунок 12.3. Феррит

– Для мартенситов:

- объёмно-центрированная кубическая структура (ОЦК-структура),
- ферромагнитная,
- твердый и хрупкий,
- не очень ковкий и непригодный для обработки.

– Шестиугольная компактная структура:

- самая плотная из структур,
- превращение при холодном упрочнении из аустенита J в мартенсит

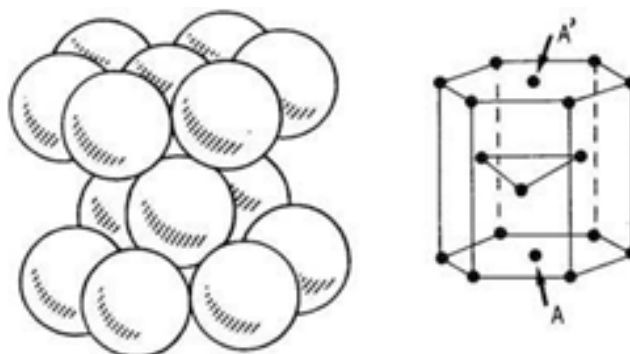


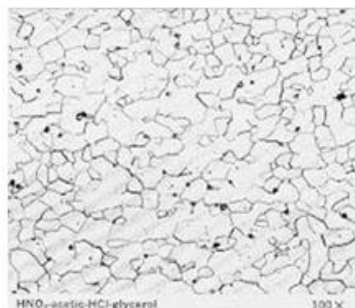
Рисунок 12.4. Гексагональная компактная структура

Некоторые микрографические изображения основных структур представлены на рисунках 12.5, 12.6 и 12.7.



Аустенит AISI 304
EN 1.4301

Рисунок 12.5. Структура аустенита AISI 304 EN 1.4301



Феррит AISI 409
EN 1.4512

Рисунок 12.6. Структура феррита AISI 409 EN 1.4512



Мартенсит AISI 409
EN 1.4512

Рисунок 12.7. Структура мартенсита AISI 630 EN 1.4542

12.4. Диаграммы состояния

12.4.1. Введение

Человек всегда стремился предсказать будущее. Это не всегда легко сделать, но промышленность относительно хорошо поддается этой идее.

В частности, сварщики хотят предсказать непосредственные или возможные риски, с которыми они (или их клиенты) столкнутся во время сборки. Они хотят знать, какую процедуру лучше всего использовать, и, если необходим присадочный материал, какой из них, с металлургической точки зрения, является лучшим.

На основе эффекта *альфа-гена* (способствующего образованию феррита) и эффекта *гамма-*

гена (поддерживающего образование аустенита) были разработаны диаграммы с целью прогнозирования структуры металла в его сварном состоянии. Это диаграммы предварительной оценки.

Эти диаграммы были установлены, а затем изменены и, с течением времени, улучшены с помощью изучения микрографических структур расплавленных зон в их сварном состоянии.

Регрессивные расчеты позволили различным авторам определить формулы расчета эквивалентов Cr (хром) и Ni (никель), используемых в качестве коэффициентов альфа-гена и гамма-гена для эффектов различных элементов, которые принимаются во внимание и которые используются в качестве координат для диаграмм.

12.4.2. Вычисление эквивалентных формул

В таблице 12.2 представлены основные эквивалентные формулы Cr и Ni, без ограничения других формул, которые использовались и используются до сих пор.

Шеффлер был первым, кто попытался предсказать сварку нержавеющей стали. Таким образом, он был первым, кто разработал формулы, дающие Cr_{eq} и Ni_{eq} для сортов нержавеющей стали, существующих в то время.

В 1960-х годах Делонг интегрировал гамма-эффект азота, который он считал таким же мощным, как и углерод.

В 1970-х годах Эспи, применив расчеты Шеффлера и расширив сферу их применения (среди прочего, азот, марганец и дуплекс), обнаружил и представил:

- значительный эффект альфа-гена ванадия и алюминия,
- эффект гамма-гена, но взвешенный по содержанию азота,
- постоянный эффект марганцевого гамма-гена.

В конце 1980-х годов *Совет по исследованиям в области сварки* разработал упрощенные формулы:

- устранение альфа-генных эффектов Si (сомнительно для сталей, содержание Si в которых может колебаться от 0,1 до 2%) V, Al, Ti и др.;
- устранение постоянного эффекта гамма-гена Mn, но путем включения его в диаграмму,
- исправление эффекта C и N гамма-гена, с легким видоизменением.

Другие формулы, приведенные в таблице, связаны с весьма особым применением, которые будут обсуждаться позже.

Таблица 12.2. Формула вычислений

	Cr_{eq}	Ni_{eq}
Шеффлер	$Cr + Mo + 1.5 Si + 0.5 Nb$	$Ni + 30 C + 0.5 Mn + 0.6 Cu$
Делонг	$Cr + Mo + 1.5 Si + 0.5 Nb$	$Ni + 30 (C + N) + 0.5 Mn$
Бюллетень совета по исследованиям сварки (WRC) 1992	$Cr + Mo + 0.7 Nb$	$Ni + 35 C + 20 N + 0.25 Cu$
Эспи	$Cr + Mo + 1.5 Si + 0.5 Nb + 5 V + 3 Al$	$Ni + 30 C + x (N - 0.045) + 0.87 + 0.33 Cu$ $x = 30 \text{ if } N = 0/0.20$ $x = 22N = 0.21/0.25$ $x = 20N = 0.26/0.35$
	$Cr + Mo + 1.5 Si + 0.5 (Nb + Ta) + 2Ti + W + V + Al$	$Ni + 30 C + 0.5 Mn + 0.5 Co$
Хаммар и Свенсон	$Cr + 1.37 Mo + 1.5 Si + 2 Nb + 3 Ti$	$Ni + 22 C + 14.2 N + 0.31 Mn + Cu$
Экенрот и Ковач (12% Cr)	$Cr + 4 Mo + 6 Si + 8 Ti + 2 Al$	$4 Ni + 40 (C + N) + 2 Mn$

12.4.3. Диаграммы состояния

На следующих страницах представлены различные диаграммы. Они используются для прогнозирования структуры сварного расплавленного металла.

– *Схема Шеффлера*

Это наиболее известная и наиболее широко используемая диаграмма производителей сосудов под давлением, в частности для разнородных сварных швов.

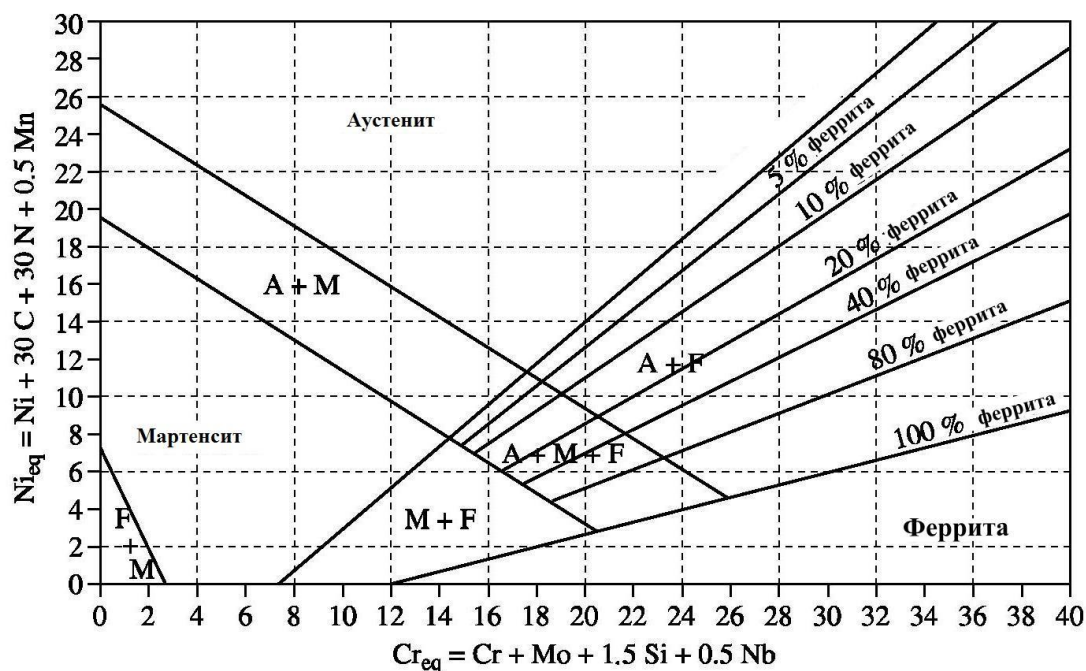


Рисунок 12.8. Диаграмма Шеффлера

Эта диаграмма имеет один существенный недостаток в том, что она не подходит для сортов с высоким содержанием марганца и/или высоким содержанием азота.

При наличии полностью однородных сварных швов в аустенитной нержавеющей стали, или в случае, когда известен анализ расплавленного металла, расчет содержания феррита в сварном металле может быть выполнен по формуле Сефериана, которая выводится из диаграммы Шеффлера:

$$\% \text{ феррита} = 3 (\text{Cr}_{\text{eq}} - 0.93 \text{Ni}_{\text{eq}} - 6.7)$$

– *Диаграмма Делонга*

Учет содержания азота в качестве эффекта от гамма-гена заставил У. Делонга построить диаграмму, отличную от диаграммы Шеффлера.

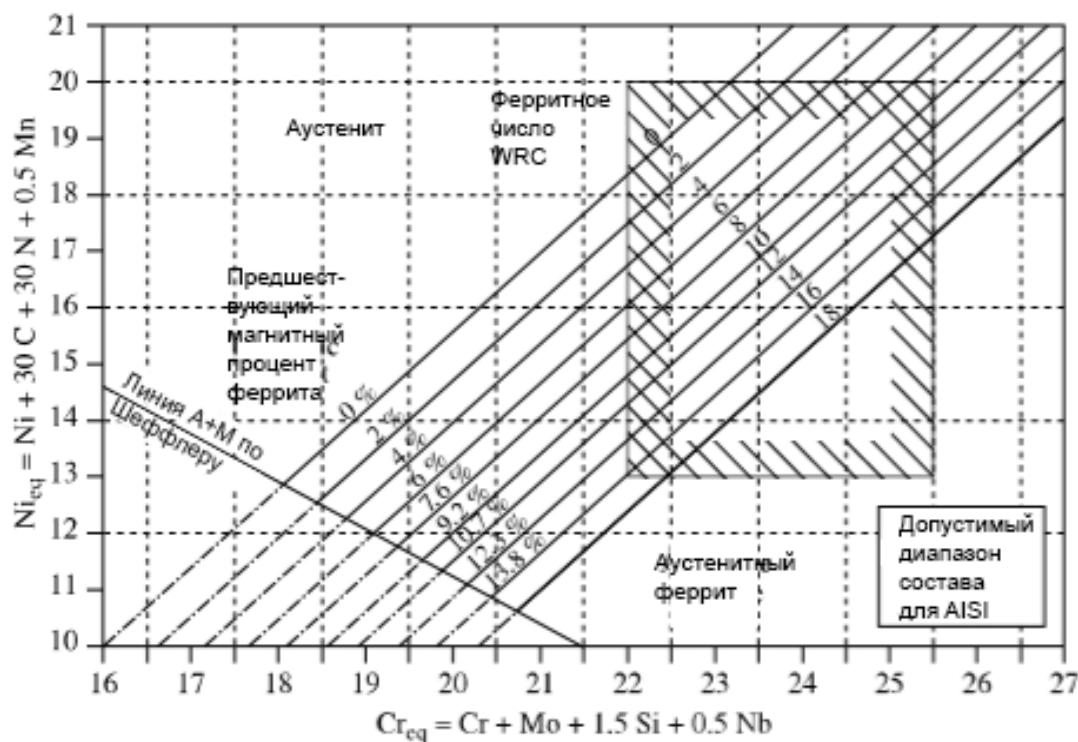


Рисунок 12.9. *Диаграмма Делонга*

Эта схема, обычно используемая в конструкции сосудов под давлением из нержавеющей стали, имеет два основных недостатка:

- а именно, его ограниченная область применения делает его неподходящим для гетерогенных сварок,
- нельзя применять для сортов с высоким содержанием марганца и/или азота.

– *Диаграмма Эсти*

Это диаграмма Шеффлера, уточненная для эквивалентных формул расчета Cr и Ni.

Эта диаграмма особенно хорошо подходит для нержавеющей сортов с высоким содержанием марганца и/или азота и для сталей, выплавленных дуплекс-процессом.

– *Диаграмма WRC92*

Это самая простая, но, к сожалению, наименее точная диаграмма:

- уменьшено количество элементов для расчета Cr_{eq} и Ni_{eq} ,
- ограниченная область применения, что делает его непрактичным для гетерогенных сварных швов.

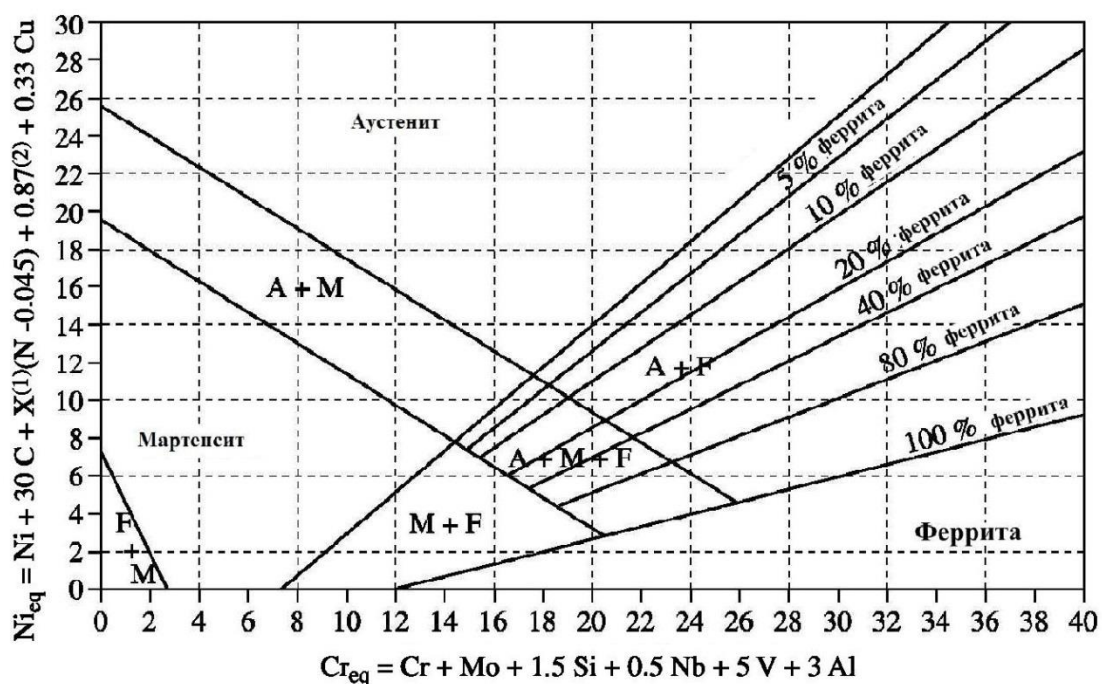


Рисунок 12.10. Диаграмма Эсти

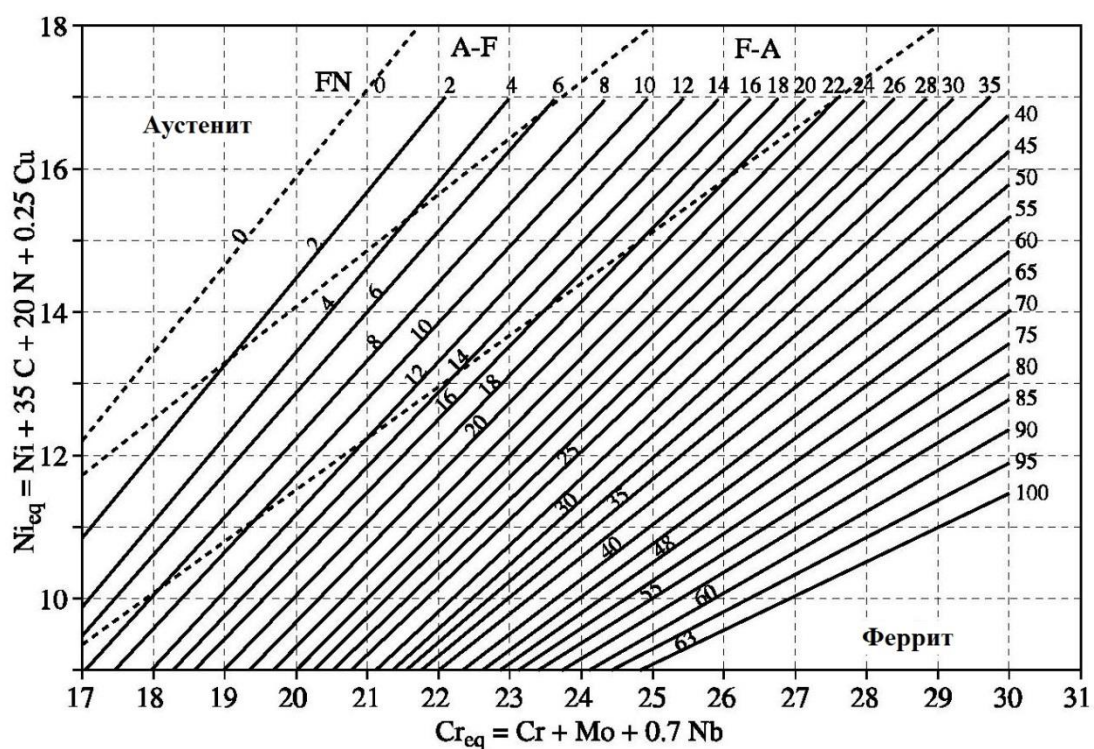


Рисунок 12.11. Диаграмма WRC 92

Поначалу эта диаграмма была градуирована только по FN (число ферритов или индекс ферритов), который нельзя было линейно перенести в % содержание феррита, что делало его практически неосуществимым. Этот дефект был исправлен, и теперь градация производится как в FN, так и в % феррите.

– Сравнение различных диаграмм

Преимущества и недостатки различных диаграмм приведены в таблице 12.3.

Таблица 12.3. Сравнение различных диаграмм

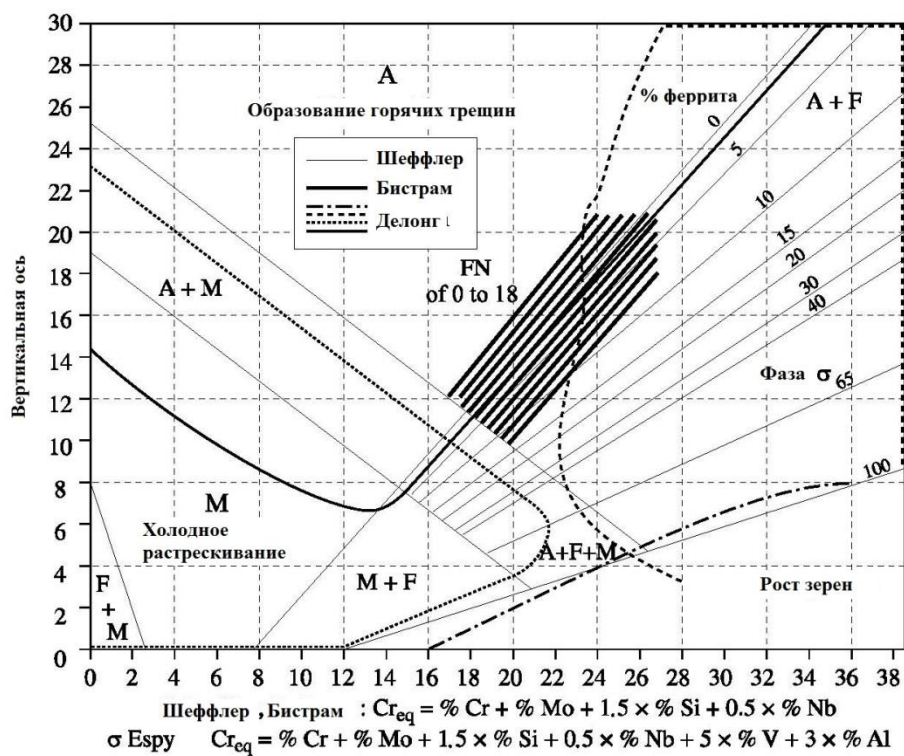
Диаграмма	Преимущества	Недостатки
Шеффлер	- Неоднородная сварка - Диапазон применения	- Не при высоком Mn ($>2\%$) - Не при высоком N ($>0.10\%$) - не совсем точен (феррит $>20\%$)
Делонг	- одобрено ASME - феррит % и FN	- ограниченное поле $Cr_{eq} > 16$ $Ni_{eq} > 10$ феррит $< 20\%$ - Не при высоком Mn ($>2\%$) - Не при высоком N ($>0.10\%$)
Эспи	- Неоднородная сварка - Диапазон применения - Много элементов - высокий Mn и/или N	- не совсем точен (феррит $>20\%$)
WRC 92	- стандартизовано в Европе (стандарт EN...) - упрощенный расчет	- несколько элементов - ограниченное поле $Cr_{eq} > 17$ $Ni_{eq} > 9$

– Диаграмма Бистрам

Диаграммы Бистрам не являются диаграммами состояния, но при наложении на них позволяют определить четыре основные зоны риска:

- риск образования горячих трещин,
- риск образования сигма-фазы,
- риск образования холодных трещин,
- риск роста зерна металла.

Полная диаграмма, представленная на Рис. 12.12, показывает, что поле нулевого риска относительно уменьшено и что различные нержавеющие стали подвержены одному или другому из перечисленных выше рисков (даже двум одновременно).



Вертикальная ось: Шеффлер : $Ni_{eq} = \% Ni + 30 \% C + 0,5 \times \% Mn$
 Бистрам : $Ni_{eq} = \% Ni + 30 \% C + 30 \% N + 0,5 \times \% Mn$
 σ_{Espy} : $Ni_{eq} = \% Ni + 30 \% C + X \times (\% N - 0,045) + 0,87^{**} + 0,33 \times \% Cu$
 * $X = 30$ if $N = 0/0,2$; $X = 22$ if $N = 0,21/0,25$; $X = 20$ if $N = 0,26/0,35$; ** постоянная для Ма между 0 и 10%

Рисунок 12.12. Полная диаграмма

12.5. Сварка ферритной нержавеющей стали

12.5.1. Введение

Семейство ферритных нержавеющей сталей охватывает важный диапазон химических составов, основанный в целом на тройной диаграмме Fe-Cr-C. Эти стали содержат минимум 11,5% хрома и максимум 0,1% углерода.

Главным образом, свойства этих сталей основаны на содержании хрома, связанном с коррозионной стойкостью.

Что касается сварки, то ферритные нержавеющей стали свариваются при условии соблюдения определенных критических свойств.

Таблица 12.4. Критические свойства и меры предосторожности, связанные с ферритными нержавеющей стали

Критические свойства			Меры предосторожности	
C	$\approx$ нерастворим $\Rightarrow$	карбиды $\Rightarrow$ коррозия	}	стабилизирующая обработка
N ₂		нитриды		
Риск роста азерен			}	H ₂ и N ₂ запрещены
Нерастворим H ₂ $\Rightarrow$ охрупчивание				

12.5.2. Риски, возникающие при сварке

Ферритные нержавеющие стали содержат, практически, от 11,5 до 29% хрома, как правило, с низким содержанием углерода и других различных легирующих элементов (Mo для коррозионных характеристик, Al для температурных режимов, Ti и/или Nb для стабилизирующей обработки).

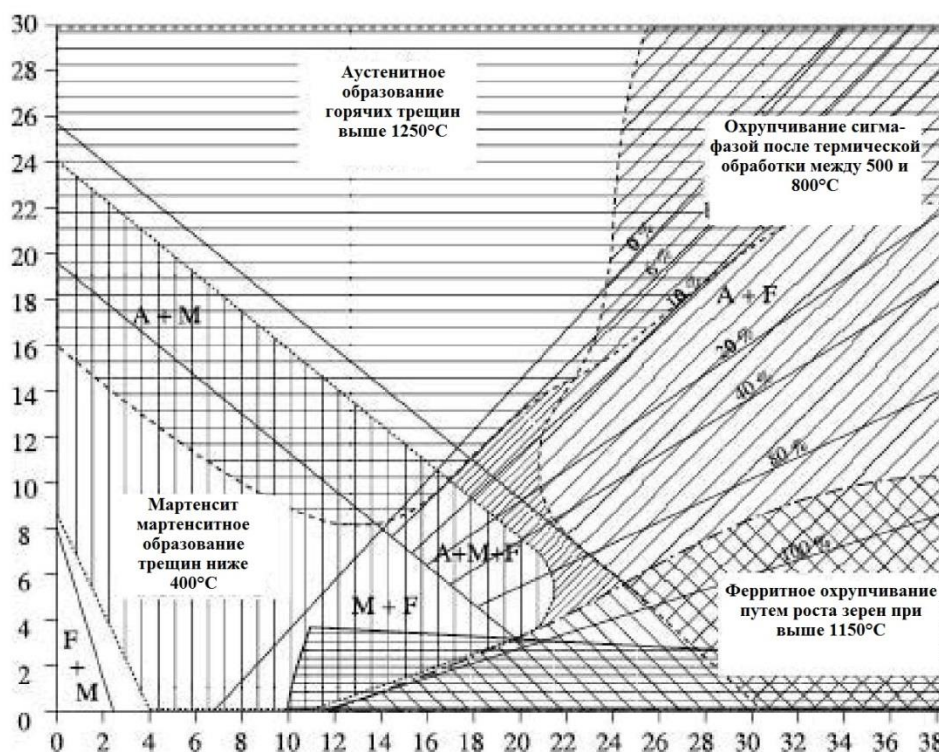


Рисунок 12.13. Положение ферритных нержавеющих сталей на диаграмме Шеффлера-Бистрама

Положение нержавеющих сталей на диаграмме Шеффлера-Бистрама показывает риски, демонстрирующие при сварке следующие стали:

- риск образования холодных трещин для полуферритных сталей, особенно с высокой чувствительностью к водороду,
- риск образования интерметаллических соединений (фаза V), по крайней мере, для сталей с очень высоким эквивалентом хрома. Принимая во внимание скорость термоциклов, образование фазы V обычно не ожидается во время самой процедуры сварки,
- риск роста зерна, который тем более вероятен, чем выше энергия сварки.

И наконец, необходимо подчеркнуть весьма важный момент, касающийся металлургии ферритных нержавеющих сталей: очень низкую растворимость углерода и азота, что, в частности, обуславливает многие виды сварки, стабилизирующую обработку титаном и/или ниобием, алгоритм которой и другие эффекты представлены ниже.

12.5.3. Стабилизирующая обработка

Большинство этих рисков устраняются или значительно уменьшаются при использовании стабилизированных типов стали.

Стабилизирующие элементы (Ti, Nb) представляют собой элементы, карбиды и нитриды которых образуются, отдавая предпочтение хрому во время термической обработки. Они

используются для захватывания углерода и азота.

Стабилизирующая обработка играет несколько ролей. Действительно, мы знаем, что: углерод и азот практически не растворимы в феррите; осажденные карбиды и нитриды хрома вызывают межкристаллитную коррозию в результате снижения концентрации хрома окружающей матрицей; постоперативные термические обработки не всегда легки или выполнимы; рост зерна ферритной структуры не поддается термической обработке; настоятельно рекомендуется использовать стабилизированные марки Ti или Nb или даже *бистабилизированные* типы Ti + Nb, как только планируется сварочная операция.

Многочисленные эффекты стабилизирующей обработки можно обобщить следующим образом:

- стабилизирующая обработка титаном характеризуется осаждением нитрида титана в жидком виде (затвердевание происходит вокруг этих зародышей TiN, создавая в зоне расплава благоприятные условия для получения равноосной структуры, повышающей хорошую ударную вязкость), а также осаждение карбидов титана в твердом состоянии около 1050 °C, вокруг нитридов титана;
- стабилизирующая обработка ниобием характеризуется осаждением карбонитрида ниобия в твердом состоянии около 1150/1200 °C и возможным осаждением интерметаллида Fe₂Nb между 600 и 950 °C с эффектом блокирования зерен, благоприятных для характеристик ползучести при высокой температуре;
- карбонитриды ниобия или титана снижают чувствительность к росту зерен феррита;
- титан и ниобий, «захватывая» элементы сильного гамма-гена, углерода и азота, имеют тенденцию стабилизировать феррит, что позволяет избежать образования мартенсита.

Наиболее часто выбираемые формулы стабилизирующей обработки:

- $Ti\% > 0.2 + 4 (C\% + N\%)$,
- $Nb\% > 0.15 + 7 (C\% + N\%)$.

12.5.4. Риски охрупчивания

Существует четыре риска охрупчивания ферритной нержавеющей стали:

- Охрупчивание при 475°C,
- Сигма-фаза,
- Охрупчивание при высокой температуре,
- чувствительность надреза.

Охрупчивание при 475°C

Аустенитно-ферритные нержавеющие стали чувствительны к охрупчиванию при 475 °C (между 400 и 600 °C) из-за плохой смешиваемости с хромом (а также с молибденом) в сплаве Fe-Cr, при котором происходит образование фазы, богатой хромом (30%) и в молибдене с образованием твердой и хрупкой фазы.

В своей области устойчивости данная фаза образуется после сверхдолгих периодов. Ее можно наблюдать очень редко. Не следует опасаться охрупчивания при 475 °C после процедуры сварки.

Сигма-фаза

Сигма-фаза представляет собой интерметаллическое соединение, появляющееся в системе железо-хром. Вот почему мы упоминаем об этом в этой главе, хотя это не играет

существенной роли при сварке ферритных и полужерритных сталей. Сигма-фаза бывает твердой и хрупкой, и ее появление в сварных швах может привести к появлению настоящей хрупкости даже при отсутствии выемки, которая не исчезает при умеренном повышении температуры.

При этом в сварных швах из ферритных и полужерритных сталей, имеющих низкую ударную вязкость при комнатной температуре, важность образования сигма-фазы в этих сварных швах остается вторичной.

Сигма-фаза имеет состав, основанный на содержании хрома 45%, она может случаться при длительной обработке выше 550 °C в сплавах железо-хромового типа, содержащих более примерно 22% хрома.

Охрупчивание при высокой температуре

На охрупчивание, связанное с поддержанием высокой температуры в течение длительного периода, влияют многие факторы, как аналитические, так и конструкционные: содержание хрома и межузловых соединений, размер зерна, качество и распределение осадков. При высокой температуре процедура сварки не приводит к охрупчиванию.

Чувствительность к эффекту надреза

Полужерритные нержавеющие стали с низким содержанием хрома ($Cr < 15\%$) не чувствительны к эффекту надреза.

С другой стороны, для сталей, содержащих более 15% хрома, чувствительность зависит от содержания промежуточных соединений ($C + N$) и увеличивается с увеличением содержания хрома.

Единственный способ уменьшить эту чувствительность - это контролировать содержание $C + N$, либо поддерживая их на очень низком уровне (необходимо быть осторожны с ростом зерен), либо задерживая их с помощью стабилизирующего элемента (Ti, Nb).

12.5.5. Присадочные материалы

Присадочные материалы обычно состоят из аустенитной нержавеющей стали. Тем не менее, важно отметить наличие сортов ферритного присадочного продукта, которые позволяют формировать однородные сварные швы, что имеет существенное преимущество с точки зрения их способности справляться с возможной деформацией.

Выбор присадочного продукта осуществляется в соответствии с основными металлами: присадочный материал должен быть более легированным, чем самый благородный из основных материалов, чтобы компенсировать потери при сварке и в отношении диаграмм состояния.

Присадочные материалы имеют стандартизацию:

- Стандарт Американского общества специалистов по сварке:
 - S.F.A. 5.4 – Электроды,
 - S.F.A. 5.9 – Оголенный провод,

- S.F.A. 5.22 – Проволока с заполнением;
- Европейский стандарт:
 - NF EN 1600 – Электроды,
 - NF EN 12072 – Оголенный провод,
 - NF EN 12073 – Проволока с заполнением.

12.5.6. Защитные газы

В таблице 12.5 приведены защитные газы, используемые для сварки ферритной нержавеющей стали, с учетом того, что H_2 и N_2 исключены, а CO_2 не рекомендуется (менее 3%).

Таблица 12.5. *Защитные газы*

Процедура	TIG	MIG
Первичный газ	Ar	Ar + O_2 (<3%)
Легирующий газ	He (<20%)	He (<20%)

12.5.7. Резюме: частный вывод

Ферритные нержавеющие стали можно *сваривать* без предварительного нагрева или последующего нагрева, следуя следующим рекомендациям, изложенным в таблице 12.6.

Таблица 12.6. *Рекомендации*

Рекомендация	Борьба
Марки стабилизированной стали	С коррозией С ростом зерна металла Повышение хрупкости при высокой температуре Чувствительность к надрезу
Твердость феррита	% мартенсита в полуферритах
Низкая энергия сварки	Рост зерна металла Повышение хрупкости
H_2 N_2 } ЗАПРЕЩЕНЫ	Холодное растрескивание Коррозия
CO_2 нецелесообразен	$C \nearrow \Rightarrow$ <u>Карбиды</u> $\searrow$

12.6. Сварка мартенситных нержавеющих сталей

12.6.1. Введение

Семейство мартенситных нержавеющих сталей включает в себя стали, которые сочетают повышенный уровень твердости с определенным уровнем коррозионных свойств (благодаря содержанию хрома), сравнимым с таковым в обработанных легированных сталях, и которые

могут быть получены путем мартенситного упрочнения.

Обычно эта группа включает в себя определенные структурно-упрочняющие стали, чей низкоуглеродистый мартенсит является относительно мягким, но характеристики которого могут быть значительно улучшены путем термообработки при средних температурах (от 500 до 750 °C), разумно выбранных для обеспечения осаждения затвердевающих интерметаллических соединений.

На Рисунке 12.14 диаграмма Шеффлера-Бистрама схематично показывает центрирование мартенситных нержавеющих сталей и сталей с упрочнением структуры

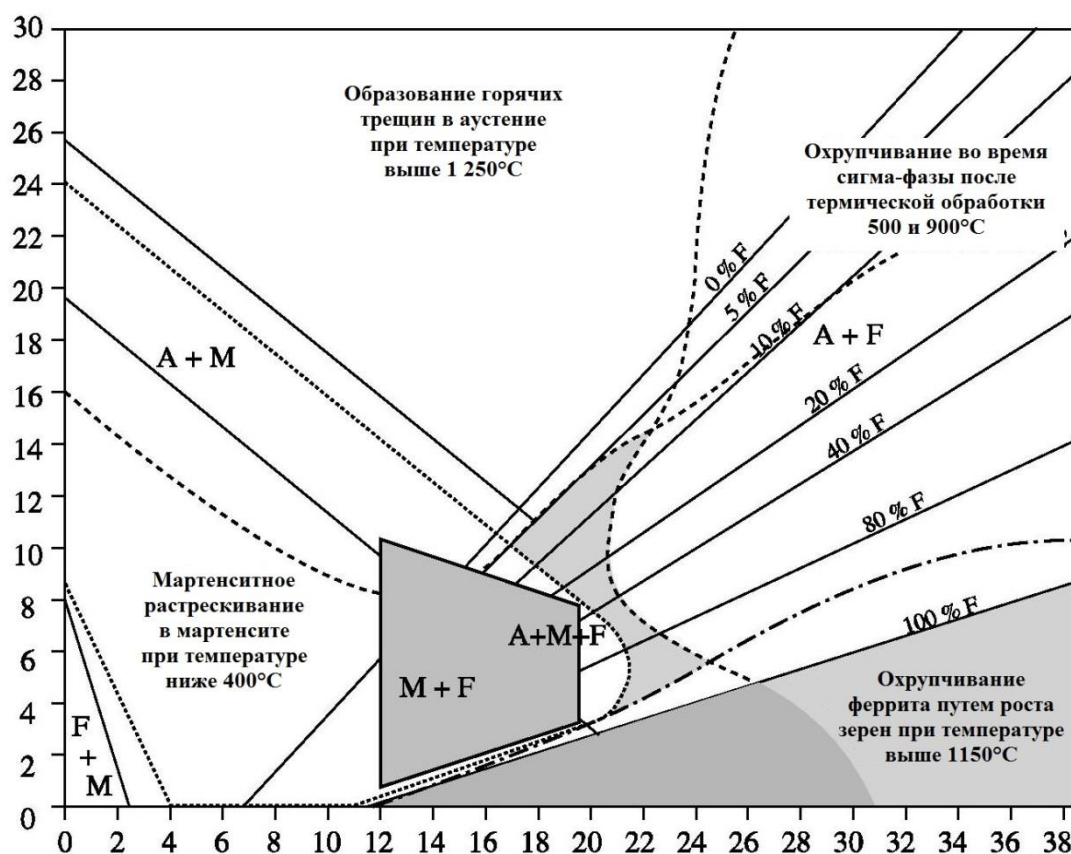


Рисунок 12.14. Схема Шеффлера-Бистрама для мартенситных нержавеющих сталей и сталей с упрочнением структуры

Нержавеющие мартенситные стали имеют сходные свойства при сварке с термически обработанными легированными сталями с эквивалентным процентным содержанием углерода и, таким образом, будут обрабатываться аналогичным образом.

12.6.2. Список мартенситных нержавеющих сталей

Неполный список основных мартенситных нержавеющих сталей и сталей, упрочненных осадками, взятых из стандарта EN 10.088-2, представлен в таблице 12.7 ниже.

Таблица 12.7. Отрывок из стандарта EN 10.088-2

X12Cr13 *X12CrS13 X20Cr13 X30Cr13 *X29CrS13 X39Cr13 X46Cr13	S = 0.15/0.35 S = 0.15/0.35
X50CrMoV15 X70CrMo15 *X14CrMoS17 X39CrMo17-1 X105CrMo17 X90CrMoV18	V = 0.10/0.20 Mo = 0.40/0.80 S = 0.15/0.35; Mo = 0.20/0.60 Mo = 0.40/0.80 Mo = 0.90/1.30; V = 0.07/0.12
X17CrNi16-2 X3CrNiMo13-4 X4CrNiMo16-5-1	Mo = 0.30/0.70
X5CrNiCuNb16-4 X7CrNiAl17-7 X8CrNiMoAl15-7-2 X5CrNiMoCuNb14-5	Cu = 3.00/5.00; Nb = 5xC/0.45 Al = 0.70/1.50 Al = 0.70/1.50 Mo 1.20/2.00; Cu = 1.20/2.00; Nb = 0.15/0.60

12.6.3. Влияние элементов C, Cr и Ni на петлю J

Мартенситные нержавеющие стали характеризуются фазовым переходом $\bar{U}\bar{J}$, которая происходит без диффузии при низкой температуре ($d\ 400\ ^\circ\text{C}$), между MS и MF.

Рассматриваемые сорта могут быть богаче Cr, поскольку чем больше элементов гамма-гена, таких как C и Ni, тем стабильнее поле J при высокой температуре.

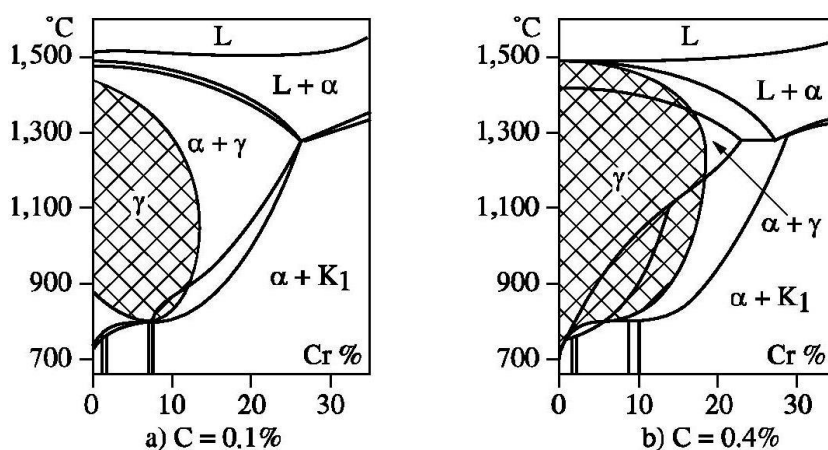


Рисунок 12.15. Удлинение петли $\bar{U}\bar{J}$ углеродом

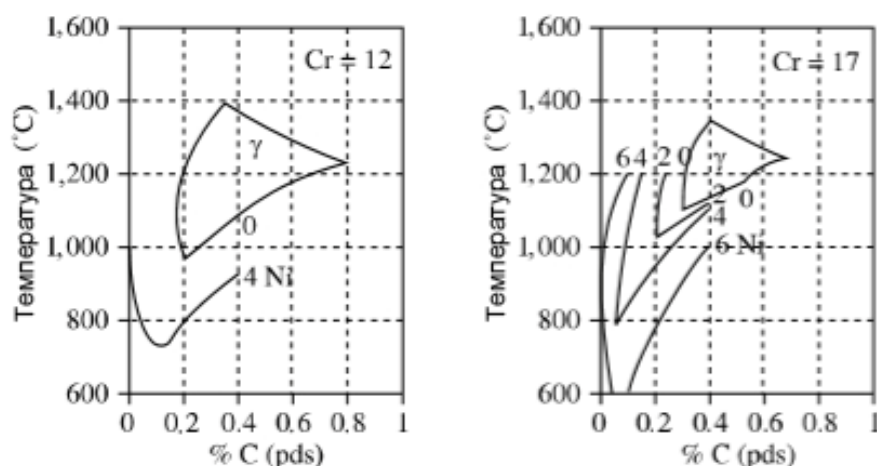


Рисунок 12.16. *Расширение поля J с помощью Ni*

12.6.4. Металлургическая свариваемость мартенситных нержавеющих сталей

На диаграмме Шеффлера-Бистрама данные виды стали расположены справа от интервала мартенситного превращения, то есть с достаточно высоким содержанием Cr (равным или более 12%), чтобы обеспечить хорошую коррозионную стойкость в относительно неагрессивных средах. В сварных швах (в зоне расплава и зоне термического воздействия в непосредственной близости от зоны расплава) быстрое охлаждение при температуре выше однофазного J-поля, при комнатной температуре может способствовать присутствию G-феррита. В этих зонах структура состоит из «свежего» мартенсита (в состоянии после закалки) и, возможно, из G-феррита, а также из остаточного аустенита для большинства легированных сортов стали. Некоторые из них, такие как мартенсит в состоянии после закалки, также будут присутствовать в зоне термического воздействия сварных швов с аустенитным присадочным материалом. Такой мартенсит может быть чувствителен к образованию холодных трещин (водородному охрупчиванию с возможным разрывом), и тем более, что, чем выше процент углерода (твердый мартенсит), тем больше водорода присутствует и тем выше термические напряжения. Таким образом, в большинстве случаев важно предварительно нагревать и нагревать материалы после при температуре $< M_s$, но близкой к M_F , в целях ограничения напряжения, вызванных фазовым переходом, чтобы осуществить небольшое снятие напряжения мартенсита сразу после его образования и работать в температурном диапазоне, где водород не склонен к усадке металла в первых J-соединениях. Затем необходимо снять напряжение сварного шва в температурном диапазоне, эквивалентном тому, который используется для отпуска этих сортов (приблизительно от 550 до 750 °C в зависимости от сортов и желаемого уровня твердости). Уровень напряжения также должен быть ограничен скоростью медленного охлаждения и нагрева, особенно для тяжелых деталей, а также путем проектирования компонента, которое позволяет избежать концентрации напряжений вокруг сварного шва.

Что касается сварного шва с аустенитным присадочным материалом (308L, 309L и т. д.) обработка D' для снятия напряжений невозможна, поскольку она может привести к диффузии углерода D' относительно J и снижению коррозионной стойкости J путем осаждения хромистых выделившихся по границам зерен (сенсбилизация). Возможно снятие напряжения при температуре около 250°C в зоне термического воздействия мартенсита.

Сварка высокоуглеродистых или ресульфурированных сортов нежелательна, тогда как сварка низкоуглеродистых сталей ($C < 0,05\%$) может осуществляться без предварительного нагрева и последующего нагрева, в том числе, для низкоуглеродистых высоколегированных

сортов (Ni, Mo, и т.д.), которые имеют MF, близкий к комнатной температуре. Для продуктов, которые позволяют это, после сварки можно проводить аустенизацию с последующим упрочнением, которое, в конкретном случае с сортом с дисперсионно-твердеющим осаждением в тяжелых продуктах, позволяет получить механические характеристики в зоне расплава и коррозии. Сопротивление сравнимо с сопротивлением кованого изделия. Процесс сварки может оказывать значительное влияние на свойства пластичности/ ударной вязкости, а именно, путем введения элементов, влияющих на эти свойства, таких как кислород, вводимого в ходе сварки на покрытый электрод. Принимая во внимание вредность азота и, особенно, водорода, H₂ и N₂ формально запрещены в процессах сварки, которые требуют газовой защиты. Для получения тонких изделий эти стали свариваются способом точечного сопротивления, валиком и стыковой сваркой расплавлением.

12.6.5. Заключение: неполный обзор

В общем, свариваемость мартенситных нержавеющей сталей заключается в следующем. Мартенситная структура чувствительна к явлению холодного растрескивания - разрыву (расхождению), связанному с водородным охрупчиванием. Это явление менее выражено при условии, что, чем ниже процентное содержание углерода, тем ниже содержание водорода и ниже уровень напряжения. Сварка высокоуглеродистой (>0,30%) или ресульфурированной стали не рекомендуется. Сварка низкоуглеродистых сортов (<0,05%) возможна без предварительного нагрева или последующего нагрева, но необходима обработка для снятия напряжения/ отпуска. Когда это возможно, *аустенизация+упрочнение обеспечивает лучший компромисс между механическим сопротивлением/ пластичностью/ коррозионной стойкостью*, в том числе, для сортов, закаленных осаждением.

12.7. Сварка аустенитной нержавеющей стали

12.7.1. Введение

Аустенитные нержавеющей стали обладают замечательными свойствами, которые четко отличают их от всех других категорий стали. В связи с этим представляется полезным указать на определенное количество принципов, касающихся строения, структуры и использования этих сплавов, основных понятий для понимания явлений, происходящих во время сварочных работ.

Аустенитная структура и присутствие никеля улучшают коррозионную стойкость хромистых сталей, особенно в слегка окисляющих или восстанавливающих средах. Более того, аустенитные нержавеющей стали характеризуются следующими свойствами: повышенной вязкостью пластичностью и ударной прочностью, значительной прокаливаемостью без охрупчивания, в том числе при низкой температуре, отсутствием реального предела текучести, повышенной механической стойкостью при высокой температуре и уникальной свариваемостью.

12.7.2. Риски, возникающие при сварке

Семейство аустенитных нержавеющей сталей также чрезвычайно обширно, как показано на диаграмме Шеффлера-Бистрама (см.Рисунок 12.17).

Как видно из этой диаграммы, аустенитные нержавеющей стали, в зависимости от сорта, сталкиваются с двумя типами рисков:

- охрупчивание во время V-фазы наиболее легированных сталей; этот реальный при использовании риск остается очень ограниченным во время сварочных работ, причем скорости нагрева и охлаждения в целом слишком высоки для начала осадков;
- образование горячих трещин, которое представляет реальный риск при сварке и которое мы рассмотрим более подробно.

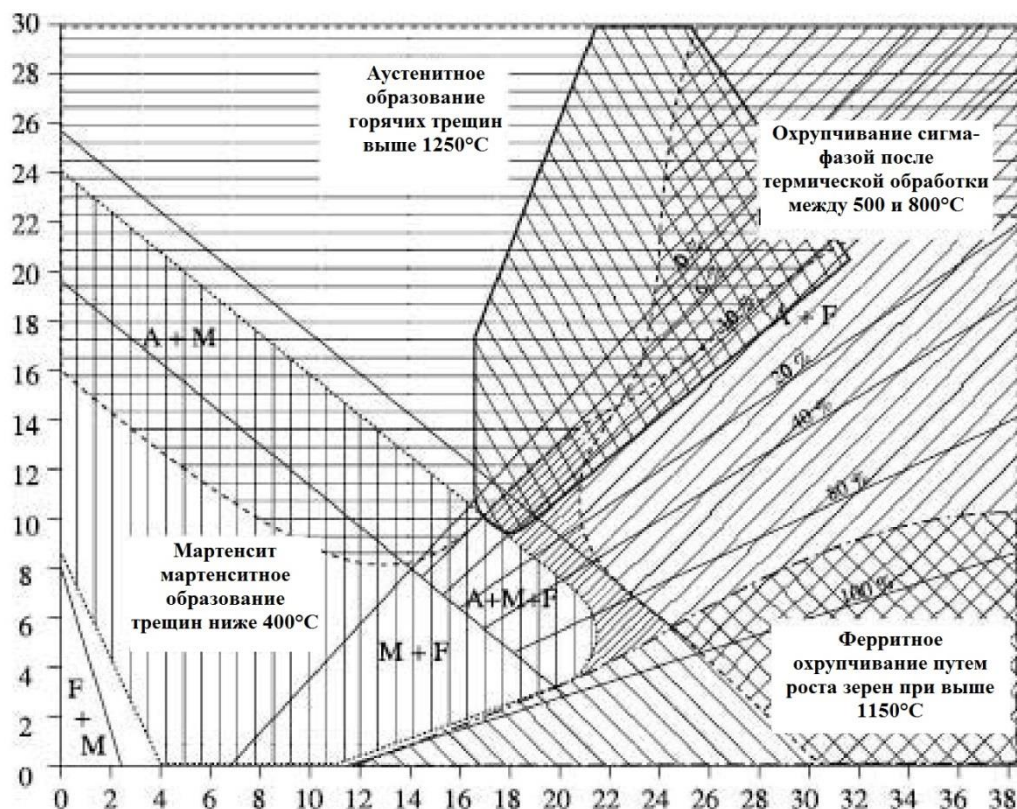


Рисунок 12.17. *Диаграмма Шеффнера-Бистрама аустенитно-ферритных нержавеющей сталей*

Другой риск, не описанный на этой диаграмме, заключается в присадке карбидов хрома (Cr_{23}C_6), что является синонимом риска межкристаллитной коррозии.

12.7.3. Выделение карбидов

Присутствие углерода в аустенитных нержавеющей сталях может быть причиной ухудшения их коррозионной стойкости, когда они подвергаются воздействию температур, которые поддерживаются в течение длительного периода времени в диапазоне от 500 до 850°C.

Для сортов со средним содержанием углерода (0,04% и более) вполне возможно переосаждение карбидов в зоне поражения.

В любом случае, производитель стали может уменьшить или исключить возможность таких осадков двумя способами: уменьшить процентное содержание углерода, снижающее количество углерода, которое может выпасть в осадок, и изменить скорость переосаждения (понижается диапазон температур, и очень незначительно увеличена продолжительность) или путем добавления элементов с более высоким сродством к углероду, чем хром; таким образом, добавленные элементы обычно представляют собой титан и ниобий. Переосаждение

карбидов Ti (TiC) и ниобия (NbC) происходит в диапазоне температур, превышающем тот, в котором осаждается $M_{23}C_6$, и, следовательно, захваченный углерод не может принимать участие в этом последнем осаждении.

12.7.4. Образование горячих трещин

Несмотря на частое использование термина «образование горячих трещин», оно не совсем подходит для описания множества явлений, охватываемых этим словом. Действительно, под этим обобщающим понятием мы находим трещины как в зоне термического воздействия, так и в зоне расплава металла, но также и в различных механизмах образования трещин.

Различные типы горячего растрескивания

Прежде всего следует отметить свойства горячего растрескивания. Такие трещины очень часто имеют небольшие размеры в зоне влияния или зоне расплава металла. Они часто довольно многочисленны, перпендикулярно линии сплавления (ЗТВ), параллельны направлению отверждения или оси сварочной ванны. Кроме того, они чаще всего встречаются в аустенитных сталях, где они являются практически единственным типом трещин, возникающих при сварке.

Два механизма могут вызвать растрескивание: разжижение и отсутствие пластичности материала.

Растрескивание вследствие разжижения объясняется наличием жидких фаз в межзеренной границе при высокой температуре (приблизительно 1250°C), когда металл уже твердый. Любое напряжение позволяет открыть жидкие пленки путем сдвига. Это может происходить при отверждении расплавленного металла (локальная задержка отверждения) или в зоне термического воздействия и расплавленном металле во время повторного нагрева (преждевременное плавление сегрегированных фаз), например, во время второго прохода.

Растрескивание ввиду отсутствия вязкости происходит при температурах ниже, чем предыдущая (примерно 1000°C). Прежде всего, это связано с осаждением определенных фаз (например, карбидов), которые снижают вязкость материала. Там также может происходить растрескивание в расплавленном металле во время затвердевания или в зоне термического воздействия и расплавленном металле во время нагревания при достаточной температуре во время цикла сварки (вторичная активация валика более поздним проходом).

ПРИМЕЧАНИЕ: очень часто трещины инициируются ликвацией и распространяются из-за недостаточной пластичности, а трещина ликвации является первоначальным дефектом, приводящим к последующему разрушению.

Механизм образования горячих трещин

Сварное соединение из аустенитной стали (включая MZ, зону термического влияния и предварительно подогретый валик) может находиться в центре растрескивания, вызванном воздействием усадки и развивающемся при высокой температуре (более 1200 ° C) в междендритных пространствах расплавленного металла или зоне термического влияния. Это вызвано локальным обогащением при текстурных соединениях элементов с низкими температурами плавления, образующих жидкую пленку с низким уровнем когезии. Наличие определенных элементов, таких как сера, фосфор и бор, способствуют такому растрескиванию.

Алгоритм обусловлен основным режимом затвердевания. Если первое затвердевание происходит в аустените (J-затвердевание слева от точки эвтектики), то будет рост *базальтового* типа с выровненными легкоплавкими фазами. Если первое затвердевание происходит в феррите (затвердевание G справа от точки эвтектики), рост будет дендритного типа с рассеянными легкоплавкими включениями и, следовательно, будет менее хрупким.

Положение эвтектики, которая разграничивает два режима затвердевания, определяется соотношением:

$$\frac{Cr \text{ эквивалент}}{Ni \text{ эквивалент}} = 1,5$$

согласно принципиальным схемам. Таким образом, легко предсказать восприимчивость аустенитных нержавеющей сталей к образованию горячих трещин.

Пути решения

Чтобы уменьшить или избежать риска образования горячих трещин в аустенитной нержавеющей стали, главным советом будет – ограничить кольцо с возможностью уменьшения воздействия насколько возможно, и выбрать исходный материал и/или наполнитель, который обеспечивает соотношение Cr_{eq}/Ni_{eq} более 1,5 в зоне расплава. Если это соотношение не может быть выполнено, необходимо отрегулировать условия сварки, ограничивая энергию сварки и обеспечивая очень эффективную защиту (не слишком много, и не слишком мало).

12.7.5. Сигма-фаза

Металлы сплавы, содержащие переходный элемент В (Fe, Ni, Mn, Co и т. д.) и переходный элемент А (Cr, Ti, V и т. д.), могут образовывать интерметаллические фазы, формула которых может варьироваться от B_4A до BA_4 .

V-фаза является наиболее известной среди интерметаллических соединений. За исключением многопроходной сварки значительной толщины, при сварке традиционных аустенитных нержавеющей сталей образование V-фазы встречается редко, поскольку этот процесс является относительно медленным, что не будет иметь место в случае сталей с высоким содержанием переходных элементов, таких как аустенитные стали с высоким содержанием хрома и молибдена. Этого риска можно избежать, уменьшая энергию сварки и ускоряя скорость охлаждения, чтобы сократить время, проведенное в термической зоне риска. Это применимо для зоны расплава и зоны влияния.

12.7.6. Присадочные продукты

Как правило, сварка нержавеющей сталей должна быть однородной, с присадочным металлом, близким по составу к основному материалу, при этом по возможности, с получением расплавленной зоны, свободной от риска горячего растрескивания.

В любом случае, присадочный металл должен быть избыточно легирован, по сравнению с основным металлом: чтобы компенсировать потери в процессе сварки и для других элементов хрома, это необходимо для улучшения коррозионной стойкости сварного соединения или его устойчивости к горячему растрескиванию, когда сварка должна оставаться чисто аустенитной. Присадочные материалы изделий стандартизованы.

12.7.7. Защитный газ

Все защитные газы на основе аргона могут использоваться без риска при сварке аустенитных нержавеющей сталей, включая:

- газы, легированные водородом для увеличения скорости сварки, поскольку содержание феррита G остается слабым ($d10\%$ в зоне расплава);
- газы, легированные азотом, поскольку растворимость азота в аустените высока;
- газы, используемые для сварки сталей, которые сами содержат азот.

Таблица 12.8. Защитные газы

	TIG	MIG
Защитный газ	Аргон (I 1)	Ar + O ₂ (M 13) Ar + CO ₂ (M 12)
Защитные газы	He (<20%) (L 3) H ₂ (<10%) (R 1) N ₂ (<10%)	He (<20%) He (<15%) M 11) N ₂ (<10%)
Основной газ	Ar (I 1) Ar + H ₂ (R 1)	Ar (I 1) Ar + H ₂ (R 1)

12.8. Сварка аустенитно-ферритной нержавеющей стали (дуплексный процесс)

12.8.1. Введение

Микроструктура основного металла с приблизительно 50% феррита и 50% аустенита в аустенитно-ферритной стали получается после поддержания температуры между 1050 и 1100°C с последующим отверждением, обычно в воде.

Так называемая *дуплексная* аустенитно-ферритная сталь имеет 22,5% Cr и PREN (число эквивалентных сопротивлений точечной коррозии), равное или превышающее 36. Ее гарантированный предел текучести выше 500 МПа.

Так называемая *супердуплексная* аустенитно-ферритная сталь имеет 25% Cr и PREN выше 40. Безусловный предел текучести выше 550 МПа. Высокие технические свойства стали, выплавленной дуплекс-процессом, позволяют абсолютное обжатие при проектировании оборудования.

Содержание молибдена и азота оптимизировано для получения наилучших свойств коррозионной стойкости, в том числе для самых толстых листов. Высокий уровень азота в аустенитно-ферритных сталях обеспечивает хорошую микроструктурную стабильность, особенно в зоне термического воздействия.

12.8.2. Риски, возникающие при сварке

Центровка сталей, выплавленных дуплекс-процессом, на диаграмме Шеффлера-Бистрама показывает, что основной риск, возникающий при сварке, заключается в осаждении интерметаллических фаз, в частности фазы 1.

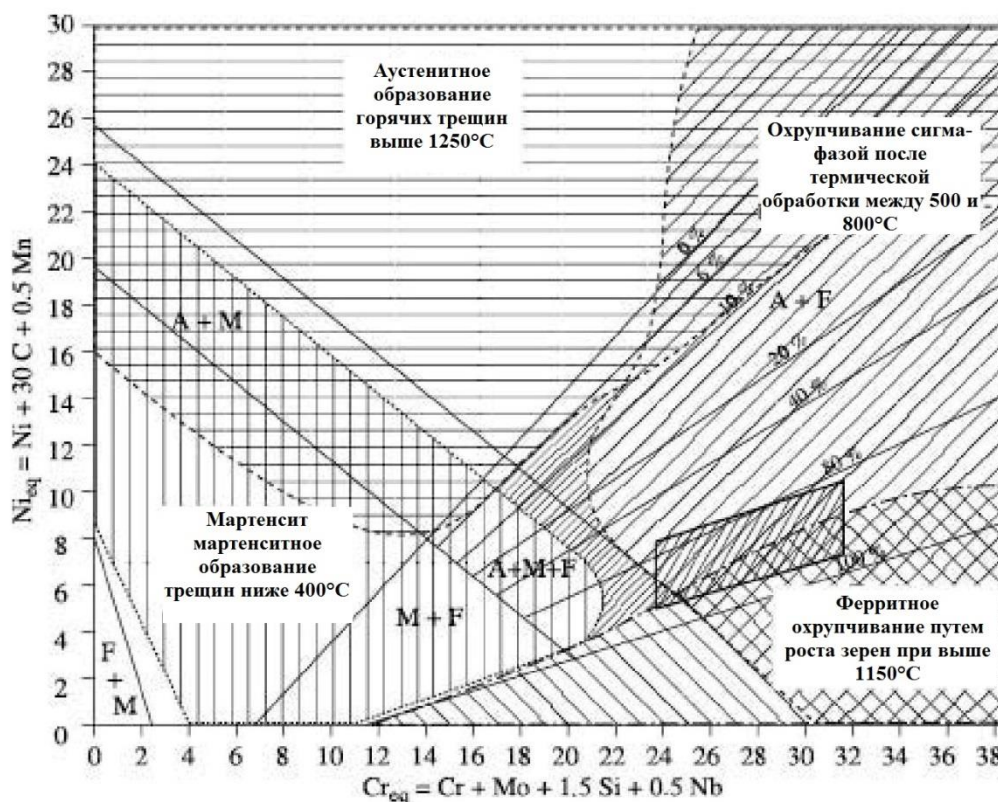


Рисунок 12.18. Схема аустенитно-ферритных нержавеющих сталей Шеффлера-Бистрама

12.8.3. Основные аустенитно-ферритные нержавеющие стали

Следующий неполный список взят из стандарта EN10 088-2.

Таблица 12.9. Основные аустенитно-ферритные нержавеющие стали

Назначение	N (%)	Другие
X2CrNiN23-4	0.05/0.20	Cu = 1%
X3CrNiMoN27-5-2	0.05/0.20	
X2CrNiMoN22-5-3	0.10/0.22	
X2CrNiMoCuN25-6-3	0.15/0.30	
X2CrNiMoN25-7-4	0.20/0.35	
		Cu = 0.7%
X2CrNiMoCuWN25-7-4	0.20/0.30	W = 0.7%

12.8.4. Свариваемость аустенитно-ферритных сталей

Стали, принятые во внимание в новом европейском стандарте, содержат приблизительно от 0,2 до 0,28% азота, низкий процент углерода (ниже или равный 0,05%) и количество Cr, Ni, Mo и, возможно, Cu и W, которые обеспечивают затвердевание феррита, затем частичное преобразование (приблизительно 50%) феррита δ в аустенит, если скорость охлаждения достаточно медленная, чтобы достичь фазового баланса (см.Рисунок 12.19).

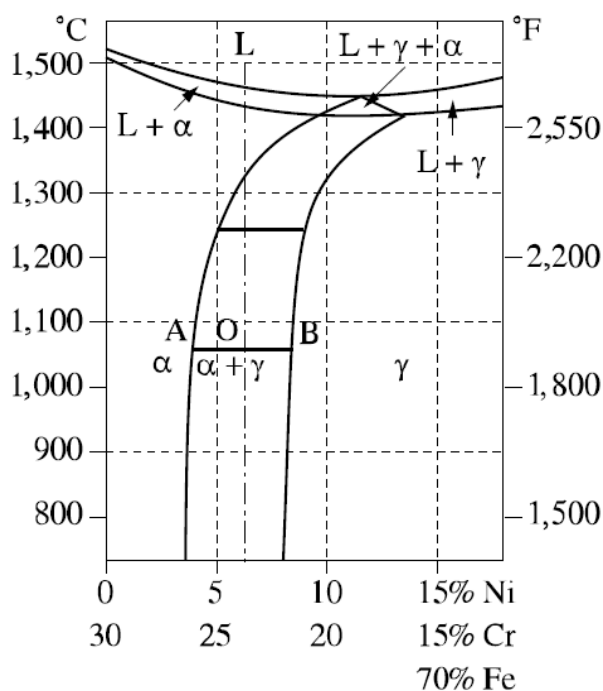


Рисунок 12.19. Диаграмма фаз

В сварном шве (где зона термического воздействия и зона расплава однородны), высокие скорости охлаждения препятствуют достижению баланса, а содержание феррита увеличивается с увеличением скорости охлаждения. При увеличении содержания азота этот эффект менее заметен, особенно, для супердуплексного сорта стали, где $N=0,25\%$. Поскольку свойства сварного шва зависят от соотношения фаз $G/\bar{U}$, важно уметь прогнозировать такую пропорцию. Среди доступных диаграмм диаграмма Шеффлера-Эспи кажется наиболее подходящей. Однако существуют более точные формулы, основанные на составе сварного шва и учитывающие скорость охлаждения.

Чтобы уменьшить содержание феррита, особенно в ЗТВ и МЗ без наполнителя, где состав не может быть отрегулирован, необходимо использовать высокие энергии сварки и, возможно, предварительно нагреть свариваемые продукты и ограничить скорость охлаждения.

Для этого необходимо учитывать степень чувствительности сорта стали к структурным изменениям феррита, которые могут происходить в двух температурных диапазонах, сосредоточенных примерно при 800°C (в частности, при образовании V-фазы) и 475°C (осаждение фазы D'-Cr и, возможно, H-Cu). С одной стороны, это ограничит скорость охлаждения (поле высокой температуры), а с другой стороны, температуру нагрева (поле низкой температуры).

12.8.5. Присадочные материалы

Что касается с присадочным материалом, он должен быть приспособлен для достижения, с одной стороны, идеальной двухфазной структуры в состоянии после сварки, а с другой стороны, с целью сопротивления коррозии в зоне сварного шва, сравнимой с кованым изделием. Первая цель достигается за счет увеличения содержания никеля в присадочном материале и, тем самым, увеличения концентрации гамма-гена в зоне расплава. Ni предпочтительнее, чем N, что снижает ударную вязкость при низкой температуре. Однако во время сварки часть азота имеет тенденцию испаряться, что приводит к образованию более альфа-генной композиции с меньшей коррозионной стойкостью (PREN). Для борьбы с этим

эффектом при сварке в среде защитного газа необходимо использовать газ, содержащий от 2 до 3% азота, поскольку этот элемент будет частично переноситься в присаженном металле.

При многопроходной сварке количество феррита в повторных проходах может быть значительно ниже 50%, а при повторном нагреве образуется значительное количество вторичного аустенита, который может быть менее стойким к коррозии, чем первичный аустенит. Однако этот эффект в значительной степени сводится к минимуму за счет увеличения содержания азота.

Коррозионная стойкость сварного соединения ниже, чем у основного металла с таким же составом. Поскольку эти стали особенно используются для их очень хорошего компромисса между механическим сопротивлением и коррозионной стойкостью в сильно коррозионных средах, важно, чтобы сварной шов не являлся слабым местом. При соблюдении этого условия становится возможным адаптировать состав присадочного материала, эквивалентный сорту стали, подлежащей сварке, путем незначительного увеличения Cr и Mo, что, с учетом вышеизложенного, приводит к оптимальному отложению добавленного металла. В средах, наиболее подверженных коррозии, предпочтительнее «переплавлять» сварной шов либо с использованием более легированного аустенитно-ферритного присадочного материала, либо с использованием присадочного материала на основе Ni с высоким содержанием Cr и Mo для сварки сверхдуплексных сталей.

12.8.6. Защитные газы

Комбинации проволока/флюс или проволока/газ, предлагаемые производителями продукции, не могут быть разобщены без риска серьезных проблем для свойств сварного шва, в то время как покрытые электроды и сварочные флюсы будут тщательно спекаться в соответствии с инструкциями производителей.

Защита от газов очень важна при плазменной, TIG- и MIG-сварке, или импульсной MIG-сварке дуплексных или супердуплексных сталей. Помимо защиты расплавленного металла от окисления, сварочный газ также должен предотвращать любые потери азота из расплавленного металла.

В настоящее время доступно множество комбинаций газов, включая бинарные газы Ar + N₂ для сварки TIG или плазмой, и тройной Ar + CO₂ + N₂ или четвертичный Ar + CO₂ + He + N₂ для MIG-сварки и импульсной MIG-сварки.

Сварочные газы с добавлением водорода не разрешены для сварки аустенитно-ферритной стали.

12.9. Неоднородная сварка

12.9.1. Указатель определений

Сварка называется *гомогенной*, когда два основных материала и присадочный материал имеют сопоставимый состав. Например: MIG-сварка двух сталей AISI 316 L (EN 1.4404) с присадкой 316 LSi (EN 12.072 - 19.12.3 L).

Сварка называется *автогенной*, когда два основных материала одинакового состава собираются без присадочного материала. Например: контактная сварка двух нержавеющей

сталей AISI 304 (EN 1.4301).

Сварка называется *гетерогенной*, когда, по крайней мере, один из трех материалов (основа или присадочный материал) отличается от других. Например: MIG-сварка между металлом AISI 409 (EN 1.4512) и металлом AISI 304 (EN 1.4301) с присадкой ER 308 LSi (EN 12.072 - 19.9 л).

12.9.2. Обработка и прогнозирование неоднородности сварных швов

Такая обработка осуществляется благодаря использованию диаграмм состояния. Механизм прост и представлен на Рисунке 12.20.

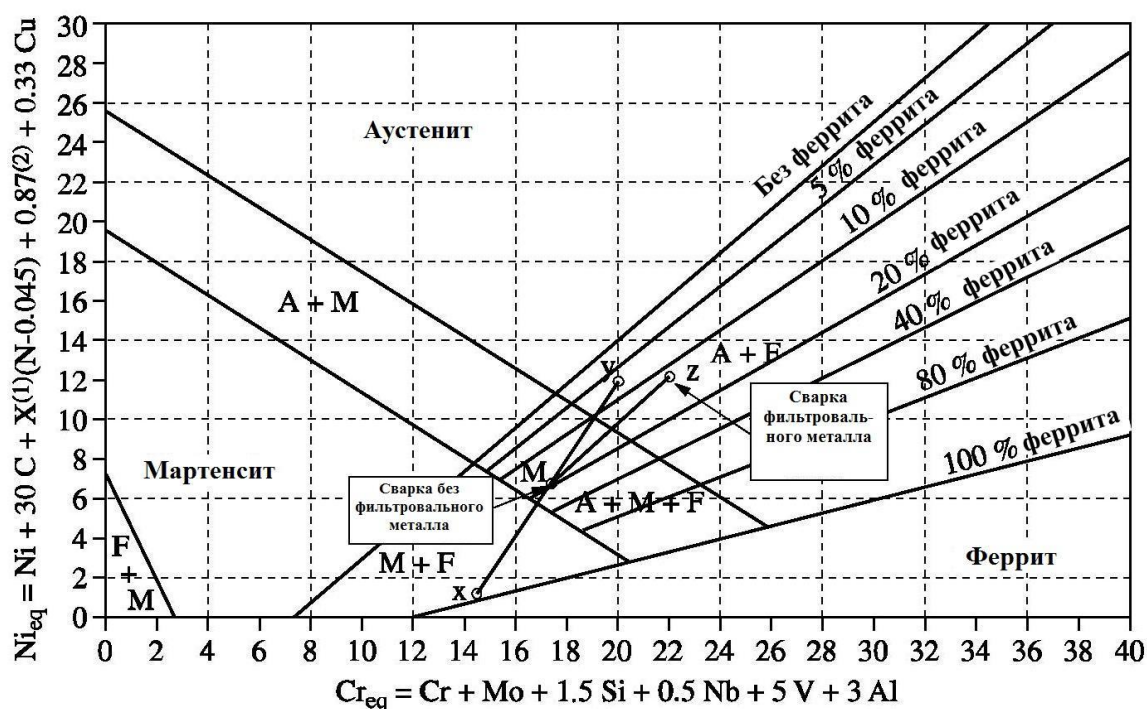


Рисунок 12.20. Схема распознавания

Когда два материала X и Y свариваются без присадочного материала, соответствующий анализ материалов позволяет определить их представляющие точки на диаграмме. Представляющая точка расплавленного металла расположена в центре тяжести двух элементов X и Y, а именно в середине линии XY, если два материала расплавлены в равных количествах (точка M).

В случае MIG-сварки двух материалов X и Y с помощью и присадочного материала Z, исследования позволяют определить позиции X, Y и Z на диаграмме: представляющая точка смешения XY, такая же, как предыдущая (точка M), а представляющая точка смешения XYZ находится в центре тяжести точек M и Z, с учетом 25% -ного разжижения в этом примере (точка B).

Можно было бы выполнить расчет с использованием взвешенного содержания каждого элемента в расплавленном металле, но это, как правило, дольше и, кроме того, менее заметно.

Введение диаграммы Бистрама позволяет, при расположении представляющей точки зоны

расплава, прогнозировать, возможна ли рискованная или нежелательная сварка без присадочного материала; необходим ли присадочный материал; и, в этом случае, какой присадочный материал лучше всего приспособлен для получения зоны без риска для зона расплава.

12.10. Отделка сварных швов

Отделка касается очистки валиков после процедуры сварки. Действительно, коррозионная стойкость сварных соединений из нержавеющей стали может сильно зависеть от качества их поверхности. В любом случае, чем лучше защита в процессе сварки (защита по обеим сторонам, использование достаточно длинных тренировочных щитов и т. д.), тем будет легче такая чистка. Очистка сварных соединений нержавеющей сталей может выполняться различными способами (как описано в технологии стандарта EN 1011-3: 1997, классификационный индекс 89-101-3), применяемыми отдельно или вместе.

Для зачистки рекомендуется использовать специальные щетки из проволоки из нержавеющей стали или другого совместимого материала. Обычно этот метод не подходит для удаления очень прилипших примесей. Рекомендуется уделять особое внимание использованию вращающихся щеток, поскольку они могут деформировать поверхность и вызывать микрокрезы, что приведет к снижению коррозионной стойкости. Иногда необходимо проводить зачистку с химической чисткой.

Продукты дробеструйной или пескоструйной обработки не должны быть загрязнены железом или нелегированной сталью. Этот метод используется для устранения прилипших примесей, а также для создания остаточных напряжений сжатия на поверхности деталей. Среди продуктов, рекомендованных для дробеструйной обработки, - стекло и нержавеющая сталь.

Для шлифования рекомендуется использовать специальные диски, ленты или точильные камни, не содержащие железа. Рекомендуется избегать чрезмерного шлифования, которое повреждает поверхность и разжижает основной металл. Этот метод также используется для устранения подавляющего большинства поверхностных загрязняющих веществ и для обеспечения регулярного перехода между сваркой и основным металлом. После измельчения можно проводить легкую химическую чистку.

Зачистка полос устраняет поверхностные оксиды или поверхностные слои с помощью химической реакции. Используется кислотная среда, состав которой зависит от типа стали, температуры и продолжительности очистки. Необходимо тщательно удалить все чистящие средства после процедуры.

Указанные выше процедуры по очистке сварного шва, механические или химические, не только удаляют оксиды, но также и пассивный слой нержавеющей стали. Чтобы ускорить восстановление пассивного слоя, рекомендуется проводить пассивирование после химической или механической очистки.

Вообще электролитическая полировка применяется к нестабилизированным сталям с целью получения гладкой поверхности и, тем самым, оптимальной коррозионной стойкости.

Для достижения оптимальной коррозионной стойкости наиболее эффективными являются химическая чистка и электролитическая полировка.

Наконец, несмотря на то что речь не идет об операции чистовой обработки как таковой, рекомендуется проводить операцию дезактивации, особенно в мастерских, не предназначенных исключительно для обработки нержавеющей стали. Целью этой дезактивации, аналогичной пассивированию в процессе, является предотвращение попадания на поверхность детали каких-либо следов посторонних веществ, особенно железистых частиц.

12.11. Глоссарий

Аустенитная нержавеющая сталь: нержавеющая сталь, структура которой является аустенитной во всех температурных диапазонах. Аустенитные нержавеющие стали относятся к типу железо-хром-никель (молибден).

Аустенитно-ферритная нержавеющая сталь: нержавеющая сталь, структура которой при комнатной температуре состоит приблизительно из 50% аустенита и 50% феррита. Аустенитно-ферритные нержавеющие стали также называют «дуплексом».

Ферритная нержавеющая сталь: нержавеющая сталь, чья структура большей частью или крайне ферритная во всех температурных диапазонах. Ферритные нержавеющие стали относятся к типу железо-хром (молибден).

Мартенситная нержавеющая сталь: нержавеющая сталь с аустенитной структурой при высокой температуре, подверженная фазовым превращениям при охлаждении:

- аустенит: мартенсит при процедуре закалкой,
- аустенит: феррит + карбиды при медленном охлаждении.

Хромовый эквивалент Cr_{eq}: вычисленное значение, при котором все элементы альфа-гена преобразованы с помощью коэффициентов в форме хрома.

Обезжиривание: чистка - это химическая обработка поверхности сталей, которая позволяет удалять оксиды, которые образуются на поверхности металла.

Очистка: химическая процедура, которая растворяет частицы нержавеющей металла, в основном, железные, осажденные на поверхности металла во время холодного превращения или завершения - чистовой обработки металла.

Разбавление: количество основного металла, переплавленного во время сварки, возвращенного в общий объем сварочной ванны.

Элемент альфа-гена: элемент, поддерживающий образование и стабилизацию структуры железа. Основными элементами альфа-гена являются Cr, Mo, Si, Al, Ti, Nb, V.

Элемент гамма-гена: элемент, поддерживающий образование и стабилизацию аустенитной структуры. Основными элементами гамма-гена являются Ni, C, N, Cu.

Никелевый эквивалент Ni_{eq}: расчетное значение, при котором все элементы гамма-гена переводятся в форме никеля с помощью коэффициентов.

Пассивирование: химическая обработка поверхности металла, позволяющая удалить из него загрязняющие элементы, которые могут там осесть, и ускорить образование пассивного слоя.

Проект европейского стандарта (PREN): эквивалентный показатель устойчивости к точечной коррозии, коэффициент коррозионной стойкости при разрыве.

γ аустенитная структура: аустенит представляет собой гранцентрированную кубическую структуру, которая в размягченном состоянии обладает следующими свойствами

- мягкий, но в высшей степени упрочняемый,
- очень податливый и поддающийся обработке,

- немагнитная.

α ферритная структура: феррит представляет собой объемно-центрированную кубическую структуру, которая в размягченном состоянии обладает следующими свойствами:

- мягкий, но не очень упрочняемый,
- податливый и достаточно поддающийся обработке,
- магнитный.

α' мартенситная структура: мартенсит представляет собой объемно-центрированную кубическую структуру, деформированную и упрочненную присутствием элементов при перенасыщении. Он обладает следующими свойствами:

- твердый и хрупкий,
- нековкий и не поддающийся обработке,
- магнитный.

ЗТВ: зона термического влияния.

MZ: зона расплава.

12.12. Список использованной литературы

[CAS 68] CASTRO R., DE CADENET J.J., *Métallurgie du soudage des aciers inoxydables et résistant à chaud*, Dunod, Париж, 1968.

[COZ 98] COZAR R., MOIRON J.L., *Ecole Inox Ugine S.A.*, презентация 1998.

[MOI 96] MOIRON J.L., BONNEFOIS B., *Soudabilité des aciers inoxydables*, Institut de Soudure 1996.

[MOI 00] MOIRON J.L., BONNEFOIS D., CUNAT P.J., *Souder les aciers inoxydables*, OTUA 2000.

Сварка алюминиевых сплавов

13.1. Металлургия сварки

13.1.1. Свариваемость алюминиевых сплавов (сравнение сталей/алюминия)

Свариваемость алюминиевых сплавов, в отличие от углеродистых сталей, не связана с проблемой фаз превращения, как у углеродистых сталей, которые, в сочетании с растворенным водородом и механическими ограничениями, могут привести к хрупкости сварного шва. Их критерии свариваемости¹, как и аустенитные нержавеющие стали, зависят от подверженности горячему растрескиванию (растрескиванию при затвердевании). Совместимость металлов, подлежащих сварке, и выбор присадочного металла также являются важными моментами, поскольку они могут привести к недостаточной пластичности шва.

Помимо этого, водород не оказывает такого же влияния на алюминиевые сплавы, как на углеродистые стали (холодное растрескивание). Что касается алюминиевых сплавов, это приводит к образованию газообразных пористостей из-за большой разницы в растворимости между жидкостью и твердым веществом (0,036 против 0,69 см³/100 г при температуре плавления 660°C). Этот газ практически исключается при производстве заготовок, но иногда он присутствует в отливках может производиться во время сварки (см. Раздел 13.3.1).

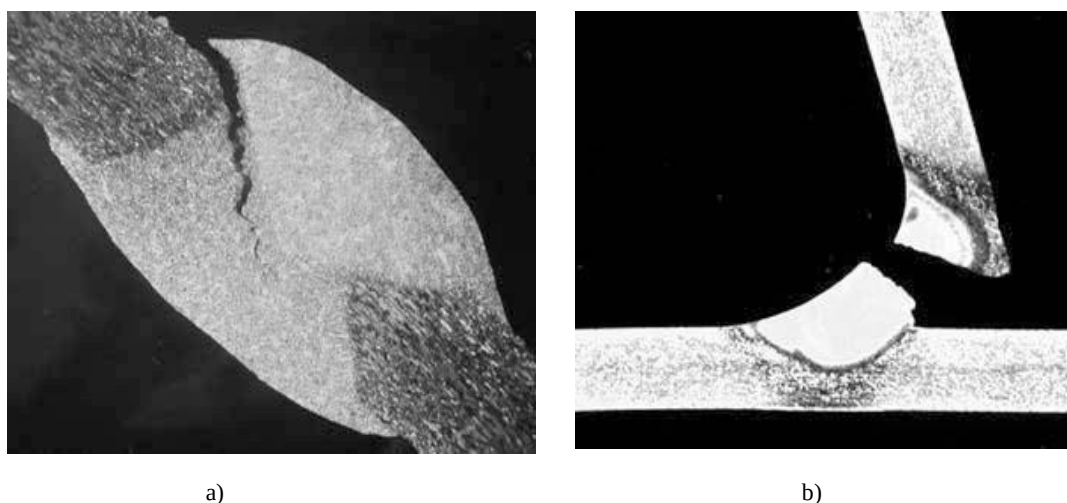


Рисунок 13.1. а) Образование горячих трещин: 2024 присадочный материал 5356 (TIG-сварка); Хрупкость зоны расплава: 5083 присадочный материал 4043A (TIG-сварка)

Глава написана Michel COURBIÈRE.

¹ Классификация свариваемых сплавов [FD 96] и их металлургия относятся к обычным процессам дуговой сварки.

Компоненты, отлитые под давлением, не поддаются сварке, поскольку растворенный в процессе их производства газ удаляется во время сварки.

По сути, нормы расчета и стандарты рекомендуют параметры использования и, в частности, составляют список сплавов, которые поддаются сварке или не поддаются дуговой сварке, что не обязательно означает, что они работают одинаково с разными методами (сопротивление, электронно-лучевая сварка, и др.).

Как правило, металлургическое состояние не влияет на свариваемость алюминиевых сплавов. Таким образом, можно сваривать сплав независимо от рабочего состояния (Н1х и Н2х) или термического состояния. С другой стороны, свойства полученной конструкции зависят от свариваемого металла и этого состояния. Действительно, в случае алюминиевых сплавов нагрев материала дугой или расплавленным металлом в большинстве случаев приводит к размягчению основного металла (см. Раздел 13.6), в отличие от углеродистых сталей, которые имеют тенденцию к отверждению. Эта зона термического влияния (ЗТВ) не видна при микроскопическом или микроскопическом наблюдении; его степень зависит от процесса сварки.

При чрезмерном нагреве металла обработанные упрочненные сплавы (серии 1000, 3000, 5000) в Н-состояниях (деформированные и восстановленные) теряют свои свойства, что влечет за собой частичную рекристаллизацию зоны термического воздействия, за исключением О-состояний (отожженных), и Н111, что соответствует отожженному состоянию, подвергнутому последующему проглаживанию. Прочность соединения равна прочности основного металла в отожженном состоянии независимо от исходного состояния: отожженного или закаленного (см. Раздел 13.5.1).

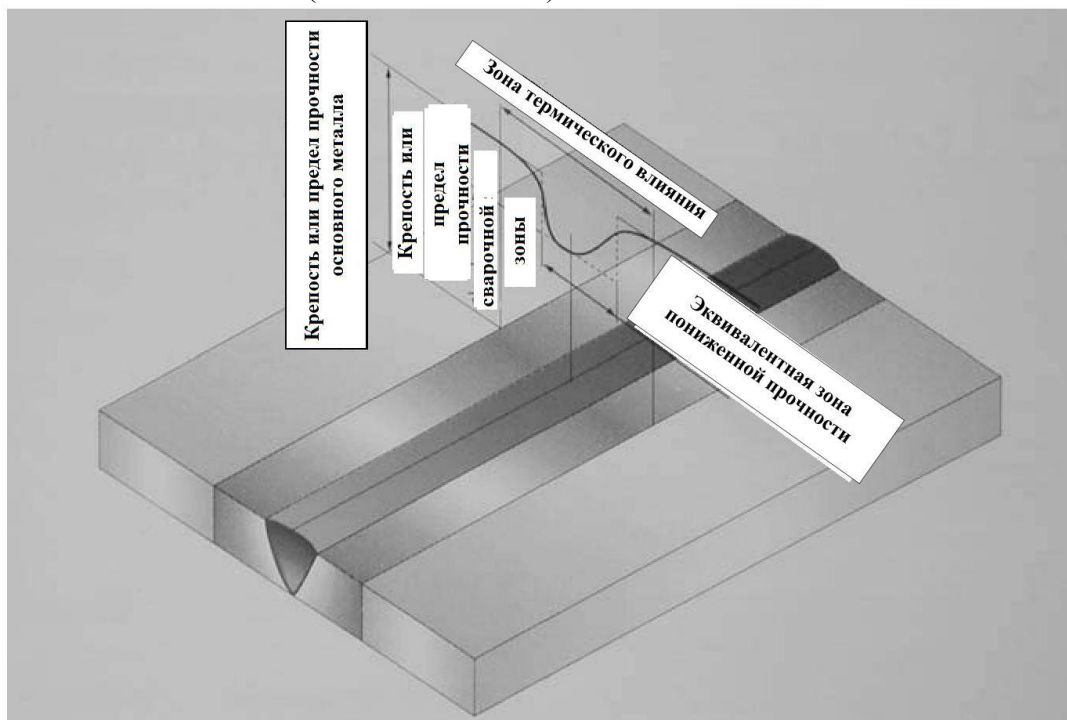


Рисунок 13.2. *Изменение механических свойств в ЗТВ*

Упрочненные конструкционные сплавы (серии 6000, 40000), обычно используемые либо в закаленном и искусственно состаренном состоянии (Т5, Т6), либо реже в закаленном и естественно состаренном состоянии (Т1, Т4), подвергаются сложной обработке. Прочность

соединения равна промежуточному значению между таковым у термически обработанного основного металла и прочности закаленного, естественно состаренного металла. Литые и термически обрабатываемые сплавы Al-Si-Mg, такие как 42100 (Al-Si7Mg03) в состоянии T6, следуют тем же правилам. Свариваемые сплавов серии 7000, поставляемых в состоянии T4, имеют эффект восстановления своих первоначальных свойств после периода созревания, продолжающегося несколько недель после сварки.

Потеря механических свойств после сварки необратима для сплавов, подвергнутых термической обработке, но отожженную зону можно частично регенерировать с помощью термообрабатываемых сплавов². Если полная термообработка (отверждение в растворе, закалка и отпуск) невозможна на больших деформируемых конструкциях, иногда возможна отпуск термообработки после сварки. Очень интересно, когда практикуется сварка между закалкой и отпуском сплавов серий 6000, 7000 и отливок серии 40000. В случае процесса после сварки необходимо соблюдать осторожность, чтобы использовать присадочный материал, подверженный отверждению (см. Раздел 13.2.2).

В отличие от углеродистых сталей (но, как у некоторых нержавеющей сталей), все алюминиевые сплавы, но в особенности сплавы серии 6000 и 7000, чувствительны к энергии сварки. Необходимо уменьшить ее, насколько это возможно, чтобы минимизировать переплавление межзеренных фаз (явление чрезмерного обжига). Это явление, называемое ликвацией и связанное с усадочными напряжениями, может привести к образованию микроскопических трещин в зоне термического воздействия. Сварка с контролируемой энергией в меньшей степени уменьшает рекристаллизацию сплавов серии 1000, 3000 и 5000. Чрезмерная высота дуги способствует возникновению этих дефектов и ухудшает механические свойства сварного шва.

Что касается температуры сварки (температура между проходами, предварительный нагрев), нужно стараться не превышать 80°C для термообрабатываемых сплавов и 120°C для деформируемых сплавов. Процессы снятия механических напряжений, использующие нагрев, редко используются с алюминиевыми сплавами, потому что необходимо достичь температур и времен, соответствующих размягчению большинства сплавов (250°C в течение 12 часов). В отдельных случаях температуры в диапазоне от 100 до 200°C влияют на их свойства при эксплуатации (механические характеристики серии 6000 и 7000, коррозионные характеристики серии 5000 и т. д.).

13.1.2. Сварочные металлы

Хотя большинство сплавов можно сваривать без присадочного металла, на самом деле, всегда требуется наличие достаточного сварного сечения, чтобы можно было заполнить усадки, провалы и зазоры и предотвратить образование горячих трещин.

Кроме того, присадочная проволока является неотъемлемой частью процесса MIG-сварки.

² Проблема экономическая, из-за размеров конструкций, которые в большинстве случаев делают сварку невозможной

Как правило, сварка всех алюминиевых сплавов возможна с помощью присадочного

материала Al-Si и, особенно, 4043A. Действительно, поскольку максимальная чувствительность к горячему растрескиванию находится в диапазоне от 0,5 до 1% кремния, риски исключаются за счет коэффициентов разбавления³, обычно получаемых при сварке.

Это преимущество сочетается с низкой усадкой при затвердевании, которая ограничивает напряжения в валике и уменьшает деформации. Однако, если он служит «универсальным» сплавом, то он не является лучшим выбором в следующих случаях:

- для сплавов серии 1000, для которых требуется хорошая коррозионная стойкость или оптимальная электропроводность, и, следовательно, требуется присадочный материал со сходными качествами (в порядке убывания чистоты: 1080A, 1050A, 1100);
- для сварки сплавов серии 5000 с более, чем 2% магния, где используются исключительно магниевые сплавы (в порядке возрастания % Mg 5154, 5554, 5754, 5654, 5087, 5183, 5356, 5056, 5556A);
- при использовании сплавов 6000 и 7000, когда требуется хорошая статическая прочность, особенно когда слабым местом является зона расплава, а не зона термического воздействия (см. Раздел 13.5.1), предпочтительным является использование 5356 или 5183;
- в случае, когда требуется равномерный цвет, после анодирования между валиком и основным металлом, по возможности, используется композитный присадочный материал (1000, 3000, 5000).

Наконец, сертифицированными организациями налагаются требования по конкретному применению некоторых проволок (например, серии 5183 для сварки морских пластинчатых сплавов 5083).

Сплавы серии 4043A, даже сплавы с более высоким содержанием кремния (4045, 4047A), являются основными присадочными материалами для сварки и заварки литья.

Другие сорта присадочного материала⁴ используются при очень специфических сварках:

- 3103 для получения однородного цвета при анодировании 3000 сплавов;
- Серия 2319 для сварки свариваемых сплавов серии 2000, в частности серия 2219;
- Серии 4009 и 4145 для сварки серии 2000 и повторной заливки отливок серий 45xxx и 46xxx;
- Серии 5180 со свариваемыми сплавами серии 7000, в частности со сплавами серии 7020 значительной толщины и/или если проводится последующая обработка;
- 4010 и 4643 с серией 6000 и для отливок семейства 42xxx и 43xxx в случае последующей термической обработки в целях повышения механических свойств.

Присадочный металл, рекомендованный в различных сочетаниях сплавов для TIG- и MIG-сварки, приведен в таблице 13.1 [стандарт EN 99]. В каждом поле на пересечении линий и столбцов, соответствующих основным материалам, указан лучший присадочный металл. Он выбирается в соответствии с тремя критериями:

³ Коэффициент разбавления определяется как объем присадочного металла, нанесенного на общий объем зоны расплава (MZ).

⁴ Изделия из магниевого присадочного материала делятся на две категории: сплавы с содержанием магния более 3,5% и сплавы с содержанием магния менее 3,5%.

Таблица 13.1. Совместимость сплавов и выбор присадочных металлов

AlSiCu 5) 6)	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
AlCu³⁾	NR	NR	NR	NR	NR	4	4	4	4	4	2
						4	4	4	4	4	2
						4	4	4	4	4	4
Основной металл В	Al	Al Mn	AlMg Mg ≤ 1.5%	AlMg 1.5 ≤ Mg ≤ 3.5%	AlMg Mg > 3.5%	Al MgSi	AlZn Mg	AlSi Cu Cu ≤ 1%	AlSi Mg ⁵⁾	AlSi Cu ^{5) 6)}	AlCu ³⁾
CR TR 15608	21	22.1	22.2	22.3	22.4	23.1	23.2	24.1	24.2	25	26
EN573-3 & EN 1706	1000	3000	5000	5000 или 51000	5000 или 51000	6000	7000 или 7000 0	44000 или 47000	42000 или 43000 или 44000	45000 или 46000 или 48000	2000 или 20000

Примечание: когда основной металл, содержащий более приблизительно 2% Mg, сварен с присадочным материалом 4000 (или когда основной металл, содержащий более 2% кремния, сварен с присадочным материалом 5000), в нем может образоваться достаточное количество Mg₂S в зоне расплавленной, чтобы ослабить его. Эти сочетания не рекомендуются для конструкций, подверженных ударам или усталостному напряжению.

1) Когда они сварены автогенно (без присадочного материала или того же состава присадочного материала, что и основной металл), эти сплавы чувствительны к горячему растрескиванию. Этой проблемы можно избежать, увеличив содержание магния в сварочной ванне до 3% или с помощью компрессионного крепления.

2) В определенных условиях использования (использование при температуре > 65°C и в агрессивной среде) сплавы, содержащие более 3% магния, могут подвергаться межкристаллитной коррозии и/или напряжению. Восприимчивость увеличивается с процентным содержанием Mg и/или закалкой. Разбавление присадочного материала в зоне расплава должно учитывать это.

3) Эти сплавы не следует сваривать без присадки, поскольку они подвержены горячему растрескиванию.

4) Может появиться межкристаллитная коррозия и/или коррозия под напряжением деформируемых сплавов серии 5000 (использование при температуре > 65 ° C и в агрессивной среде), когда содержание магния превышает приблизительно 3%. В случае использования в такой среде содержание Mg в расплавленной зоне не должно превышать содержание основного металла. Предпочтительно использовать состав присадочный материал, аналогичный составу основного металла.

5) Кремниевый состав присадочного материала должен быть как можно ближе к основному материалу.

6) Когда эти сплавы отливаются под давлением, они не поддаются сварке из-за газа, содержащегося в металле.

- максимальные механические свойства зоны расплава (верхняя линия);
- коррозионная прочность (средняя линия). Что касается коррозии, то лучшая однородность цвета после анодирования достигается с использованием присадочной проволоки, ближайшей к свариваемому металлу. При сварке сплавов серии 6000 не следует использовать присадочные материалы серии 4xxx, которые дают тускло-серый цвет;
- эксплуатационная свариваемость (нижняя граница), включая образование горячих трещин и смачивание. Это свойство вызывает форму валика, благоприятную для усталостной прочности.

Выбор металла часто является компромиссом между этими соображениями. Обычно сварка не вызывает проблем коррозионной активности с подходящим присадочным материалом⁵.

Тем не менее, следует отметить случай деформируемости сварных сплавов 7000, так как они имеют плохую коррозионную стойкость в закаленном природно затвердевшем состоянии Т4 (отшелушивающая коррозия). По этой причине зона термического воздействия этих сплавов (в состоянии Т6 и Т4) должны быть защищены. Последующий отпуск значительно улучшает проблему.

13.2. Способы сварки

13.2.1. Введение

Способы сварки алюминиевых сплавов многочисленны, большинство из них в большей или меньшей степени связаны с другими металлами, особенно, со сталью (контактная сварка, дуговая сварка и т. д.). Однако их физические, физико-химические и механические свойства обусловили необходимость адаптации существующих процессов, а также позволили разработать новые методы сварки. Таким образом, наличие очень стабильного оксида, высокая электрическая и удельная теплопроводность исключали сварку с использованием стержней с покрытием; слабые свойства при нагревании привели к развитию сварки трением с перемешиванием (см. раздел 13.2.5).

Мы приведем здесь самые современные методы, не вдаваясь в подробности о принципах, но указав адаптацию и характеристики алюминиевых сплавов. Выбор метода зависит от многих критериев, таких как форма деталей, толщина свариваемых изделий, требуемая производительность, уровень качества сварного шва, капитальные вложения, степень автоматизации и т.д. Этого достаточно для справочной информации, зная, что сравнение не всегда возможно.

13.2.2. Способ дуговой сварки (TIG и MIG)

Два процесса дуговой сварки, TIG-сварка (*с вольфрамовым инертным газом*) и MIG-сварка (*с металлическим инертным газом*), используются со сварными алюминиевыми сплавами. В них используется плазма для передачи тепла, полученного ионизацией инертного газа (аргон, гелий или их смеси) при прохождении электрического тока между свариваемой деталью и электродом, который может быть огнеупорным (TIG-сварка) или образованным с помощью присадочного материала (MIG-сварка). Газ также используется для защиты плавленого металла от окисления.

⁵ Алюминиевые сплавы, которые считают не поддающимися дуговой сварке, как правило, не обладают хорошими антикоррозионными свойствами.

Теоретически, аргон используется потому, что он обеспечивает лучшую защиту (более высокая плотность, чем у воздуха), хотя плазменная дуга легче генерируется (более низкая

энергия ионизации) и дешевле. Гелий обычно используется для получения большего проплавления (лучшей теплопередачи) при MIG-сварке и непрерывной или импульсной TIG-сварке. Использование смеси также может быть полезным, но с долей He, равной, по меньшей мере, 50%. Добавление других газов (N_2 , O_2) никогда не показывало существенных преимуществ.

Критерии выбора процесса основаны, в основном, на производительности (автоматизация, скорость сварки), толщине собираемых изделий и требуемом качестве сварки.

MIG-сварка, включающая подачу присадочного металла, включает в себя только одну горелку, в результате чего он легко автоматизируется и *тем более* способен к роботизации. Процесс TIG-сварки, с другой стороны, часто остается ручным процессом, поскольку автоматически необходимо отдельно управлять подачей проволоки в сварочную ванну, что является деликатной операцией, особенно в ее начале. Следовательно, такой процесс не может быть легко роботизирован с присадочным материалом. В ручном режиме степень вмешательства в процессе TIG-сварки является полной, тогда как при MIG-сварке все регулировки должны выполняться на испытательных образцах.

Следует отметить, что MIG-сварка, процесс с более высокой энергией, чем при TIG-сварке, включает в себя более локальный нагрев, поэтому деформации, создаваемые при сварке, меньше. Эти два метода позволяют получить сварные швы практически одинаковых механических характеристик. Однако на конструкционных упрочняющих сплавах MIG производит сварные швы, которые в целом являются более жесткими (см. Раздел 13.5). С точки зрения его использования, процесс TIG требует, по сравнению с MIG, более тщательной подготовки поверхности. С другой стороны, это придает лучшее качество валикам. При MIG-сварке это качество (проплавление, форма валика и т. д.). Часто зависит от подготовки кромки свариваемых изделий.

Сварка всегда выполняется путем «проталкивания» горелки в сторону зоны сварки; он наклонен примерно на 80° к поверхности детали в направлении смещения, чтобы обеспечить лучшую газовую защиту.

Сварка преимущественно плоскостная и находится в полуподнятом положении, хотя сварка карнизов и потолочная сварка не представляют особой проблемы. С другой стороны, следует избегать нисходящего сварочного положения, чтобы не сваривать ванну с расплавленным металлом (частая причина отсутствия проникновения).

При помощи MIG-сварки, для удаления риска проплавления и обеспечения полного проникновения настоятельно рекомендуется сварка встык на опорной планке. Планки могут быть встроены с хорошим эффектом прямо на этапе проектирования заготовок и профилей (см. Рис. 13.21). Защита в обратном направлении не требуется, в отличие от нержавеющей сталей.

Следует позаботиться об обеспечении хорошего электрического контакта зажима заземления; неспособность его выполнения часто является причиной плохого начала сварки или ухудшения стабильности дуги из-за присутствия глинозема на поверхности деталей (см. раздел 13.3.1).

13.2.2.1. Переменный ток при TIG-сварке

Электрическая дуга образуется между вольфрамовым тугоплавким электродом и свариваемой деталью. В отличие от нержавеющей сталей, используется переменный ток. Во время отрицательной фазы на детали происходит промывание слоя оксида алюминия, присутствующего на поверхности алюминия, и проникновение во время положительной фазы на электроде. По этой причине конец электрода закруглен. Диаметр электрода находится в прямой зависимости от сварочного тока: от 35 до 50 А/мм толщины, подлежащей сварке. Как правило, рекомендуется диаметр, равный этой толщине.

Источники теперь имеют рубленый вид и позволяют уменьшить эффект чистки, сдвигая полярность в сторону положительного на электроде. Присадочный материал вводится в сварочную ванну расплавленного металла в виде стержня (ручная сварка) или проволоки (автоматическая сварка). Так как энергия сварки не зависит от присадочного материала, процесс очень гибкий, что позволяет выполнять сварку вручную со значительными зазорами (в несколько раз больше толщины для изделий до 3 мм) и хорошо приспособлено для ремонта.

Как правило, это ручной процесс, часто используемый для производства отдельных деталей и требующий большой ловкости. Он используется во всех случаях, когда требуется высокое качество, в частности, для выполнения водонепроницаемых сварных швов. Скорость сварки контролируется оператором, который может контролировать энергию и количество присадочного материала, контролируя расплавленную сварочную ванну.

Толщина свариваемых изделий составляет от десятых долей мм, а на практике ограничивается 5 или 6 мм. Кроме того, существует трудность плавления металла, в то время как искажения из-за перегрева становятся значительными. Для толстых материалов используется процесс с постоянным (или импульсным) током, но чаще выбор падает на сварочный процесс MIG.

13.2.2.2. Постоянный и импульсный ток TIG-сварки

Процесс TIG-сварки также используется с непрерывным или импульсным постоянным током. В процессе используется гелий исключительно в качестве защитного газа, но активация дуги осуществляется с помощью аргона, который легче ионизируется. Ток является постоянным, то есть осуществляется электронным переносом от катода (электрода) к детали. В этом случае на оксидное покрытие не наносится чистящая фаза (и не происходит эрозии электрода). С другой стороны, ток легко регулируется, что позволяет сваривать изделия толщиной от 0,01 до 10 мм. Огнеупорный электрод изготовлен из частицы вольфрамосодержащего оксида (обычно 2% ThO₂, но также 2% CeO₂ или 5% (ZrO₂) для поддержания угла шлифования⁶. Затачивают под углом от 15 ° до 120 ° в соответствии с толщиной детали для направления эмиссии электронов. Поскольку высота дуги мала (около десятых долей миллиметра), этот процесс используется исключительно для автоматической сварки. Однако следует отметить его использование при ремонте деталей большой толщины (отливки, пресс-формы для пластмассовой промышленности и т. д.).

В альтернативном процессе используется импульсный ток (частотой в несколько Гц), который дает преимущество лучшего контроля теплопередачи, таким образом, лучший контроль глубины проникновения и ширины валика. Этот импульсный режим приводит к горячим фазам и холодным фазам, что вызывает слоистое отверждение, которое очищает структуру и уменьшает сегрегацию.

13.2.2.3. Газ, инертный к металлу

MIG - это процесс, полученный из MAG (*металлический активный газ*) и применяемый к сталям, которые используют присадочную проволоку (обычно 1,2, а также 1,6 и 2,5 мм для толстых продуктов) в качестве расходного электрода и нейтральный газ (обычно аргон) для образования плазмы. Последнее поддерживается путем контроля высоты дуги, которая зависит от скорости подачи проволоки и сварочного напряжения. Электрический контакт провода в горелке обеспечивается через медную контактную трубку. Низкая жесткость присадочной проволоки обуславливает необходимость использования катушек с соответствующими приводными роликами, которые проталкивают проволоку к горелке через оболочку из ПТФЭ и, таким образом, облегчают разматывание (существует риск заклинивания со стальной оболочкой). Горелка может быть оснащена системой тяги (двухтактной системой), которая позволяет лучше регулировать скорость подачи проволоки и высоту дуги, также избегать явления выгибания проволоки при запуске. Его использование необходимо при роботизированной сварке.

Процесс менее адаптивный, чем TIG-сварка, поскольку энергия сварки пропорциональна количеству применяемой проволоки. Для оптимизации валика, сварочная установка обычно может регулировать три параметра:

- скорость подачи проволоки, пропорциональная сварочному току (и, косвенно, толщине свариваемых изделий),
- скорость сварки,
- высота дуги, пропорциональная напряжению при сварке.

Что касается алюминиевых сплавов, режим распыления (*распылительная дуга*) осаждения металла поддерживается высоким напряжением дуги (режимы короткого замыкания или шарового переноса, используемые со сталью, не подходят). Эта проблема долгое время ограничивала минимальные толщины для сварки до 3-4 мм. Снижение энергии может быть достигнуто путем изменения режима дуги (импульсного тока), что вызывает регулярное отделение металлических капель. Снижение напряжения и среднего тока позволяет сваривать толщины от 1,2 до 1,5 мм.

Определенное так называемое синергетическое сварочное оборудование объединяет для каждой комбинации проволоки/газа (диаметр, качество) предварительные настройки многочисленных параметров (высокие низкие токи и напряжения, частота и т. д.). Эти синергетические кривые, являющиеся функцией скорости проволоки, экономят время при настройке. Уже используемые сварочные программы хранятся в памяти, что облегчает производственный процесс (существует возможность работы в режиме отзыва программ для роботизированного производства).

С практической точки зрения, по-прежнему, необходимо регулировать напряжение дуги⁷, поскольку в зависимости от свариваемых изделий и от положения сварки, в частности, могут возникнуть проблемы с проникновением, пористостью или отсутствием плавления боковых стенок.

⁶Торий является слабо радиоактивным элементом, поэтому важно соблюдать меры предосторожности при заточке и хранении электродов.

В таком оборудовании с электронным регулированием также используется программирование сварочного цикла⁸ (см. Рис. 13.3), который допускает предварительный нагрев и, таким образом, предотвращает отсутствие проникновения (недостаточное плавление) в начале валика, а также появление последнего кратера (усадочная труба с риском горячего растрескивания), когда дуга гаснет. Следует отметить, что перемещение горелки осуществляется в конце склона предварительного нагрева. Определенное сварочное оборудование также имеет сильный импульс тока (700 А), который оптимизирует инициирование и, таким образом, предотвращает запутывание проволоки при запуске без дуги. Таким образом, процесс хорошо подходит для производства небольших валиков (<50 мм) и для роботизированного производства.

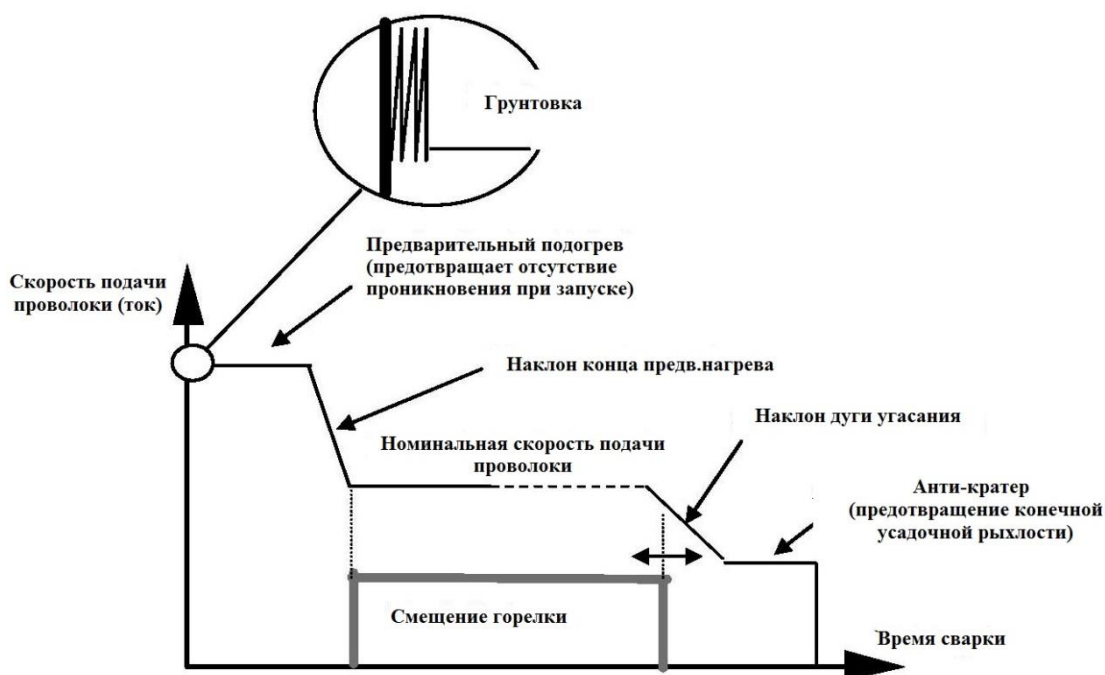


Рисунок 13.3. Синергический цикл MIG-сварки

Необходимо отметить развитие техники спаренного провода, которая позволяет не только увеличить осажденный металл, но и особенно значительно увеличить скорость сварки (до нескольких м/мин).

Некоторые производители также предлагают оборудование для роботизированной сварки, которое оптимизирует соотношение между мощностью и наплавленным металлом. Сварка тонких материалов (менее 1,5 мм) становится менее чувствительной к контакту деталей или образованию зазора, разной толщины и т. д.

⁷Некоторые производители также предлагают модификации для других параметров.

⁸Этот цикл должен регулироваться для каждой программы, так как он зависит от среды сварного шва.

Таблица 13.2. Краткое описание проблем с качеством валиков при MIG-сварке

Проблема	Причина	Средства защиты
Недостаточное проникновение	Недостаточная энергия сварки	Увеличить скорость подачи проволоки. Выполнить подготовку кромок на продуктах >6 мм Используйте газ, отличный от аргона ⁹
	Чрезмерное проникновение	Открыть фаску для уменьшения пятки на толстых изделиях
	Смещение факела слишком медленное	Уменьшить скорость сварки ¹⁰
	Избыточная высота дуги	Уменьшить напряжение сварки
Чрезмерное проникновение	Превышающая норму энергия	Уменьшить скорость подачи проволоки
	Неадекватная подготовка	Оптимизировать подготовку кромок на толстых продуктах
Чрезмерная выпуклость валика	Чрезмерный объем провода	Если проникновение правильное, оптимизируйте обработку кромок продуктов и, следовательно, адаптируйте скорость подачи проволоки
	Смещение факела слишком медленное	Увеличить скорость сварки
	Избыточная высота дуги	Уменьшить напряжение дуги
Валик слишком широкий	Смещение горелки слишком медленное	Увеличить скорость сварки
	Избыточная высота дуги	Уменьшить напряжение дуги
Тонко распределенная пористость	Избыточная высота дуги	Уменьшить напряжение дуги

13.2.3. Контактная сварка сопротивлением

Это метод, полученный из того, что используется для стали, но оборудование было значительно адаптировано ввиду высокой электрической и теплопроводности алюминиевых сплавов, более низкой твердости и чувствительности к горячему растрескиванию.

Принципиальные различия заключаются в следующем:

- использование более мощных машин, в частности, использование трехфазных токов, даже промежуточной частоты, выпрямленных для толщин > 3 мм;
- использование электродов большого радиуса, обычно 100 мм, для ограничения давления Герца под электродом;
- использование цикла сварки (ток/давление), приспособленного для удаления выступов и уменьшения внутренних дефектов (трещин и пористости).

⁹ В случае сварки толстых листов ($e > 8$ мм), проплавление улучшается при использовании гелия или смеси He/Ar (70/30) вместо чистого гелия.

¹⁰ Убедитесь, что проволока не спускается в сварочную ванну вертикально, тогда в этом случае необходимо увеличить скорость сварки (никогда не сваривайте «на сварочной ванне»).

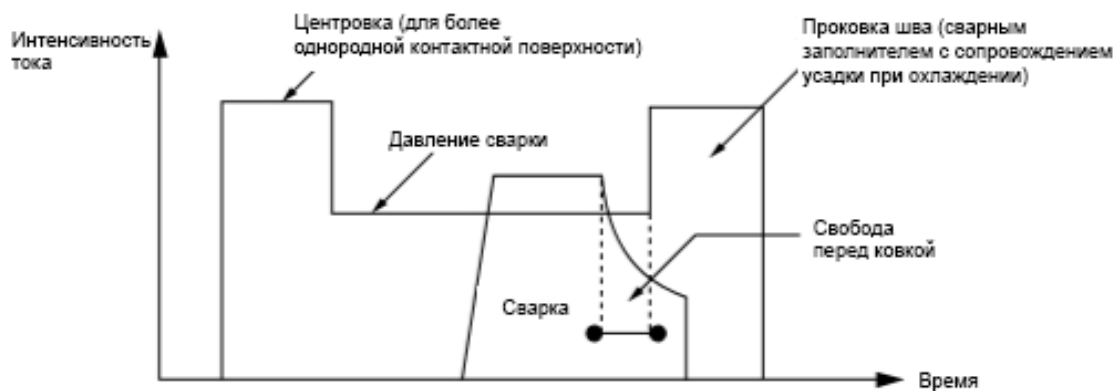


Рисунок 13.4. Цикл контактной сварки

Тепловые свойства алюминиевых сплавов (см. Таблицу 13.3, раздел 13.4.1) требуют очень короткого времени сварки. Для этого необходимо использовать высокую мощность силы тока. Тем самым, высокостойкая окисная пленка должна быть стерта значительными деформациями. Следует отметить, что высокое контактное сопротивление благоприятно для формирования расплавленной зоны (ядра сварной точки) на границе раздела, что облегчает сварку тонких изделий на толстых изделиях.

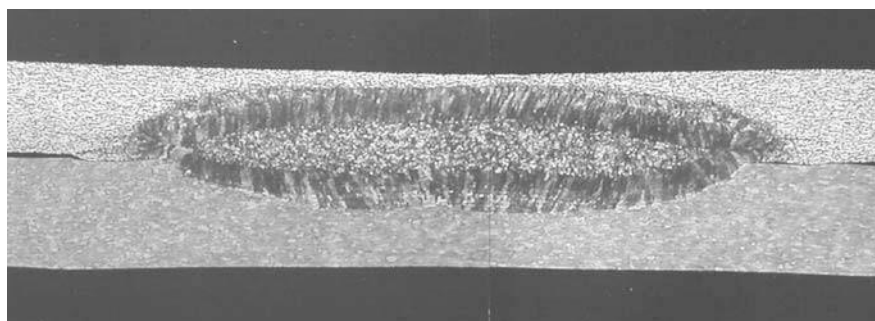


Рисунок 13.5. Сварка 5182-О 1 мм толщиной и 6016-T4 1.2 мм толщиной (применение на автомобилях)¹¹

Большинство сплавов, относящихся к семействам 2000 и 7000 (2024, 7075 и т. д.), поддается сварке с использованием этого процесса, поскольку характер сжатия исключает любой риск горячего растрескивания.

Непрерывная шовная сварка не подходит для алюминиевых сплавов, потому что она вызывает слишком большую деформацию таким же образом, в то время как контактная сварка сопротивлением не используется из-за очень сильного необходимого тока, поэтому стыковая сварка расплавлением является предпочтительной.

13.2.4. Стыковая сварка расплавлением

Стыковая сварка расплавлением основывается на инициировании между двумя свариваемыми частями электрической дуги, которая плавит материалы на поверхности. За

¹¹ Следует отметить, что MZ смещен в сторону металла с самой низкой теплопроводностью. Это общее явление сварки наблюдается и в других способах сварки (MIG, TIG).

этим следует операцияковки протяжкой, которая удаляет расплавленный металл и создает очень ограниченную зону термического воздействия.

Этот процесс обычно используется при прерывистой сварке встык (соединения в металлических соединениях, ободах колес и т.д.) или при непрерывном производстве труб (сварные трубы, начиная с рулона листового металла).

Все семейства сплавов поддаются сварке этим способом, в частности 7000 сплавов (7075).

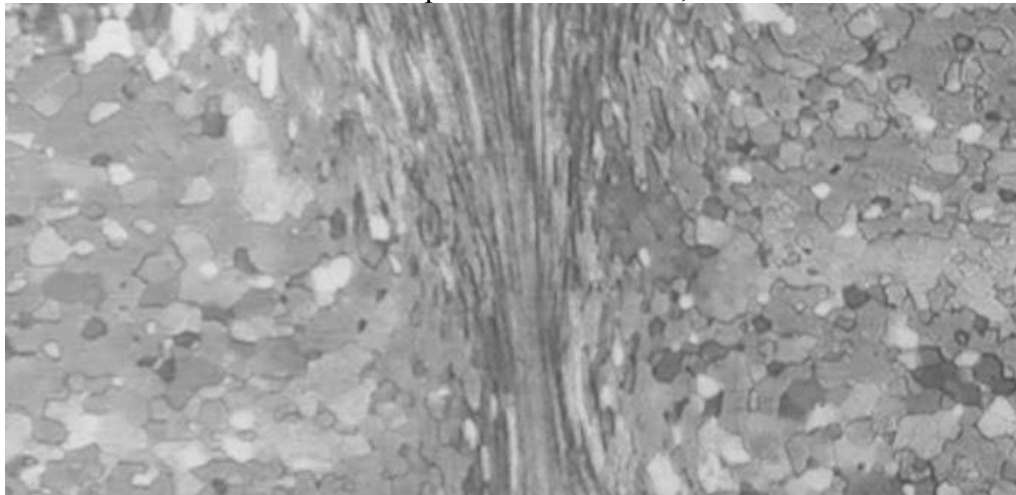


Рисунок 13.6. Сварочный шов с расплавлением A 6005A-T5

13.2.5. Сварка трением и сварка трением с перемешиванием

Техника сварки трением ограничена необходимостью приведения во вращение по меньшей мере одной из частей, подлежащих сборке¹². Его применение остается несущественным и ограничивается цилиндрическими деталями и в основном алюминиевыми/ медными узлами для электрических разъемов.

Процесс сварки трением с перемешиванием (в специальной литературе FSW) имеет недавнее происхождение и основан на сварке без плавления, получаемой путем сильного сдвига материала с помощью штифта/вращающегося инструмента, который смешивает металл собираемых материалов без расплавления, без расплавления. Уменьшение напряжения потока материала достигается, в первую очередь, за счет нагрева металла трением перед смещением инструмента, с помощью пластины на поверхности металла, что приводит к постепенному созданию сварного шва. Пластина также позволяет удерживать металл и поддерживать давление, что позволяет избежать выброса металла из зоны сварки.

Процесс предлагает следующие преимущества:

- все сплавы поддаются сварке,
- нет пористости, что означает малую подготовку поверхности,
- без присадочного металла или защитного газа,
- пары или металлические брызги, а также ультрафиолетовое излучение отсутствуют,
- уменьшенные деформации по сравнению с дуговой сваркой.

12 Испытания так называемой линейной сварки трением не продемонстрировали целесообразность сварки алюминиевых сплавов.

Этот процесс в основном используется со сплавами серии 6000 (6060, 6082) из-за высокой скорости сварки, а также с сериями 2000 (2024, 2219 и т.д.) и 7000 (7075, 7049 и т.д.), большинство из которых не поддаются дуговой сварке.

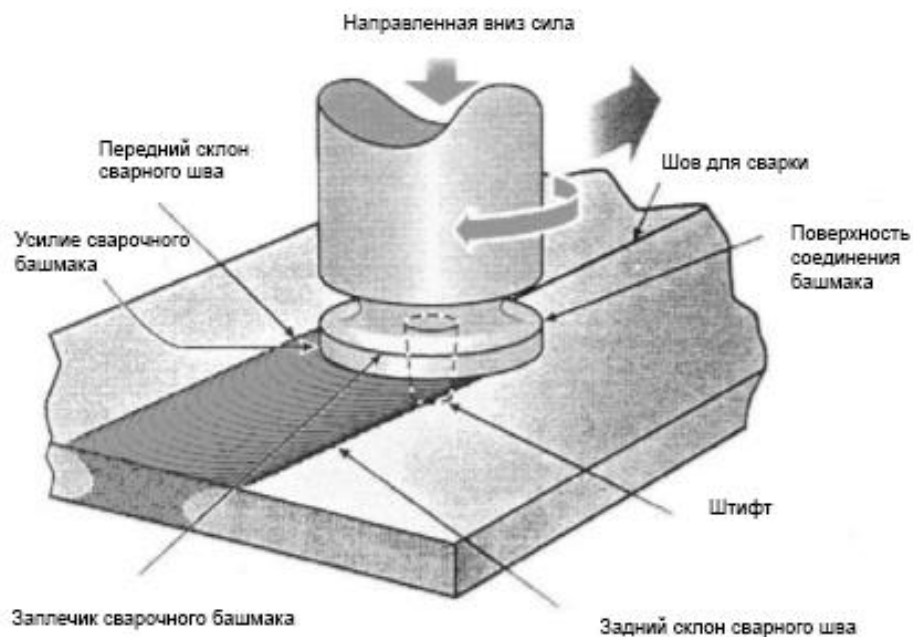


Рисунок 13.7. Общая схема сварки трением с перемешиванием

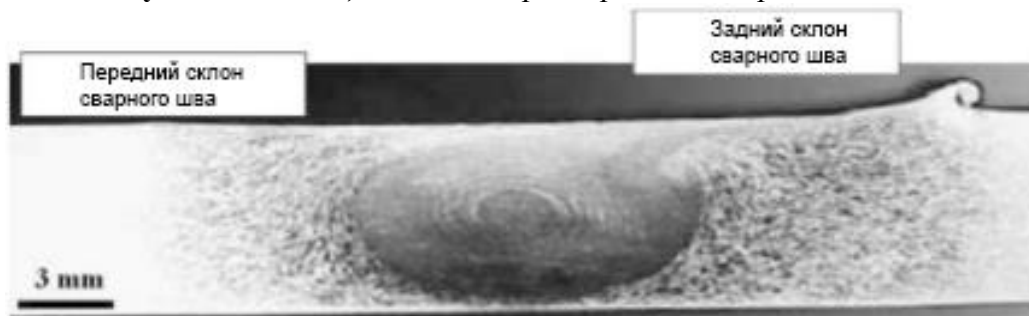


Рисунок 13.8. Микроструктура 2024 T3

13.2.6. Электронно-лучевая сварка

Сварка зависит от плавкости материала под воздействием электронного пучка, ускоренного магнитным полем и сфокусированного на детали в вакуумной камере¹³. Этот процесс очень гибкий и позволяет сваривать детали от нескольких сотых долей мм до 250 мм (предел машин, доступных в продаже).

Требуемая мощность зависит от толщины свариваемых изделий; как правило, считается, что для проникновения толщиной 3 мм необходим 1 кВт.

Практически все сплавы поддаются сварке (1050A, 5083, 7075, 2024, 6061, 42100, 48000 и т. д.). Проблема горячего растрескивания значительно снижается при использовании низких

¹³ На стали процесс работает с низким вакуумом, который сокращает время закачки. Не используется на алюминиевых сплавах из-за их высокоокислительных характеристик. Некоторые установки допускают сварку при атмосферном давлении, при условии, что луч может быть сфокусирован на расстоянии нескольких мм от горелки.

скоростей сварки. Однако эти скорости намного выше, чем при традиционных методах дуговой сварки, поскольку можно легко достигнуть скорости 5 м/мин.

Пониженная чувствительность к горячему растрескиванию также обусловлена низким нагревом свариваемых изделий; это также приводит к уменьшению деформаций, которые ограничены усадкой расплавленного металла. Сварка осуществляется без присадочного материала, но иногда для уменьшения трещин можно использовать легированную фольгу.

Зоны термического воздействия почти не существует, и зона расплава обычно представляет собой слабое место сварного шва.

Предпочтительный метод — это конфигурация встык. Слияние проводится постепенно с эффектом «замочной скважины»; сварка, как правило, выполняется по всему периметру деталей во избежание дефекта затухания валика (усадочной рыхлости). Сильная плотность энергии часто вызывает испарение металла; также некоторые элементы со слабым натяжением пара имеют пониженную концентрацию в зоне расплава. Так обстоит дело прежде всего, с цинком и магнием.

Этот процесс дает выгодные преимущества для полых изделий, таких как трубчатые секции и полые отливки, поскольку сварка может полностью осуществляться через стены. Наиболее подходящей конфигурацией является стыковая сварка; не требуется закругление или подготовка кромки на свариваемых деталях.

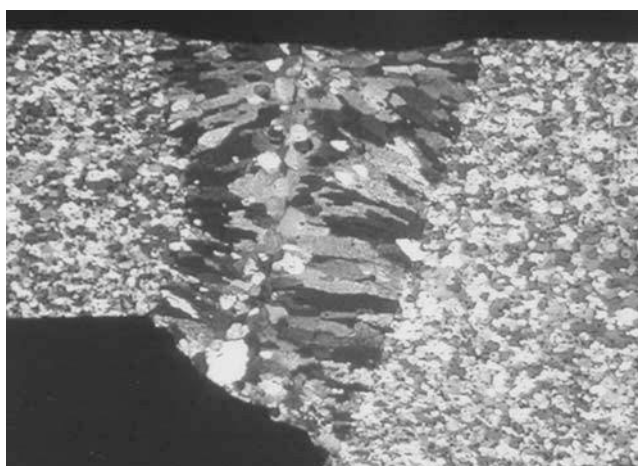


Рисунок 13.9. Шов, полученный электронным лучом, толщиной 2 мм 061T6

На тонких изделиях также можно выполнять сварку прозрачностью (круговая сварка).

Обязательно иметь чистые поверхности, химически очищенные, если это возможно, чтобы предотвратить появление пористости. Сварка обычно выполняется на обработанных деталях для устранения зазоров, насколько это возможно.

13.2.7. Лазерная сварка

Расплавление металла достигается монохроматическим когерентным излучением, сфокусированным на свариваемой детали, чтобы получить высокую плотность энергии в диапазоне от 10 до 100 кВт/мм². Доступны два типа лазерных источников:

- СО₂-лазер (длина волны 10,6 мкм), который позволяет использовать высокие уровни

мощности, но который позволяет транспортировать пучок лазера только через зеркала. Таким образом, процесс ограничивается плоской сваркой (чрезвычайно сложно для роботизации);

- твердый YAG-лазер (длина волны 1,06 мкм), который использует более низкие уровни мощности (максимум 5 кВт), но который позволяет транспортировать луч по оптоволокну и, таким образом, относительно легко роботизировать.

Сильное отражение этого луча из-за яркости поверхностей из алюминиевого сплава предотвращает поглощение, необходимое для плавления свариваемых деталей. Таким образом, необходимо инициировать испарение металла для образования валика. Таким образом, наличие элементов с низким натяжением пара (в частности, магния) делает возможным сварку с пониженным уровнем энергии. Уровни мощности выше 100 кВт/мм² бесполезны, так как металлические пары образуют плазму, блокирующую лазер, особенно источники CO₂.

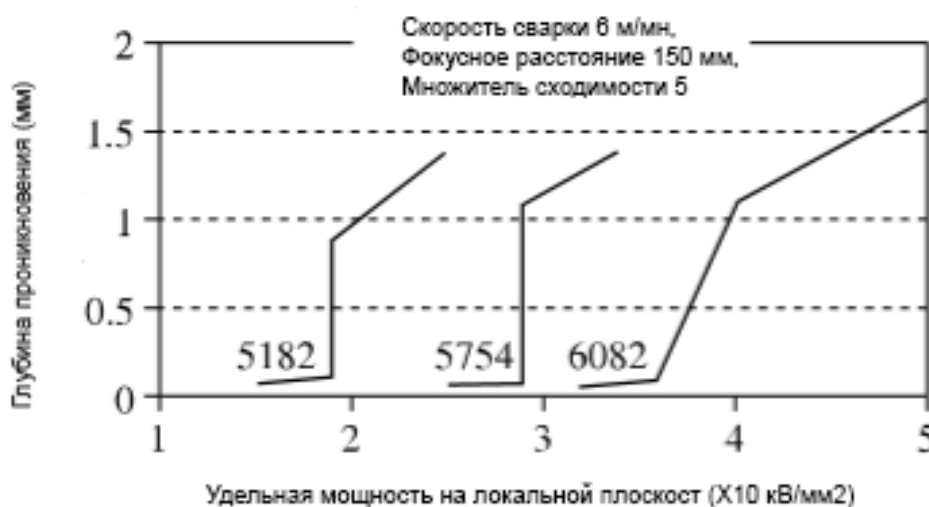


Рисунок 13.10. Порог лазерного взаимодействия с различными алюминиевыми сплавами

Лазерная сварка, наряду с электронным лучом, является одним из редких способов, которые позволяют проводить непрерывную сварку с помощью прозрачности при работе в режиме «замочной скважины». Решение этой проблемы (благодаря оксидному покрытию, которое предотвращает взаимопроникновение) позволяет производить непрерывные сварные швы, которые иногда могут заменять узлы с точечной сваркой (контактная сварка, клепка, обвязка и т. д.), но особенно контактная сварка сопротивлением, которая используется нечасто, ввиду деформаций. Однако сечение валика ограничивает поведение сварного шва, когда толщина свариваемых изделий превышает 2 или 3 мм. Как и при дуговой сварке, но в меньшей степени, лазерная сварка может вызвать растрескивание в горячем состоянии, проблему, которая может быть устранена с использованием присадочного металла.

Высокая плотность энергии обеспечивает скорость сварки несколько м/мин (обычно 5 м/мин для соединения листов толщиной 3 мм).

Основным недостатком лазера остаются капитальные затраты и толщина сварного шва, которая остается низкой (ниже 5 мм).

13.2.8. Иные методы

С алюминиевыми сплавами могут быть использованы другие, более маргинальные методы. Часто эти методы разрабатываются для сборки очень неоднородных материалов и получения разнородных конструкций.

Сварка взрывом позволяет покрывать листы и, таким образом, получать биметаллические комбинации, зачастую из стали и алюминия, используемые в дуговой сварке для смешанных конструкций из алюминиевых сплавов (применение в военном кораблестроении).

Технология, полученная из этого, является магнитно-индукционной сваркой, где энергия доставляется от электромагнитной катушки. Особенно ее используют для выполнения деформированных соединений (внешних или внутренних).

Ультразвуковая сварка позволяет сваривать небольшие поверхности с помощью сонотрода. Основное применение - сварка термopара для измерения температуры на поверхности детали.

Другие методы включают сварку шипов разрядом из конденсатора и т. д.

13.3. Подготовка и использование сварочных изделий полуфабрикаты из алюминия

13.3.1. Особенности поверхностей из алюминиевого сплава

Алюминиевые сплавы естественным образом покрыты очень стабильной оксидной пленкой - оксидом алюминия, температура плавления которого превышает температуру плавления алюминия (2030°C). Толщина этой пленки зависит от процесса изготовления заготовок; ее больше всего на заготовках для литейного производства и горячекатаных листах.

Этот оксид подвержен гидратации во время производства (например, при закалке сплавов серии 6000) или при хранении. Гидраты бывают двух типов:

- те, которые образовались при высокой температуре, в частности, во время горячей прокатки; они очень стабильны и могут быть устранены только механическим или химическим промыванием;
- те, которые образовались при низкой температуре ($T < 90^{\circ}\text{C}$), в частности, во время хранения, которые могут быть разрушены при простом нагревании.

Все эти гидраты могут быть, в некоторой степени, обогащены магнием в сплавах серий 5000 и 6000.

В итоге, поверхности продукта могут содержать смазку, адсорбированную или конденсированную воду, которая, подобно гидратам, разрушается под электрической дугой (или просто под воздействием тепла плавленого металла), образуя водород. Этот газ вреден и генерирует пористость, как только он присутствует в жидком алюминии, что имеет место в методах сварки плавлением.

Подготовка и использование заготовок требуют особого внимания для получения сварных швов хорошего качества. Разумеется, что эти пункты могут быть специфическими для способа выполнения, но качество, на которое нацелены, всегда должно соответствовать требованиям графика спецификаций.

13.3.2. Хранение

Несмотря на хорошую коррозионную стойкость, заготовки и отливки из алюминиевых сплавов должны храниться в сухой, проветриваемой среде, поскольку защитное оксидное покрытие может испортиться.



Рисунок 13.11. Изменение толщины оксидного слоя в зависимости от условий хранения

Во избежание образования конденсата следует соблюдать осторожность, чтобы не было разницы в температуре между местом хранения и местом сварки. Целесообразно, чтобы температура свариваемых продуктов и наполнителей была равна или выше температуры точки росы.

Присадочные материалы должны храниться в заводской упаковке. Независимо от срока использования целесообразно хранить их в отопляемых непыльных шкафах (40°C).

Для установок MIG-сварки устанавливать подогрев и/или катушки с инертным газом.

13.3.3. Подготовка поверхности

Эти этапы направлены на помощь в оказании свариваемости (способность к смачиваемости TIG-сварки, выбросы дыма), а также на обеспечение хорошего внутреннего состояния валика (пористость, оксидные пленки). Основной процедурой является обезжиривание с использованием нехлорированного растворителя типа эфира пропиленгликоля, алифатических углеводородов, гидрофторалканов и т. д.

За этим обезжириванием может следовать зачистка, чтобы получить очень хорошее качество валикового шва при максимальной плотности. Зачистку можно проводить либо механическим способом с помощью вращающейся щетки с проволокой из нержавеющей стали, либо химически (с использованием соды, пассивирования азотной кислотой и промывки водой). В некоторых случаях обезжиривание и зачистку можно проводить вместе, используя щелочные моющие средства или чистящие средства для сульфохромной кислоты.

Поскольку обезжиривание необходимо часто, то, если продукты хранятся в сухих условиях и если не требуется очень высокая компактность, чистку можно исключить, (класс D стандарта NF EN 10042). С другой стороны, перед чисткой всегда следует проводить обезжиривание, чтобы избежать повторного загрязнения.

Что касается отливки, рекомендуется песок или дробеструйная обработка, вместо

тугоплавкой промывки. Обезжиривание не рекомендуется, потому что без нагревания летучесть растворителей не всегда достаточна для их удаления, в результате чего остатки смазки попадают в поверхностные пористости. Механическую обработку отливок желательно проводить в сухом виде.

При TIG-сварке обезжиренная поверхность, зачистка щеткой или химическая зачистка окисной пленки являются обязательными для получения стабильной дуги и достаточного смачивания расплавленного металла. Если требуется большая плотность, то можно прибегнуть к соскабливанию продуктов, включая присадочные стержни.

При использовании MIG-сварки, при невзыскательном применении, с точки зрения качества гранул (пустоты), нет необходимости проводить чистку щеткой или зачистку, если заготовки хранились в среде, свободной от влаги; достаточно местного обезжиривания. С другой стороны, если требуется низкий уровень пористости, обезжиривание должно сопровождаться чисткой.

При контактной сварке, если допустимы некоторые пористости в сварочной сердцевине, то обезжиривание и чистка не являются обязательными.

При электронно-лучевой сварке обезжиривание обязательно и рекомендуется чистка. Для сварки трением с перемешиванием рекомендуется обезжиривание.

13.3.4. Очистка сварных швов

При MIG-сварке присадочные проволоки из Al-Mg (5356, 5754 и т. д.) Оставляют неприлипшую черную сажу на поверхности и по краю валика. Сварные швы, выполненные с использованием присадочной проволоки Al-Si (4043A, 4047A и т. д.), не оставляют следов, кроме как в начале валика, если они выполняются в хороших условиях (правильная настройка оборудования, достаточная газозащита сварочной ванны). Сажу можно устранить щелочной промывкой под давлением. Для пустотелых изделий чистка погружением не рекомендуется без эффективного ополаскивания (риск последующей коррозии).

13.4. Деформации

13.4.1. Введение

Все процессы сварки плавлением, в частности, дуговая сварка, вызывают деформации и напряжения в сварных деталях. Деформация и напряжения тесно связаны, устранение последних часто приводит к искажению.

Эти явления, относящиеся ко всем материалам, усиливаются физическими свойствами алюминиевых сплавов (см. Таблицу 13.3), главным образом, их высокой теплопроводностью, которая вызывает значительный нагрев деталей. Это повышение обобщенной температуры в сочетании с высоким коэффициентом расширения алюминиевых сплавов вызывает расширение, необходимое для того, чтобы оно происходило как можно более свободно, чтобы предотвратить перегревание деталей, перегретых при сжатии, с остаточной деформацией после охлаждения. Вопреки общепринятым представлениям, чаще всего нагрев, а не усадка при затвердевании валика, является источником проблем, возникающих при сварке алюминиевых сплавов.

Таблица 13.3. Сравнение физических свойств алюминия и мягкой стали

Свойства	Al 1050A	Сталь S235	Алюминий/сталь
Модуль упругости (модуль Юнга) (МПа)	70,000	210,000	0.33
Плотность (кг/м ³)	2,700	78,000	0.34
Точка плавления (°C)	658	1,535	
Массовая теплоемкость (Дж/кг°K)	897	420	2.1
Массовая внутренняя энергия (кДж/кг ⁻¹)	385	210	1.8
Удельная теплопроводность (Вт/м°K)	237	46	5.1
Коэффициент линейного расширения (10 ⁻⁶ K ⁻¹) между 20 и 100°C	23	12	2

(*)Усадка зависит от качества присадки. Присадочные металлы группы 4000 значительно уменьшают его, он очень низкий при 4047 (Al-Si12).

Сохранение деталей в заданном положении, а также последовательность и направление выполнения валиков являются основными факторами снижения деформаций. Деформацию, вызванную зажимом во время нагрева, используемого для уменьшения искажений, можно отличить от деформации, вызванной самой сваркой.

13.4.2. Сравнение стали и алюминия (деформация из-за нагрева)

В случае сварки фиксированных конструкций¹⁴ механизм, который вызывает деформацию алюминиевых сплавов, такой же, как и у стальных сплавов, но эффекты очень разные. В стальной детали общая достигаемая температура остается значительно ниже 100°C; в алюминиевых сплавах она зачастую выше, следовательно, расширение более значительное. Пока детали свободно расширяются, нет никакого напряжения (см. Рисунок 13.12).

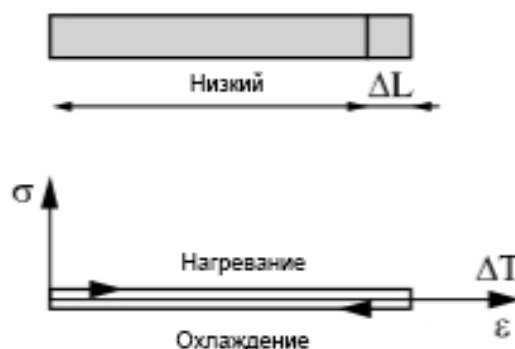


Рисунок 13.12. Диаграмма деформаций/ напряжений при сварке разжатых систем

13 При сварке термин «зажим» используется для обозначения предотвращения расширения по самой большой его длине.

При условии сварки детали длиной 1 м нагрев приводит к тепловому расширению (1) $\Delta l = E \cdot \alpha \cdot \Delta T \cdot l$. 1,8 мм для алюминиевого сплава, такого как 5083-О, в отличие от 0,2 мм для стали типа S235, исходя из предположения о том, что после сварки средняя температура стальной детали составляет 40°C и 100°C для детали из алюминия.

С другой стороны, если полученная конструкция зажата, деталь будет сжата в сборке с

равным напряжением сжатия (2) $\sigma = \varepsilon \cdot E = \alpha \cdot \Delta T \cdot E$. Это напряжение может достигать таких уровней, что предел текучести материала будет превышен, особенно в HAZ¹⁵, что приводит к уменьшению длины детали. Кроме того, следует отметить, что предел текучести падает под воздействием температуры быстрее при использовании алюминиевых сплавов, чем при использовании стали (см. Таблицу 13.4).

Таблица 13.4. Эволюция предела текучести различных материалов в зависимости от температуры (продолжительность <5 мин)

Материал	R _{p0.2} (МПа)			
	20°C	100°C	200°C	300°C
Сталь S235	220	220	210	200
6061-T6	275	260	220	90
5083-O	145	145	140	50

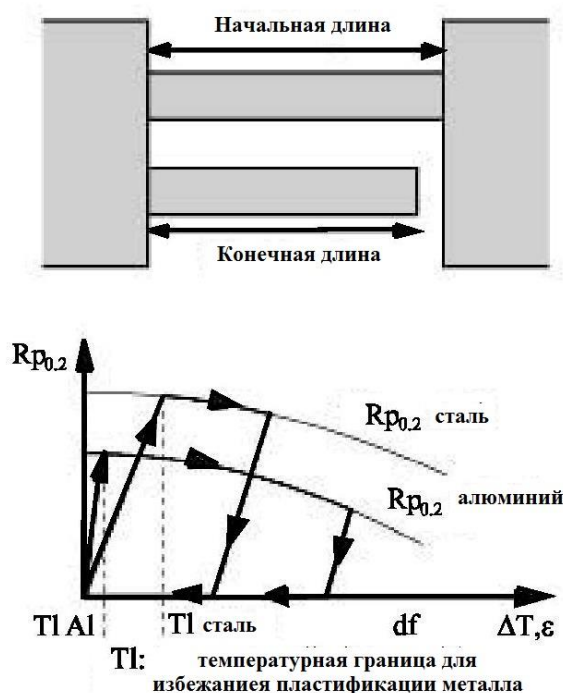


Рисунок 13.13. Диаграмма напряжений во время сварки зажатых деталей

В первом приближении, согласно формуле (2), применительно к мягкой стали с пределом текучести 220 МПа, температурная граница для металла, который не нужно полностью пластифицировать, составляет около 100°C, против 90°C для сорта 5083-O.

- 14 При сварке термин «зажим» используется для обозначения предотвращения расширения по самой большой его длине
- 15 Зона вблизи валика (20 мм) достигает более 300 ° С независимо от сплава.

Более значительные напряжения и деформации неизбежны для алюминиевых сплавов по сравнению со сталями.

Полная усадка после сварки переводится в упрощенном виде либо путем значительных остаточных напряжений в жестких конструкциях или толстых изделиях, либо деформаций в

гибких конструкциях (см.Рисунок 13.14).

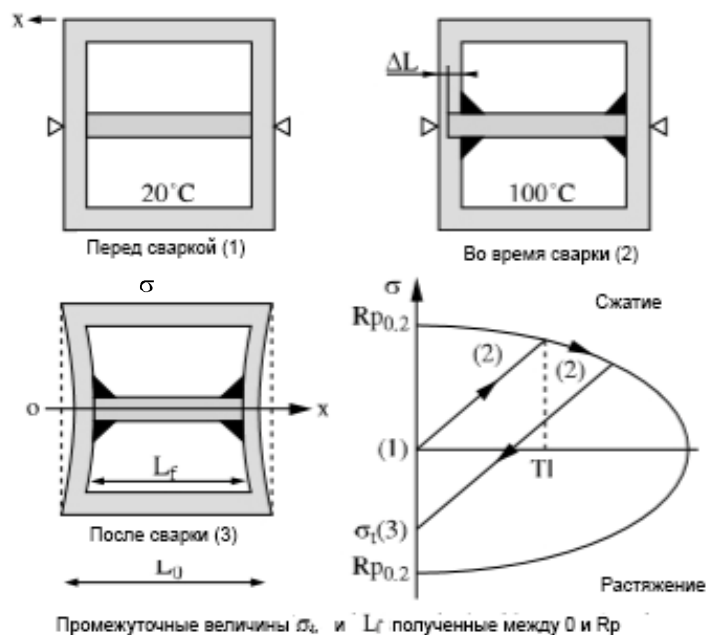


Рисунок 13.14. *Диаграмма деформаций/ напряжений при сварке гибких конструкций*

В целях устранения этих деформаций или внутренних напряжений, влияющих на все детали, подогнанный процесс сварки налагает конкретное центрирование и порядок выполнения валика (см. Рисунок 13.15). Таким образом, общий уровень остаточного напряжения в деталях зависит, прежде всего, от положения кромки и зажатия.

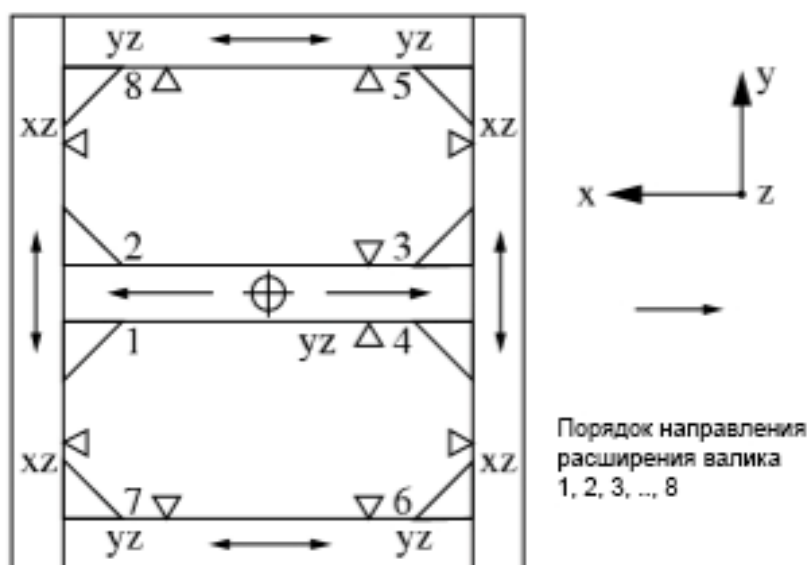


Рисунок 13.15. *Последовательность наложения швов для незажатых конструкций*

Удерживание деталей в заданном положении всегда достигается путем фиксирования в направлении, минимизирующем эффект расширения в течение сварочного цикла; соответственно толщине изделия в отношении стальных листов и в направлении, параллельном сварным швам, что касается профилей.

13.4.3 Усадка

Явления усадки, сопровождающие формирование зоны расплава, являются сложными, в

связи с тем, что они зависят от химического состава сварочной ванны и количества расплавленного металла. Она уменьшается за счет использования присадочных материалов серии 4000 (4043А и особенно 4047А). Эта усадка фактически является комбинацией двух явлений:

- очень локализованный нагрев сжатой зоны (как описано в разделе 13.5.1), причем зона жидкости свободна от каких-либо напряжений;
- затвердевание зоны расплава, которая затем подвергается растяжению (с риском образования горячих трещин, если сплав восприимчив), и поэтому заканчивается обобщенными растягивающими силами, действующими на зону валика.

Мы должны помнить, что валик всегда короче, чем детали в первую минуту. Иногда искажения можно уменьшить с помощью предварительных деформаций или с помощью центровки, определяющей их положение. На этом этапе необходимо отличать поперечную усадку валика от продольной усадки валика.

В общих чертах поперечную усадку валика можно оценить как изменение между 0,3 и 1 мм в соответствии с формой валика (угловое или стыковое сварное соединение) и в зависимости от его объема (в зависимости от толщины изделия). В отношении изделий, поддающихся деформации, это нередко приводит к угловым деформациям сварных деталей.

Продольная усадка, всегда самоограниченная, часто превращается на толстых изделиях во внутренние напряжения, и ее трудно устранить на тонких и/или длинных изделиях без предварительной деформации свариваемых деталей (локальное вытягивание зоны, подлежащей сварке).

Сварка прерывистых валиков (коротких отрезков) используется для уменьшения амплитуды деформации от этих усадок.

13.4.4 Основные правила

Эта усадка фактически является комбинацией двух явлений:

- очень локализованный нагрев сжатой зоны (как описано в разделе 13.5.1), причем жидкая зона свободна от каких-либо напряжений; чтобы можно было легко осуществлять расширение, конструируя так называемые *скользящие* конструкции. Они очень часто имеют форму сварных швов в направлении расширения.

В этом типе сборки детали удерживаются в заданном положении, во избежание сварки с расхождением между изделиями, но она может иметь влияние на механическую прочность, особенно на предел усталости (швы внахлестку). В целях сопровождения расширения комплектующих изделий, также можно прибегнуть к незакрепленной полученной конструкции, для дополнения расширения комплектующих. Отмечается сильное ухудшение деформации в случае, если крепление осуществляется сжимающим оборудованием, наилучшим примером является винтовой зажим;

- оптимизировать порядок выполнения валиков для компенсации их усадки. Таким образом, при перемещении к свободным кромкам валики надо сначала разместить в середине деталей, чтобы ограничить их самоограничение. В случае прерывистых (коротких) сварных швов валики должны начинаться с середины свариваемых деталей и чередоваться по порядку (см. Рисунок 13.16).

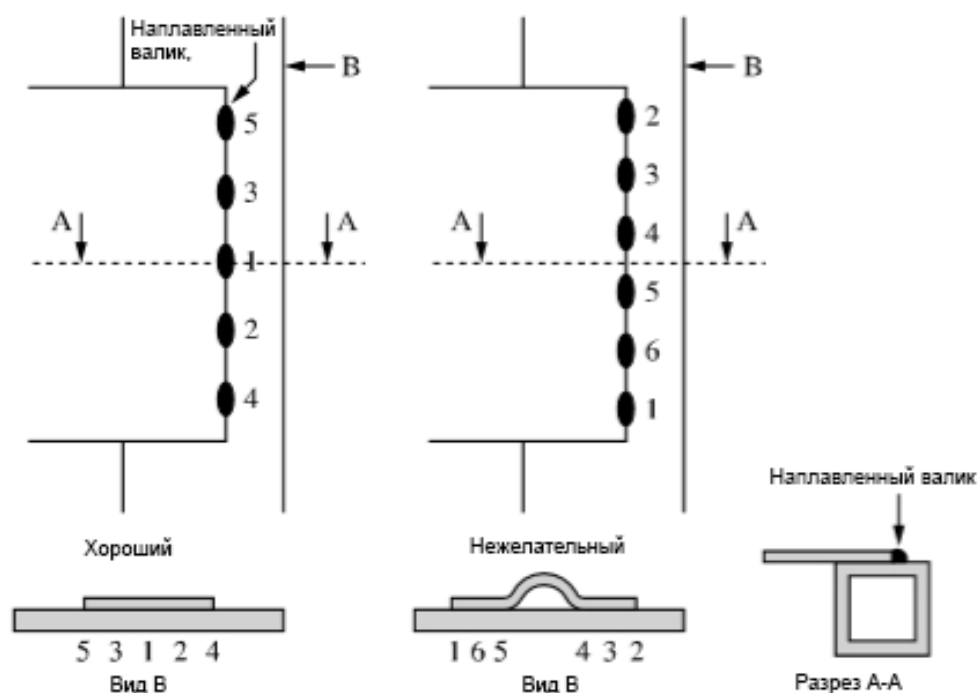


Рисунок 13.16. Кратковременная сварка панели пола на жестком каркасе

Как уже упоминалось, усадка во время отверждения может быть более значимой для алюминиевых сплавов, чем для сталей. Это явление может вызвать еще большее опасение, когда сварка выполняется с зазором. Хотя новое оборудование MIG-сварки предназначено для сварки тонких изделий из алюминиевого сплава, этот начальный зазор устраняется после первых нескольких миллиметров сварки при совокупном воздействии расширения объема и усадки. Стыковая сварка валика с зазором приведет к пассивным деформациям или внутренним напряжениям.

Таким же образом, для узла, сваренного в жесткой полученной конструкции, накапливающийся усадочный эффект могут привести к деформациям, усиленным локальным уменьшением напряжения потока в зоне термического воздействия во время сварки последних валиков (см. Рисунок 13.17). Точки центровки будут размещены на максимальном расстоянии от сварных зон, насколько это возможно.

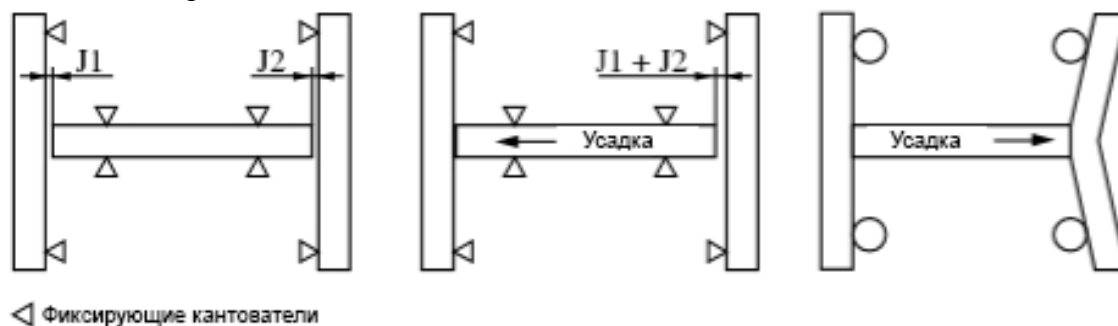


Рисунок 13.17. Распределение зазоров и сопутствующая угловая деформация

Использование присоединения с пружинной оттяжкой или откатом является средством предотвращения этих пассивных деформаций. Необходимо иметь в виду, что поперечная усадка валика неизменно более значительна в конце сварного шва, чем в начале. Этот принцип применяется в примере на Рисунке 13.18, с учетом того, что деформация валика редко компенсируется последующим сварным швом.

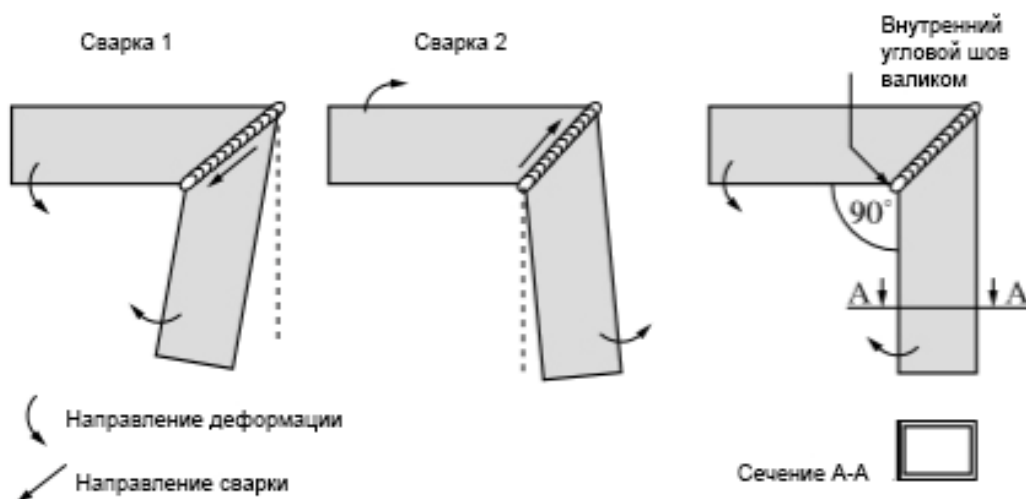


Рисунок 13.18. Выделение деформаций на конце валика сварного шва (угловая деформация может быть компенсирована валиком в нижнем углу)

Очень важно:

- сварить два параллельных шва в одном направлении для уменьшения деформации,
- выполнять сварку в направлении самозащемленных или слабозащемленных зон, которые часто являются краями детали, то есть зон с небольшим количеством материала и/или менее жестких зон.

13.5 Определение размеров сварных конструкций

13.5.1 Помеха электростатического сопротивления

Наличие сварных швов снижает механические свойства алюминиевых сплавов: необходимо учитывать расчеты размеров конструкций. Ниже представлены общие схемы проверки расчетов в Еврокоде 9 [ENV 99a] для сварных швов, выполняемых традиционными методами дуговой сварки (TIG и MIG)¹⁶.

Расчеты прочности элементов должны учитывать поведение зоны, близкой к валику, а также зоны термического воздействия и саму зону расплава (MZ). Как правило, расчет зоны термического воздействия является достаточным, но необходимо проверять обе зоны, в частности, для угловых швов валиком в толстых изделиях.

Для определения размеров принято, что прочность материала уменьшается вблизи сварных швов равномерным образом. Это смягчение выражается в использовании коэффициента ρ_{HAZ} ¹⁷, который, умноженный на допустимое напряжение при растяжении

¹⁶ При других сварочных процессах можно сослаться на предварительные испытания и измерения микротвердости, чтобы оценить степень и потерю механических характеристик в зоне термического воздействия.

¹⁷ Этот так называемый «металлургический КПД» известен под названием β в DTU алюминия или в правилах Европейского Конвента для несущих металлоконструкций; его не следует путать с формулой β с тем же названием.

(f_0 для растяжения, $f_u = f_0 / \sqrt{3}$ для сдвига), дает эксплуатационное предельное значение f_{ZAT} (МПа), которое не должно превышать в зоне термического воздействия.

Ширина зоны термического воздействия зависит от толщины изделий, геометрической конфигурации, температуры между проходами, а также от процесса сварки. Таким образом, в TIG- или MIG-сварках полуширина может варьироваться от 20 до 40 мм.

Обычно считается, что зона термического воздействия распространяется на все толщины детали, подлежащей сварке.

Таблица 13.5. Ширина ЗТВ учтена в расчетах

Толщина изделий	Ширина ЗТВ (мм)
0 < толщ. d 6 мм	20
6 d толщ. d 12 мм	30
12 d толщ. d 25 мм	35
толщ. > 25	40

Эти значения, как правило, ниже, чем у несобранных материалов, из-за присутствия размягченной зоны термического воздействия или зоны расплава, у которых отсутствует такая металлургическая структура.

Коэффициент размягчения ρ_{HAZ} зависит от исходного состояния продуктов и используемого процесса. Таблица представлена в зависимости от сплава, его термического состояния (Н или Т) и процесса сварки для 6000 сплавов (TIG- или MIG-сварки).

Таблица 13.6. Коэффициент модификации ρ_{HAZ} ; из [ENV 99b]

Семейство сплавов	Тепловое состояние	$\rho_{HAZ}(MIG)$	$\rho_{HAZ}(TIG)$
1000	H14	0.6	0.6
3000	H14, H16, H18	0.6	0.6
5000	H22	0.86	0.86
	H24	0.8	0.8
6000	T4	1	
	T5	0.65	0.6
	T6	0.65	0.5
7000	T6	0.8 до 1	0.6 до 0.8

Значение 1 берется для сплавов в состоянии F, O или H111

Таблица 13.7. Допустимое значение напряжения в зоне расплава f_{MZ} некоторых сплавов; из [ENV 99b]

Значение допустимого напряжения f_{MZ} (МПа)	Присад. материал	Сплав							
		5052	5454	5083	6060	6005A	6061	6082	7020
	5356	170	220	240	160	180	190	210	260
	4043A				150	160	170	190	210

Предел напряжения шва f_W зависит от металлов, подлежащих сборке, и используемого присадочного материала (5356 и 4043A).

В случае гетерогенного сварного шва используется самый низкий предел напряжения.

Проверка сварного шва выполняется путем применения традиционного критерия фон Мизеса к зоне термического воздействия, тем самым учитывая уменьшение допустимого напряжения f_{HAZ} в зоне термического воздействия и f_{MZ} в зоне расплава.

Для учета параллельного и перпендикулярного сдвига корда при угловых швах валиком используется формула Бета, которая также применима к стали. Для алюминиевых сплавов β принимается равным 1.

$$\sigma_c = \beta \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)}$$

Нормальные напряжения, параллельные угловым швам валиком, не учитываются при расчете швов.

При этом, условия устойчивости деталей к изгибу учитывают влияние зоны термического воздействия посредством коэффициента асимметрии s , который увеличивается при наличии сварных швов.

Факторы дисперсии сварки и качества исполнения учитываются с использованием коэффициента прочности γ_{MS} , который снижает предел напряжения. Для валиков, выполненных с нормальным качеством сварки, этот коэффициент имеет значение $\gamma_{MS} = 1.25$. Для валиков, сваренных с более низким уровнем качества, значение $\gamma_{MS} = 1.60$.

Что касается углового шва валиком или соединения внахлестку, расчеты размеров для двух конкретных случаев, рассматриваемых чаще всего, представлены ниже (см. Рисунки 13.19 и 13.20).

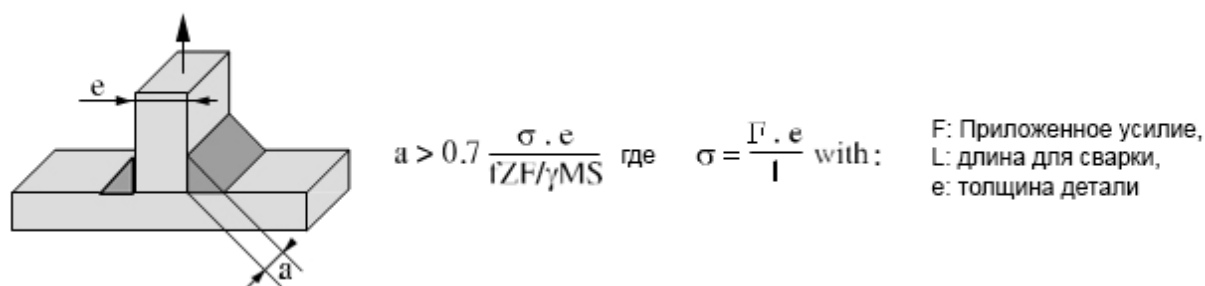


Рисунок 13.19. Сварное соединение с двумя угловыми швами, под нагрузкой, перпендикулярной оси сварки

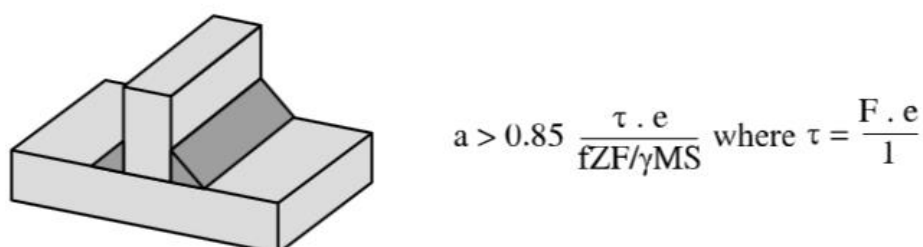


Рисунок 13.20. Сварное соединение с двумя угловыми швами, под нагрузкой, параллельной

13.5.2 Вычисление степени усталости

Как и для стали, усталостная прочность сварных конструкций определяется конструкцией (конфигурацией сборки); см. Главу 6.

Широкая сварочная совместимость сплавов позволяет оптимально использовать профили (в основном 6000) и отливки (40000) во взаимодействии с плоскими изделиями (5000). Алюминиевые изделия из литья и литых заготовок обладают преимуществом возможности интеграции по своей конструкции сквозных конфигураций, способных повысить производительность. Все эти изделия имеют одинаковые характеристики внутренней усталости после сварки, поведение которых зависит от локального геометрического уровня напряжения (горячая точка) и, во-вторых, от качества валика [ENV 99b]. Зачастую наилучшие характеристики достигаются с помощью сильных конфигураций, которые, с другой стороны, позволяют использовать валики среднего качества, но хорошее качество исполнения валиков не компенсирует плохую калибровку. Следует отметить, что с учетом того, что нежелательные дефекты находятся больше в начале валика (риск залипания, недостаточное проникновение), размещение концов валиков на свободных краях часто менее вредно для усталостного поведения.

13.5.3 Правила, регулирующие оптимальное использование сварных конструкций

Первое правило состоит в размещении сварных швов в зонах, подвергающихся низким нагрузкам или вообще не нагруженных, второе - в использовании стыковых сварных швов, отдавая предпочтение сварным швам валиком, поскольку они обеспечивают лучшую помеху электростатического происхождения и характеристики усталости. К тому же, в случае стыковой сварки профилей или формования отливок целесообразно размещать планка опоры сварочной ванны на отливках или скрученных заготовках, возможно, включая разделку кромок, в целях обеспечения постоянного проникновения (см.Рисунок 6.21).

На этапе проектирования должны быть приняты во внимание определенные меры, касающиеся деформации во время сварки. Необходимо соблюдать совместимую толщину между собираемыми деталями.

Следует отметить, что когда установление двойного соотношения является достаточным фактором безопасности при дуговой сварке, то можно допустить значительные отклонения при сварке с прозрачностью (лазер, электронный луч) или при контактной сварке (свариваемость определяется самым низким значением толщины). Необходимо предусмотреть возможность минимизации деформаций во время сварки, например, путем проектирования подвижных соединений.

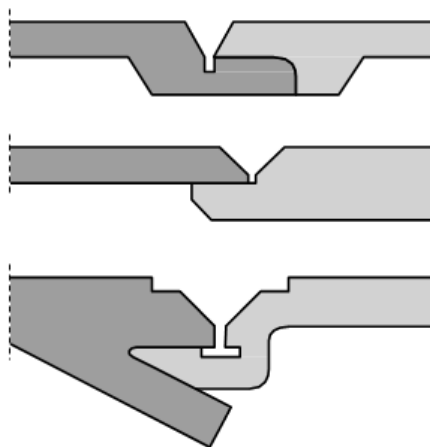


Рисунок 13.21. *Схема подготовки кромок для профилей или отливок*

13.6. Дефекты сварки

Здесь мы упомянем дефекты, которые чаще всего встречаются при сварке алюминиевых сплавов, особенно с использованием методов дуговой сварки.

Статические свойства связаны с эффективным сечением валика, в то время как усталостная прочность сильно зависит от уровня локальных напряжений. Что касается статических свойств, то более вредными являются дефекты, влияющие на эффективное поперечное сечение валика. Таким образом, не требующая немедленного вмешательства пористость, полученная во время дуговой сварки, мало влияет на усталостную прочность, но может довольно серьезно влиять на статические свойства сварных швов.

На тонких изделиях менее 2 мм риск усадки трубы на задней стороне валика может уменьшить этот участок, особенно при сварных швах валиком.

Дефекты неточного смещения и все эффекты влияния (сварные швы только на одной стороне полых изделий) очень разрушительны по сравнению с внутренними дефектами валика, особенно в отношении усталости материала.

Наиболее вредоносными дефектами валика являются неполное проплавление из-за разупрочнения разреза, которое его охватывает, и отсутствие плавления или прилипания к краям валика, что часто вызвано слишком высоким напряжением дуги, особенно с присадочными материалами семейства 5000.

Также необходимо упомянуть углы разделки кромки и выпуклость валика. Их можно уменьшить путем использования обработки кромок в случае стыковой сварки¹⁸. Не требующие немедленного вмешательства газовые поры не оказывают значимого эффекта на долговечность (см. Рисунок 13.22).

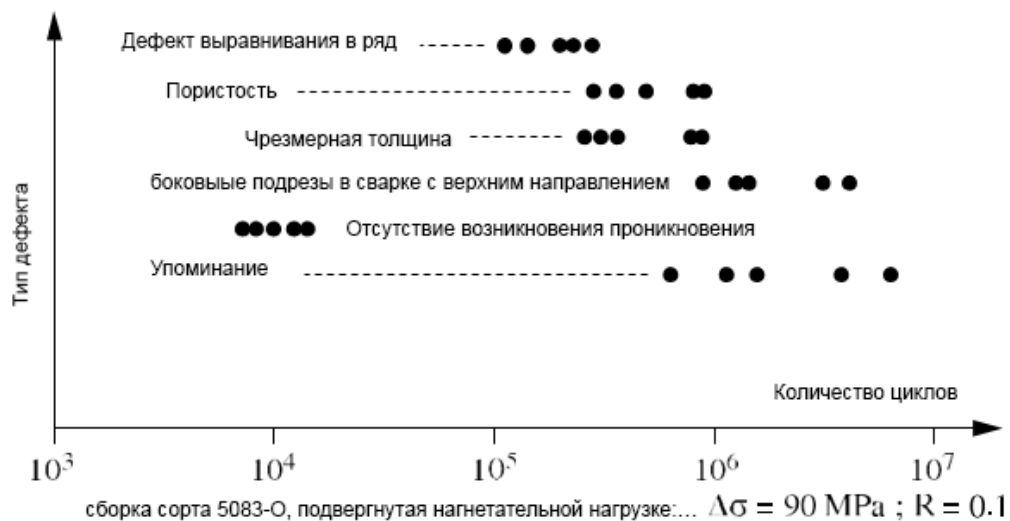


Рисунок 13.22. Опасность дефектов стыковой сварки. Усталостное поведение растягиваемых образцов

В Таблице 13.8 происхождение большинства текущих дефектов показано с их идентификационным номером Международного института сварки (IIW) и в соответствии со стандартом NF EN 26520.

18 Следует помнить, что такая разделка кромок могут поставляться напрямую и без каких-либо дополнительных затрат для сформованных или литых изделий.

Таблица 13.8. Основные дефекты

PW №	Дефекты	Вероятное происхождение
104	Кратер разлома	Валик оканчивается внезапным гашением дуги
200	Пустота в литье	Наличие химических соединений, которые могут распасться на поверхности (не забывая о присадочном материале, который может быть грязным или плохо выровненным) Плохая стабилизирующая обработка жидкой ванны Металл “газоотравлённый” (особенно литые заготовки) Чрезмерная высота дуги (дуговая сварка)
402	Непровар при сварке	Недостаточная скорость подачи проволоки, в особенности, в начале валика (недостаток тока в начале MIG-сварки) Чрезмерная скорость сварки (или сварка в сварочной ванне). Неправильная подготовка фаски (слишком узкая, избыточная пята) на толстых изделиях при MIG-сварке Чрезмерная высота дуги
4011	Недостаточное сплавление (sticking)	Чрезмерная высота дуги Недостаточная скорость подачи проволоки, особенно в начале валика (MIG) Компонент слишком холодный (разница в толщине материалов для сварки)
506	Перетекание через край	Интервал затвердевания различен для присадочной проволоки и основного материала (часто встречается в TIG-сварке с присадочным металлом 4000)
5013	Подрезание корней шва или задняя усадочная раковина сварного шва (только на тонких листах толщ. <2 мм)	Избыточная энергия сварки Избыточный зазор между деталями Недостаточный угол наклона сварочной головки
509	Смятие	Избыточная энергия сварки Слишком слабая скорость сварочной головки

13.7. Безопасность и охрана труда

Риски, связанные со сваркой алюминиевых сплавов, обычно связаны с другими материалами (ослепление в методах дуги, термические ожоги, пары и выбросы озона в процессе дуговой сварки и т.д.). Однако следует учитывать физические и химические свойства, характерные для алюминиевых сплавов.

Высокая отражательная способность поверхностей требует особой бдительности в отношении ослепления, защиты лица (встроенная маска) и защиты всех открытых частей кожи (при сварке резервуаров или закрытых сосудов); должны использоваться защитные фильтры класса 10-13 согласно S 77-104 (которые более непрозрачны, чем при сварке стали).

Алюминиевые сплавы являются хорошими проводниками тепла, поэтому повышается

риск ожогов (необходима защитная одежда).

Производство озона имеет важное значение в дуговой сварке; следует отметить, что уровень выбросов выше при использовании присадочного материала Al-Si (в среднем 0,15 ч/млн), чем при использовании присадочного материала Al-Mg (в среднем 0,05 ч/млн). Это значение значительно увеличивается при сварочном напряжении 22 вольт.

Некоторые сплавы содержат небольшое количество бериллия (в частности, 5000 сплавов). Процессы дуговой сварки предполагают использование присадочного материала с низким уровнем (ниже 0,0008%). Некоторые сплавы являются исключениями из этого правила (4011). Пользователь должен указать это требование при заказе заготовок.

13.8 Список использованной литературы

- [EN 99] EN.1011-4, Soudage – Recommandations pour le soudage des métaux – Partie 4: Soudage à l'arc de l'aluminium et des alliages d'aluminium, 1999.
- [ENV 99a] ENV1999-1, Eurocode 9 part 1: general rules, 1999.
- [ENV 99b] ENV1999-2, Eurocode 9 part 2: fatigue, 1999.
- [FD 96] FD.CR.12187, Lignes directrices pour un groupement des matériaux pour le soudage, 1996.

Стандартизация: организация и контроль качества сварки

14.1. Введение

Изготовление сборок или сварных конструкций в течение многих лет было предметом нормативных текстов или стандартизации. Область сосудов под давлением была рассматривалась нормами и правилами около 30 лет, в то время как французские стандарты серии Р 22, касающиеся стальной конструкции, были установлены с начиная с 1975 года. Аналогично этому, сборка при помощи сварки рассматривается в пяти частях французского стандарта NF E 83-100 «Конструкция сборных узлов: процессы сварки», опубликованного в конце 1980-х годов и пересмотренного в 1995 году.

Вступившая в силу в 1987 году Европейская директива «Простые сосуды под давлением», за которой последовали более поздние «сосуды, работающие под давлением, без огневого подвода теплоты», включала разработку и принятие стандартов, разработанных Техническим комитетом CEN/ TC 121 «Сварка», стандартов, направленных на замену существующим сводам национальной стандартизации.

Нелегко проанализировать эти европейские стандарты, поскольку они стабилизированы не полностью и, по разным причинам, подлежат пересмотру, что приведет к существенному изменению их структуры. Тем не менее, работа продвинута достаточно для обсуждения общих тем и объяснения основной темы, касающейся их применения.

Таким образом, в дальнейшем развиваются три предмета:

- стандарты общей организации качества;
- стандарты для аттестации процедур или персонала;
- стандарты, касающиеся неразрушающего контроля.

14.2. Стандарты общей организации качества

14.2.1. Презентация

Общая организация требований к качеству сварки была прежде всего предметом европейского стандарта NF EN 729 «Требования к качеству сварки - сварка металлических материалов плавлением» в четырех частях, опубликованного в ноябре 1994 года, а также технического отчета CEN (CR 13576) «Сварка: применение требований к качеству EN 729 для сварки металлических материалов плавлением» с целью прояснения ее запрещенных целей и методов реализации.

Данный европейский стандарт был принят на международном уровне в соответствии со стандартом ISO 3834 и пересмотрен с целью обеспечения полной согласованности с новой версией стандартов ISO 9000, выполненной в рамках Венского соглашения, которое привело в апреле 2006 года к публикации EN ISO 3834 «Требования к качеству сварки металлических материалов плавлением» в пяти частях:

- Часть 1: Критерии выбора соответствующего уровня требований к качеству.
- Часть 2: Комплексные требования к качеству.
- Часть 3: Стандартные требования к качеству
- Часть 4: Элементарные требования к качеству.
- Часть 5: Документы для соответствия требованиям качества ISO 3834-2, ISO 3834-3 или ISO 3834-4.

Как и в случае EN 729, эти пять частей сопровождался техническим отчетом ISO/TR 3834-6 «Руководство по внедрению ISO 3834».

14.2.2. Принципы работы

Ключ к интерпретации этой серии стандартов, касающихся качества в сварке, содержится во введении стандарта ISO 3834-1 «Критерии для выбора соответствующего уровня требований к качеству», в котором указано: *«Спецификация требований к качеству важна для сварочных процессов, потому что качество этих процессов не может быть легко проверено. По этой причине они считаются специальными процедурами, как указано в стандарте ISO 9000: 2000. Качество не может быть проверено внутри изделия, оно должно быть предусмотрено при проектировании. Даже самые обширные и сложные неразрушающие испытания не улучшают качество продукта»*. Это кажется само собой разумеющимся и касается не только сварки, существуют и очевидные моменты, о которых иногда полезно помнить.

На этой основе ISO 3834 охватывает части 2, 3 и 4, снижающихся в строгой последовательности с требованиями к качеству, предъявляемым к сварке как в мастерской, так и на рабочей площадке, часть 1, в которой приводятся элементы выбора в соответствии с договорными требованиями с использованием краткого сравнения требований. Эти указания дополняются в техническом отчете ISO 3834-6 рисунком 14.1, который следует ниже.

Поскольку части 3 и 4 представляют ограничения только по части 2 «Комплексные требования к качеству», мы ограничимся анализом последних, выделив конкретные моменты.

14.2.3. Анализ

Пункт с обзором ISO 3834 определяет цели стандарта следующим образом:

- быть независимым от типа изготовленной конструкции;
- определить требования к качеству сварки для сварки в мастерских и/или на объекте;
- предоставить руководство, описывающее способность изготовителя производить конструкции, отвечающие указанным требованиям;
- обеспечить основу для оценки сварочной мощности производителя.

Очевидно, что этот стандарт может использоваться для нескольких целей. Его можно использовать как в качестве справочного материала в контракте, так и в качестве инструмента для организации качества сварки, поскольку синопсис пунктов, взятых из требований ISO

9000, подтверждает их применение к конкретной области сварки:

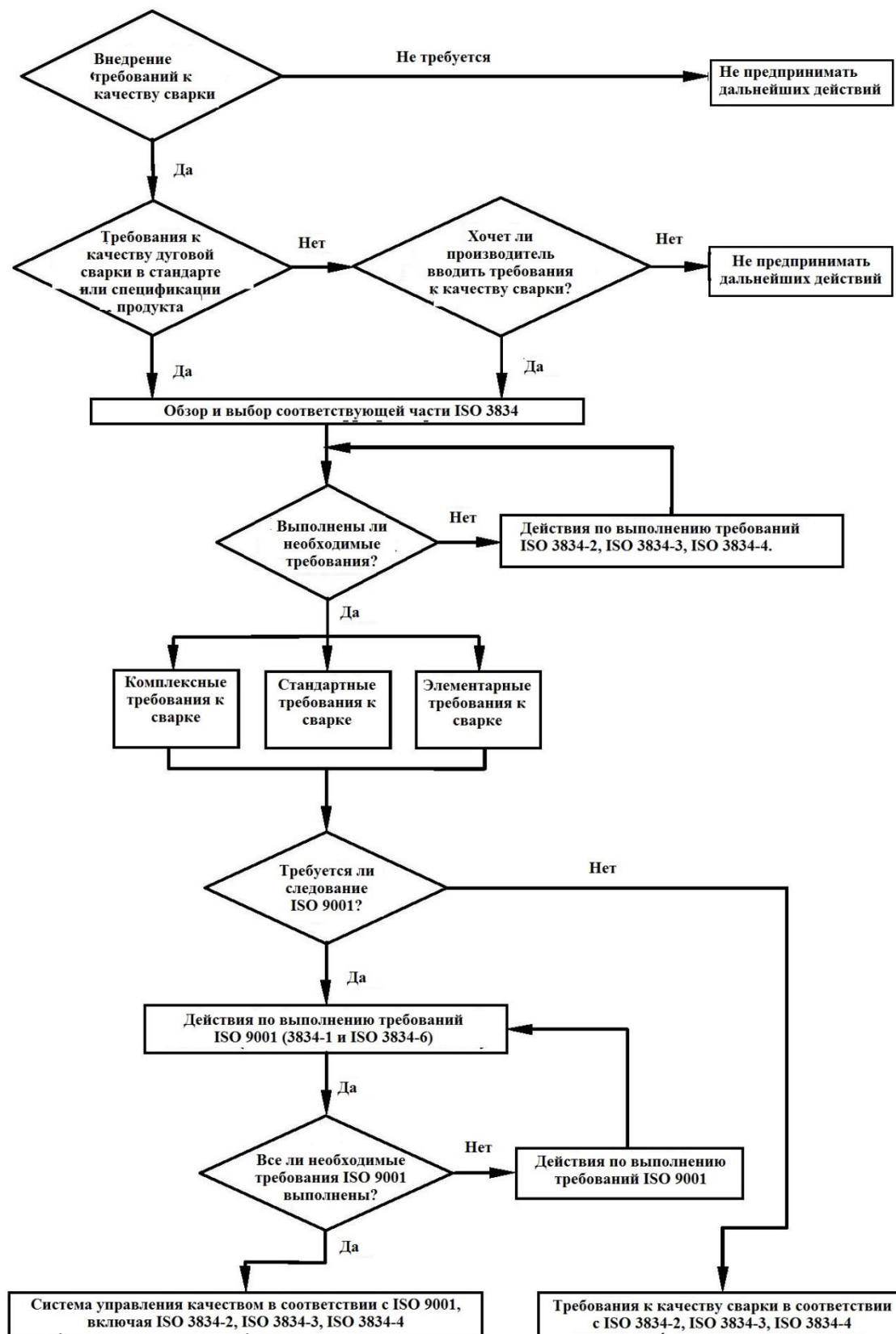


Рисунок 14.1. Блок-схема выбора требований к сварке

- анализ требований и технический обзор,
- подрядные работы,

- команда сварщиков,
- персонал по контролю и испытаниям,
- оборудование,
- сварка и другие виды работ,
- сварочный материал,
- заготовка паяемого материала,
- термическая обработка после сварки,
- контроль и испытания,
- несоответствие и внесение исправлений,
- калибровка и подтверждение измерительного, контрольного и испытательного оборудования,
- идентификация и прослеживаемость,
- записи по качеству.

Некоторые из этих пунктов не нуждаются в комментариях, поскольку они являются традиционными и содержат только технические элементы, определяющие режимы применения сварочных работ. Таковы требования, относящиеся к анализу требований и техническому обзору (рассмотрению контракта), субподряду, оборудованию, сварочным расходным материалам, хранению исходных материалов, термической обработке после сварки, несоответствию и корректирующим действиям, для калибрования, для идентификации и прослеживаемости и для записей по качеству.

Во всех этих областях сварка едва ли отличается от других промышленных работ, для которых целесообразно иметь достаточную документацию на технические данные оборудования и материалов, положений, принятых в случае отклонения, а также всей информации, касающейся прослеживаемости. процедур.

Три пункта, однако, заслуживают гораздо более тщательного изучения. Они касаются самой сварки и связанных с ней действий, персонала, отвечающего за сварку, и, наконец, самих осмотров и испытаний. Действительно, в этих трех областях конкретные технические требования, связанные с применением общих принципов обеспечения качества, дополняются ссылками на целый ряд определенных стандартов, представляющих более или менее сложную архитектуру, которую представляется целесообразным расширить более подробно.

14.2.3.1. Сварка и другие виды работ

Сварка и виды деятельности, связанные со сваркой, должны, как и все другие виды деятельности, иметь под заголовком службы контроля качества программу производства, включающую список и идентификацию операций, подлежащие выполнению, осмотры и испытания, которые должны быть выполнены так же, как и ссылки на применяемые процессы. Этот последний пункт имеет особое значение и является объектом ряда стандартов, касающихся спецификаций, и аттестации процедур сварки, к которым мы еще вернемся.

14.2.3.2. Персонал, отвечающий за сварку и проверку

Выражение «персонал, отвечающий за сварку» традиционно относится к сварщикам, занимающимся ручной сваркой, и операторам, выполняющим автоматические или полуавтоматические процессы. Для каждой из этих категорий указано, что они должны быть аттестованы подходящим испытанием, определенным в серии стандартов EN 287, касающихся сварщиков, или EN 1418, касающихся операторов. Здесь нет ничего нового,

кроме того, что используется только один аттестационный уровень по сравнению с тремя уровнями, которые указаны в бывшем французском стандарте NF A 88-110. Один из аргументов, выдвинутых для обоснования этой позиции, заключался в том, что квалификационные испытания обычно проводятся в оптимальных условиях, позволяющих получить наилучшие уровни качества; кроме того, для других уровней потребность в квалификации остается проблемой.

В дополнение к категориям персонала, определенным выше, пункт 7.3 ISO 3834, часть 2, вводит понятие «персонал по координации сварки», определяемый в соответствии с тремя уровнями технических знаний в стандарте ИСО 14731 «Координация в сварке - задачи и обязанности». Эта функция была подробно разработана в упомянутом выше отчете (ISO/ TR 3834-6), поскольку она бесступенчата и может выполняться разными людьми: инженером-сварщиком, технологом по сварке, руководителем производства, мастером и т. д. Транскрипция EN 719 в стандарт ISO, эта концепция встретила определенную сложность из-за неоднозначности стандарта, которая может означать, что необходима сертификация третьей стороной. Это неверно, и мы отсылаем читателей к вышеупомянутому отчету, который содержит все необходимые объяснения.

Совсем другое дело для персонала, ответственного за проведение неразрушающего контроля, для которого необходима сертификация в соответствии со стандартом EN 473 «Квалификация и сертификация персонала по неразрушающему контролю - общие принципы». Напомним, что эта сертификация состоит из трех уровней и присуждается в соответствии с используемой техникой исследования: ультразвуковым, рентгенографическим, магнитными частицами или проверкой герметичности методом проникающего красителя. Французской сертифицирующей организацией является SOFREND, Французская конфедерация по неразрушающему контролю; для таких органов уже существуют двусторонние соглашения о взаимном признании, и была создана европейская организация.

14.2.3.3. Осмотр, экспертиза и испытания

Требования к качеству, относящиеся к осмотру, экспертизе и испытаниям, зависят главным образом от хорошей эксплуатации технологии сварки. Перед сваркой желательно определить используемые продукты, исходные материалы и сварочные материалы, проверить достоверность квалификаций, подготовку соединений и т. д. Во время сварки наиболее важны параметры сварки, температуры и т. д.; после сварки следует проводить проверку размеров и неразрушающий контроль.

Серия стандартов, касающиеся последних, имеет определяющее значение, в то время как их структура была предметом тщательного анализа и заслуживает особого пояснения.

14.3. Стандарты для аттестации сварочных работ

Стандарты для аттестации технологии сварки являются одними из старейших, опубликованных CEN/TC 121, особенно в отношении ручной дуговой сварки сталей и алюминиевых сплавов. Четыре части явились началом серии стандартов EN 288 «Спецификация и аттестация процедур сварки металлических материалов»:

- Часть 1: Общие положения для сварки плавлением.
- Часть 2: Спецификация технологии сварки для дуговой сварки.

- Часть 3: Испытание на выполнимость сварного шва для дуговой сварки сталей.
- Часть 4: Испытание на выполнимость сварного шва для дуговой сварки алюминия и его сплавов.

Их публикация не вызвали коренной перестройки, по сравнению с практиками того времени; таким образом, часть 3 не сильно отличается от французского стандарта NF A 89-010, за исключением некоторых конкретных моментов, например, определения полей достоверности или способов отпечатки. Общим правилом оставался выбор между «нет аттестации» или «аттестация по испытанию».

С течением времени и по мере продвижения работ по стандартизации появились дополнительные части, описывающие новые методы аттестации: использование расходных материалов, подвергнутых испытаниям, ссылки на опыт, ссылки на стандартную процедуру сварки, выполнение конкретного сварного соединения до производства, так далее.; общая философия, основанная на благородном намерении, состоит в том, чтобы предложить целый ряд возможностей, позволяющих выбрать наиболее экономичное и технически подходящее решение.

К этому аспекту проблемы, который можно считать преодолимым, был добавлен вопрос о распространении стандартов на другие сварочные процессы (газовая сварка, электронно-лучевая сварка, лазерная сварка, контактная сварка и т. д.), а также на другие металлы (стальные или алюминиевые отливки, никель, титан, цирконий, медь и т. д.). Применение каждой из этих переменных к различным возможностям, предлагаемым дуговой сваркой на стальном или алюминиевом светодиоде, не только в соответствии с EN 288, включающим около 50 деталей, но также и в совершенно независимых стандартах, которые разнообразны по количеству. Само собой разумеется, что пользователь был бы полностью потерян.

Поиск практического решения в сочетании с тем фактом, что пересмотр позволил предусмотреть публикацию этих стандартов на международном уровне, привел к полной переработке системы с общей структурой, определенной в таблице 14.1. Основная цель заключалась в том, чтобы максимально сократить количество документов за счет расширения общих частей. В дополнение к этому был составлен технический отчет о создании системы группирования металлических материалов, пригодной для всех сварочных работ; практическая цель состояла в том, чтобы получить поля достоверности, общие для всех квалификаций, таким образом избегая существующих расхождений, например, между сварщиками и процедурами сварки

Таблица 14.1. Организация стандартов, касающихся аттестации технологии сварки

Процесс	Дуговая сварка	Газовая сварка	Электронный луч	Лазерная сварка	Сварка сопротивлением	Приварка штырей	Сварка трением
Общие правила	EN ISO 15607						
Группировка материалов	CR 15608					EN ISO 14555	EN ISO 15620
Спецификация технологии сварки (WPS)	EN ISO 15609-1	EN ISO 15609-2	EN ISO 15609-3	EN ISO 15609-4	EN ISO 15609-5		
Протестированный сварочный материал	EN ISO 15610						
Предыдущий опыт сварки	EN ISO 15611						
Технология нормального сварного шва	EN ISO 15612						
Предварительное испытание на свариваемость	EN ISO 15613						
Испытание на выполнимость сварного шва	EN ISO 15614 - 1: Сталь/Никель - 2: Al/Mg - 3: Литая сталь - 4: Литой Al - 5: Ti/Zr - 6: Медь - 7: Наплавка - 8: Соединение труб с трубой - 9: Дуговая подводная гипербарическая мокрая сварка - 10: Гипербарическая сварка сухим способом		EN ISO 15614 - 11 Сварка электронным или лазерным лучом		EN ISO 15614 - 12 Сварка сопротивлением		

Анализ таблицы выше подчеркивает следующие данные:

- ко всем процессам применяются общие правила,
- только приварка штырей и сварка трением не соответствуют общей схеме, и это учитывает их специфику,
- системы группирования металлических материалов являются общепринятыми для всех других процессов (дуговая сварка, газовая сварка, электронно-лучевая сварка, лазерная сварка, контактная сварка),
- способы аттестации по использованию испытанных сварочных материалов; ссылаясь на предыдущий опыт сварки, путем принятия стандартной процедуры сварки, выполнения специального сварного соединения до производства, также являются общими для этих же процессов. Это означает, что можно применять тот же тип процедуры,
- в отношении испытания на выполнимость сварного шва были произведены перегруппировки, включающие дуговую сварку и газовую сварку, с одной стороны, и электронный луч и лазерную сварку, с другой стороны. Это означает, что одни и те же виды испытания используются и интерпретируются в соответствии с одними и теми же методами,

– однако, и это вполне нормально, требования, касающиеся спецификаций процедуры сварки (WPS), являются специфическими для каждого процесса.

Несмотря на все эти усилия по упрощению, конечный результат все еще кажется недоступным и довольно затруднительным в использовании. Его не обязательно использовать на практике, при условии предоставления точных подробностей относительно потенциальных областей применения различных методов определения характеристик для сварочных процедур, а также их пределов.

Остаются вопросы, в частности, касающиеся аттестации процедур, основанных на испытанных сварочных материалах. На них можно ответить, пояснив, что методы утверждения сварочных расходных материалов в настоящее время охватываются европейским стандартом EN 13479 «Сварочные расходные материалы: общий стандарт для присадочных металлов и флюсов для сварки плавлением металлических материалов», разработанным в соответствии с «Европейской директивой по строительной продукции». Кроме того, эти методы могут быть согласованы между заказчиком и поставщиком.

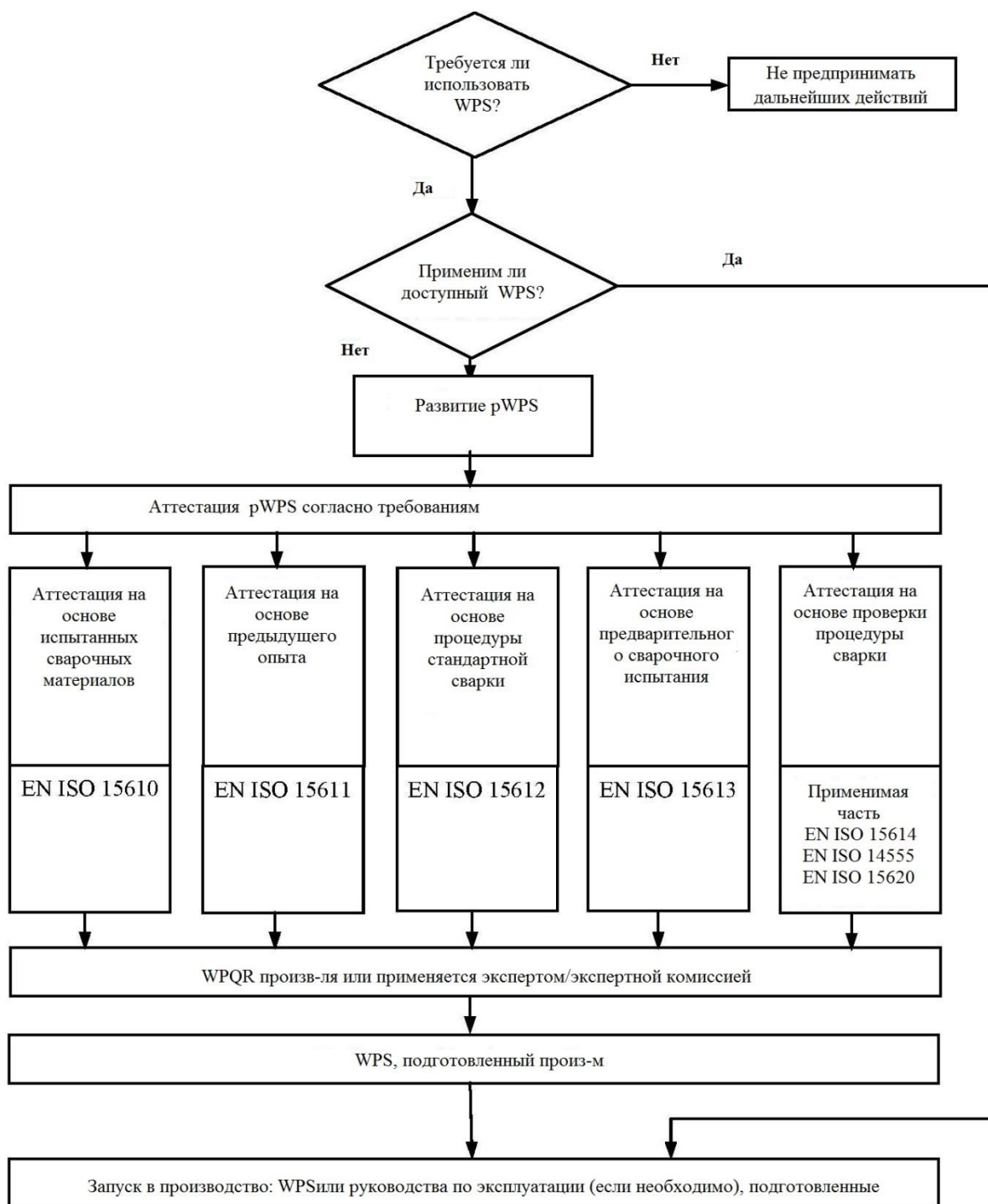


Рисунок 14.2. Технологическая схема процесса аттестации сварочного процесса

- WPS: Спецификация технологии сварки
- WP: Способ сварки
- pWPS: Предварительная технологическая карта сварки
- WPQR: Акт аттестации метода сварки

Несомненно, каждой стороне – и клиенту, и поставщику - потребуется некоторое время, чтобы в полной мере воспользоваться возможностями, предлагаемыми рядом решений и преимуществами, которые дает это открытие (учитывающее производственную практику), а затем выбрать наиболее подходящее решение из полной картины фактов.

Стандарт EN ISO 15607, касающийся общих правил, содержит приложения, в которых содержатся точные необходимые данные. В равной степени он описывает ход процедуры, в частности, используя диаграмму, такую как на Рисунке 14.2, что позволяет задавать соответствующие вопросы в подходящее время.

14.4. Стандарты неразрушающего контроля

Для неразрушающего контроля, который является последним аспектом организации по обеспечению качества, даже если этого недостаточно для обеспечения определенного уровня качества, хотя это, тем не менее, является определяющим фактором для принятия сварной конструкции или устройства. За последние несколько лет он также стал объектом значительного объема работ по стандартизации, общая концепция которых значительно изменилась.

Стандарты, касающиеся требований к качеству сварки плавлением (серия EN ISO 3834), содержат только ссылки на применяемые стандарты EN или ISO. Таким образом, здесь удобно развивать принципы, определяющие их развитие.

Давайте прежде всего отметим текущую практику. Например, для стальной конструкции французский стандарт NF P 22-471 «Металлоконструкция: выполнение сварных соединений» описывает и определяет три класса дефектов, которые могут встречаться в сварных швах. Кроме того, в нем указаны пределы неразрушающего контроля: до 40 мм для рентгенографии, от 20 мм для ультразвукового исследования. Наконец, он представляет для каждого метода, с точки зрения уровней индикации, допустимые дефекты в соответствии со степенью требуемого качества.

Эта презентация предлагает неоспоримое преимущество, а именно то, что она собирает только в одном документе всю информацию, необходимую пользователю. С другой стороны, у него есть некоторые недостатки:

- классы дефектов, вероятно, будут определены по-разному в зависимости от применения (стальная конструкция, сосуды под давлением и т. д.), тогда как технология изготовления аналогична,
- эксплуатационные пределы различных методов являются фиксированными (если не происходит пересмотра стандарта), тогда как в действительности достигнут прогресс или различные факторы склоняются в пользу конкретного метода,
- способы толкования показаний к применению развиваются, зачастую становясь все более сложными.

Такая практика может быть разрешена на национальном уровне, если в течение многих лет сосуществуют некоторые руководства, содержащие идентичные или похожие спецификации (CODAP для сосудов под давлением, стандарты металлоконструкций и т. д.). На европейском уровне это менее полезно, поскольку целью является свобода передвижения товаров и людей путем устранения технико-экономических барьеров для обмена.

Это происходит путем гармонизации технических спецификаций и, в отношении сварки, «горизонтального» подхода, независимого от областей применения, который происходит следующим образом:

- разработка единой системы отсчета для описания и определения классов дефектов,
- определение режимов исполнения для каждого метода, а также их пределов действия, а

также указание того, в какой момент указание можно считать значимым или нет,

- интерпретация уровней индикации для каждого метода, которые он предоставляет со ссылкой на базовый класс дефектов.

Такая структура предоставляет в распоряжение пользователей инструмент, в частности, членов технического комитета, отвечающих за разработку европейских стандартов исполнения (CEN/TC 54 для сосудов под давлением, CEN/TC 135 для стальных конструкций).

Все эти работы по стандартизации контролируются стандартом EN ISO 5817 «Сварка: сварные соединения плавлением в стали, никеле, титане и их сплавах - уровни качества для дефектов», который описывает и определяет, в порядке уменьшения важность три класса дефектов: В, С и D. Он представляет собой систему отсчета, на которую могут ссылаться специалисты по неразрушающему контролю и конечные пользователи, уровень качества, адаптированный к каждому случаю, определяется в стандарте приложения или разработчиком, ответственным за связь с производителем, пользователем и/или другими заинтересованными сторонами. Существует эквивалентный стандарт для сборки из алюминиевого сплава, EN ISO 10042.

Итак, найдем стандарт EN 12062 «Неразрушающая дефектоскопия сварных швов: общие положения для металлических материалов». Анализ, представленный на первой странице, гласит, что этот стандарт *«дает указания по выбору неразрушающих методов испытания для проверки сварных швов и оценки результатов для контроля качества. В нем также указываются общие правила и стандарты, применяемые к различным типам экспертизы, как для методологии, так и для приемочных уровней металлических материалов»*. Можно посчитать неудачным использование термина «приемочные уровни», поскольку он подразумевает определенную неоднозначность, смешивая две концепции: классификацию и концепцию качественной оценки, причем второй вопрос является предметом спора, поскольку критерии приемки не могут быть единообразными для всех областей применения и должны оставаться обязанностью пользователей; на самом деле, речь может идти только о «переносе» указаний в терминах в соответствии с методом, используемым для классов, определенных в ISO 5817: это можно назвать методом передаточной функции. Затем приводятся подробности, касающиеся как метода, так и его пределов применимости, а также «приемочных уровней» в стандартах, характерных для каждого метода.

Таким образом, рассматриваются шесть различных методов исследования: визуальный, проникающий, магнитные частицы, вихретоковый, радиографический и ультразвуковой. Структуру системы схематично можно показать на Рисунке 14.3.

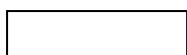




Рисунок 14.3. Структура стандартов НРК

Что касается стандартов, касающихся аттестации процедуры сварки, устройство может показаться сложным, но оно отвечает определенной логике, которая соответствует реальности на местах.

Проектировщик или изготовитель, ответственный за проект или сооружение, должен знать природу и размер дефектов, допустимых при его строительстве и, в общем, не может предвосхищать методы неразрушающего контроля, которые будут использоваться. В предложенной системе его единственной заботой будет выбор допустимого класса дефектов со ссылкой на основную систему отсчета, EN ISO 5817 или ISO 10042.

Кроме того, независимость стандартов в отношении классов дефектов и характера производимых конструкций или оборудования позволяет им развиваться в соответствии с прогрессом в методах, не влияя на основную систему отсчета или процедурные стандарты. Таким образом, у нас есть последовательная и прогрессивная система.

Однако эта область все еще требует определенного периода адаптации. Разумеется, вызывает сожаление рассеяние пунктов в различных документах и утрата окончательной общей картины, как это сегодня наблюдается в кодексах или специфичных стандартах. Задача европейских технических комитетов, отвечающих за процессуальные нормы, теперь состоит в том, чтобы принять во внимание эту полную группу концепций и, насколько это возможно, направить пользователя в их применении.

14.5. Заключение

Презентация и анализ документации, такой как стандарты, особенно те, которые охватывают сложные темы как с технической, так и с организационной точек зрения, никогда не бывает легким делом. Ситуация осложняется тем, что она постоянно развивается. Многие стандарты, разработанные на европейском уровне, были вновь приняты на международном уровне с техническими изменениями, а также изменениями в презентации. Другие последуют его примеру в ближайшем будущем, и это требует внимания каждую минуту.

Следует помнить, что сварка представляет собой горизонтальную технику с множеством применений, что процессы и методы находятся в непрерывном развитии, а также становятся

все более сложными, и, наконец, международная конкуренция может проходить нормально только при наличии справочных текстов, составленных из обобщения большинства, и используется в качестве основы для договоров.

В данной связи промышленники, участвующие в сварном строительстве, в сотрудничестве с заинтересованными клиентами и партнерами, оснащаются с помощью комитетов по стандартизации приспособлениями, позволяющими им достигать удовлетворительных результатов, как с точки зрения экономики, так и уровня качества. Для некоторых это означает изменение практики, даже культуры, но в долгосрочной перспективе это принесет пользу всем.

Список авторов

Régis BLONDEAU
Ecole nationale supérieure des mines de Saint-
Etienne
Франция

Christian BONNET Air Liquide/CTAS Saint-
Ouen-l'Aumône Франция

Jean-Henri BERGEOT
CTICM
St-Rémy-lès-Chevreuse Франция

Marc BOUSSEAU
DCN-Indret Nantes Франция

Abdelkrim CHEHAÏBOU Institut de soudure
Metz Франция

Joël CLAEYS Arcelor Mittal Dunkirk
Франция

Michel COURBIÈRE Pechiney Alcan Voreppe
Франция

Yves DESALOS
Renault Guyancourt Франция

Olivier DIERAERT Arcelor Mittal Dunkirk
Франция

Léon DUNAND-ROUX
Areva NP
Chalon-sur-Saône Франция

François FAURE Areva NP
Paris Франция

Jean-Paul GOURMELON Honorary “Ponts et
chaussées” civil engineer general
Nantes Франция

Jean-Claude GOUSSAIN Institut de soudure
Metz
Франция

Dominique KAPLAN Arcelor Mittal
Париж
Франция

Henri-Paul LIEURADE
CETIM
Senlis Франция

Guy MURRY
Ingénieur conseil Clermont-Ferrand Франция

Jean-Louis MOIRON Ugine SA
Gueugnon Франция

Jean-Pierre PESCATORE CTICM
St-Rémy-lès-Chevreuse Франция

Gérard PRADERE Renault Guyancourt
Франция

Gilles RIGAUT Arcelor Mittal Dunkirk
Франция

Pascal VERRIER Arcelor Mittal Dunkirk

Алфавитный указатель

ЕС ИСО, 424

Mn-Ni-Mo, 328,332,335

А

Автоматическая сварка, 196,381

азот, 16,30,42,57,68-70,75,80,118,131,137-139,151,152,162,165-168,173,176,181,232,273,355,361,365-368,391

активный газ (MAG), 27,29,168,170,266

алюминий, 19,37,71,93,131,152,266,269,291,393

аргон, 19,21,27,29,30,57,83,165-172,181,196,265-269,284,365,379,381-384

атмосфера, 130

аустенит, 57,70,71,101-111,119,131,133,136-138,142,143,148,176,177,234,235,279,280,345-348,364-372

Аустенитно-ферритные нержавеющие, 330,355,366,371

аустенитные нержавеющие, 66,231,329,331,361,362,371,373,

ацетилен, 18

Б

без разрушения

бейнит, 106-107, 112,116,117,135-137,278

бериллий,

Бистрама, 354,358,360-366,370

бор, 118,138,139

Боротитановый эффект,

В

ванадий, 118,131,138

величина коэффициента напряжения, 200

включения, 103,110,114,130-138,157,164,172,177,186,194,275,276,348,364,

влажность, 159-164

водонепроницаемость, 79,255,342,

водород, 16-26,30,65,69,70,78,79,108,110-113,116,120,145-152,156,158-169,174,176,179,181,197,232,235,273-279,294,296,315,323,354,361,365,368,373,390

военное кораблестроение,

вольфрам в атмосфере инертного газа (TIG), 29-

30,280,281,316,337,341,357,361,367,373,376, 379-385,391,392,398-399,404

Восстанавливающие элементы

вращающийся перенос, 171

вредные воздействия

высокоплотные энергетические

сварочные процессы

высокопрочная низколегированная (HSLA)

высокопрочная

высота дуги height, 374-385,404

вычисление степени усталости, 401

газовольфрамовая дуговая сварка, ГВДС (GTAW), 265

Г

гелиевое, 342

гелий, 21,27,30,41,42,57,82,166-169,181,255,379-381

Геометрическое напряжение, 202,206

горячий, 17,20,37,56,63-66,71-79,88,139,144-

149,159,174,202,206,219,242,247,250,276-

277,291,297,314,331,336,341,352,362-

365,373-396,399-401

гранулированный флюс,

графики 178,303

Д

двухфазная, 115,242,250-252,367

Делонга, 66,348-352

дефекты, 12,16,53,54,63,75-81,90,110,115,138,139,145,148,180,191-

194,211-238,256,258,275-281,286,297-

308,322-324,333-

337,352,363,375,385,388,401-404,415-417

деформации, 23,34-38,61,65,78,83,101,114-121,141,144-

149,178,187,195,202,213,215-

236,250,256,272,275,278,280-286,294,315-

328,345,356,376-388,392-401

диаметр ядра, 244

диоксид углерода,

Диффузная сварка, 281,297

допускаемое, 410

Дуга под флюсом,

дуговая сварка в защитных газах (GMAW), 39,168,181

Е

ЕС,
 З
 зажатие, 243,253,275,320,394,395
 Закись азота, 181
 Заполненный рутиловый электрод, 157
 затвердевшая структура,
 зачистка металлической щеткой,
 370,391-392
 защитный газ,
 55,56,73,82,83,165,172,176,181,183,267,365-369
 зет-сталь (Z),
 золото, 55
 зона плавления, 223
 Зона проплавления,
 зона термического воздействия (HAZ),
 64,101,109,367,379,399
 И
 излом, 116,157,221,225,323
 измельчение зерна,
 износостойкость, 272
 изотермы, 92,97
 импульсный ток, 381
 инертный газ (MIG), 280
 инициация, 132
 интегралы, 219
 Инфракрасная термография, 52,54,81
 ионизация,
 испытания 77-81,111,132,140-148,195,213-219,225-230,243,244,255,281,288,298,315,324,329,334,343,386,398,407-416
 Источники лазерного излучения,
 К
 калий,
 кальций,
 карбонаты, 25,157,162,164,175-176
 карбонитриды, 107,355
 керамический флюс,
 кислород, 16-22,27,39,63,75,77,130-137,152, 157,162-169,172,176-180,361
 клинчевание,
 коаксиальный, 56
 контактная сварка, 250,369,379,384-389,411-412
 контактное сопротивление, 32,385
 концентрация, 16,90,142,151,193,276
 корабли, 11
 короткие замыкания, 21,267
 коррозионное, 277

коррозия, 119,272,357,378-379
 коэффициент концентрации напряжения,
 коэффициент надежности,
 Коэффициент Пуассона, 219
 Крестовые соединения,
 кривая усталости S-N, 190,202-209
 кристаллизация, 101,307
 кристалличность, 218
 критерий твердости,
 критерий трещинообразования,
 Кузнечная сварка, 38
 Л
 лазерная сварка,
 69,71,86,94,222,242,257-264,388-389,411-412
 латеральный,
 легирующие элементы, 130,157,175,259
 Линейная механика разрушения,
 Линейная электроэнергия,
 листы с металлическим покрытием, 246
 листы с органическим покрытием, 246-250
 литий,
 М
 магний,
 магнитная индукционная сварка,
 магнитодинамический эффект, 21
 магнитное поле,
 Макрогеометрический эффект, 191,192
 максимальная температура, 94
 марганец, 328,348
 марганцево-молибденовая, 328
 Марганцево-углеродистая, 94
 мартенсит, 106-116,135-137,146,235,252,278,295,296,307-309,346,347,355-360,371-372
 мартенситная нержавеющая, 371
 медь, 48,77,174,247,291,411-412
 Международный Институт Сварки, МИС (IIW), 11,133,172
 межкристаллитные преципитаты,
 межслойная температура,
 Менее прочный чем основной металл
 Металлургическая трансформация,
 механическая сварка,
 механика трещинообразования,
 механические свойства 33,37,70,77,102-110,115,126,128-131,157,272,299,329,375,379,398

механические характеристики, 126-127,177,197,236,256,279,315,333,339,361,375

Микроскопическое/микрорастрескивание, 309

микроструктура, 101,107,109,115,132,164, 261,276,365,387

Многопроходная сварка, молибден, 48,126,138,142,177,266,355,364-365,371

мосты, 11,212

Н

на изгиб, 78,213,216

На основе углерода,

на растяжение, 77,115,144,149,195,198, 244,245,251-252,315

на твердость

на ударный изгиб, 213,214,225

наклейка, 244

наплавка, 37,96-97,412

натрий,

недостаточная толщина,80

неоднородный сварочный шов,

неоновый, 41

непровар, 404

нержавеющая, 19,86,93, 279,308,331-336,344,370-372

несоосность,

несплавление, 64

неточное стыкование,

Нижняя прорезь,

никель, 120,152,291,328,330, 336,348,371,411-412

ниобий, 118,131,138,355,363

нитриды, 57,103,104-107,354-355

Номинальное напряжение,189,204-206,216

О

обезжиривание, 64,290,298,371,391-392

образец для компактного растяжения (КР), 216

Обратимое повышение хрупкости,

Обратная отпускная хрупкость,

объемный, 79,223,228

одномерный тепловой поток,

озон, 180-181,,404,405

Окислительная способность, 172

оксиды, 15,103,118,294,370,371

опора сварочной ванны,

осаждение,

68,107,120,233,277,279,355,361,364,367

ослепление, 404

остаточное напряжение,

от нагрева,

отверждение, 16,308,365,375,381

отпуск, 101-120,178,278-

284,323,360,361,375,379

отражательная способность, 76,257,262,404

отслеживание шва, 54

оцинкованная, 262-269

очаговые зоны повышения хрупкости,

Очистка песком,

П

параметр охлаждения, 94-96,111

Перенос металла, 157,168-169,182,183,267

перлит, 101,128,131

плавкий, 31-32

плавленый флюс,

плазма, 17-19,54,131,181,258,265,379

плакирование, 335-341

Пластическая неустойчивость, пластичность, 114,145,150,217,230 315,320, 331,361

плоский тепловой поток,

по Баттелю,

по Пеллини, 211-216

по Шарпи, 137,213-215,315,329

по Шнадту, 213

повторно аустенитизированные зоны,

Повторный нагрев, 299

Повышение хрупкости водорода,

Повышение хрупкости, 328,357

подготовка поверхности, 391

Позиционирование кромки,

показатель щелочности,

пористость, 63,90,151,194,275,276,286, 301,302,322,382,384,390,402

порошкообразный флюс, 26

порядок наложения валика,

Последующая термообработка

Послесварочный отпуск термообработкой, 309,316,375

Превращение нулевой пластичности (NDT), 215-216

Предварительное растрескивание, 219

предварительный прогрев, 316

предел пластичности, 228

предел толщины, 97

Предел упругости, 38,120,145

предел усталости, 396
 Приварка шпилек,
 примёрзание,
 примеси, 36,141,279,293,322
 Присадочная проволока, 167,173,284,375
 присадочный металл, 18-26,279,364,376
 Продольное распыление,
 производство растворимости, 103
 проникновение, 20-49,57,80,97,139,147-
 188,239,281,316,342,381-389,401
 пропан, 18
 профиль валика,
 прочность сварки,
 путем расстегивания,
 Р
 радиография,
 разведение,
 размягчение, 115,174,178
 разъедание,
 Раковины сварного шва,
 Раскрытие вершины трещины,
 растрескивание,69,78-79,107,110-
 121,142-150,186-189,211,219,273-
 277,322,357,363, 373,389
 расплавленный металл, 15-36,63,102,
 110,119,126-132,141,142,164,167,259,
 266,269,294,386
 расслаивание стальных листов, 114
 Расчет размеров,
 расширение,
 119,213,227,231,278,308,342-343,360,392-
 396
 режим импульсной генерации,
 режимы нагрузки по усталости,
 рельефы, 54,80,267-268
 риски трещинообразования в сварных
 швах,
 111,141,150,211,225,226,274,299,323,347,3
 54-374,376,404
 рутиловые элементы,
 16,25,110,139,140,156-158,175-
 184,234,235,316
 Сборка на изгиб,
 сваренная встык стальная конструкция,
 261-263,308,380,386,388
 Сварка взрывом, 38,280,390
 сварка внахлест, 38,151,253-
 257,264,268,396,400
 сварка с удельным расходом твердых
 частиц,

сварка стали с покрытием,
 12,86,97,156,175-179,230,242,246-
 268,284,316,336-339,379
 сварка тонколистных сталей с
 покрытием,
 сварка трением, 37,275-386,412
 сварочная проволока, основная, 131
 сварочное напряжение,
 21,63,97,120,132,147,
 169,181,182,189,192,196,198,201-
 206,211,216,235,267,277,360,363,378,382-
 384,394,398,402
 Сварочный дым, 16,48,157,179-184,391
 сверхпрочная,
 связующий элемент, 156,162,164,232,285
 сегрегация примесей, 143-144
 сера, 66,143,145,232,266,364
 серебро, 55
 сигма-фаза, 355,356,364
 силикаты, 103,152,156-165,174,175
 силикон,
 Сквозное проплавление,
 36,257,276,288,401
 скорость нагревания,
 скорость нагружения,
 скорость охлаждения,
 70,79,96,117,131,234, 265,324,364-367
 скорость проволоки,
 скорость сварки, 26,29,63,80,141-
 143,150,167,255,259,264-269,333,380-384,
 389,404
 Следовые элементы,
 смачивающая способность
 расплавленного металла, 128,145,150-
 175,276,280,379,391-392
 снятие напряжения, 120,177,360
 Совет по исследованиям в области
 сварочных работ 1992 г. (WRC92), 348
 сопла, 326,331,341
 Состояние естественного отверждения,
 Сосуды под давлением,
 212,214,228,277,310,327-338,340-
 350,374,406,415-416
 стали
 стандарты
 79,81,84,113,156,177,186,219,273,374,406-
 417
 старение после наклепа, 101,138,327
 Статическое напряжение,
 185,274,214,376
 Статическое сопротивление, 190,249,398

строительная, 116,178,209,312-315,327,334,342,413
 Структурное упрочнение, 77
 Стыковая сварка оплавлением, 35,36,385
 стыковая сварка, 35,36,292,294,309,385,397
 Судна типа «Либерти», 11
 сульфиды, 103,114,233,276,277
 сцепление,
 Т
 твердое вещество, 140
 Твердость усиления с обратной стороны шва при полном проплавлении underbeadhardness, 106-107,115-116,128,270,278,298,357
 твердые сплавы,
 твердый раствор, 101,106
 температура между проходами, 128,148,235,375
 температура перехода из пластичного состояния в хрупкое, 213-225
 Тепловая таблица данных,
 тепловое уравнение,
 тепловой поток
 теплоотвод, 91-98
 теплопроводность, 33,71,76,90-92,166,262,379,385,392-393
 теплотворная способность,
 Теплотворность по объему, 91
 термитная сварка, 32
 термический КПД, 97
 термический циклы/циклы, 90,102,269
 термодиффузия,
 термокинетические диаграммы,
 титан, 25,40,57,65,74,75,80,86,104,118,131,134,138,139,152,157,176,177,231-235,269,279,354,355,363,411,416
 Т-образные швы,
 тонколистовая сталь с покрытием, 12,86,97,242,246,247,251,256,262-268,284,336
 точечная сварка вкрест с раздавливанием, 253,255
 точечная сварка, 33,242,243,248,253,255,273,274
 трехосность напряжений, 115
 трещинообразование
 Трещинообразующее смещение, 103,115,194,220,260
 трибология фрикционных поверхностей,

у
 углерод, 12-22,69,78,79,94,106-118,128,131, 142,148,152,172,173,232,233,261,273,277-279,283,289,299,328,329,337,348,353-363
 углеродистое железо,
 Углерод-марганцевые,
 Углеродный эквивалент, 274
 Угловые швы без полного проплавления, 205
 Углы стыковки,
 Ударная прочность,
 ударные, 118,164,218,225
 Ультразвуковая сварка, 38,280,390
 упрочнение наклёпом,
 Упругопластичный излом,
 усадка, 141,277,278,299,320,393,395,396-398
 усталостная долговечность,
 усталостная прочность, 119,185-200,277,401,402
 усталостный излом, 323
 усталость, 185,204,211,299
 устойчивость горения дуги, 27-30
 Ф
 феррит, 70,101-107,116-128,134-143,176,177, 183,332,346-372
 Ферритные нержавеющие стали, 68-70
 флюс, 16-32,38,95-100,110,128,132,139,142,151,160-166,196,281,316,331-337,368,413
 фосфор, 66,67,77,79,118,142,143,232,277,299,328,364
 Функциональная свариваемость,
 Х
 холодный, 12,35,65,69,70, 78,79,90,107-120,139,145-148,158,160,167,169,174,269,274-279,286,291,309,315,322,324,335,337-357,360,371,373,381,404
 хром, 68,126,142,143,152,179,180,262,266,277,279,330,336,344,348,353-365,371,388,391
 Хром-молибденовые Cr-Mo, 120
 хрупкий излом,
 Ц-Ч
 цезий,
 цинк, 83,97,151,172,242,247,264-269,388
 циркон 30,40,57,63,65,75,76,411
 чистка наплавленных валиков,
 Ш

шаровой перенос, 19-
 28,45,88,148,157,160-183,219,267-
 271,337,381,382,416
 шарообразный,
 Швы с подрезом,
 шестивалентный,
 шлак, 16-17,21-32,100,156-
 162,172,194,280,281
 шовная сварка,242,252,385
 Шэффлер/Бистрама, 66,143,278,348-367
 Шэффлера, 66,143,278
 Э
 Эвтектическое образование,
 электрическая сварка сопротивлением,
 33-35,100,280,384-389,412
 Электрод повышенной прочности,
 электродуговая сварка, 281,335
 электроды, 25,27,33,43,90,156-
 160,179,183,
 197,245,250,323,337,356,357,368
 Электролитическое цинковое покрытие,
 242,246,264
 Электроннолучевая сварка, 97,309
 электропроводность, 33,166,376
 электрошлаковый,
 энергия сварки, 97,128,129,147,149,270,
 354,357,381-384,404
 Эспи, 348-352,367
 Эффект Джоуля, 17-36,253