

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

стр.

1. Справочник	2
2. Введение. Марки стали, производимые SSAB Oxelosund AB	2

ОСНОВНЫЕ ИНСТРУКЦИИ ПО СВАРКЕ

1. Факторы, определяющие качество сварки	4
2. Водородное растрескивание	5
2.1 Источники водорода	6
2.2 Высокие растягивающие напряжения	6
2.3 Химический состав	7
2.4 Предупреждение водородных трещин	8
2.5 Обнаружение водородных трещин	15
2.6 Что делать с водородными трещинами?	15
2.7 Предупреждение водородных трещин	16
3. Другие типы дефектов швов, относящиеся к основному металлу	17
4. Сварка	18
4.1 Ударная вязкость ЗТВ	18
4.2 Твердость ЗТВ	27
5. Термообработка после сварки (PWHT)	30

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ШВОВ

1. Снижение деформаций сварки и остаточных напряжений	31
2. Физические предпосылки	31
3. Уменьшение деформаций и остаточных напряжений сварки	31
4. Местоположение точек начала и остановок сварного шва	33

СНЯТИЕ УСТАЛОСТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ

1. Физические предпосылки усталостных трещин, методы и рекомендации к их устранению	34
2. Физические предпосылки	34
3. Снятие усталостных напряжений сварных изделий	37
3.1 Улучшение проекта конструкции сварного изделия	38
3.2 Обработка сварных изделий	39

НАПЛАВКА ТВЕРДЫМ СПЛАВОМ

1. Сопротивление конструкций износу	42
2. Типы износа	42
3. Наплавка твердым сплавом HARDOX-стали	42

ИСПРАВЛЕНИЕ СВАРКИ И ДУГОВАЯ СТРОЖКА (поверхностная резка)

1. Общие положения	44
2. Процесс восстановления и исправления сварных швов	44

НЕРАЗРУШАЮЩИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

1. Общие положения	45
2. Методы NDT	45
2.1 Визуальный контроль	45
2.2 Капиллярная дефектоскопия	45
2.3 Магнитопорошковая дефектоскопия, МРТ	47
2.4 Ультразвуковой контроль	48

ВВЕДЕНИЕ

Во введении освещены основные моменты справочника по сварке и коротко представлены стали, производимые исключительно SSAB Oxelosund.

1. СПРАВОЧНИК.

Цель настоящего справочника — обеспечить компании, использующие в своем производстве стали, изготовленные SSAB Oxelosund AB, исчерпывающей информацией, рекомендациями и советами по сварке. Справочник преследует в какой-то степени и популярно-образовательную цель для того, чтобы предлагаемые рекомендации были понятны и приемлемы.

Информационный материал и рекомендации по сварке, данные в справочнике, относятся, к октябрю 1992 г. Справочник будет изменяться с развитием производства стали компанией SSAB Oxelosund AB и обретением новых и дополнительных знаний. Позже будут добавлены новые главы.

Настоящий справочник состоит из семи отдельных глав, каждая имеет номера рисунков, таблиц, указывающие на принадлежность к разделу данной главы.

Главы **ОСНОВНЫЕ ИНСТРУКЦИИ ПО СВАРКЕ** и **НАПЛАВКА ТВЕРДЫМ СПЛАВОМ** включают инструкции, относящиеся только к сталим, производимым исключительно SSAB Oxelosund AB. Остальные главы применяются ко всем сталим, содержащим углерод и марганец.

2. ВВЕДЕНИЕ. Марки стали, производимые SSAB Oxelosund AB

SSAB Oxelosund AB производит толстолистовой прокат. Многие марки стали производятся в соответствии с большинством национальных и международных стандартов, например St52-3. Кроме того, выпускаются фирменные марки стали, производимые исключительно SSAB Oxelosund AB.

Фирменные марки стали имеют определенный химический состав и производятся

по специальной технологии. В результате этого фирменные стали обладают узким разбросом механических свойств. Фирменными марками стали нашей компании являются WELDOX и HARDOX.

Кроме того, мы производим обычную нормализованную низкоуглеродистую (MS) и твердую (HS) конструкционную сталь и сталь для изготовления резервуаров высокого давления, например, ОХ 520.

WELDOX — конструкционные стали или стали для изготовления резервуаров высокого давления, HARDOX — износостойкие стали. На рис. 2а показаны механические свойства и твердость наших сталей. Сталь марок «WELDOX» различается по величине предела текучести; сталь марок «HARDOX» различается по величине твердости по Бринеллю.

WELDOX-стали поставляются после термомеханической обработки (ТМ-стали) или после закалки и отпуска (QT-стали, структура — мартенсит отпуска). Все WELDOX-стали имеют простой химический состав (незначительное общее количество легирующих добавок) и **обеспечивают высокую свариваемость** при высоком уровне прочности.

С металлической точки зрения нормализованные стали и стали после термомеханической обработки по свойствам очень близки друг к другу. На рис. 2б показана микроструктура ферритной стали. Разница между двумя типами стали :

— прочность и ударная вязкость ТМ-стали обеспечивается оптимальным использованием процедуры горячей прокатки и охлаждения;

— прочность и ударная вязкость нормализованных сталей достигается более высоким содержанием легирующих элементов и последующей за прокаткой нормализующей термообработкой.

HARDOX-стали — закаленные мартенситные износостойкие стали. Микроструктура мартенситной стали показана на рис. 2с.

Свойства сталей Oxelosund

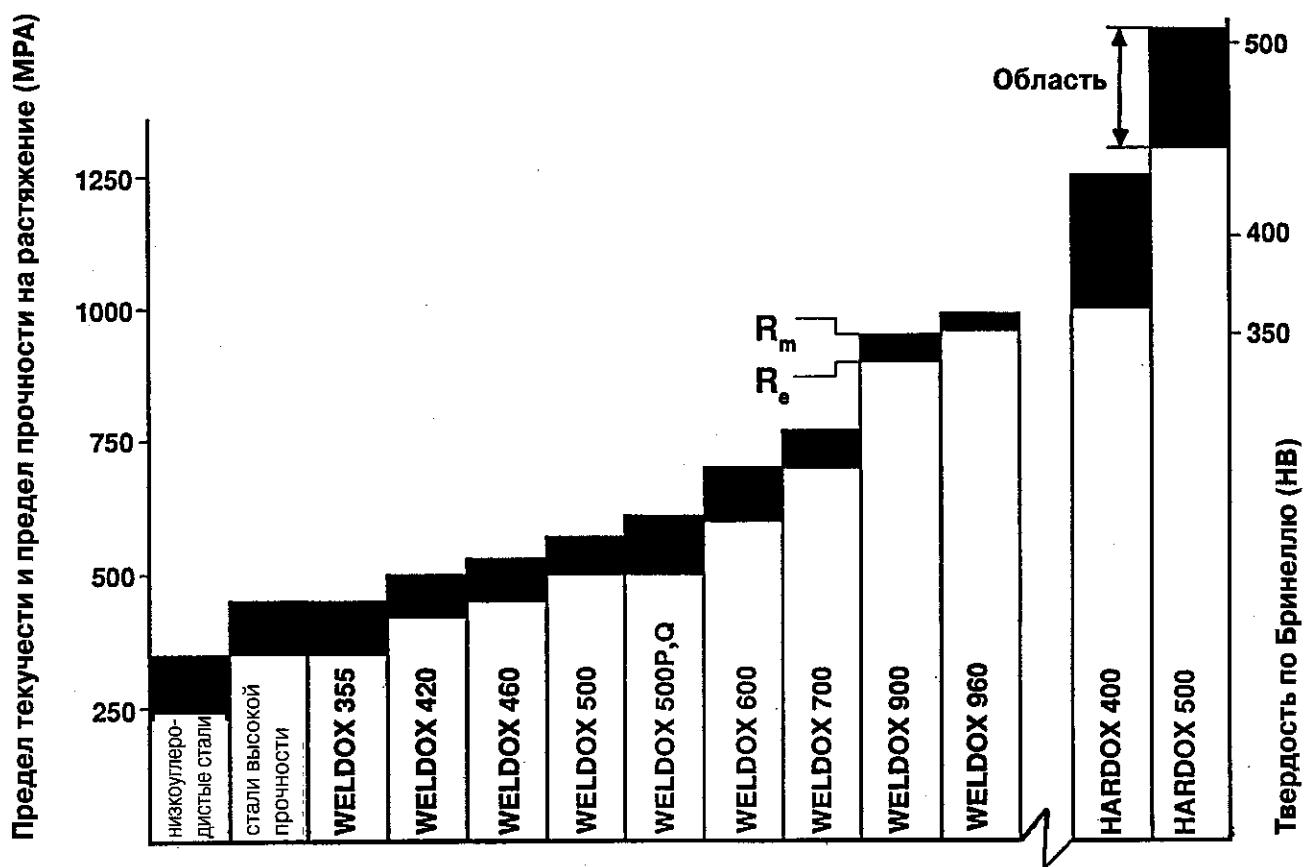


Рис. 2а Механические свойства WELDOX-сталей. Твердость HARDOX-сталей.

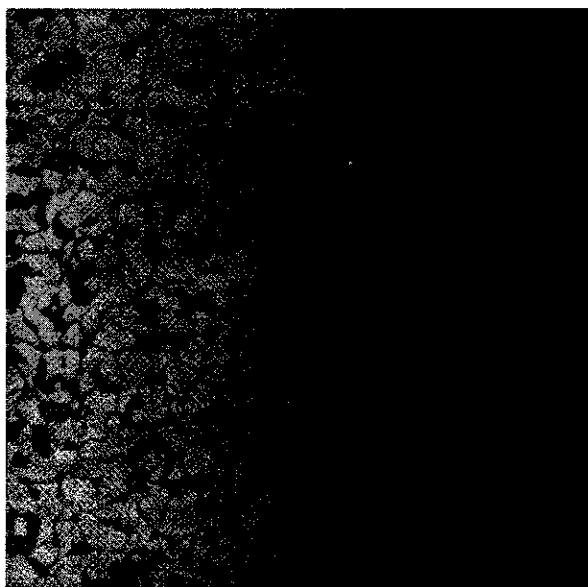


Рис. 2б Микроструктура ферритной стали. Нормализованные и горячекатанные стали и ферритные стали. Темные участки на рисунке — перлит; светлые — феррит.

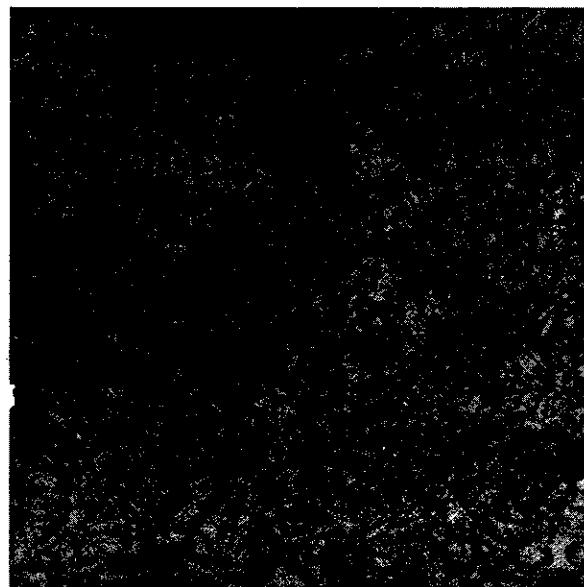


Рис. 2с Микроструктура мартенситной стали. Закаленные стали и закаленные и отпущеные стали — мартенситная структура.

ОСНОВНЫЕ ИНСТРУКЦИИ ПО СВАРКЕ

В этой главе даны основные инструкции по сварке специально для сталей, производимых SSAB Oxelosund AB. Объясняется, что такое водородные трещины и показан способ их предупреждения. Даны рекомендации по предварительному подогреву и областям соответствующего подогрева для получения желаемых ударной вязкости и твердости в зоне термического влияния. Даны инструкции по термообработке после сварки.

1. ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ КАЧЕСТВО СВАРКИ

Качество сварных соединений определяется свойствами основного металла и сварочного материала, геометриейстыка (соединения), мастерством сварщиков и условиями сварочного оборудования. В несколько грубо представлении эти факторы суммируются на рис. 1.

— Водородное (холодное) растрескивание в ЗТВ — только потенциальный тип дефекта, который может возникнуть в сварном соединении.

— Сварка WELDOX-сталей не отличается от сварки обычных (традиционных) конструкционных сталей.

— WELDOX-стали сочетают отличную свариваемость и высокую прочность.

— Излишняя термообработка после сварки WELDOX-сталей не рекомендуется.

— Стали, производимые SSAB Oxelosund AB обеспечивают отличную свариваемость.

— Сварка HARDOX-сталей несколько отличается от сварки обычных сталей.

— Цель разработки HARDOX-сталей — достижение хорошей свариваемости и простого химического состава. Однако, для HARDOX 500 и для листов большой толщины следует уделить внимание риску появления водородных трещин.

— Стали марок HARDOX не следует нагревать выше температуры 250 °C.

— HARDOX-стали имеют значительно более высокую прочность, чем конструкционные стали. Основные пластические деформации в сварном соединении возникают, следовательно, в сварном шве.



Рис. 1 Факторы, влияющие на качество сварных соединений.

— Стальм HARDOX 500 и толстым листам HARDOX 400 свойственны высокие остаточные напряжения. Эти напряжения делают их, в сравнении с конструкционными стальми, расположеннымими к развитию трещин в сварном соединении и проникновению их в лист.

— HARDOX-стали не могут подвергаться термообработке после сварки, т.к. это может привести к значительному уменьшению твердости.

2. ВОДОРОДНОЕ РАСТРЕСКИВАНИЕ

Водородное растрескивание известно также как холодное растрескивание. Холодное растрескивание происходит, когда изделие остыло или, иногда, когда изделие остывает до температуры окружающей среды. Водородное растрескивание связано с наличием водорода в сварном шве.

Водородное растрескивание может произойти и проявляется в сварном шве также как и в зоне термического влияния. Так как полное растрескивание происходит обычно в течение 48 часов по окончании сварки, то инспекция должна быть проведена по истечении этого времени.

Водородные трещины распространяются в поперечном направлении и в направлении действия самых больших растягивающих напряжений. Следовательно, они обычно распространяются в поперечном или продольном направлении относительно сварного соединения. Самые высокие напряжения материала большей частью распространяются в поперечном направлении.

Водородные трещины могут разрушить поверхность листа или оказаться под поверхностью. На рис.2 показаны наиболее общие типы водородных трещин.

Механизм появления водородных трещин не известен во всех деталях. Следовательно, различные стандарты и различные эксперты могут дать и различные советы по избежанию их появления.

Три предварительные причины водородного трещинообразования:

- 1) наличие водорода;
- 2) высокие растягивающие напряжения;
- 3) достаточно высокое содержание легирующих элементов в стали или сварочном материале (высокий углеродный эквивалент).

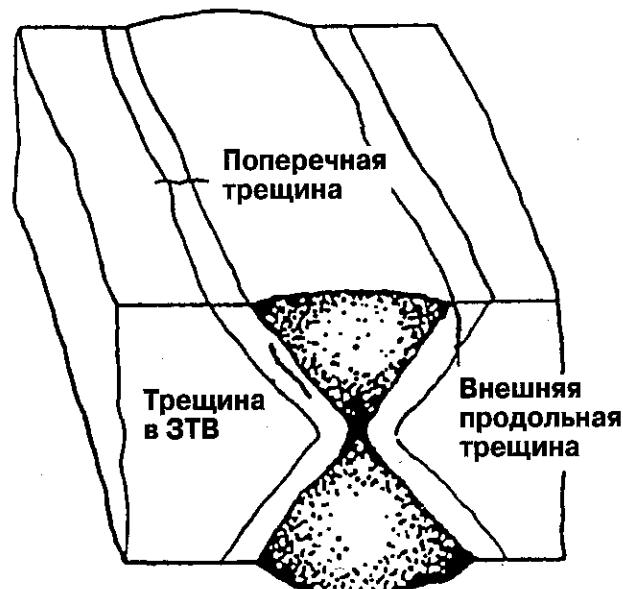


Рис 2. Водородные трещины в ЗТВ при угловой и стыковой сварке.

2.1 Источники водорода

Во время сварки неизбежно присутствует какое-то количество водорода. Наиболее обширные источники водорода:

- 1) испарения воды в воздухе или в защитном газе;
- 2) влажность покрытия электрода или флюса;
- 3) влажность и ржавчина в разделке шва;
- 4) легковоспламеняющиеся наложения, т.е. смазка или остатки эмульсии в разделке шва.

Некоторые из веществ, содержащих водород, например вода, разлагаются в электродуге на атомарный водород, который легко растворяется в сварочной ванне. Во время охлаждения и кристаллизации сварочной ванны растворимость атомарного водорода уменьшается. Излишнее количество водорода может повторно объединиться в газообразный водород и стать причиной пористости.

Растворимость атомарного водорода в твердом сварном шве значительно уменьшается в течение охлаждения. Избыточный атомарный водород диффундирует в воздух, в ЗТВ и в основной материал. При более высокой температуре растет скорость диффузии. В конечном итоге равновесие достигается остановкой истечения атомарного водорода.

До остановки истечения водорода в сварном соединении водородная концентрация локально может быть очень высокой — особенно в тех частях соединения, где возникают высокие растягивающие напряжения и происходит концентрация напряжений. Например, в швах прихваткой и корневых проходах. В этих областях водородные трещины могут развиваться, когда температура в сварном соединении падает приблизительно до 100 – 150 °С. Ниже этой температуры водородные трещины не развиваются.

Водородные трещины обычно появляются в течение 48 часов после сварки.

2.2 Высокие растягивающие напряжения

Напряжения возникают и развиваются в сварном соединении во время охлаждения вследствие усадки (термическая усадка, тепловое уплотнение). Развивающиеся растягивающие напряжения уравновешиваются напряжениями сжатия в других областях (на других площадях).

Приблизительное понимание распределения напряжений в сварном изделии достигается, если каждый сварной валик мысленно представить как резиновый шнур, а разделанный шов — как канавку в резиновой пластине. Резиновый шнур растягивается и закрепляется в упругом (податливом) разделанном шве. Напряжение растяжения в резиновом шнуре уравновешивается усадкой и напряжением сжатия в окружающем материале шва.

Стали марок HARDOX обладают очень высокой прочностью отчасти вследствие их высокой твердости. Следовательно, термическая усадка в сварном соединении вызывает, главным образом, упругие деформации основного материала и пластические деформации наплавленного сварного шва. Если электроды (сварочные материалы) не имеют соответствующую прочность, то это также верно и для высокопрочных закаленных и отпущеных сталей (QT-сталей), подобных стальям WELDOX 900 и выше.

Электроды с низким пределом текучести, следовательно, могут способствовать более низким напряжениям в сварном соединении, чем электроды с более высокой прочностью. Кроме того, вообще электроды с низким пределом прочности имеют лучшую пластичность, чем электроды с высоким пределом прочности. Пластичность — способность к пластическим деформациям без образования трещин. Более высокая пластичность делает наплавленный на шов металл более сопротивляющимся растрескиванию.

Уровень напряжения в сварном соединении увеличивается с увеличением сжатия, то есть упругой жесткости конфигурации шва или способности отвечать усадке (сжатию) наращиванием напряжений вместо упругих деформаций. Если термическое сжатие валика шва ограничивается во многих

направлениях, развиваются многоосевые напряжения. Многоосевые напряжения увеличивают общий уровень напряжений. Пример высокого сжатия сварных соединений — углы и коробчатые структуры. Пример низкого сжатия сварных соединений —стыковые соединения между двумя незакрепленными листами.

Вследствие концентраций напряжений уровень напряжений в сварном соединении (сварном шве) локально может оказаться в 2—3 раза выше, чем в окружающих областях. Концентрация напряжений зависит от локальной геометрии. Один пример — изменение в площади поперечного сечения, то есть переход между швом прихваткой и торцами разделки. Другой пример концентратора напряжений — геометрическая бороздка (надрез, выемка). Например, внешняя продольная бороздка углового шва.

2.3 Химический состав

Более высокое содержание легирующих элементов в стали или в материале сварного шва приводит к увеличению углеродного эквивалента. Углеродный эквивалент — мера свариваемости материала. Более высокая величина данного эквивалента указывает на склонность к водородным трещинам.

Цель создания HARDOX и WELDOX-стали — иметь насколько возможно низкий углеродный эквивалент без потери твердости или прочности. Типичные углеродные эквиваленты для наших сталей показаны в таблице 2.3.

Общее правило — стали, имеющие значение углеродного эквивалента меньше, чем 0,40 не восприимчивы к водородному трещинообразованию.

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Cu+Ni}{15}$$

$$Pcm = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn+Cu+Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B$$

Марка стали	Типичные значения СЕ* 100 и [Pcm* 100] для некоторых толщин			
	t≤20 мм	20< t ≤40 мм	40< t ≤50 мм	t>50 мм
OX 524	40 [23-24]	40 [23-24]	40 [23-24]	40 [23-24]
OX 520M	40 [24]	40-42 [24-27]	42 [27]	42 [27]
WELDOX 355	34 [17]	34 [17]	34 [17]	
WELDOX 420	36 [21]	36 [21]	36 [21]	36 [21]
WELDOX 460D	33 [17]	33 [17]	33 [17]	40-42 [23-25]
WELDOX 460E	33 [17]	33-40 [17-23]	40 [23]	40-42 [23-25]
WELDOX 500D	37 [18]	37 [18]	37 [18]	42 [25]
WELDOX 500E	37 [18]	37-42 [17-25]	42 [25]	42 [25]
WELDOX 500P, Q	38 [20]	40-42 [23-25]	40-42 [23-25]	40-42 [23-25]
WELDOX 600	37 [23]	37 [23]		
WELDOX 700D, E	37-41 [23-26]	46 [27]	46-56 [27-31]	56 [31]
WELDOX 700F	56 [31]	56 [31]	56 [31]	56 [31]
WELDOX 900	56 [31]	56 [31]	56 [31]	56 [31]
WELDOX 960	56-64 [31-33]	64 [33]	64 [33]	64 [33]
HARDOX 400	36 [23]	50-56 [28-31]	56 [31]	56-62 [31-38]
HARDOX 500	58 [37]	63 [38]	63 [38]	63 [38]

Таблица 2.3 Типичные углеродные эквиваленты для сталей, производимых SSAB Oxelosund AB (Октябрь 92) как функции толщины листа. Индексы D, E, F отвечают гарантированной ударной вязкости при -20, -40, и -60 °C соответственно; Р означает, что сталь используется для изготовления резервуаров высокого давления. Q означает, что сталь поставляется после закалки и отпуска.

2.4 Предупреждение водородных трещин

Водородное растрескивание отчасти вероятностное явление. Возможность обнаружения водородных трещин зависит от того, насколько внимательно ведется их поиск. Многие трещины безопасны при условии, что они достаточно малы и находятся в некритических зонах. Это может служить некоторым объяснением того, почему в цехах иногда игнорируют наши рекомендации — как не надо обрабатывать HARDOX-стали. И при этом получают удовлетворительное качество своих готовых изделий.

Существует тесная связь между степенью влажности электродов, химическим составом листа, сопутствующим подогревом и необходимостью предварительного подогрева. К сожалению, эта связь не установлена количественно. В настоящее время трудно представить ее какой-либо диаграммой или математическими формулами.

Стандарт BS 5135:1984 обеспечивает хорошее количественное описание этой связи. BS 5135 обеспечивает точно выраженные, простые, количественно определенные инструкции и настоятельно рекомендуется как общее руководство для сварки. Этот стандарт, однако, не разработан ни для современных закаленных и отпущеных сталей, ни для сталей, полученных термомеханической прокаткой и не применим для стали, имеющей значение СЕ выше 0,53.

Средства для предупреждения водородных трещин, обеспеченные стандартом BS 5135, контролируют содержание водорода, уровень предварительного подогрева и сопутствующий подогрев. Есть немало других средств, но их нелегко сформулировать и они не обеспечивают гарантии в работе. Все это зависит от конкретных условий. Здесь необходимы собственный опыт и интуиция.

В основном механизме холодного растрескивания нет различий между HARDOX/WELDOX-сталью и общими конструкционными сталью. Для каждой марки стали фиксируется химический состав, и остаются только два параметра, которыми можно манипулировать: содержание водорода и величина напряжений.

2.4.1 Снижение уровня напряжений в сварных изделиях

Самый простой способ добиться оптимального распределения напряжений — использование электродов, имеющих насколько возможно низкий предел прочности. Если шов должен быть выполнен наплавкой твердым сплавом, то в промежуточных проходах используются электроды с низким пределом прочности. Электроды для наплавки твердым сплавом используются только при последнем проходе.

Напряжения вокруг прихватывающих швов могут быть уменьшены в результате увеличения площади, несущей нагрузку, то есть увеличением площади продольного поперечного сечения прихватывающих швов.

2.4.2 Минимизация содержания водорода в сварочном шве

Самый лучший путь в работе с водородом — допускать, насколько возможно, меньшее количество его в сварном шве. Технология сварки имеет первостепенную важность :

- 1) не допускать наличия на разделанном шве влажности, ржавчины, смазки и т.д. ;
- 2) обращаться со сварочными материалами согласно инструкциям изготовителя. Это предохранит флюсы и покрытия от поглощения влажности, проволочные электроды — от образования ржавчины.

Для предупреждения образования влажности необходимо при ручной дуговой сварке обращаться с электродами в соответствии с рис. 2.4.2а. В действительной цеховой практике редко получается так. Каждому следует стремиться получить те же результаты на практике. Если нет возможности использовать подогреваемые пеналы или тепловые шкафы, электроды следует хранить в уплотненных контейнерах, не пропускающих влагу.

Выбор электродов также влияет на количество водорода, поступающего в сварной шов. Цифры, данные в табл. 2.4.2б, приближенны и различные для разных сварочных материалов и у разных изготовителей.

Основные покрытия электродов вообще имеют самое низкое содержание водорода из всех других покрытий. Ударная вязкость основных электродов в дальнейшем вообще должна превосходить соответствующую величину других типов электродов. Сварной шов, образованный металлом основного электрода, следовательно, обладает большей способностью приостановить рост хрупких трещин.

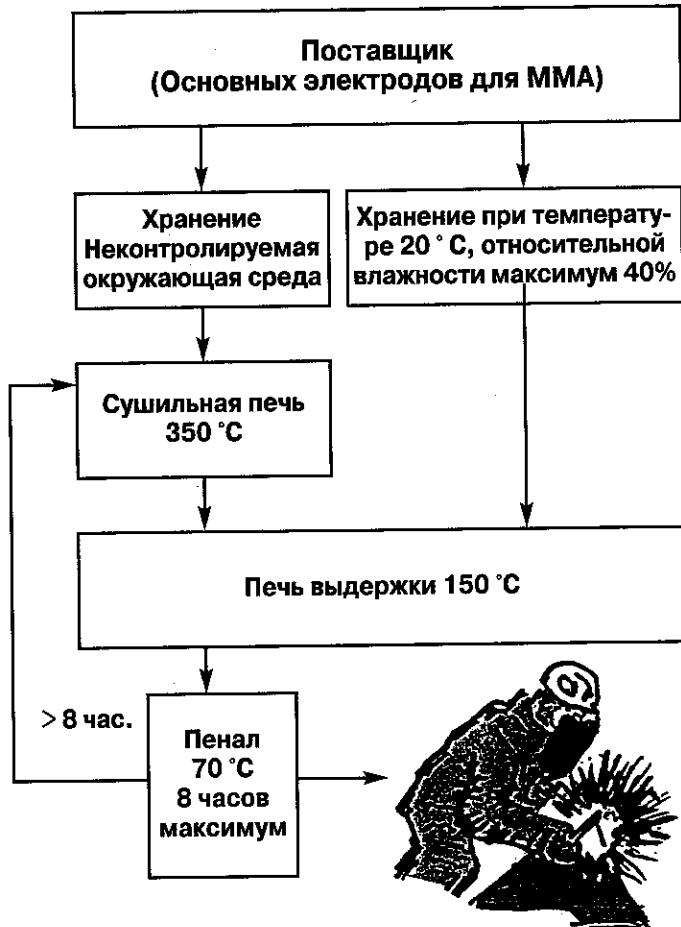


Рис. 2.4.2а Рекомендуемое обращение с электродами в процессе ручной дуговой сварки (MMA)

Процесс сварки	Тип электрода	Содержание водорода в сварочных материалах (электродах) (мл/100 г. в сварочном шве)
Ручная дуговая сварка (MMA)	Основной — открытый в момент начала работы/ прокаленный	3,5–5
	Основной влажный (отсыревший)	5–10
	Рутиловое покрытие	25–35
Дуговая сварка плавящимся электродом (MIG)	Твердый электрод	2–3
	Металлический электрод	2–10
	Порошковая проволока	3–15
Дуговая сварка в защитном газе (SAW)	Основной — открытый в момент начала работы/ прокаленный	2–5
	Основной влажный (отсыревший)	5–10
	Другие типы открытых в момент начала работы/ прокаленных электродов	3–6
	Другие типы влажных (отсыревших) электродов	6–12

Таблица 2.4.2б Содержание водорода (потенциальное) в сварочных материалах (электродах) (ISO 3690, метод ртутного столба).

2.4.3. Предварительный подогрев — удаление водорода, находящегося в сварном шве.

Водород, поступивший в сварной шов через сварочную ванну, может быть удален в результате диффузии. Возросшая рабочая температура (предварительный подогрев) и увеличение температуры сопутствующего подогрева уменьшают скорость охлаждения сварного изделия. Высокая температура ускоряет диффузию водорода и уменьшает количество водорода, оставшееся в сварном изделии. Уменьшенная скорость охлаждения также уменьшает твердость в ЗТВ, что способствует уменьшению риска водородного трещинообразования.

Общие рекомендации по минимальной рабочей температуре наших сталей показаны в таблице 2.4.3b, 2.4.3c и 2.4.3d. На рис. 2.4.3a продемонстрировано определение комбинированной толщины листа. Эти рекомендации основаны на испытании Tekken — испытании свариваемости при высокой степени сжатия при охлаждении. Если рекомендации по рабочей температуре наших сталей сравнивать с рекомендациями BS 5135 или другим стандартом по сварке, то обнаружатся некоторые несоответствия. Это отчасти связано с непризнанным в настоящее время стандартом по сварке, который разрабатывается для QT-стали (закаленных и отпущеных сталей).

Рекомендации по рабочей температуре применяются к обычным условиям возникновения напряжений в сварном соединении при охлаждении, включая сварку прихваточным швом и корневые проходы. Они не содержат

запаса прочности. Для условий сильных напряжений при охлаждении рекомендуется более высокий уровень температуры. Самый высокий уровень рабочей температуры также применяется при возникновении сильного напряжения (при охлаждении) для соответствующей комбинированной толщины листа.

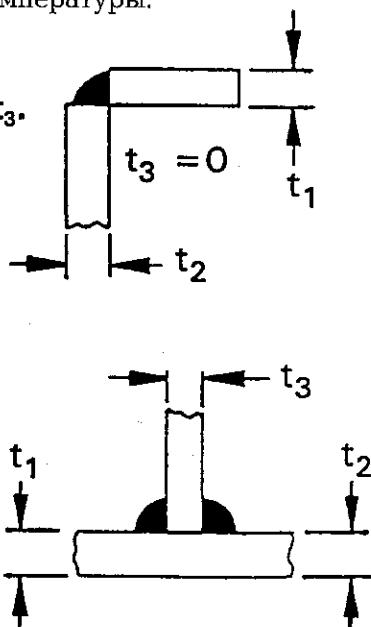
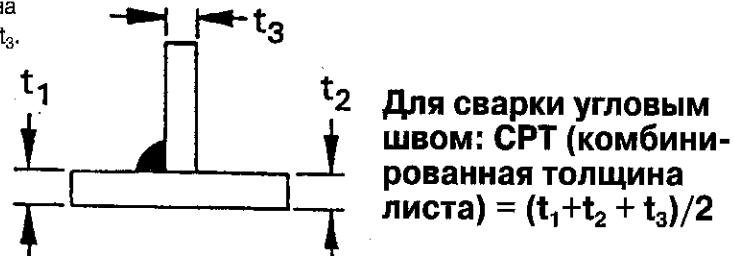
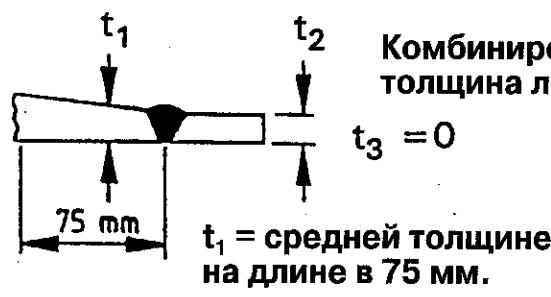
При сварке HARDOX-сталей важно выдерживать температуру нагрева ниже 250 °C. Выше этой температуры HARDOX-листы могут потерять некоторую твердость вследствие отпуска. Максимальная рекомендуемая температура в 250 °C предлагается для того, чтобы предупредить пористость в наплавленном металле, вызванную турбулентностью воздуха.

Рекомендуемая рабочая температура для предупреждения холодного растрескивания относится к зоне сплавления сварного соединения. Водородное растрескивание может, однако, развиваться или начинаться в сварном металле. Особенно для электродов, имеющих предел текучести выше приблизительно 600 N/mm². В сомнительных случаях следует консультироваться с поставщиком электродов по рекомендациям предварительного подогрева его изделий.

Самая большая необходимость в наращивании рабочей температуры — при сварке прихваточным швом и в корневых проходах. Несмотря на то, что самая большая необходимость возникает именно при сварке прихваткой, предварительный подогрев часто отвергается при этой операции. Во время сварки промежуточных проходов напряжения уменьшаются и уменьшается необходимость повышения рабочей температуры.

Рис. 2.4.3a
Определение:

Комбинированная толщина листа = $t_1 + t_2 + t_3$.



**Рекомендуемая минимальная рабочая температура (°C)
для сварки при величине подводимой энергии 1 кДж/мм**

HD ≤ 5 мл	Комбинированная толщина листа (мм)											
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
OX 524/Fe510	Комнатная температура (КТ)										75°	
OX 520M	КТ										75°	
WELDOX 355	КТ											
WELDOX 420	КТ										75°	
WELDOX 460	КТ										75°	
WELDOX 500	КТ										75°	
WELDOX 500P,Q	КТ										75°	
WELDOX 600	КТ										75°	
WELDOX 700D,E	КТ	75°		100°				125°		150°		
WELDOX 700 F	КТ	100°		125°				150°				
WELDOX 900	КТ	100°		125°				150°				
WELDOX 960	КТ	100°		125°				150°				
HARDOX 400	КТ			100°		125°		175°				
HARDOX 500	КТ	125°	150°	175°								

5 < HD ≤ 10 мл	Комбинированная толщина листа (мм)																			
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130							
OX 524/Fe510	КТ										75°									
OX 520M	КТ										75°									
WELDOX 355	КТ																			
WELDOX 420	КТ										75°									
WELDOX 460	КТ										75°									
WELDOX 500	КТ										75°									
WELDOX 500P,Q	КТ										75°									
WELDOX 600	КТ										75°									
WELDOX 700D,E	КТ	75°	100°	125°				150°												
WELDOX 700 F	КТ	125°	150°																	
WELDOX 900	КТ	125°	150°																	
WELDOX 960	КТ	125°	150°																	
HARDOX 400	КТ	75°	100°	125°				150°		175°										
HARDOX 500	100°	150°	175°																	

Таблица 2.4.3б Рекомендуемая минимальная рабочая температура (°C) для сварки при величине подводимой энергии 1 кДж/мм. HD = потенциалу водорода (мл Н₂ / 100 г наплавленного металла) согласно ISO 3690 (Нг-метод).

**Рекомендуемая минимальная рабочая температура (°C)
для сварки при величине подводимой энергии 1,7 кДж/мм**

HD ≤ 5 мл	Комбинированная толщина листа (мм)											
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
OX 524/Fe510	Комнатная температура (KT)											75°
OX 520M	KT											75°
WELDOX 355	KT											
WELDOX 420	KT											75°
WELDOX 460	KT											75°
WELDOX 500	KT											75°
WELDOX 500P,Q	KT											75°
WELDOX 600	KT											75°
WELDOX 700D,E	KT			75°			100°			150°		
WELDOX 700 F	KT	75°		100°						150°		
WELDOX 900	KT	75°		100°						150°		
WELDOX 960	KT	75°		100°						150°		
HARDOX 400	KT			75°			100°			175°		
HARDOX 500	KT	100°	125°	150°			175°					

5 < HD ≤ 10 мл	Комбинированная толщина листа (мм)											
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
OX 524/Fe510	Комнатная температура (KT)											75°
OX 520M	KT											75°
WELDOX 355	KT											
WELDOX 420	KT											75°
WELDOX 460	KT											75°
WELDOX 500	KT											75°
WELDOX 500P,Q	KT											75°
WELDOX 600	KT											75°
WELDOX 700D,E	KT			75°	100°			125°			150°	
WELDOX 700 F	KT	100°			125°						150°	
WELDOX 900	KT	100°			125°						150°	
WELDOX 960	KT	100°			125°						150°	
HARDOX 400	KT			125°						175°		
HARDOX 500	KT	150°						175°				

Таблица 2.4.3с Рекомендуемая минимальная рабочая температура (°C) для сварки при величине подводимой энергии 1,7 кДж/мм. HD = потенциал водорода (мл H₂ / 100 г наплавленного металла) согласно ISO 3690 (Нг-метод).

**Рекомендуемая минимальная рабочая температура (°C)
для сварки при величине подводимой энергии 3 кДж/мм**

HD ≤ 5 мл	Комбинированная толщина листа (мм)												
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
OX 524/Fe510	Комнатная температура (КТ)												75°
OX 520M	КТ												75°
WELDOX 355	КТ												
WELDOX 420	КТ												75°
WELDOX 460	КТ												75°
WELDOX 500	КТ												75°
WELDOX 500P, Q	КТ												75°
WELDOX 600	КТ												75°
WELDOX 700D, E	КТ		50°			75°			75°			125°	
WELDOX 700 F	КТ		75°			75°			75°			125°	
WELDOX 900	КТ		75°			75°			75°			125°	
WELDOX 960	КТ	50°	75°			75°			75°			125°	
HARDOX 400	КТ		50°			75°			75°			150°	
HARDOX 500	КТ	75°	100°	125°		150°			150°				

5 < HD ≤ 10 мл	Комбинированная толщина листа (мм)												
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
OX 524/Fe510	Комнатная температура (КТ)												75°
OX 520M	КТ												75°
WELDOX 355	КТ												
WELDOX 420	КТ												75°
WELDOX 460	КТ												75°
WELDOX 500	КТ												75°
WELDOX 500P, Q	КТ												75°
WELDOX 600	КТ												75°
WELDOX 700D, E	КТ		50°		75°			75°			100°		150°
WELDOX 700 F	КТ	75°	100°			100°			100°			150°	
WELDOX 900	КТ	75°	100°			100°			100°			150°	
WELDOX 960	КТ	75°	100°			100°			100°			150°	
HARDOX 400	КТ		100°			100°			100°			175°	
HARDOX 500	КТ	125°			125°			125°			175°		

Таблица 2.4.3d Рекомендуемая минимальная рабочая температура (°C) для сварки при величине подводимой энергии 3 кДж/мм. HD = потенциалу водорода (мл Н₂ / 100 г наплавленного металла) согласно ISO 3690 (Нг-метод).

2.4.4. Понижение рабочей температуры

Высокая рабочая температура не всегда осуществима по ряду причин. Необходимость в повышенной рабочей температуре может быть исключена в результате осуществления одного из следующих методов или их комбинаций :

- последующий подогрев;
- завершение сварки до начала образования трещин;
- высокое количество подводимой энергии подогрева;
- использование аустенитных электродов.

2.4.4.1. Последующий подогрев

Альтернативой/дополнением к высокой рабочей температуре является последующий подогрев сварного шва. Оба метода способствуют диффузии водорода из сварного изделия. Сварка выполняется, если возможно, при повышенной температуре. Чем выше — тем лучше. Существует риск образования водородных трещин в то время, пока температура ниже 100–150 °C. Сразу по завершении операции сварки температуру сварного шва следует увеличить до 150–250 °C и поддерживать эту температуру не менее 1 часа на 10 мм толщины листа. Более длительное время последующего подогрева более эффективно. Для HARDOX-стали температура последующего подогрева не должна превышать 200 °C, т.к. это может стать причиной понижения твердости.

Не следует ускорять охлаждение сварного изделия после сварки, например, посредством воды. Надо предоставить возможность тепловой диффузии из сварного шва водорода, потенциально вредного для него.

2.4.4.2. Завершение сварки до начала образования трещин

Как упоминалось выше, водородное растрескивание — явление, развивающееся со временем. Обычно оно протекает в течение 48 часов после сварки.

Риск развития трещин сразу после сварки невелик. Он увеличивается со временем, и самая большая вероятность развития водородных трещин появляется спустя пару часов (грубо). После этого максимальный риск трещинообразования опять снижается и примерно через 48 часов исчезает. Температура предварительного подогрева может быть понижена, если сварка прихваткой, корневые проходы и несколько промежуточных проходов выполняются с короткими интервалами по времени. Таким путем большинство критических моментов будет устранено до того, как начнется растрескивание. Следует использовать тепловую энергию предшествующих проходов как предварительный подогрев для последующих проходов.

2.4.4.3. Высокое количество подводимой энергии подогрева

Как видно из таблиц рабочей температуры (Таблица 2.4.3b – 2.4.3d), температура предварительного подогрева может быть заметно уменьшена в результате повышения величины подводимой энергии. Это может быть применено к швам прихваткой и корневым проходам также, как и к промежуточным проходам и к последнему проходу.

2.4.4.4. Использование аустенитных электродов

Сварочные швы из аустенитных (нержающей) сварочных материалов обладают высокой растворяющей способностью для водорода, что значительно уменьшает диффузию водорода в зону термического влияния. Кроме того, аустенитные электроды дают очень вязкий и пластичный шов, имеющий низкий уровень предела текучести. Риск водородного растрескивания в результате этого значительно уменьшается.

В цехах, выполняющих сварку броневых автомобилей, используются аустенитные электроды, так как предварительный подогрев непрактичен. Эти броневые стали имеют свариваемость, соответствующую HARDOX 500. Еще неизвестно в деталях, в какой мере аустенитные электроды реально исключают необходимость повышения рабочей температуры. Рекомендуются: твердая или металлическая проволока и электроды, имеющие основные покрытия.

2.4.5 Приварка шпилек к стальному листу

При приварке болтов методом «Stud welding» (приварка шпилек к листу) настоятельно рекомендуется использовать современное оборудование в хорошем состоянии. Приварка болтов указанным методом — быстрый, дешевый и надежный метод крепления компонентов. Сварка методом «Stud welding» значительно снижает необходимость в предварительном подогреве. Эти свойства делают метод подходящим для HARDOX-сталей.

Иногда необходимо для практического и экономического эффекта закреплять компоненты между собой сваркой. Например, интенсивно изнашиваются желобы для гравия — они должны регулярно заменяться. Такие компоненты часто крепятся болтами.

Приварка болтов методом «Stud welding» — хорошая замена сверлению и зенковке отверстий для болтов. Как и для обычной сварки, перед ее началом лист и болт должны быть свободны от ржавчины, смазки и т.д. Предпочтительна шлифовка металла. В соответствии с опытом по Oxelosund-сталим сварка «Stud»-методом этих сталей не требует предварительного подогрева плиты при условии хорошей гигиены сварки. Нельзя тоже сказать о HARDOX 500. Если развиваются водородные трещины, в дальнейшем для сварки «Stud»-методом рекомендуется температура 100 °C.

Сварка «Stud»-методом требует намного меньше труда, чем сверление отверстий, и не требуется, чтобы она выполнялась в цехе. ЗТВ невелика в сравнении с ЗТВ дуговой сварки, и обычно не возникает каких-либо проблем с материалом.

2.5 Обнаружение водородных трещин

Водородные трещины обычно развиваются в течение 48 часов после сварки. По истечении этого времени содержание водорода в сварном изделии обычно достигает такого значения, что дальнейшее водородное трещинообразование не развивается. Следовательно, исследование на наличие водородных трещин должно проводиться не ранее 48 часов после сварки.

Участки поверхности, поврежденные трещинами, могут быть обнаружены невооруженным

глазом при условии, что трещины достаточно большие. Однако, более реальное обнаружение трещин обеспечивается проведением неразрушающих испытаний с использованием комбинации:

- 1) визуальной инспекции;
- 2) цветной дефектоскопии;
- 3) магнитно-порошковой дефектоскопии;
- 4) УЗК.

Неразрушающие испытания рассматриваются в отдельной главе.

Водородные трещины в швах прихваткой и корневых швах часто расщепляют наплавленный металл, что облегчает их обнаружение. Обычно корень разделки шва труднодоступен для неразрушающих испытаний (NDT). NDT швов прихваткой и корневых валиков обычно не выполняются. Испытания обычно проводятся только на законченном изделии. Швы прихваткой и корневые валики рекомендуется испытывать только если предполагаются большие трещины.

Если швы прихваткой или корневые швы исследуются неразрушающим контролем, разделка шва должна быть впоследствии тщательно очищена. Цветная дефектоскопия и другие испытания — потенциальные источники водорода.

2.6 Что делать с водородными трещинами ?

Если сварное изделие содержит водородные трещины, то, как правило, проводится удаление их механическим способом и исправление шва.

В динамически нагружаемых конструкциях трещины могут распространяться и вызывать повреждение конструкции. Так как WELDOX очень вязкие, то основной причиной разрушения может быть пластическое смятие или вязкий разрыв.

В HARDOX-стали, с другой стороны, присутствуют остаточные напряжения после процесса их закалки. Эти напряжения создают возможность более легкого распространения малых трещин в HARDOX-сталих, чем в конструкционных сталях. Ударная вязкость HARDOX-сталей также намного ниже, чем конструкционных сталей. Следо-

вательно, трещины в HARDOX-сталих делают сварное изделие более расположенным к хрупкому разрушению.

Значение трещин для целостности конструкции может быть определено знанием механизма разрушения. Механизм разрушения требует детальной информации об ударной вязкости материала, остаточных напряжениях и нагрузках, которые несет сварное изделие. Все эти знания обычно не-

доступны, заставляя предпринимать заделку трещин как надежное действие для предотвращения разрушения.

Если потенциальное разрушение не имеет каких-либо серьезных последствий, то малые трещины, расположенные в некритических зонах, приемлемы. Изготовитель, тем не менее, несет полную ответственность за неисправленные трещины и дефекты, которые обнаружены.

2.7. Предупреждение водородных трещин

КРИТИЧЕСКИЕ СТАЛИ

- Водородные трещины не являются проблемой для низкоуглеродистых и твердых (MS и HS) сталей, производимых компанией SSAB Oxelosund AB, WELDOX 355, 420, 460, 500, 600, тонких WELDOX 700D, E и тонких HARDOX 400.
- Следует обращать внимание на водородные трещины в WELDOX 700F, 900, 960, в толстых WELDOX 700 D,E и среднетолстых HARDOX 400.
- Водородные трещины — серьезная, но контролируемая проблема в HARDOX 500 и в толстых стальных листах HARDOX 400.
- Электроды высокой прочности могут потребовать более высокую рабочую температуру, чем стальные листы, которые должны свариваться.

КРИТИЧЕСКИЕ МЕСТА С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ТРЕЩИН

- Швы прихваткой и корневые валики наиболее восприимчивы к водородным трещинам. Следует обращать особое внимание на эти швы.

МИНИМИЗАЦИЯ СОДЕРЖАНИЯ ВОДОРОДА В СВАРНОМ ШВЕ

- Тщательно соблюдать технологию сварки.
- Тщательно подбирать сварочные материалы, в которых гарантировано минимальное содержание водорода.
- Хранить сварочные материалы в соответствии с инструкциями производителя.

СНИЖЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРОЧНОМ ШВЕ

- Использовать, где возможно, электроды с низким пределом прочности.
- Использовать длинные прихваточные швы и корневые проходы.

УДАЛЕНИЕ ВОДОРОДА СРАЗУ ЖЕ ПО ПОСТУПЛЕНИЮ ЕГО В СВАРНОЕ ИЗДЕЛИЕ

- Повышение рабочей температуры сварки.
- Последующий подогрев.
- Высокая величина подводимой энергии.

3. ДРУГИЕ ТИПЫ ДЕФЕКТОВ ШВОВ, ОТНОСЯЩИЕСЯ К ОСНОВНОМУ МЕТАЛЛУ

Качество сварных соединений определяется свойствами основного металла и материала наплавленного шва, геометрией стыкового соединения, мастерством сварщиков и характеристиками сварочного оборудования. Эти факторы несколько грубо просуммированы на рис. 4.

Дефекты сварки, относящиеся к основному металлу, развивающиеся в ЗТВ:

- 1) водородное (холодное) растрескивание;
- 2) расслоение;
- 3) растрескивание после повторной термообработки.

Водородное растрескивание рассматривается в разделе 2 этой главы.

Расслоение развивается в течение сварки стали, содержащей большое количество марганцево-сернистых соединений — MnS. Oxelosund-стали имеют гарантированное содержание серы максимум 0,035 %. На практике содержание серы в значительной степени ниже. Расслоение, следовательно, не является проблемой для сварки Oxelosund-сталей.

Растрескивание после повторного нагрева развивается в ЗТВ во время последующей термообработки после сварки. Эти трещины обычно малы, но они могут позднее распространяться, если сварное соединение подвергается усталостной нагрузке.

Стали, содержащие хром, молибден, ванадий, рассматриваются как восприимчивые к этому типу растрескивания. Фосфор увеличивает эту восприимчивость. Согласно некоторым теориям WELDOX-стали, имеющие уровень предела текучести от 700 Н/мм², и выше, могут иметь химический состав, восприимчивый к растрескиванию повторного подогрева. Механизм растрескивания повторного подогрева неизвестен в деталях.

Растрескивание повторного подогрева сварных изделий из Oxelosund-сталей по имеющемуся опыту использования этих сталей никогда не наблюдалось.

Можно сказать, что наши стали обладают отличной свариваемостью. Единственный тип дефектов сварки, относящихся к основным материалам Oxelosund-сталей, — водородное растрескивание. Как описывается в разделе 2, водородное трещинообразование не представляет проблемы для Oxelosund-сталей.



Рис. 4 Факторы, влияющие на качество сварных соединений.

4. СВАРКА

4.1 Ударная вязкость в ЗТВ

Во время сварки основной металл, примыкающий к линии оплавления, испытывает сильное температурное воздействие. Эта зона называется Зоной Термического Влияния. ЗТВ не однородна, но состоит, в свою очередь, из нескольких подзон. На рис. 4.1 а схематически представлена ЗТВ.

Крупнозернистая зона расположена ближе к линии оплавления. На этом расстоянии от линии оплавления температура должна быть достаточно высокой, чтобы трансформировать сталь и вызвать возрастание зернистости. Во время последующего охлаждения структура трансформируется в крупномартенситную или бейнитную. Эта зона твердая и, в общем, имеет самую низкую ударную вязкость сварного шва.

Следующая зона называется Мелкозернистой Зоной. В этой зоне температура должна быть достаточно высокой только для того, чтобы вызвать нормализацию основного материала. Но иногда происходит возрастание зернистости. Эта зона имеет хорошую ударную вязкость.

Следующая за Мелкозернистой — Межкритическая Зона. В этой зоне основной материал частично трансформирован нагревом при сварке. В конечном итоге структура выглядит подобно микроструктуре основного материала, в которой содержатся мелкие, твердые и хрупкие включения. Грубозернистая ЗТВ и Межкритическая ЗТВ в общем имеют самую низкую ударную вязкость, присущую сварному шву. Иногда сварной металл может иметь более низкую ударную вязкость, чем ЗТВ. Электроды с уровнями предела текучести до 800 МПа, имеющие лучшую ударную вязкость, чем минимальная ударная вязкость ЗТВ, доступны на рынке.

Последняя зона — Подкритическая Зона ЗТВ распространяется примерно на 10 мм за Межкритическую Зону. Эта зона должна быть изменяющейся по степени отпуска стали и в связи с этим становиться несколько мягче. Она может также быть подвержена старению вследствие деформаций и воздействия нагрева, сопутствующих сварке.

Твердость и ударная вязкость Подкритической Зоны обычно не очень отличаются от свойств основного материала. Сварное изделие, показанное на рис. 4.1а, — это сварное соединение, полученное за один проход. Такое соединение легко описывать. Большинство же сварных изделий — многопроходные изделия. ЗТВ многопроходного сварного изделия имеет в каждом испытанном положении несколько последовательных термических циклов с переменными характеристиками.

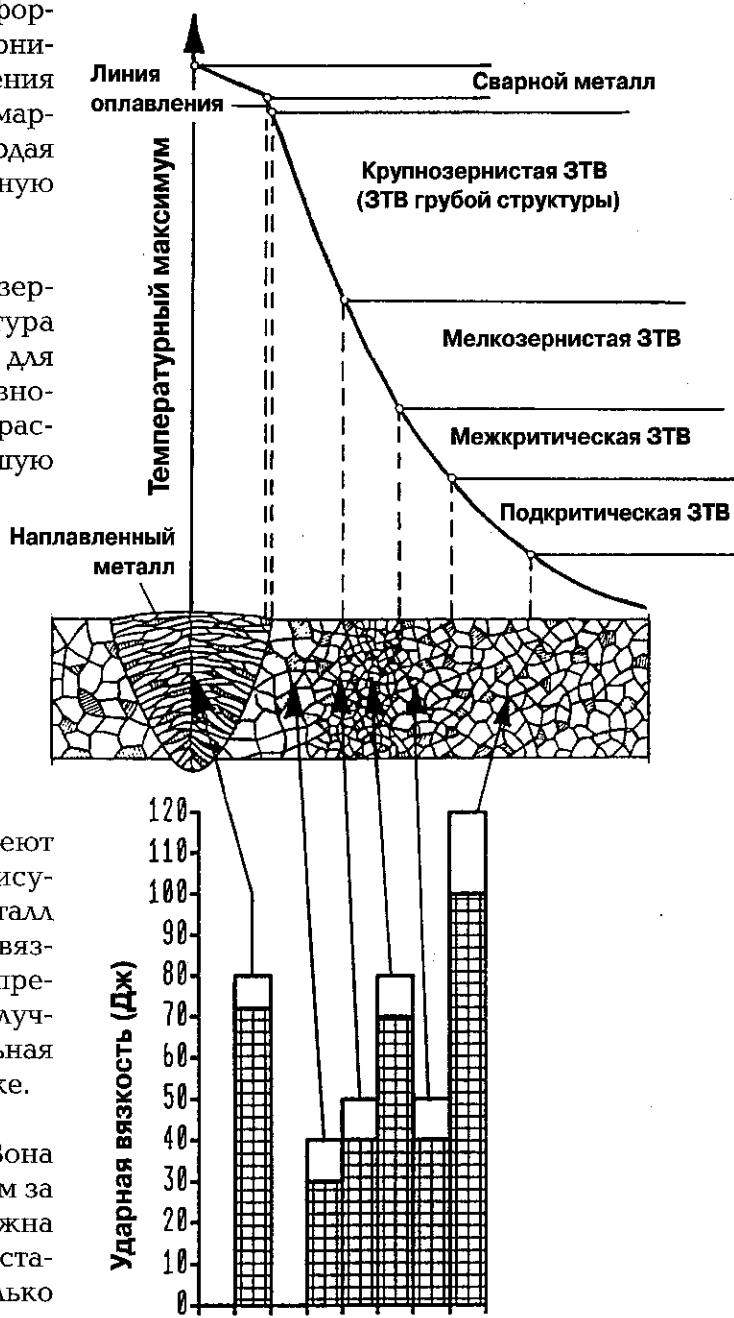


Рис. 4.1а Схематическое описание размера зернистости и распределения ударной вязкости в сварном изделии.

ЗТВ многопроходного сварного изделия намного сложнее, чем это представлено на рис. 4.1а. Это похоже на наложение нескольких схем 4.1 а, несколько смещенных относительно друг друга. Результирующая ЗТВ состоит из смешанных малых площадей хрупких и твердых, вязких и мягких микроструктур. В то время, как мы можем обнаружить ЗТВ одного прохода, образуются также и несколько новых зон.

Как было показано, ЗТВ — очень неоднородная зона с переменными свойствами различных ее составляющих.

Влияние нагрева во время сварки на ширину ЗТВ схематически показано на рис. 4.1б. Ширина ЗТВ увеличивается с увеличением величины подводимой энергии. Как видно из рис. 4.1.б, явно проявляется рост Крупнозернистой Зоны ЗТВ.

Типичная ширина Зон Термического Влияния для обычной величины подводимой тепловой энергии (2,5 кДж/мм при толщине листа 30 мм):

- Крупнозернистая Зона ЗТВ приблизительно 0,5 мм.
- Мелкозернистая Зона ЗТВ приблизительно 1,0 мм.
- Межкритическая Зона ЗТВ приблизительно 0,2 мм.

Ударная вязкость различных ЗТВ определяется, главным образом, их размером и величиной зерна (размером зерна). На рис. 4.1с схематически представлена близкая к линии оплавления область ЗТВ, подвергнутая термообработке. Рост зерна происходит при температуре выше приблизительно 1150 °С. Более высокая температура ускоряет рост зерна (рост зернистости). Размер зерна в Крупнозернистой Зоне ЗТВ пропорционален пересеченной заштрихованной площади (графика ВРЕМЯ/ТЕМПЕРАТУРА) на рис. 4.1с.

Крупнозернистость ЗТВ уменьшает ударную вязкость. И ширина ЗТВ и величина зерна Крупнозернистой Зоны ЗТВ увеличиваются с увеличением величины подводимого тепла. Следовательно, более низкий подвод тепла — лучшая ударная вязкость ЗТВ.

АМПЛИТУДА ТЕМПЕРАТУРЫ

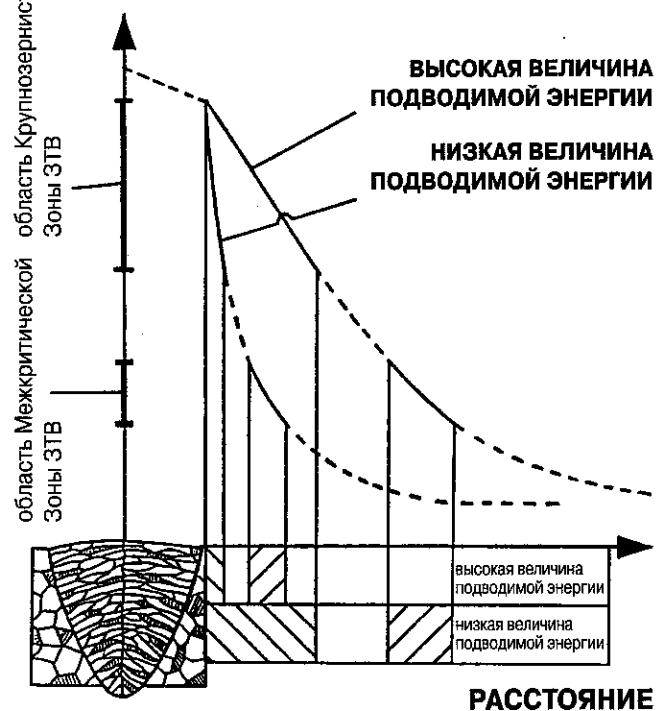


Рис. 4.1б Схематическое описание влияния сопутствующего подогрева на ширину ЗТВ. На рисунке показаны самые хрупкие Зоны: Крупнозернистая и Межкритическая.

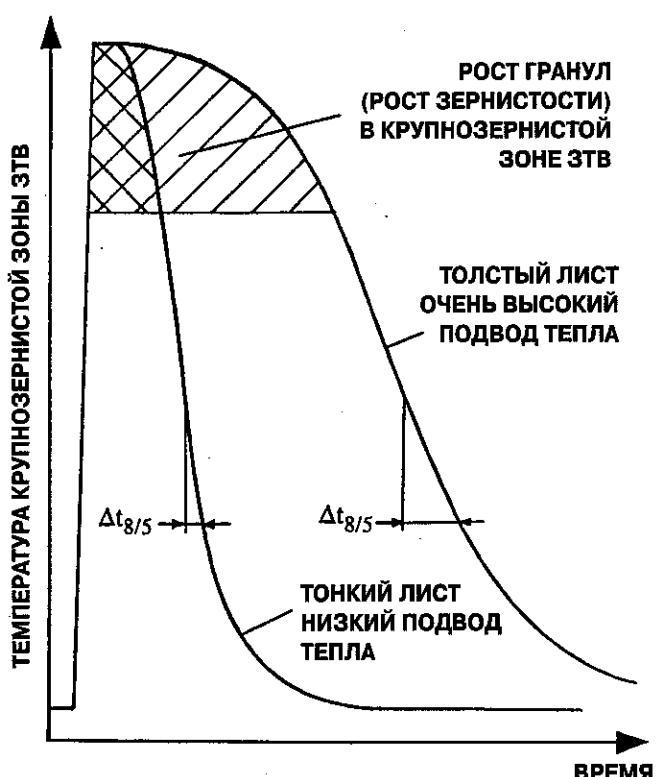


Рис. 4.1с Схематическое описание влияния температурного цикла испытанного Грубозернистой Зоной ЗТВ во время сварки.

Низкая величина подводимой тепловой энергии увеличивает также число проходов сварного шва, необходимое для заполнения разделанного шва. В многопроходном сварном изделии ЗТВ и сварной металл каждого последующего прохода частично получают дополнительный отпуск, в результате чего трансформируются их механические свойства. Чем больше проходов имеет шов, тем лучше становится ударная вязкость.

Многопроходная сварка особенно благоприятна для ударной вязкости металла шва.

Влияние величины подводимой энергии на термический цикл, которому подвергается сварное изделие, обычно описывается временем охлаждения ЗТВ между 800 °C и 500 °C, $\Delta t_{8/5}$. Величина $\Delta t_{8/5}$ первоначально рассматривалась как параметр, определяющий микроструктуру ЗТВ, но эта же величина является также довольно неплохим описанием температурного цикла. Однако, это не универсальный параметр для определения ширины и структуры ЗТВ.

Связь между параметрами сварки и геометрией сварного изделия описывается рядом формул и номографических диаграмм. На рис. 4.1d и в таблице 4.1а показана общая номографическая диаграмма для определения величины $\Delta t_{8/5}$.

Для гарантии высокой ударной вязкости ЗТВ на термический цикл накладываются ограничения. Эти ограничения зависят от химического состава стали и требований ударной вязкости/твёрдости в ЗТВ. Для Oxelosund-сталей ограничения на термический цикл обусловливаются двумя параметрами:

- 1) максимальным рекомендуемым $\Delta t_{8/5}$;
- 2) максимальной рекомендуемой величиной подводимой энергии.

Максимальная рекомендуемая величина подводимой энергии не зависит от толщины листа и соответствует дуговой сварке под флюсом. Максимальная рекомендуемая величина подводимой энергии используется как верхний предел для величины подводимой энергии, когда не может использоваться как адекватный критерий процесса сварки.

Стальной лист — однородный материал, имеющий четко определенные механические свойства и ударную вязкость. Критерий по ударной вязкости для стальных листов основывается на экспериментальной и научной корреляции между ударной вязкостью и вязкостью разрушения (трещиностойкостью).

Сварное изделие, и особенно ЗТВ, имеют очень неоднородные ударную вязкость и механические свойства. Этот факт делает сварное изделие очень сложным с точки зрения механизма разрушения. Поэтому отсутствует признанный способ определения требований к ударной вязкости.

Требования к ударной вязкости ЗТВ, указанные в проектной документации, могут изменяться. Они основываются на опыте конструкторов и инженерных решениях. Требования к ударной вязкости ЗТВ либо такие же, либо ниже, чем для исходного листа.

ЗТВ неизбежно содержит местные хрупкие зоны. Ударная вязкость указанной части ЗТВ может быть описана статистическим распределением, содержащим как высокие, так и низкие значения ударной вязкости. Следовательно, невозможно определить величину подводимой энергии, ниже которой ударная вязкость всегда оказывается выше заданной величины.

Рекомендации по сварке Oxelosund-стали для конструкционных сталей предназначаются для всех сталей и, главным образом, базируются на измерениях средней ударной вязкости ЗТВ, на расстоянии 3 мм от линии оплавления.

Максимальная величина подводимой энергии, рекомендуемая SSAB Oxelosund AB, приводится в таблице 4.1b. При более низкой величине подводимой энергии ударная вязкость в ЗТВ становится выше.

В таблице 4.1b приведены два параметра:

- 1) Максимальное рекомендуемое $\Delta t_{8/5}$.
- 2) Максимальная рекомендуемая величина подводимой энергии (которая не зависит от толщины листа и соответствует величине подводимой энергии при сварке под флюсом (SAW)).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ОХЛАЖДЕНИЯ (В СЕКУНДАХ)
(ГОДОВОЙ ОТЧЕТ, СЕНТЯБРЬ 1983г., ЕВРОПЕЙСКОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ УГЛЯ И СТАЛИ)

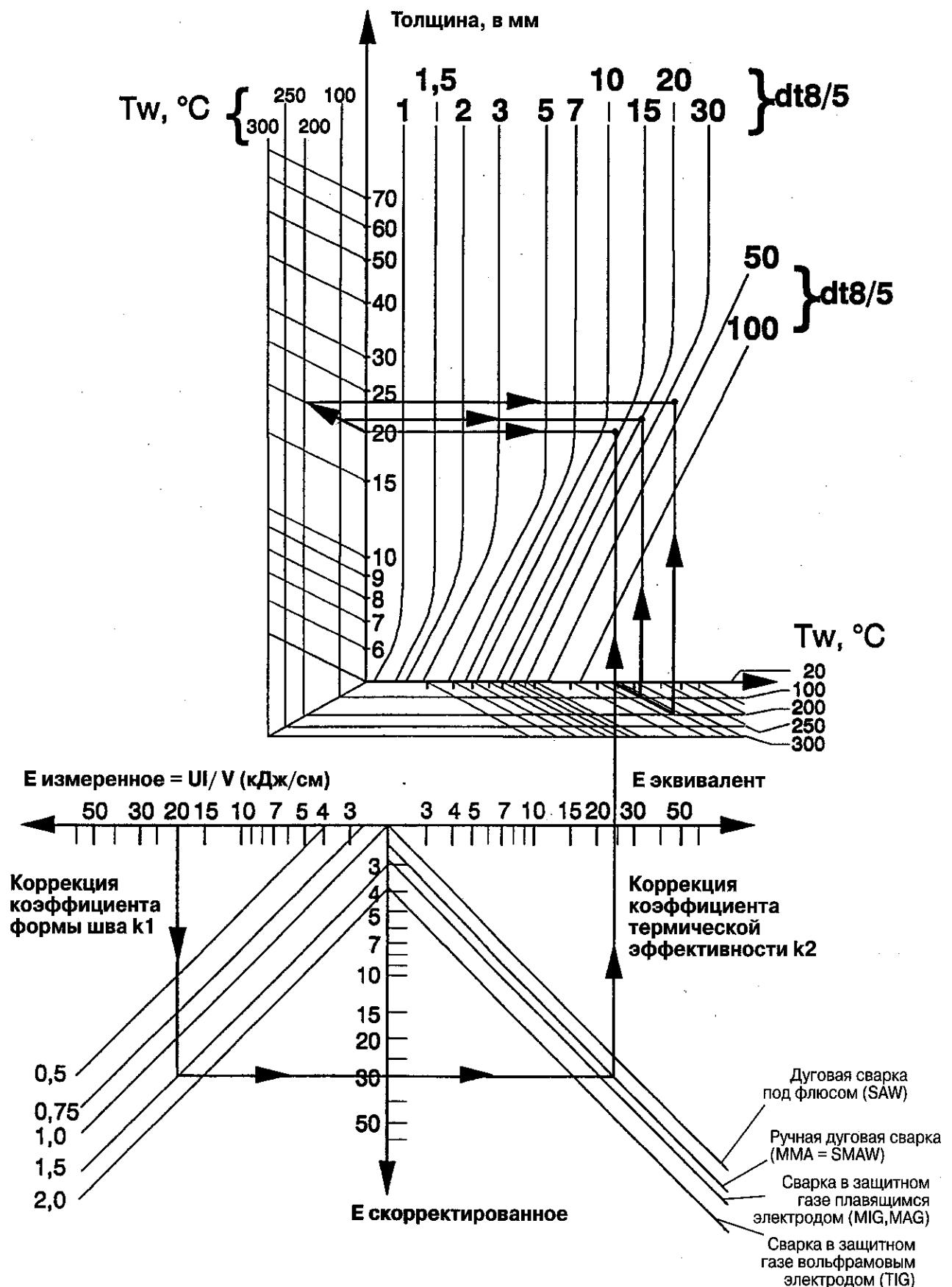


Рис. 4.1d Основная номографическая диаграмма для определения $\Delta t_{8/5}$. Величина фактора K1, описывающего форму сварного шва, приводится в таблице 4.1 а. Здесь: Tw = Рабочей температуре (промежуточной между проходами); E = Номинальной величине подводимой энергии; U = Напряжению дуги; I = Силе тока сварки; V = Скорости сварки.

По рис. 4.1. d, f, e, g величины $\Delta t_{8/5}$ могут быть приведены к соответствующей величине подводимой энергии. Рис. 4.1.f, e, g представляют собой упрощенные варианты рис. 4.1d для приведения величины $\Delta t_{8/5}$ к максимальной величине подводимой энергии для различных условий стыковой сварки.

Для сварки угловых соединений, где должен использоваться лист одной толщины, интересующую толщину можно найти на

рис. 4.1.e, f, g. Самая тонкая толщина листа обычно ограничивает величину подводимой энергии (сопутствующего нагрева).

При сварке HARDOX-сталей необходимо рассматривать ограничения, касающиеся величины подводимой энергии (сопутствующего нагрева), уделить особое внимание величине ЗТВ и ударной вязкости сварного металла. Ударная вязкость ЗТВ должна быть почти равной ударной вязкости основного листа.

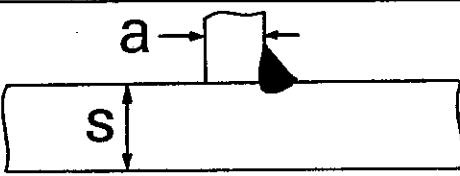
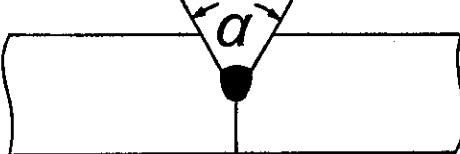
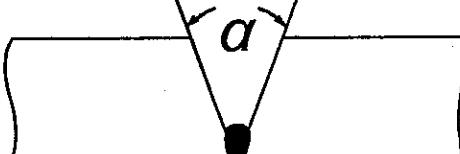
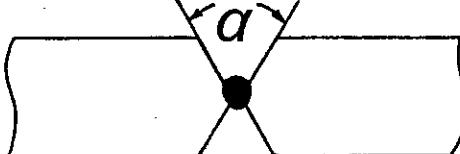
Конфигурация шва		Отношение a/s				
		0	0.25	0.5	0.75	1
	k_1	1	0.97	0.89	0.78	0.67
Конфигурация шва	угол раскрытия (град.)					
	α	60	75	90	105	
	k_1	0.60	0.63	0.67	0.70	
	k_1	1.50	1.72	2	2.38	
	k_1	0.75	0.85	1	1.20	

Таблица 4.1а Коэффициент конфигурации шва k_1 для различных геометрических форм шва.

$\Delta t_{8/5}$ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТОЛЩИНЫ ЛИСТА И ВЕЛИЧИНЫ ПОДВОДИМОЙ ЭНЕРГИИ ПРИ МАКСИМАЛЬНОЙ РАБОЧЕЙ ТЕМПЕРАТУРЕ 20 °С.

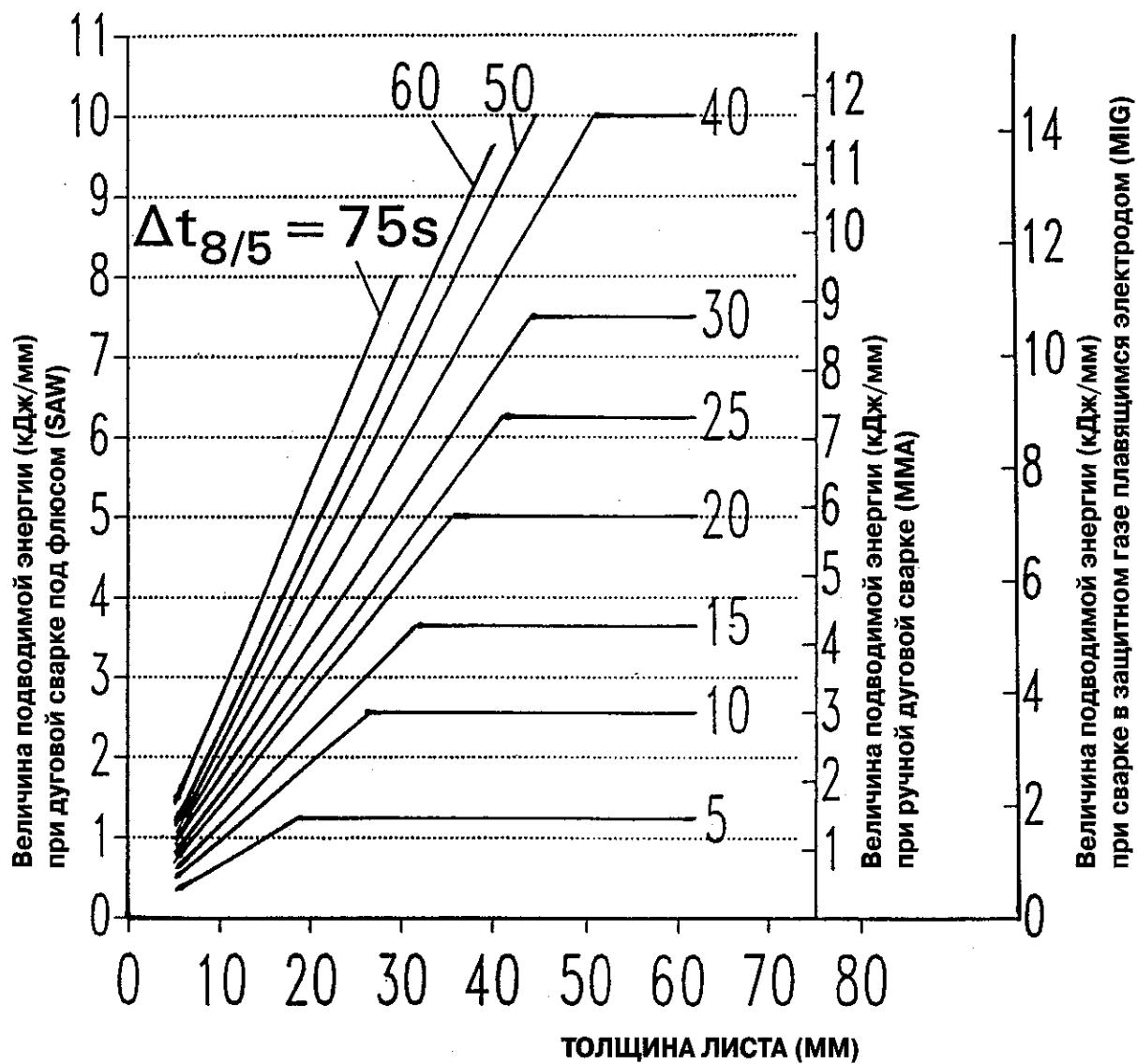


Рис. 4.1e Упрощенное определение $\Delta t_{8/5}$ для стыковых соединений как функции величины подводимой энергии, процесса сварки и толщины листа. Рабочая температура 20 °С.

$\Delta t_{8/5}$ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТОЛЩИНЫ ЛИСТА И ВЕЛИЧИНЫ ПОДВОДИМОЙ ЭНЕРГИИ ПРИ МАКСИМАЛЬНОЙ РАБОЧЕЙ ТЕМПЕРАТУРЕ 100 °C.

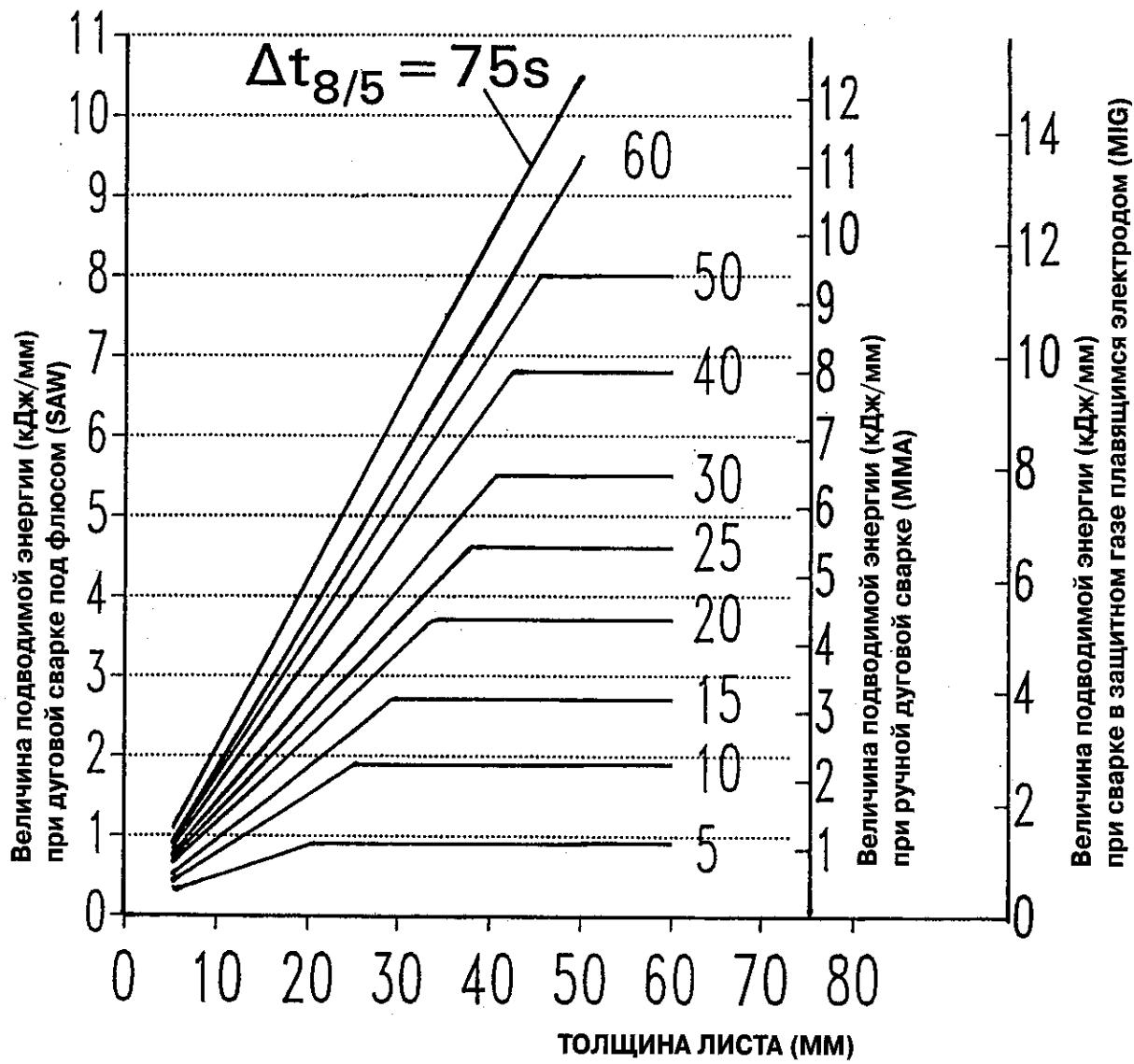


Рис. 4.1f Упрощенное определение $\Delta t_{8/5}$ для стыковых соединений как функции величины подводимой энергии, процесса сварки и толщины листа. Рабочая температура 100 °C.

$\Delta t_{8/5}$ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТОЛЩИНЫ ЛИСТА И ВЕЛИЧИНЫ ПОДВОДИМОЙ ЭНЕРГИИ ПРИ МАКСИМАЛЬНОЙ РАБОЧЕЙ ТЕМПЕРАТУРЕ 200 °C.

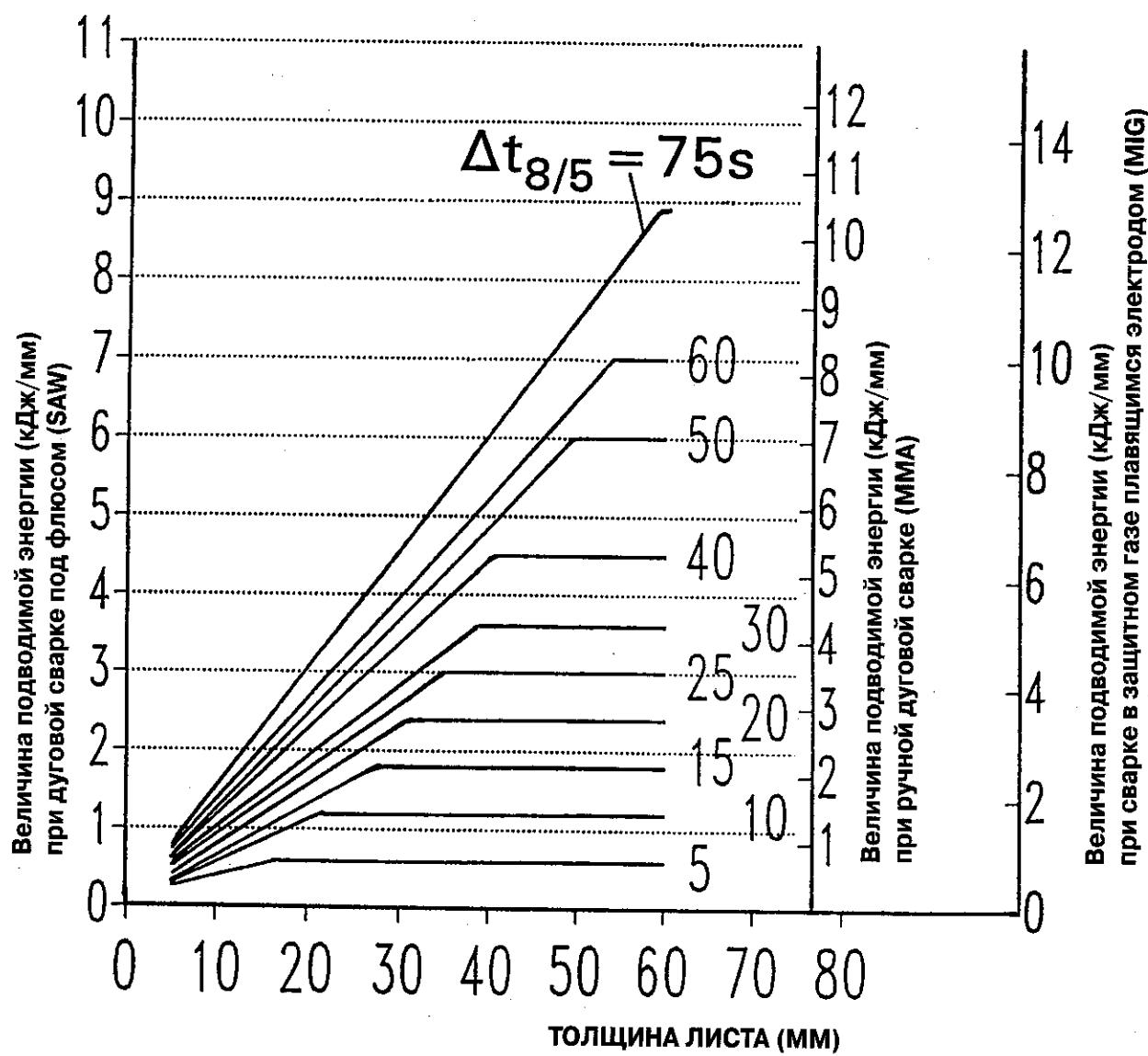


Рис. 4.1g Упрощенное определение $\Delta t_{8/5}$ для стыковых соединений как функции величины подводимой энергии, процесса сварки и толщины листа. Рабочая температура 200 °C.

**МАКСИМАЛЬНОЕ РЕКОМЕНДУЕМОЕ $\Delta t_{8/5}$ [S] И ЭФФЕКТИВНАЯ ВЕЛИЧИНА
ПОДВОДИМОЙ ЭНЕРГИИ (КДЖ/ММ) ДЛЯ СВАРКИ СТАЛЕЙ ПРОИЗВОДСТВА
SSAB OXELOSUND AB.**

Марка стали	Ударная вязкость при большой ЗТВ			Ударная вязкость при средней ЗТВ		
	-20°	-40°	-60°C	-20°	-40°	-60°C
OX 524D	50 [4.0]			75 [8.0]		
OX 524E	60 [5.0]	50 [4.0]		75 [8.0]	75 [8.0]	
OX 520M*	40 [3.5]	30 [3.0]				
WELDOX 355	75 [8.0]	60 [6.5]		[15]	[15]	
WELDOX 420	60 [6.5]	50 [5.5]		75 [8.0]	75 [8.0]	
WELDOX 460	60 [6.5]	50 [5.5]		75 [8.0]	75 [8.0]	
WELDOX 500	60 [6.5]	50 [5.5]		75 [8.0]	75 [8.0]	
WELDOX 500P*	50 [4.0]	40 [3.5]				
WELDOX 500Q						
Марка D	50 [5.5]			75 [8.0]		
Марка E	60 [6.5]	50 [5.5]			75 [8.0]	
WELDOX 600	10	10		35	15	
WELDOX 700E $t \leq 12 \text{ мм}$ $12 < t \leq 20$ $20 < t \leq 45$ $45 \text{ мм} < t$	10 25 30 [3.5] 35 [4.0]	10 10 10 [3.0] 25 [3.5]		35 30 40 [4.5] 40 [4.5]	15 20 35 [4.0] 35 [4.0]	
WELDOX 700F	35 [4.0]	25 [3.5]	15 [3.0]	40 [4.5]	35 [4.0]	25 [3.0]
WELDOX 900E	25 [3.5]	10		35 [4.5]	30 [4.0]	
WELDOX 960E	25 [3.5]	10		35 [4.5]	30 [4.0]	

*) Сталь для изготовления сосудов под давлением.

Таблица 4.1b Максимальное рекомендуемое $\Delta t_{8/5}$ [S] и эффективная величина подводимой энергии (кДж/мм) для сварки сталей производства SSAB Oxelosund AB.

Для получения хорошей ударной вязкости ЗТВ величина подводимой энергии (сопутствующий подогрев) не должен превышать наименьшую из величин: 1) максимальное рекомендуемое $\Delta t_{8/5}$ [S] и 2) максимальная рекомендуемая величина подводимой энергии (кДж/мм). Максимальная рекомендуемая величина подводимой энергии (кДж/мм) (Дуговая сварка под флюсом) указывается в таблице в скобках. Рекомендации по сварке главным образом основываются на обширном опыте сварочных испытаний с величиной подводимой энергии до 4,5 кДж/мм. Ограничение величины подводимой энергии значением 4,5 кДж/мм в основном базируются на экстраполяции, инженерном решении и некоторых ограниченных результатах испытания.

Для конструкционных сталей рекомендации SSAB Oxelosund AB по сварке являются обычными и, в основном, базируются на замерениях средней ударной вязкости в области ЗТВ, на расстоянии 3 мм от линии оплавления. Однако, ударная вязкость отдельных образцов для испытаний вырезанных в различных местах в пределах этих 3 мм может иметь низкие значения. Критерий «Ударная вязкость большой ЗТВ» – это средняя ударная вязкость, обычно бывающая выше 40 Дж для WELDOX-сталей и выше 27 Дж – для остальных сталей при рассматриваемой температуре испытания. Соответственно, критерий «Ударная вязкость средней ЗТВ» – это средняя ударная вязкость, обычно бывающая 40 Дж для WELDOX-сталей и 27 Дж – для OX-сталей.

Для сталей для производства сосудов под давлением требования к сварным соединениям намного выше, чем для обычных конструкций. Свариваемость и ударная вязкость в ЗТВ Oxelosund-сосудов под давлением из сталей WELDOX 500P и OX 520M по меньшей мере такая же хорошая для соответствующих конструкционных сталей WELDOX 500Q и OX 524. Следовательно, более высокие требования по сварке для сталей сосудов под давлением в сравнении с конструкционными сталью вследствие более высоких требований по ударной вязкости не должны привести к худшим свойствам.

4.2. Твердость ЗТВ

Крупнозернистая Зона ЗТВ WELDOX-стали обычно имеет более высокую твердость, чем основной материал. Чем более низкая величина подводимой энергии, тем получается более высокая максимальная твердость ЗТВ. Схематический профиль твердости WELDOX-изделия показан на рис. 4.2а.

Из-за риска (например коррозионных деформаций) на максимальную твердость ЗТВ иногда стандартами налагаются некоторые ограничения. Если такие требования предъявляются к сварному изделию, величины $\Delta t_{8/5}$, описанные в разделе 4.1, должны быть выше, чем определенные минимальные величины. Минимальные величины $\Delta t_{8/5}$ не трудно привести к сопутствующим величинам подводимой энергии, как описано в разделе 4.1 и отражено на рис. 4.1d, e, f, g.

На рис. 4.2с показана как функция $\Delta t_{8/5}$ максимальная твердость неотпущененной ЗТВ сварных изделий ОХ и WELDOX-стали. Отпущенная зона более мягкая.

В разделе 5 рассматривается уменьшение твердости ЗТВ термообработкой после сварки. Пик твердости в ЗТВ для сталей WELDOX 700, 900 и 960 может быть уменьшен термообработкой после сварки приблизительно на 30 единиц по Виккерсу. На пик твердости в ЗТВ других WELDOX и ОХ-стали влияние незначительно.

Схематический профиль твердости сварного изделия из HARDOX-стали показан на рис. 4.2б. Твердость в ЗТВ сварных изделий из HARDOX-стали всегда частично ниже, чем для основного материала. Некоторые участки ЗТВ становятся мягче от тепла сварки.

Как видно из рисунка, профиль твердости сварного изделия из HARDOX-стали от линии оплавления начинается твердой зоной, за которой следует более мягкая зона, и уровни твердости этих зон вне уровня твердости основного материала. Ширина более мягкой зоны, где твердость ЗТВ составляет меньше, чем 90% твердости основного материала, около 3–7 мм. Более высокая величина подводимой энергии обуславливает более широкую и более мягкую зону отпуска.

Нижняя предельная величина минимальной твердости в ЗТВ — сварного изделия из HARDOX-стали — составляет около 65 % твердости основного материала.

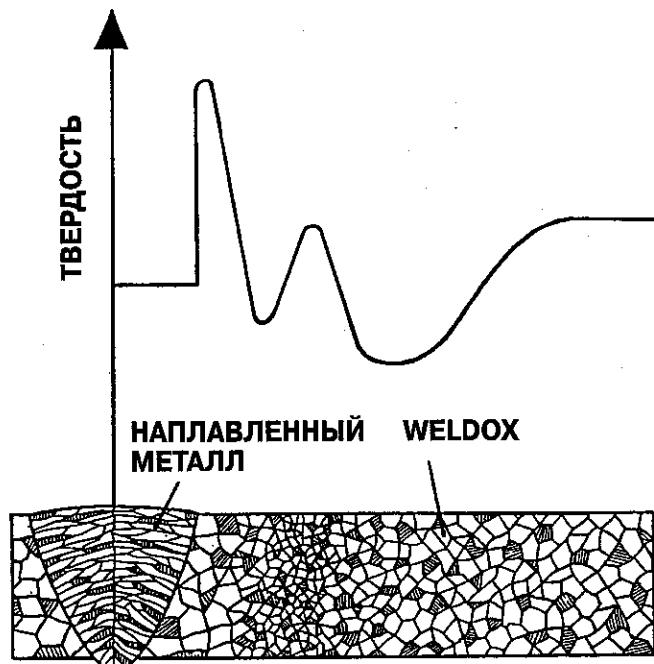


Рис. 4.2а Схематический профиль твердости сварного изделия из WELDOX-стали.

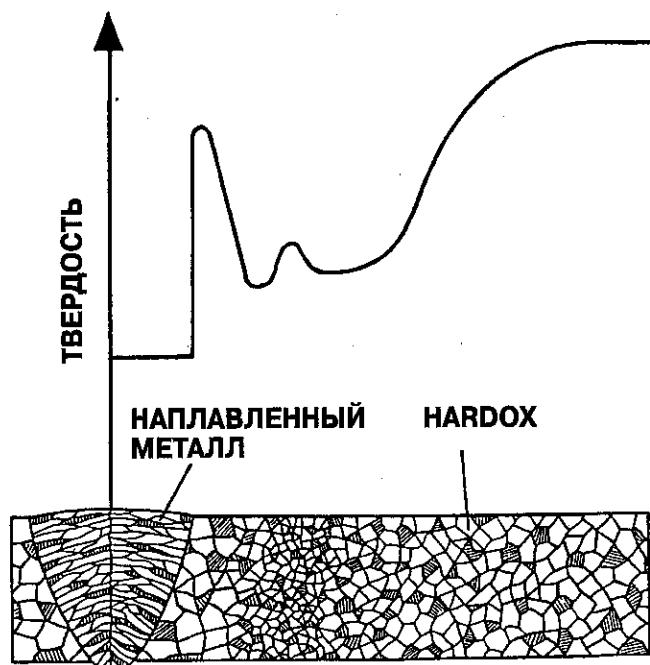
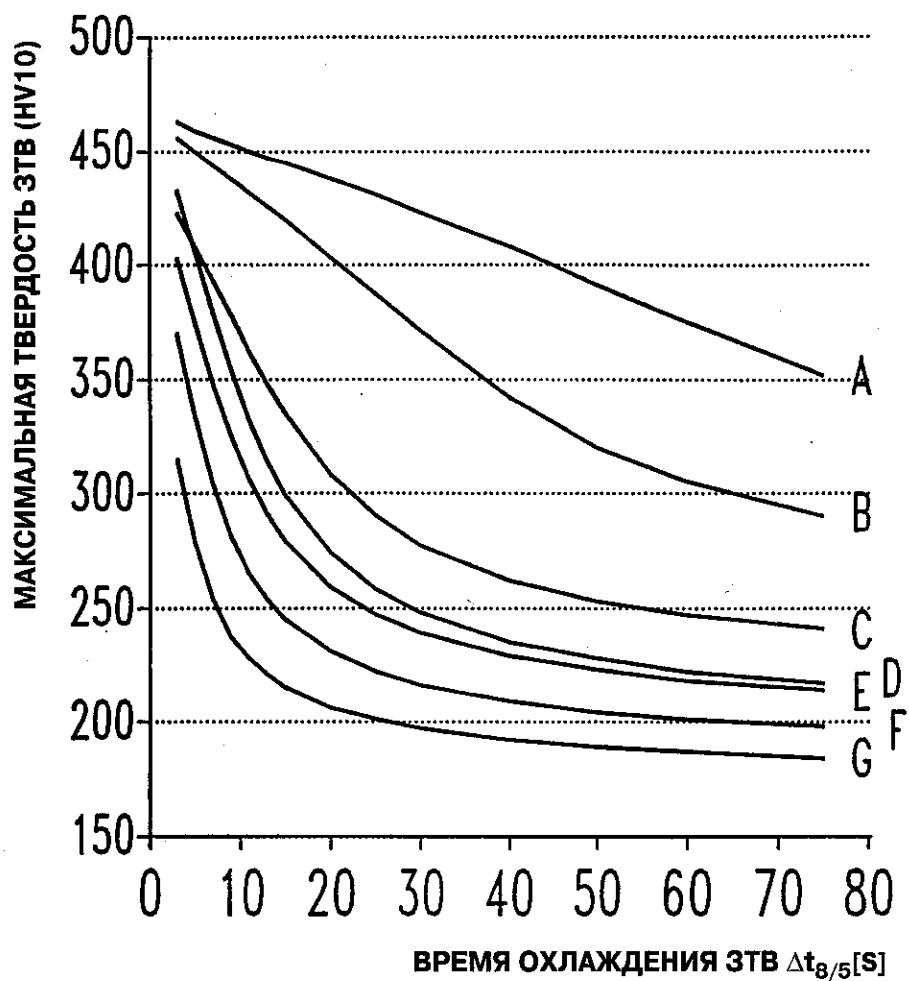


Рис. 4.2б Схематический профиль твердости сварного изделия из HARDOX-стали.

Твердость ЗТВ в зависимости от времени охлаждения ЗТВ



Марка стали	Макс. твердость ЗТВ	Марка стали	Макс. твердость ЗТВ
OX 524D $t \leq 80$	F	WELDOX 600	F
$t > 80$	D	WELDOX 700E $t \leq 12$ мм	F
OX 524E	D	$12 < t \leq 20$	D
OX 520M	D	$20 < t \leq 45$	C
WELDOX 355	G	45 мм $< t$	B
WELDOX 420	E	WELDOX 700F	B
WELDOX 460	G	WELDOX 900E	B
WELDOX 500	F	WELDOX 900F	B
WELDOX 500P	D	WELDOX 960E $t \leq 13$ мм	B
WELDOX 500Q	D	$13 < t \leq 20$	A
Марка D	D		
Марка E	D		

Рис. 4.2с Максимальная твердость ЗТВ (неотпущеная ЗТВ) как функция $\Delta t_{8/5}$. Точность графика: ± 40 HV10 (HV — твердость по Виккерсу). В таблицах значения графика переводятся на WELDOX и другие стали, производимые SSAB Oxelosund AB. OX 524 соответствует сталям Fe510 и St52-3.

При сварке HARDOX-сталей неизбежна некоторая местная потеря твердости в ЗТВ. Во время сварки важно поддерживать промежуточную температуру ниже 250 °С. При нагреве выше этой температуры листы HARDOX могут стать отпущенными и вызвать некоторую потерю твердости на большей площади.

Пиковая твердость в ЗТВ, данная на рис. 4.2c, относится к твердости ЗТВ, которая не отпущена последующим проходом шва.

Допускается отпуск предыдущего валика шва последующим проходом (используя так называемый метод валика отпуска), можно уменьшить пиковую твердость в ЗТВ. На рис. 4.2d показан метод валика отпуска. Проходы шва, расположенные на кромках наружной поверхности сварного шва, не должны быть заключительными проходами в сварном изделии. ЗТВ на кромках наружной поверхности сварного шва отпускаются финальными (заключительными) проходами.

Метод валика отпуска наиболее эффективен для ЗТВ, содержащих мартенсит, то есть, если величина для ЗТВ кромки наружной поверхности сварного шва меньше, чем приблизительно 15 с. Типичная пиковая твердость ЗТВ, отпущеной валиком отпуска, соответствует ЗТВ, имеющей значение $\Delta t_{8/5}$ 15–25 с, рис. 4.2c.

Если валик отпуска располагается, как показано на рис. 4.2d, тепло валика отпуска не оказывает отрицательного влияния на твердость ЗТВ. Напротив, валик отпуска улучшает твердость ЗТВ. Твердость сварного металла, однако, уменьшается с увеличением сопутствующего подогрева валика отпуска.

Если валик отпуска располагается близко к кромке наружной поверхности сварного шва, меньше, чем около 1–2 мм, твердость ЗТВ может не уменьшиться. Такой валик отпуска будет служить повторным подогревом Межкритической (первоначально Крупнозернистой) Зоны и уменьшит твердость.

Если валик отпуска располагается слишком далеко от кромки наружной поверхности сварного шва, он не будет эффективен.

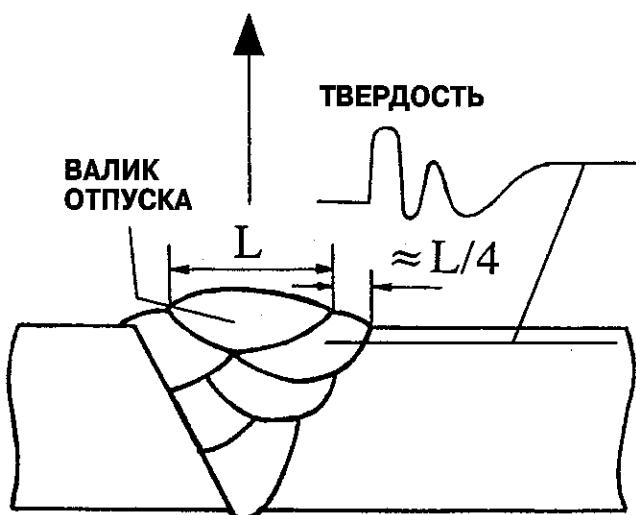
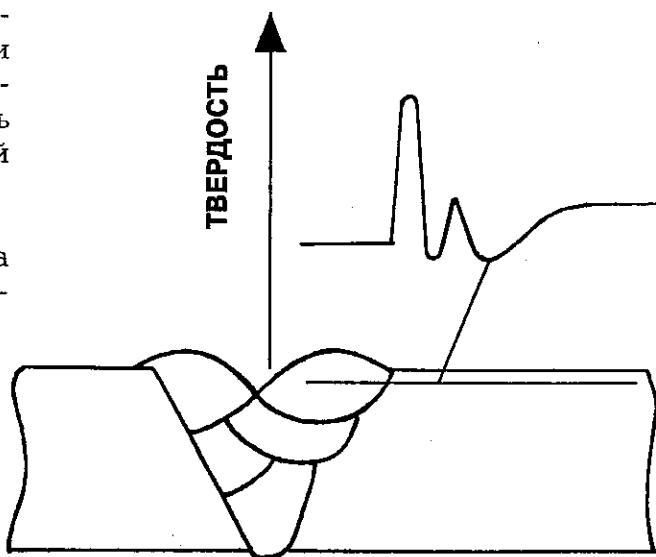


Рис. 4.2d Уменьшение максимальной твердости ЗТВ методом валика отпуска.

5. ТЕРМООБРАБОТКА ПОСЛЕ СВАРКИ (PWHT)

Для HARDOX-сталей PWHT не проводится, т.к. при этом материал становится отпущенными, и твердость уменьшается на 30 – 40 %.

Для обеспечения работы сварного изделия в дальнейшем PWHT выполняется с целью:

- 1) уменьшения остаточных напряжений в сварном соединении;
- 2) уменьшения твердости в ЗТВ;
- 3) улучшения ударной вязкости ЗТВ.

WELDOX является высококачественной сталью. В этих сталях единственной, технически допустимой причиной для PWHT, остается уменьшение остаточных напряжений.

Следовательно, PWHT для WELDOX рекомендуется только в случае, если желательно снизить остаточные напряжения или это требуется по конструкторской документации.

PWHT не улучшает значительно свойства ЗТВ WELDOX. PWHT может оказать отрицательное влияние на свойства основного материала и наплавленного металла:

1) На ударную вязкость WELDOX влияние PWHT незначительно. Максимальная твердость ЗТВ для WELDOX 700, 900 и 960 может быть уменьшена проведением PWHT приблизительно на 30 единиц Виккерса для значений $\Delta t_{8/5}$, меньших, чем 20 с. Для величин $\Delta t_{8/5}$, имеющих значения выше 20 с, уменьшение будет меньше. На максимальную твердость ЗТВ других WELDOX влияние PWHT незначительно.

2) Типичное влияние PWHT на свойства основного материала — уменьшение предела текучести и предела прочности на растяжение на 10 – 20 МПа. PWHT может также вызвать некоторое уменьшение ударной вязкости, особенно у горячекатанных сталей WELDOX 355-500. PWHT этих сталей сдвигнет кривую ударной вязкости к более высоким температурам приблизительно на 20 °C.

3) В зависимости от типа сварочных материалов (электродов) свойства растяжения и ударной вязкости наплавленного металла могут ухудшиться или улучшиться проведением PWHT. Для получения подробной информации о специальных электродах следует консультироваться с поставщиком.

В таблице 5 приводятся параметры для получения оптимальных результатов проведения PWHT. Если конструкция изготавливается в соответствии с проектными нормами, например нормами по сосудам высокого давления, параметры PWHT проектны норм превалируют над рекомендациям SSAB Oxelosund AB.

РЕКОМЕНДУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ PWHT

Для всех WELDOX сталей за исключением WX900 и WX960:

Скорость нагревания.....	минимум 100 °C/ча
Температура выдержки.....	550 – 580 °C
Время выдержки	2 мин/мм толщины листа минимум 30 мину
Скорость охлаждения	минимум 100 °C/ча

WX900 и WX960:

Скорость нагревания.....	минимум 100 °C/ча
Температура выдержки.....	520–550 °C
Время выдержки	2 мин/мм толщины листа минимум 30 мину
Скорость охлаждения	минимум 100 °C/ча

Таблица 5 Рекомендуемые параметры Oxelosund-сталей.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ШВОВ

В этой главе даны инструкции для минимизации остаточных напряжений и деформаций в сварных изделиях.

1. СНИЖЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ СВАРКИ И ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Иногда минимизация остаточных напряжений и деформаций в сварных изделиях становится большой проблемой. Планируя изготовление таких изделий необходимо рассматривать следующее:

- начинать сварку в местах наименьшей гибкости изделия и направлять швы к свободным концам;
- избегать начала и остановки шва в высоконапряженных областях;
- использовать пластичные электроды, имеющие настолько низкий предел прочности, насколько позволяют конструкционные требования к сварному изделию;
- использовать сбалансированную технологию сварки;
- минимизировать площадь поперечного сечения сварного соединения;
- учитывать геометриюстыка.

2. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Сталь расширяется при увеличении температуры и сжимается при охлаждении. Это вызывает деформации и остаточные напряжения в сварных конструкциях.

Во время охлаждения сварного изделия термическая усадка вызывает пластические либо упругие деформации. Выше предела текучести материал не может быть упруго деформированным. Все дополнительные деформации — пластические.

Сварные конструкции исследуются на суммарные остаточные напряжения и экстремально приложенные нагрузки. Остаточные напряжения нежелательны, если они вызывают или могут вызвать растрескивание, разрушение, коробление и т.д.

При сварке HARDOX-сталей минимизация остаточных напряжений важна с точки зрения уменьшения риска образования трещин.

3. УМЕНЬШЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ И ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ СВАРКИ

Величина остаточных напряжений сварки определяет предел текучести сварного шва. Конструкционные стали, в противоположность износостойким, могут подвергаться PWHT. PWHT уменьшает упругие деформации и снижает остаточные напряжения на 80–90 %.

Остаточные напряжения и деформации в сварном изделии могут быть уменьшены, если уменьшаются сжимающие напряжения в сварном шве в результате:

- 1) использования электродов с пределом прочности настолько низким, насколько позволяет конструкция изделия;
- 2) выполнения сварки по возможности малым количеством сварочного материала.

Деформация сварного соединения может быть уменьшена в результате использования равномерной сварки, как продемонстрировано на рис. 3а.

Деформация сварного соединения может быть уменьшена в результате уменьшения угла разделки сварного соединения. Это возможно потому, что термическая усадка в верхней части шва больше, чем в корне V-образного шва, рис. 3в.

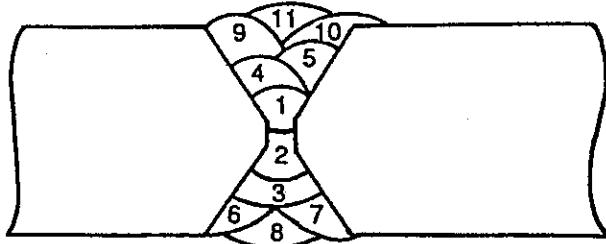


Рис. 3а Пример равномерной сварки.

V-образное соединение асимметрично относительно центральной плоскости листа. При сварке таких асимметричных соединений угловая деформация уменьшается с увеличением сопутствующего подогрева. Объяснить это явление довольно сложно, оно связано с термическим процессом в сварном соединении.

Хорошая последовательность выполнения сварных швов имеет первостепенное значение, так как позволяет минимизировать остаточные напряжения и деформации.

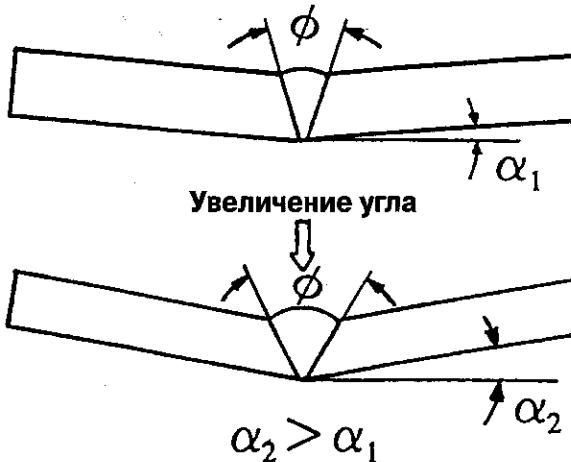
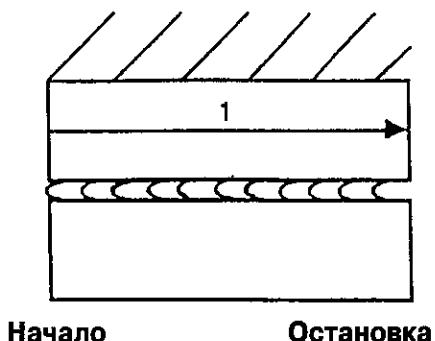


Рис. 3в Влияние угла разделки на деформацию сварных соединений.

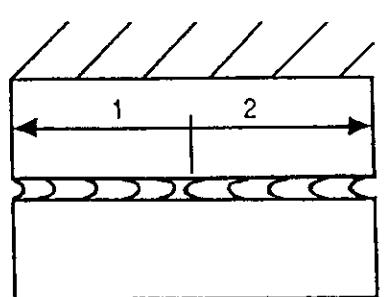
Основное правило: начинать сварку в местах с меньшей гибкостью или эластичностью компонентов. Направление сварки — к свободным концам, где сварное делье более свободно от возникающих деформаций.

Противоположный подход приведет к лее значительным напряжениям и деформациям в сварном соединении. Примеры улучшения последовательности швов показаны на рис. Зс.

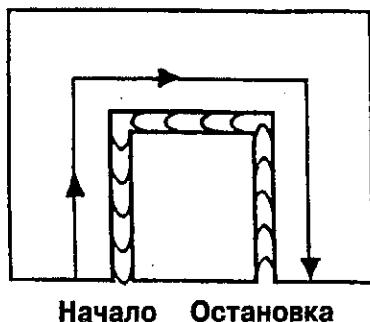
УЛУЧШЕНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ШВА



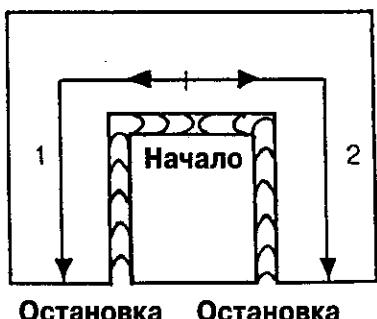
Начало **Остановка**



Остановка Начало Остановка



Начало Остановка



Остановка Остановка

Рис. 3с Пример равномерной сварки.

4. МЕСТОПОЛОЖЕНИЕ ТОЧЕК НАЧАЛА И ОСТАНОВОК СВАРНОГО ШВА

Шов не бывает свободен от дефектов полностью. Местоположение точек начала и остановок в сварном шве очень важный фактор, так как дефекты располагаются в этих местах. В местах начала шва часто присутствуют газовые поры, шлаковые включения и недостаток проплавления. В местах остановок шва могут присутствовать твердые застывшие частицы и трещины. Большинство из этих дефектов может быть удалено шлифовкой. Эта крайняя мера нежелательна и не может гарантировать удаление всех дефектов.

Следовательно, важно избегать начала и остановки шва в местах, где можно предсказать присутствие самых больших напряжений, например, в углах или других резких геометрических переходах.

Таким образом, при сварке должны применяться два основных правила :

- 1) избегать начала и остановки шва в углах ;
- 2) начинать сварку в жестких местах изделия и вести ее по направлению к свободным концам швов.

Например, хорошая последовательность швов и положений валика показана на рис. 4.

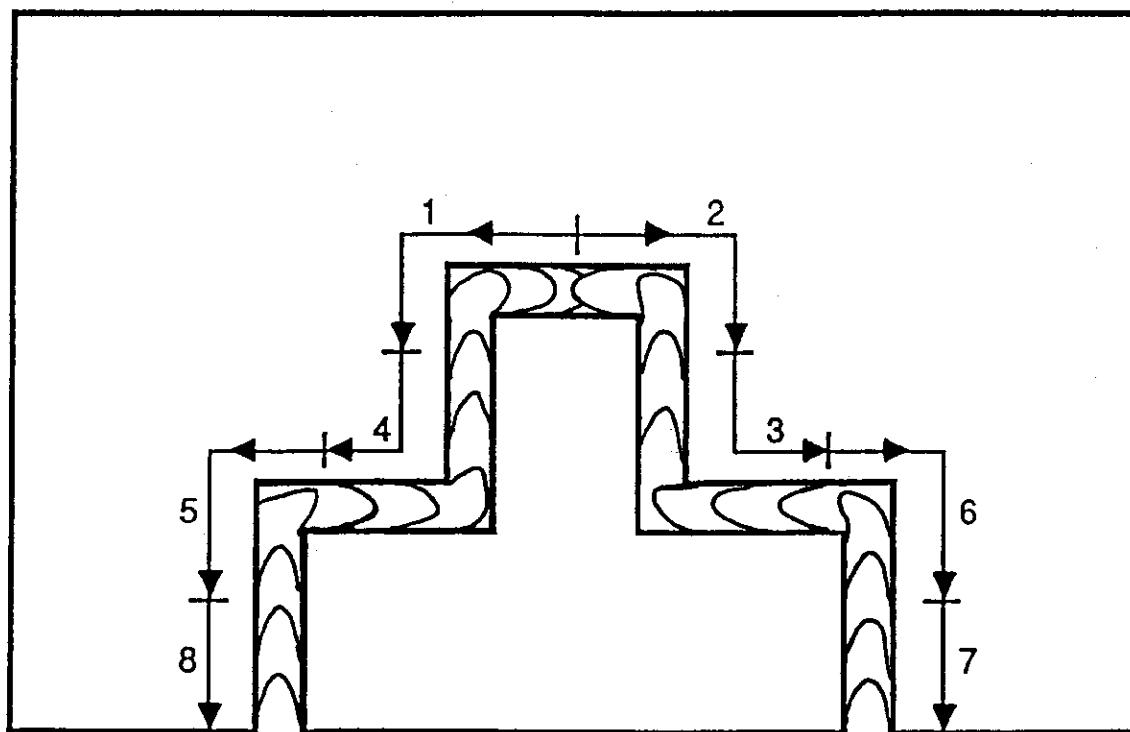


Рис. 4 Пример хорошей последовательности швов.

Замечания:

- 1) направление сварки всегда к свободным концам, т.е. туда, где привариваемые части обладают оптимальной гибкостью во время сварки;
- 2) места начала и остановки сварки никогда не располагаются в углах.

СНЯТИЕ УСТАЛОСТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ

В этой главе обсуждаются физические предпосылки усталостного трещинообразования. Обсуждается также выполнение и эффект метода снятия усталостных напряжений в сварных конструкциях.

1. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН, МЕТОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ К ИХ УСТРАНЕНИЮ

Уровень прочности сталей, используемых для многих конструкций, увеличился. Явления усталости чаще стали ограничивать возможности проектных решений. Усталость в сварных конструкциях почти исключительно сосредоточивается в местах сварных швов. Свойства усталости сварных конструкций могут быть, однако, улучшены. Это возможно обеспечить как усовершенствованием конструкции изделия, так и обработкой сварных стыков.

Усовершенствование конструкции:

- 1) размещение сварных стыков в менее напряженных областях;
- 2) уменьшение макроскопических концентраций напряжений;
- 3) смещение кромки наружной поверхности сварного шва из области концентрации напряжений;
- 4) использование сварного шва более высокого качества;
- 5) замена сварных деталей деталями гнутыми, литыми и кованными.

Обработка сварных швов:

- 1) уменьшение концентрации напряжений;
- 2) удаление центров кристаллизации трещин из сварного шва;
- 3) создание условий напряжения сжатия вокруг сварного шва.

Снятие усталостных напряжений выполняется только в самых критических областях конструкции. Обработка выполняется на кромке наружной поверхности сварного шва, где появляется большинство усталостных трещин.

Рекомендуемые методы обработки: первоначальная шлифовка небольшой фрезой и TIG (дуговая сварка в защитном газе вольфрамовым электродом) или плазменное оплавление кромки наружной поверхности шва.

2. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Усталость — процесс, в котором элементы конструкции, подвергаемые циклическим напряжениям ниже предела текучести в конечном итоге разрушаются. Механизм этого явления — медленное распространение трещин. Трещины возникают или развиваются во время циклической нагрузки. В течение каждого цикла нагрузки происходит медленный рост трещин.

Усталостные свойства стальных листов вообще улучшаются с увеличением предела прочности на растяжение. Это объясняется тем, что обычно стальные листы не содержат исходных трещин. До распространения усталостных трещин должны зарождаться (становиться центром кристаллизации) трещины на микроскопическом уровне. Препятствием к зарождению трещин может быть высокий предел прочности на растяжение. Для зарождения трещин требуется превышение предела прочности на растяжение, более высокие амплитуды нагрузки. Как только начинается образование усталостных трещин, дальнейшее распространение трещин происходит почти с постоянной скоростью. При испытании образцов, не содержащих сварных соединений, 90 % времени испытаний ушло на зарождение трещин. Остальные 10 % периода испытаний ушло на распространение трещин до разрушения.

На рис. 2а показаны различия в усталостных свойствах между сталью с разными пределами прочности на растяжение.

BS40, OX 524 и WELDOX 700 — конструкционные стали, имеющие гарантированны

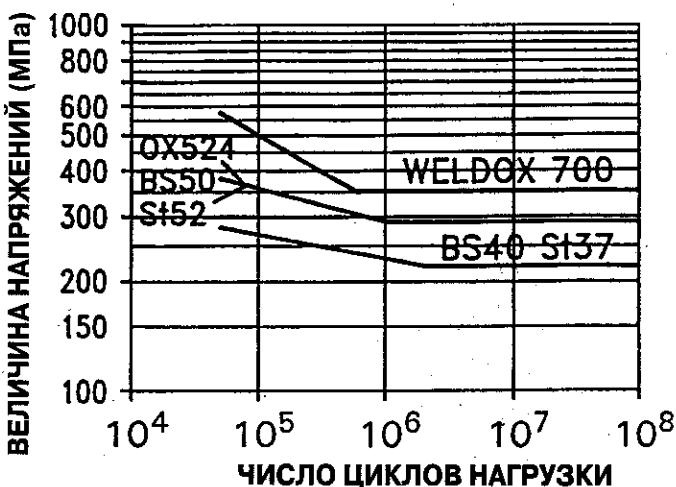


Рис.2а Графическая зависимость напряжений от числа циклов нагрузки для сталей, имеющих различные значения предела прочности на растяжение.

предел текучести около 250, 360 и 700 Н/мм² соответственно. Тип диаграммы, показанный на рис. 2а, называется S-N диаграммой. Диаграмма представляет величину напряжений (динамического нагружения) как функцию числа циклов нагрузки, при которой элемент (конструкции) будет разрушаться на определенном уровне вероятности, обычно 50 %. Область напряжений определяется рисунком 2д.

Сварное изделие неизбежно содержит «дефекты». Этих дефектов бывает достаточ-

но, чтобы устраниТЬ (или сдвинуть) обсуждаемую выше стадию установления трещин.

Сварные дефекты можно разделить на два типа:

- 1) концентрация напряжений в результате неправильной геометрии шва;
- 2) образование ядра трещины (места зарождение трещины).

Концентрация напряжений вызывается более или менее резкими переходами в локальной геометрии шва. Уровень нагрузки вокруг места концентрации напряжений локально увеличивается коэффициентом концентрации напряжений. В результате уровень нагрузки во много раз превосходит nominalный уровень напряжений. Типичные коэффициенты концентрации напряжений сварного изделия — 1,5 — 2,5. Наиболее важна концентрация напряжений в углах кромки наружной поверхности сварного шва, в разрезах и в корневых дефектах, см рис. 2б.

Ядро трещины — острые трещины, подобные дефекту, который после небольшого числа циклов нагрузки становится распространяющейся трещиной.

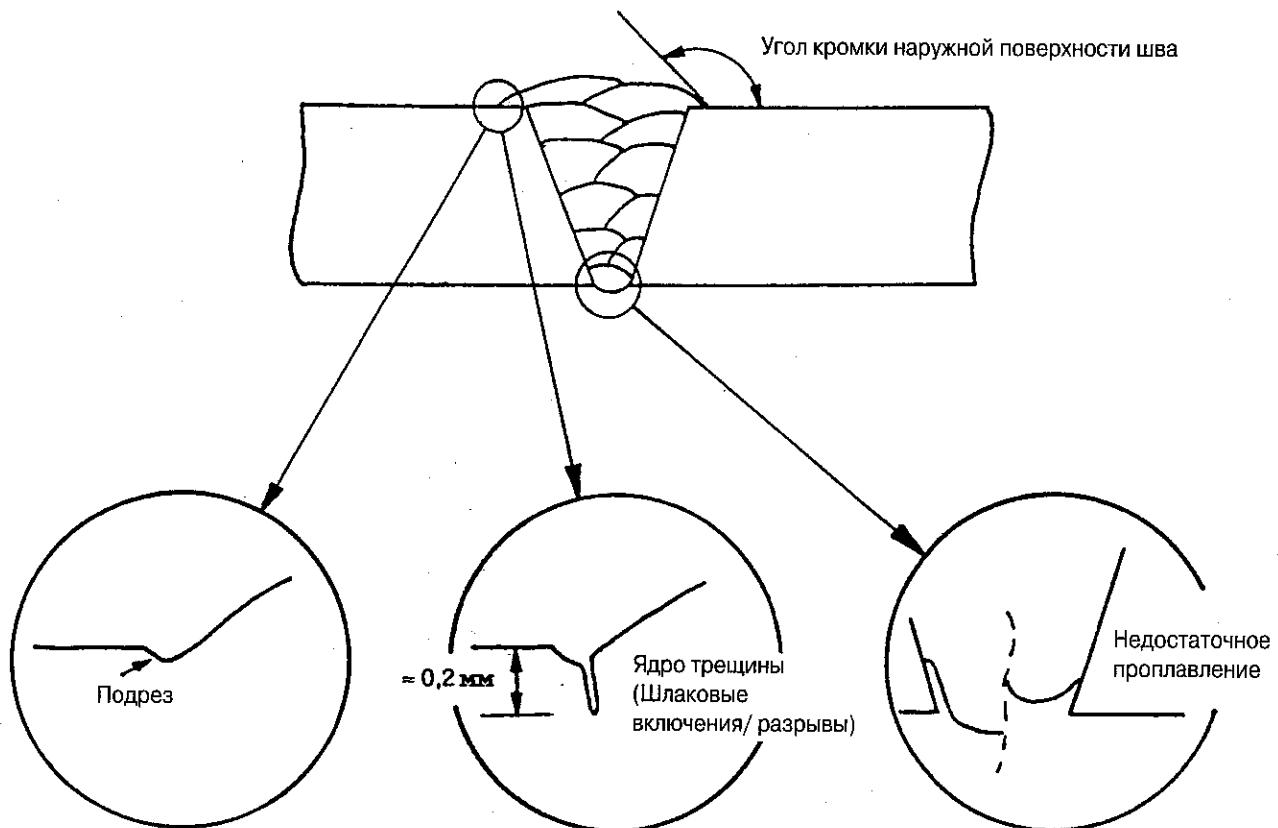


Рис. 2б Схематическое описание деталей в сварном соединении, определяющих свойства усталости.

Наиболее важные причины образования ядра трещин:

- 1) недостаток проплавления;
- 2) микроскопические шлаковые включения и разрывы (задирания).

Шлаковые включения и разрывы (задирания) имеют типичную и максимальную глубину приблизительно 0,05 мм и 0,2 мм соответственно. Они расположены на поверхности раздела сварной металл/основной материала на дне подрезов, рис. 2b. Эти микроскопические ядра трещин неизбежно присутствуют в кромке наружной поверхности сварного шва, безотносительно к качеству сварного изделия. На качество шва влияют концентрация напряжений и количество других присутствующих ядер трещин.

Вследствие наличия ядер трещины (места зарождения трещины) стадия установления (развития) трещины занимает только 10–30 % усталостного периода (усталостного разрушения) сварного изделия. Остальные 70–90 % занимает распространение трещины.

Скорость распространения усталостных трещин в сварном изделии приблизительно такая же, как и в листе. Присутствие концентраторов напряжений увеличивает скорость распространения. Следовательно, различие в продолжительности усталостного разрушения между сварным изделием и листом — следствие отсутствия продолжительной стадии зарождения трещин в сварном изделии.

Это физические предпосылки к тому, почему:

- 1) усталостные свойства сварного изделия не улучшаются с увеличением предела прочности;
- 2) усталостная прочность конструкции ограничивается сварными соединениями и их качеством.

Различия в усталостных свойствах сварных изделий из сталей, имеющих разные пределы прочности, показаны на рис. 2c. Соответствующая диаграмма для основного металла показана на рис. 2a.

Как видно из рис. 2c, график усталости содержит наклонную линию, с более или менее

резким наклоном для всех сварных изделий. Эта наклонная линия на своем верхнем конце заканчивается пределом текучести основного материала. Сварные изделия из сталей с высоким пределом прочности, следовательно, имеют лучшие свойства низкоциклической усталости, чем соответствующие сварные изделия из сталей с низким пределом прочности.

Обычно считается, что наклонная линия на рис. 2c должна быть закончена на своем нижнем конце граничной (пороговой) величиной — пределом усталости. Эта предельная величина, как обычно определяется, должна получиться при количестве циклов нагрузки $= 2 \cdot 10^6$.

В области напряжений ниже предела усталости рассматриваемое сварное изделие имеет неопределенный (неограниченный) срок жизни.

Эффективная нагрузка, которой подвергается конструкция, должна составлять сумму остаточных напряжений и внешней нагрузки. На рис. 2d показаны примеры спектра нагрузки. Спектр нагрузки состоит из динамической нагрузки, наложенной на статическую нагрузку. Разница между максимальным и минимальным напряжениями называется областью напряжений.

В течение каждого цикла нагрузки усталостная трещина немного растет. Рост этот пропорционален эффективной области напряжений. Эффективная область напряжений — часть области напряжений, которая относительно оси напряжений приходится на сторону растяжения, Рис. 2d.

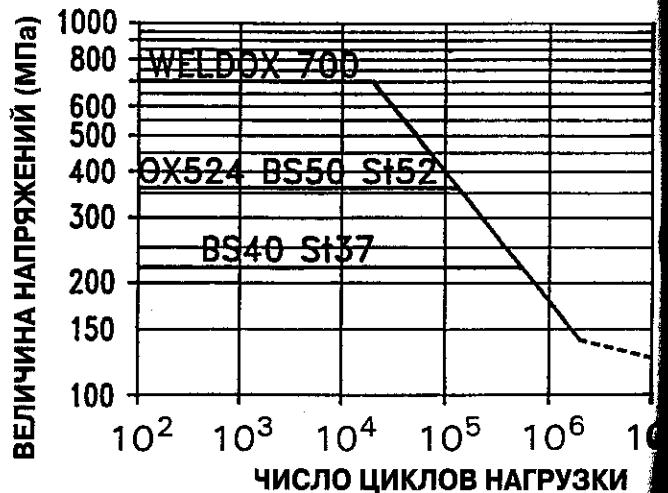


Рис. 2c Схематический график S-N (напряжения — число циклов нагрузки) стыковых сварных соединений, имеющих различные пределы прочности.

Компонента статического напряжения не влияет на распространение трещин (не вносит вклад в распространение трещины). Следовательно, высокий предел прочности сталей в сварных конструкциях позволяет вынести высокие статические напряжения.

Интенсивное использование сталей с высоким пределом прочности позволяет:

- 1) увеличить несущую способность конструкции;
- 2) уменьшить вес конструкции.

Величина напряжений, испытываемых сварными соединениями, увеличивается с увеличением рабочей нагрузки. Увеличение в области напряжений на коэффициент 2 снижает усталостную прочность сварного соединения приблизительно на коэффициент 8. Следовательно, сварные конструкции из сталей с высоким пределом прочности

более расположены к усталости, чем соответствующие конструкции с низким пределом прочности.

Как только трещины становятся достаточно большими для обнаружения, они могут быть зашлифованы или исправлены сваркой. Усталостная прочность исправленного шва обычно ниже усталостной прочности первоначального сварного изделия. Это может быть следствием того, что в месте, где выполняется исправление, происходит некоторое понижение качества. Исправление сваркой также обычно приводит к остаточным напряжениям растяжения, которые могут снизить усталостную прочность.

3. СНЯТИЕ УСТАЛОСТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ СВАРНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Есть два подхода к снятию усталостных напряжений стальных конструкций:

- 3.1 Улучшение проекта конструкции.
- 3.2 Обработка сварных изделий (сварных соединений):
 - 1) минимизация величины напряжения посредством изменения условий статических остаточных напряжений;
 - 2) снижение концентрации напряжений;
 - 3) устранение ядра трещины.

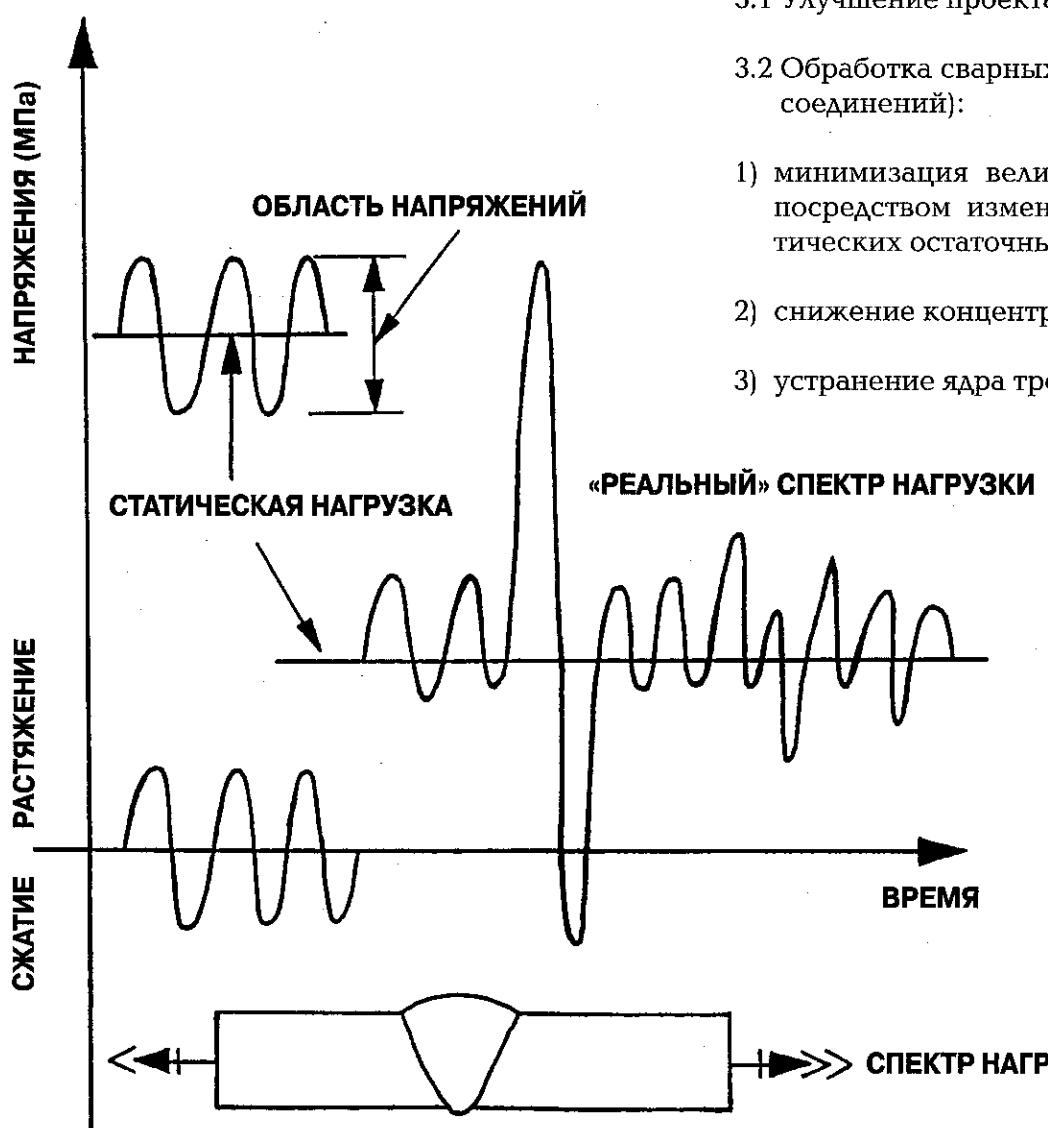


Рис. 2d Схематическое описание спектра нагрузки.

3.1 Улучшение проекта конструкции сварного изделия

Наилучший способ повышения усталостной прочности конструкции — улучшение проекта в наиболее критических частях конструкции. Это необходимо сделать до начала производства.

Улучшение проекта может быть выполнено различными путями:

- перемещение сварных швов в менее критические точки;
- ориентация сварных стыков не перпендикулярно к направлению нагрузки; оптимальная ориентация сварного соединения — по линии направления нагрузки;
- улучшение проекта конструкции позволяет уменьшить местные макроскопические напряжения;

— замена сварных компонентов гнутыми литыми и кованными;

— использование более высокого класса сварки на сварных изделиях.

Рис. 3.1а показывает примеры улучшения проекта конструкции.

Оптимальное положение сварных соединений в конструкциях, подвергающихсягибу, — вдоль нейтральной оси, рис. 3.1б.

Критические участки угловых сварных соединений, то есть углы, могут быть расширены, чтобы отодвинуть кромку наружной поверхности от места концентрации напряжений, рис. 3.1с.

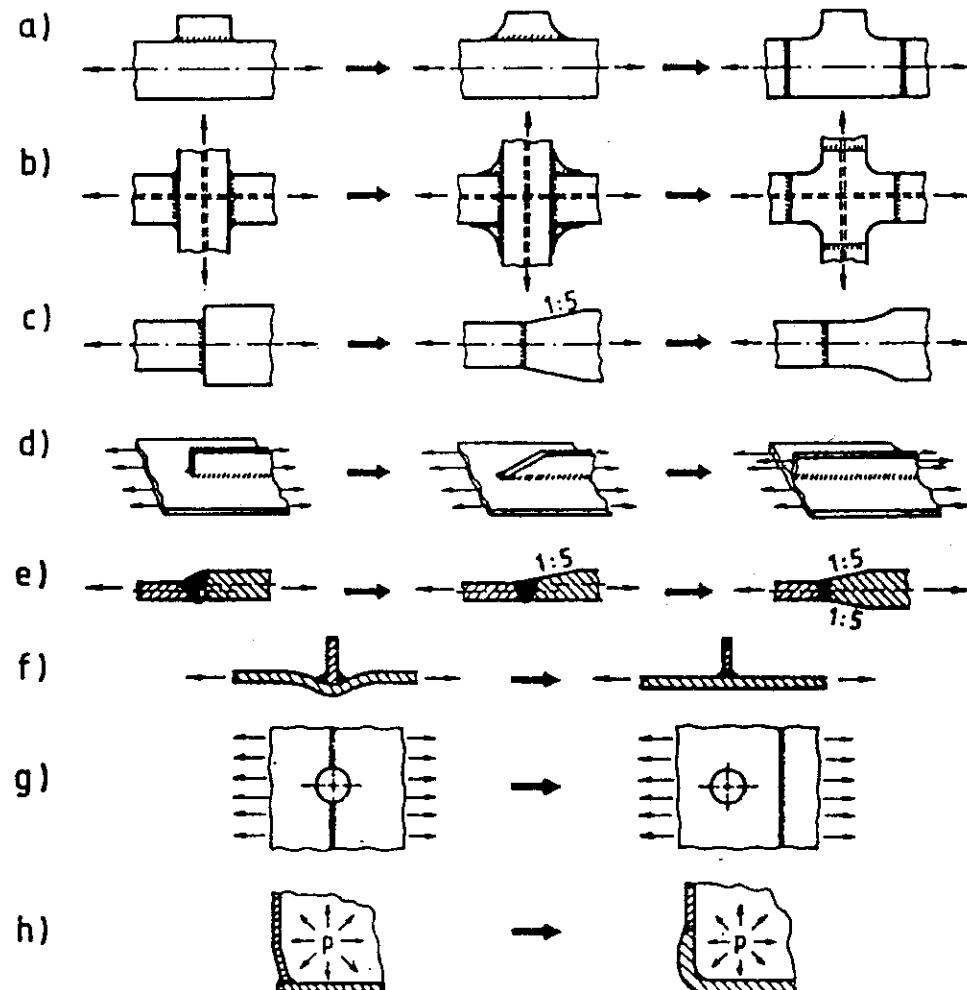


Рис. 3.1а Примеры проектных решений с целью повышения усталостной прочности.

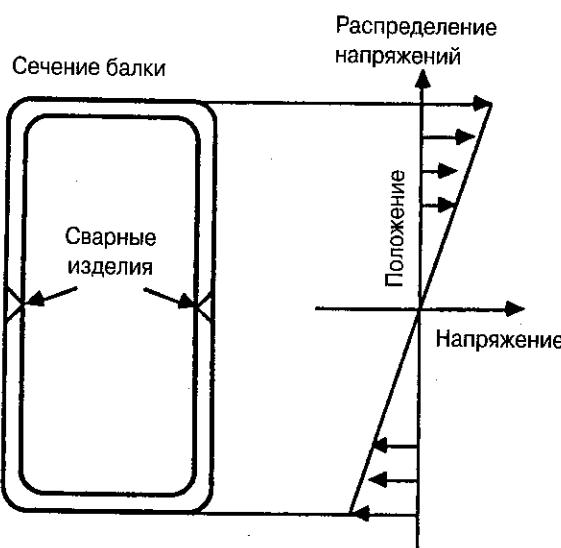
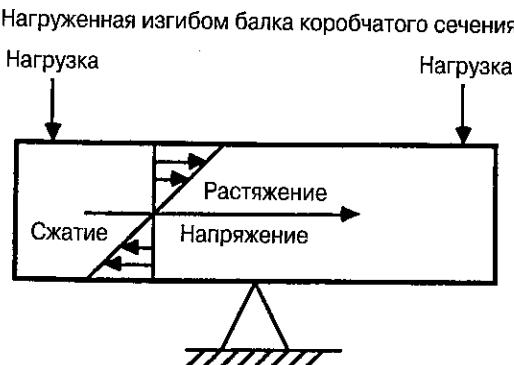


Рис. 3.1б Оптимальное положение сварных изделий в коробчатом стержне, подвергающемуся изгибу.

3.2 Обработка сварных изделий

Обработка сварных изделий включает один или комбинацию следующих методов:

- 1) изменение условий напряжений;
- 2) устранение ядра трещины;
- 3) уменьшение концентрации напряжений.

Обработка сварных изделий — дорогостоящая операция. Следовательно, обработка выполняется только на сварных соединениях, которые действительно важны для повышения усталостной прочности конструкции. Известно простое правило: сварные соединения, ориентированные поперечно направлению наибольших динамических нагрузок — соединения, наиболее подвергаемые усталости.

Усталостные трещины обычно начинают проявляться в линии оплавления между сварным металлом и основным материалом. Обработка сварных изделий, следовательно, ограничивается кромкой наружной поверхности шва. Цепь никогда не бывает сильнее, чем ее слабейшее звено.

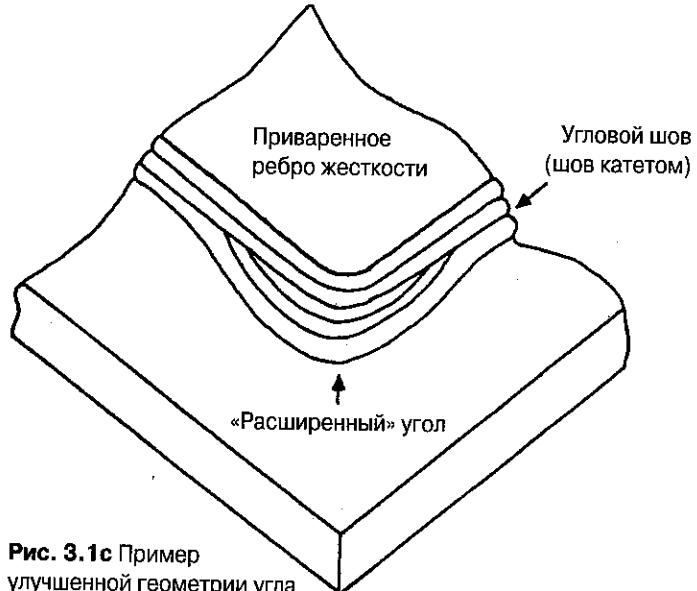


Рис. 3.1с Пример улучшенной геометрии угла

3.2.1 Напряженное состояние

Сварное изделие (сварное соединение, шов,стык) подвергается результирующему напряжению наложенных рабочих нагрузок, веса, конструкционных напряжений и остаточных напряжений. Величина компонентов нагрузки обычно неизвестна в деталях. Это часто затрудняет вычисление результирующей нагрузки.

Напряженное состояние может быть улучшено устранением остаточных напряжений растяжения или наложением локальных сжимающих напряжений. Предварительное требование для эффективности всех методов — уменьшение области результирующих эффективных напряжений. Этот тип обработки содержит в себе лучший потенциал для компонентов, подвергающихся сжимающим (внешним) нагрузкам. Если внешние нагрузки создают эффект растяжения при обработке, то метод обычно недостаточно эффективен.

Величина остаточных напряжений уменьшается в результате термообработки после сварки (PWHT).

При локальной молотковой проковке или дробеструйной обработке вокруг сварных изделий могут возникать поверхностные напряжения сжатия.

Напряжения сжатия могут также возникнуть при перегрузке на растяжение или при испытании на растяжение чрезмерной нагрузкой. Перегрузка также вызывает местную текучесть вокруг концентрации напряжений, созданной сварными изделиями (соединениями).

3.2.2 Ядро трещины и концентрация напряжений

Ядра трещины располагаются в кромке наружной поверхности шва в переходе между сварным металлом и основным материалом. Устранение ядра трещины одновременно изменяет местную геометрию кромки наружной поверхности шва. Следовательно, устранение ядер трещин и снижение концентрации напряжений происходит в одной и той же операции. Этот метод улучшения усталостных свойств всегда эффективен.

Обработка кромки наружной поверхности шва может выполняться шлифовкой или оплавлением и наплавкой. Стыковые соединения иногда имеют сварочные лунки и усиления, которые подвергают механической обработке или шлифуют заподлицо с поверхностью.

Если используется шлифовальная машина, то глубина такой обработки должна быть по меньшей мере 0,5 мм для гарантии полного устранения ядра трещины.

Предпочтительно шлифование небольшой фрезой (буrom), т.к. это не дает следов

шлифовки, поперечных направлению нагрузки, вызвавшей усталостные явления. Следы шлифующего диска могут быть также неблагоприятны, как и устранные подрезы и ядра трещин.

Наплавка на кромку наружной поверхности шва выполняется сваркой TIG (сварка в защитном газе вольфрамовым электродом) или плазменной сварочной горелкой. Кромка наружной поверхности шва оплавляется до глубины 2 мм.

Эффекты оплавления кромки наружной поверхности шва:

- 1) шлаковые включения, всплывающие на поверхность шва;
- 2) разрывы (задирания) и трещины сплавляются сваркой;
- 3) кромка наружной поверхности шва становится гладкой, что приводит к снижению концентрации напряжений.

Влияние различных типов обработки на величину усталостной прочности сварного изделия показано на рис. 3.2.2. Описаны

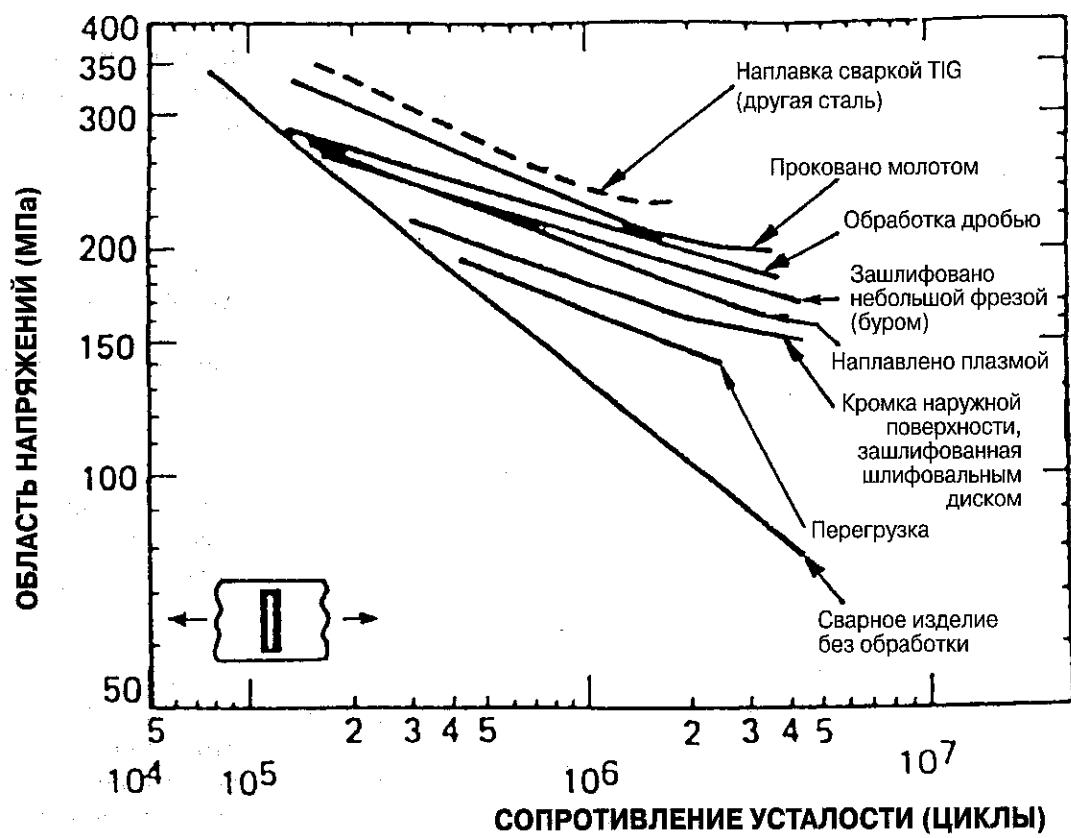


Рис. 3.2.2 Пример влияния обработок на свойства усталости сварного изделия.

различных видов обработки изменяется в различных исследованиях. Предполагается, что объяснение этому в неидентичности условий. Обработка сварных изделий может увеличивать предел усталости на коэффициент 2.

Недавние исследования показывают, что обработка дает больший эффект в снятии усталостных напряжений сварных изделий для сталей с высоким пределом прочности, чем для сталей с низким пределом прочности.

3.2.3. Систематизация методов улучшения свойств усталости

Проковка молотом вообще рассматривается как наиболее эффективный метод улучшения свойств усталости сварных изделий.

Проковка молотом означает нанесение серии ударов, вызывающих образование пластических деформаций в материале. При этом создаются зарубки (риски) глубиной примерно 0,5 мм.

К сожалению, исполнение этого метода сопровождается большим шумом, что часто делает неприемлемым его использование.

Шлифование небольшой фрезой (буром) и наплавка (оплавление) шва рассматрива-

ются как методы равной эффективности. Они классифицируются как занимающие второе место по эффективности из методов повышения усталостной прочности.

Шлифование имеет такое преимущество, как нечувствительность к окружающей среде и может, следовательно, выполняться на открытом воздухе. К сожалению, шлифование буром заключает в себе и некоторые неудобства для оператора. Неудобства — вибрации и фрезерование резцом, имеющим форму острой бритвы.

Наплавка на кромку наружной поверхности шва имеет преимущества в быстроте и отсутствии каких-либо неудобств для оператора. Недостаток метода — его чувствительность к окружающей среде. Он должен выполняться в закрытом помещении и быть огражден от влияний погоды.

Обработка дробью классифицируется как третий по эффективности метод улучшения усталостных свойств сварного изделия.

Эффективность термообработки после сварки и перегрузки растяжением или испытания гидростатикой как методов улучшения усталостных свойств зависит от рабочих нагрузок и напряженного состояния конструкции.

НАПЛАВКА ТВЕРДЫМ СПЛАВОМ

В этой главе обсуждается повышение износостойкости конструкции наплавкой твердым сплавом. Даны инструкции по сварке наплавкой твердым сплавом.

1. СОПРОТИВЛЕНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ИЗНОСУ

Наплавка твердым сплавом используется для защиты или ремонта компонентов, подвергающихся износу.

Диапазон изменения типов износа широк. Каждый тип износа имеет свой механизм или комбинацию других механизмов. Правильное понимание типа происходящего износа необходимо для выбора подходящего сплава для наплавки твердым сплавом.

2. ТИПЫ ИЗНОСА

АБРАЗИВНЫЙ износ. Элемент абразива (шлифовки) — обычно минерал.

АДГЕЗИЯ происходит между скользящими поверхностями вследствие трения. Мелкие выступающие, торчащие элементы прилипают друг к другу при микротрении в сварке и разрываются.

ЭРОЗИЯ — износ, который получается от сталкивания (соударения) с твердыми частицами в воздухе или потоке жидкости.

УСТАЛОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ — появляется от контакта вращения между металлическими поверхностями. Примером могут служить железнодорожные колеса и шариковые подшипники. Поверхность становится изношенной вследствие трещинообразования и расслаивания.

ФРЕТТИНГ-КОРРОЗИЯ (КОРРОЗИОННОЕ ИСТИРАНИЕ) — образование и отслаивание окислов (окалины) между скользящими или вибрирующими поверхностями контакта. Например, между звеньями цепи.

КАВИТАЦИЯ (ПОРООБРАЗОВАНИЕ) — когда давление жидкости локально станов-

ится ниже достаточного, жидкость может закипать, образуя газовые пузырьки. Газовые пузырьки, разрушаясь, создают ударные волны, которые ударяются об окружающие поверхности, например, винты турбин и насосов.

3. НАПЛАВКА ТВЕРДЫМ СПЛАВОМ HARDOX-СТАЛИ.

HARDOX-сталь с отличной износостойкостью, и обычно для этих сталей не следует использовать наплавку твердым сплавом. Наплавка твердым сплавом приводит к потерии сопротивления износу HARDOX-сталей. Это могут быть местные снижения твердости в ЗТВ.

Иногда тяжелому износу подвергаются только локальные участки конструкций. В таких случаях по стоимости может быть эффективной наплавка твердым сплавом этих площадей по сравнению с заменой ного компонента HARDOX-стали.

Следует выбирать электроды, которые обеспечивают желаемую твердость перед следующей термообработкой. Сталь HARDOX поставляется в закаленном состоянии. Термообработка наплавленного шва приведет к отпуску стали со значительной потерей твердости.

Наплавка твердым сплавом легче всего вызывает растрескиваемость. Чтобы остановить распространение трещин в листе с HARDOX, рекомендуется вязкий слой наплавки на свариваемые кромки промежуточного металла между наплавкой твердым сплавом и листом. Для промежуточного слоя следует использовать электроды с новым покрытием с низким пределом прочности или аустенитные электроды. Метод промежуточного слоя схематично показан на рис. За.

Если для сварных соединений из HARDOX-стали требуется хорошее сопротивление износу, электроды для наплавки твердым сплавом рекомендуются только после последнего прохода (наложения последнего валика сварного шва). Корневой и промежуточные проходы выполняются электродами с основным покрытием с низким пределом прочности.

прочности. Правильное сварное изделие с хорошей сопротивляемостью износу схематически показано на рис. 3в.

В наплавках твердым сплавом часто развиваются последующие трещины. При вы-

соких уровнях прочности эти трещины могут распространяться в основной материал и, в конечном итоге, вызвать разрушение конструкции. Следовательно, если возможно, следует избегать наплавки твердым сплавом на высоконапряженных участках.

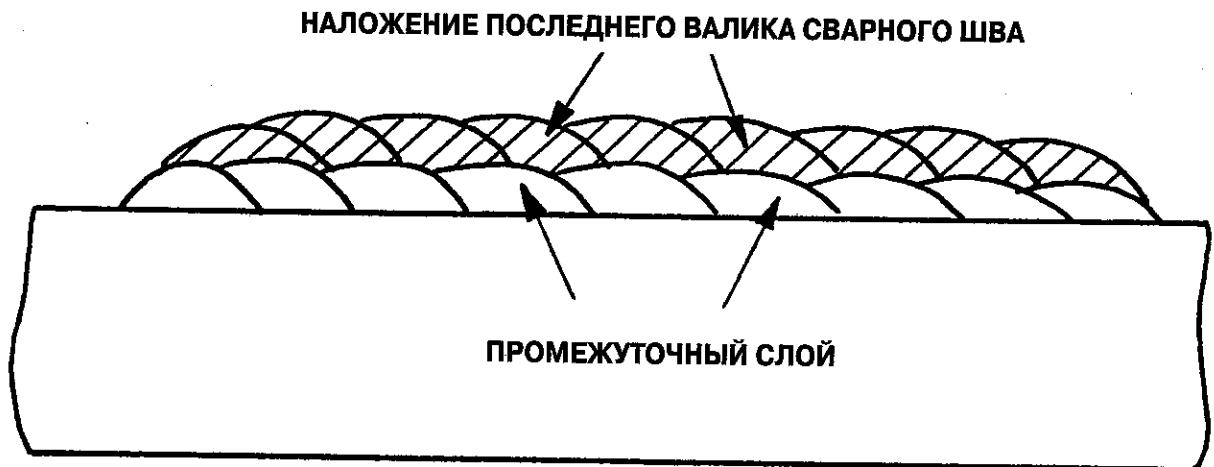


Рис. 3а Наплавка твердым сплавом с промежуточным слоем.



Рис. 3в Правильное сварное изделие из HARDOX-стали с наплавкой твердым сплавом последнего валика сварного шва (последнего прохода).

ИСПРАВЛЕНИЕ СВАРКИ И ДУГОВАЯ СТРОЖКА (поверхностная резка)

В данной главе рассматривается влияние на характеристики структуры металла процессов восстановления и исправления сварных швов, а также процесса электродуговой сварки при удалении дефектов. Приведены рекомендации по проведению данных видов работ.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Процесс восстановления и исправления сварных швов на материалах типа OX, WELDOX, HARDOX аналогичен процессу сварки данных материалов. При этом действительны все рекомендации, приведенные в предыдущих главах данного руководства.

2. ПРОЦЕСС ВОССТАНОВЛЕНИЯ И ИСПРАВЛЕНИЯ СВАРНЫХ ШВОВ

Вследствие износа или повреждения компоненты конструкции требуют восстановления и исправления. Восстановление требуется также для удаления дефектов, таких как трещины.

Поскольку процесс восстановления и ремонта, как правило, проводится на открытом воздухе, возникают проблемы образования трещин из-за проникновения водорода. В случае работ со сталью с низким эквивалентом по углероду предпочтительно использовать электроды. Стали всех толщин марок OX и WELDOX класса 355-600, и также WELDOX 700 D, E и HARDOX 400 с толщинами листов до 20 мм, имеют обедненный химический состав. Следовательно, данные стали являются предпочтительными при выборе материалов для изготовления рабочих конструкций, подлежащих нагрузкам и ремонту в «жестких» условиях. К примеру, оборудование для землеройных машин и тракторов.

Как правило, детали и узлы, требующие замены, удаляются газовой резкой или дисковой пилой.

Газовая резка деталей из HARDOX и толстых листов HARDOX 400 может привести к возникновению эффекта «холодные трещины». Если возникновение трещин желательно, единственным существующим простым и надежным способом является предварительный подогрев. Чем выше начальная температура, тем меньше риск возникновения «холодных трещин». Рекомендуемая температура предварительного подогрева 150 – 200 °C. Перед началом становительных работ дефекты и некачественные сварные швы удаляются зачисткой шлифовальными машинками или строжкой (вырезанием). При удалении трещин и сных швов с неполным проваром расплавленный металл может заполнить другие трещины, расположенные рядом. При этом данные дефекты не могут быть определены методом NDT (неразрушающего контроля). Следовательно, после строжки канавка должна быть дополнительно зачищена на глубину 2 мм для того, чтобы убедиться в отсутствии скрытых дефектов. Рекомендуется провести NDT контроль непосредственно после зачистки (смотри раздел «Неразрушающие методы контроля»).

При удалении дефектов при помощи кратковременного расплавленного металла будет изменен его состав, в своем составе большой процент углерода. Свариваемость не ухудшается при условии, что в канавке, получившейся в результате дуговой резки, нет отвердевших остатков сварного шва. При этом насыщение углеродом основного металла является незначительным.

ЗТВ (зона термического влияния) канавки, полученной дуговой сваркой, имеет же характеристики, что и соответствующая свариваемая деталь. Обычно сварка производится после обработки канавки дуговой сваркой. Как правило, глубина проникновения ЗТВ составляет пару миллиметров. Следовательно, основная часть ЗТВ после окончания канавки дуговой сваркой удаляется в процессе последующей сварки. Влияние ЗТВ свариваемой детали после обработки канавки дуговой сваркой оказывается значительным. Оно имеет сходство с при обычной сварке за несколько проходов.

Перед началом сварки канавку и 20-миллиметровую зону около канавки требуется зачистить до основного металла (до блеска). Это требуется для удаления загрязнений из зоны сварки и исключения возможности попадания водорода.

При проведении ремонтных и восстановительных работ сварка проводится в соответствии с требованиями, оговоренными в главе «Основные инструкции по сварке».

Для соединения деталей кроме дуговой сварки могут применяться также другие методы. При условии, что предварительный подогрев невыполним или является дорогостоящей операцией, допускается применять болтовые соединения деталей. При использовании современного оборудования рекомендуется соединение деталей электrozаклепками. Данный способ соединения деталей без подогрева является наиболее быстрым, дешевым и надежным. Этот способ особенно рекомендуется для соединения деталей, изготовленных из HARDOX 500 и толстых листов HARDOX 400.

НЕРАЗРУШАЮЩИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

В данном разделе рассматриваются основные методы проведения неразрушающего контроля.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Метод NDT (неразрушающего контроля) в основном применяется для контроля готовых деталей и узлов. Метод NDT применяется для определения качества изготовления изделий и для контроля качества соединения свариваемых деталей.

Как определяется уже в названии этого метода, данный контроль не требует разрушения соединяемых деталей и не оказывает отрицательного влияния на них.

Методика проведения NDT основывается на опосредованном (косвенном) определении дефектов. При этом контроль должен проводиться опытным и знающим дефектоскопистом, который может правильно оценить результаты проведенного контроля.

Основными и наиболее важными методами NDT являются следующие:

- 2.1. Визуальный контроль;
- 2.2. Капиллярная дефектоскопия;
- 2.3. Магнитопорошковая дефектоскопия;
- 2.4. Ультразвуковой контроль.

2. МЕТОДЫ NDT

2.1. Визуальный контроль

До некоторой степени качество различных видов газовой или электродуговой сварки может быть проконтролировано методом визуального контроля. Данным методом определяются форма шва, степень сплавления и наличие проникающих дефектов.

Надежность и качество данного метода могут быть улучшены при использовании приборов, к примеру, увеличительных стекол, карманных линз, видеокамер и трубчатых окуляров. Видеокамеры и трубчатые окуляры дают возможность проконтролировать обратную сторону шва в трубах и других изделиях, где доступ к осмотру затруднен.

2.2. Капиллярная дефектоскопия

В основном данный метод применяется для определения проникающих дефектов в неферромагнитных материалах. При этом для ферромагнитных материалов более надежным является метод магнитопорошковой дефектоскопии. Проникающая жидкость — это жидкость с низкой вязкостью и небольшим коэффициентом поверхностного натяжения. Такого рода жидкость проникает и заполняет даже микродефекты.



Рис. 2.2 Капиллярная дефектоскопия

Методика проведения контроля

1) Очистка поверхности перед контролем

Важно, чтобы изделие (компонент), подлежащее контролю, было очищено от ржавчины, окалины, масел, смазок и т.д. Данную очистку следует проводить смыvанием, травлением или очисткой металлическими щетками. При проведении механической очистки требуется обратить особое внимание на то, чтобы при этом не остались «забитыми» возможные дефекты.

2) Нанесение жидкости (пенетранта)

Пенетрант наносится распылением, поливом, нанесением кистью или погружением в ванну с пенетрантом. Через некоторое время (от 5 с до 30 мин) пенетрант заполнит дефекты, расположенные на поверхности как показано на рис. 2.2. Интервал времени зависит от типа дефектов, которые Вы определяете, температуры, типа пенетранта и контролируемого материала.

3) Удаление излишнего количества пенетранта

Излишнее количество пенетранта должно быть удалено с контролируемой поверхности. Удаление проводится смыvанием, вытира нием или с помощью нанесения специальных химических реагентов.

Важно, чтобы на контролируемой поверхности не оставалось пенетранта, поскольку он будет создавать помехи при проведении контроля. На Рис. 2.2 показано, как правильно должен быть удален пенетрант (до какого уровня).

4) Проведение контроля (нанесение проявителя)

Проявителем может служить сухой белый порошок или быстроиспаряющаяся супензия. Суспензия наносится на контролируемую поверхность тем же способом, что и пенетрант.

Сухой белый порошок наносится распылением.

Пенетрант «всасывается» проявителем, как указано на рис. 2.2.

Процесс проявления может быть остановлен при помощи нанесения на контролируемую поверхность закрепителя (фиксатора). Образовавшаяся пленка может быть удалена с контролируемой поверхности и сохранена как документальное подтверждение.

5) Оценка полученных данных

При этом методе легко определяется расположение и длина дефектов. По степени смачивания проявителя пенетрантом и размерам поверхности «мокрого» проявителя опытный дефектоскопист определяет ширину и глубину поверхностных дефектов.

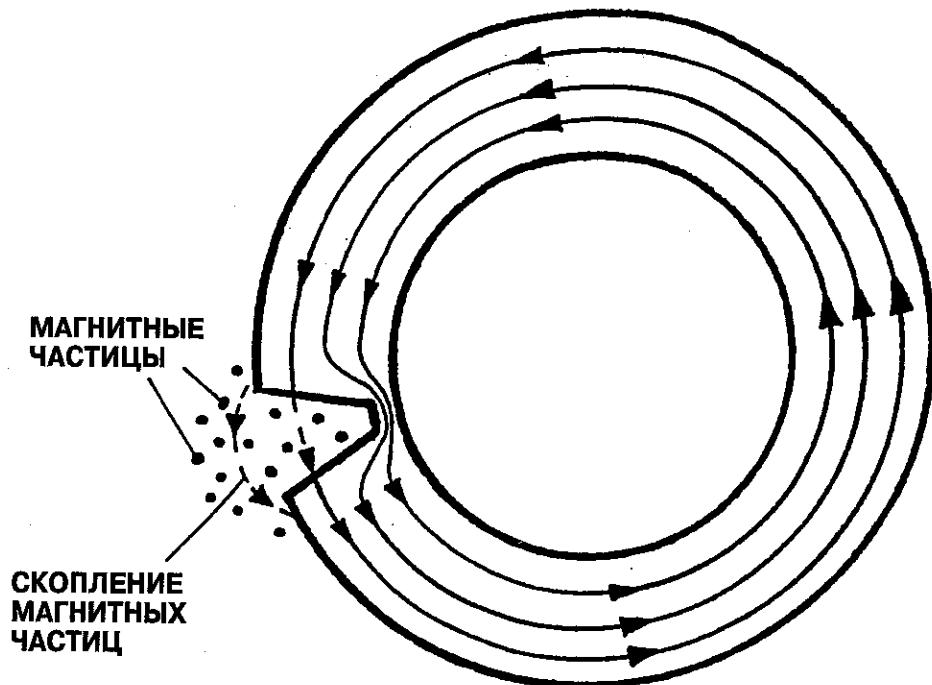


Рис. 2.3 Магнитопорошковая дефектоскопия. Магнитные частицы притягиваются к краям радиальной трещины намагниченного контролируемого участка.

2.3. Магнитопорошковая дефектоскопия, MPI

Метод магнитопорошковой дефектоскопии применяется для определения поверхностных дефектов только для ферромагнитных материалов.

Данный метод основан на наведении магнитного поля вокруг проводника. Если дефект в виде трещины попадает в магнитное поле, магнитный флюс скапливается вокруг него. Порошок собирается внизу трещины, но часть его поднимается на поверхность металла и поляризуется по краям трещины. Магнитные полюса вокруг трещины притягивают мелкозернистые магнитные частицы как указано на рис. 2.3.

Дополнительно при помощи данного MPI метода можно определять скрытые дефекты, находящиеся близко к поверхности.

Методика проведения контроля

1) Очистка поверхности перед контролем.
Смотри раздел 2.2.

2) Намагничивание

Контролируемая поверхность может быть намагнечена либо подведением электрического тока к контролируемой поверхности,

либо вводя ее во внешнее магнитное поле. Наиболее часто внешние магнитные поля наводятся от электромагнитных катушек или постоянных магнитов. При этом магнитный флюс должен ориентироваться в направлении, перпендикулярном предполагаемому направлению расположения дефектов.

Переменный ток (электрический ток) применяется для выявления поверхностных дефектов. Для скрытых дефектов, расположенных на глубине до 5 мм, применяется постоянный ток.

3) Проведение контроля (нанесение магнитных частиц)

Применяются 2 основные среды для нанесения магнитных частиц — сухие порошки, наносимые распылением сжатым воздухом, и суспензии, наносимые разбрзгиванием. Первые более чувствительны при определении скрытых дефектов, последние — для поверхностных. Для визуального контроля к магнитным частицам добавляется либо краски, либо флюоресцентные вещества.

4) Оценка полученных данных

При этом методе легко определяется расположение и длина дефектов. Незначительные помехи могут быть вызваны царапинами или линиями сплавления.

2.4. Ультразвуковой контроль

Данный метод используется для выявления скопления пор, шлаковых включений, трещин и других скрытых дефектов в металле.

При обнаружении дефекта раздается звуковой сигнал из электроакустического преобразователя, обычно работающего на пьезоэлектрических кристаллах. Частота сигнала в пределах от 0,5 до 10 МГц. Чем меньше дефекты, тем выше должна быть частота. Ультразвуковые волны в твердых средах распространяются на большие расстояния. Они почти полностью отражаются от трещин и инородных неметаллических/металлических включений.

Выполнение

1) Очистка элемента

Поверхность должна обеспечивать хороший акустический контакт. Ржавчина, окалина и другие загрязнения могут вызвать отдельные (случайные) показания. Поверхность должна быть обработана тем лучше, чем более высокая частота используется при УЗК.

2) УЗК-испытания

УЗК выполняется в режиме отражения или в режиме передачи.

В режиме отражения щуп работает с одной стороны образца, действуя как передатчик, и как приемник. Немедленно за выходом сигнала щуп включается в режим приемника. Полученные сигналы записываются осциллографом на экране как вертикальные пики. Если материал однороден и свободен от дефектов, ультразвуковой сигнал проходит беспрепятственно на обратную сторону поверхности элемента, где отражается и возвращается к щупу. Если сигнал находит дефект, щуп дополнительно зафиксирует отражение от дефекта.

Временная ось осциллографа калибруется для прямого определения расстояния от поверхности до потенциальных отражателей.

В режиме передачи используются два щупа. Один как передатчик, другой — как приемник. В зависимости от размера дефекты

(нарушения сплошности) частично или полностью маскируют исходящие сигналы. Сигнал, записанный приемником, усиливается (преобразуется) и демонстрируется подходящим прибором, например, вольтметром.

Наиболее часто в испытаниях УЗК используется режим отражений. Этот режим проще в исполнении и обеспечивает более высокую чувствительность, чем режим передачи.

3) Контактирующее вещество (контактный агент)

Для всех испытаний УЗК очень важна хорошая акустическая связь между щупом и испытуемым элементом. Эта связь может быть улучшена наложением контактного вещества. Примером могут служить вода и мыло — и то, и другое создает хороший акустический контакт с поверхностью исследуемого элемента.

4) Щупы (пробники)

Есть три основных типа щупов для УЗК

- 1) щупы для испытания в нормальном (перпендикулярном) направлении к поверхности элемента;
- 2) щупы для УЗК, используемые в наклонном направлении к поверхности исследуемого элемента, — угловые щупы;
- 3) щупы для исследования поверхности

При УЗК сварных изделий иногда применяются угловые щупы. Они имеют лучший угол воздействия при недостаточном проплавлении. Они также исключают необходимость шлифования сварной луны поддиша с поверхностью для хорошего акустического контакта (рис. 2.4).

5) Оценка

УЗК проводится для обнаружения скрытых дефектов. Интересующие показания могут быть записаны фотографированием экрана осциллографа. Оператор должен обладать значительным мастерством и опытом, чтобы уметь перевести показания УЗК в типы и размеры дефектов. Расположение дефекта легче определяется при УЗК.

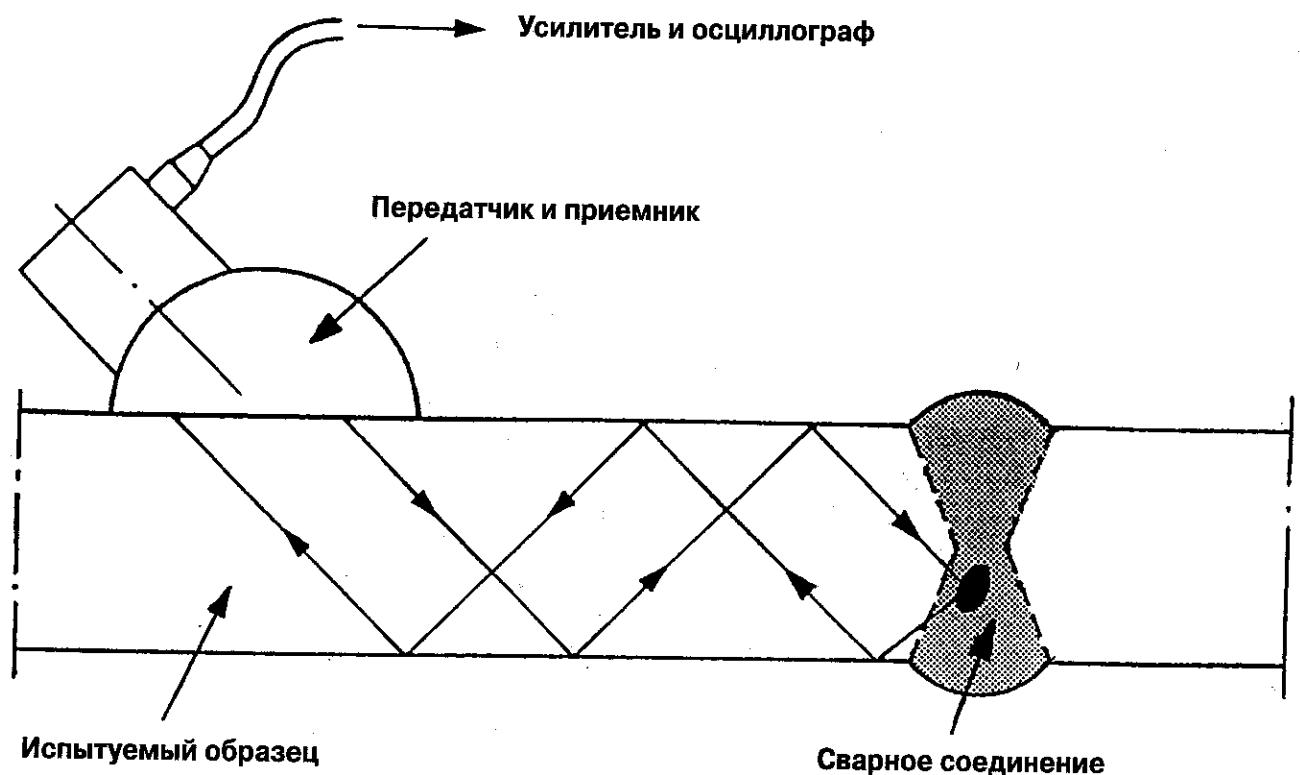


Рис. 2.4 УЗК сварных соединений.