

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра машиноведения

Е. В. Пояркова

ДЕФЕКТЫ СВАРНЫХ ШВОВ И СОЕДИНЕНИЙ

**Часть 1
Трещины**

Методические указания

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 15.03.01 Машиностроение, 15.04.01 Машиностроение

Оренбург
2018

УДК 620.10
ББК 30.121
П 75

Рецензент – доцент, доктор технических наук Ю. А. Чирков

П75 **Пояркова, Е. В.**

Дефекты сварных швов и соединений. Часть 1. Трещины: методические указания / Е. В. Пояркова; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург : ОГУ, 2018. – 48 с.

Методические указания предназначены для выполнения лабораторно-практических заданий по дисциплинам «Современные методы оценки конструктивной и технологической прочности сварных соединений конструкций», «Техническая диагностика и контроль качества» и «Машиноведение» обучающимися по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 15.03.01 Машиностроение, 15.04.01 Машиностроение.

Методические указания подготовлены в рамках проекта по совершенствованию содержания и технологий целевого обучения студентов в интересах организаций оборонно-промышленного комплекса («Новые кадры ОПК-2017»).

УДК 620.10
ББК 30.121

© Пояркова Е. В., 2018
© ОГУ, 2018

Содержание

Введение	4
1 Трещины в сварных швах	9
1.1 Общие положения	9
1.2 Горячие трещины	10
1.3 Холодные трещины.....	20
1.4 Методы борьбы с образованием трещин	23
2 Содержание обобщенной группы дефектов сварных соединений по типу трещин	28
2.1 Трещины обычные	28
2.2 Микротрещины.....	29
2.3 Продольные трещины	31
2.4 Поперечные трещины	33
2.5 Радиальные трещины	36
2.6 Трещина в кратере.....	38
2.7 Раздельные трещины	40
2.8 Разветвленные трещины	43
3 Вопросы для самоконтроля	45
4 Список рекомендованных источников.....	47

Введение

Дефекты сварных соединений являются следствием неправильного выбора или нарушения технологического процесса изготовления сварной конструкции, применения некачественных сварочных материалов и низкой квалификации сварщика.

Цель настоящих методических указаний сводится к приобретению обучающимися навыков по выявлению дефектов и определению качества сварки различных элементов конструкций и оборудования внешним осмотром, а также с помощью диагностических приборов и оборудования, имеющихся в арсенале Аэрокосмического института ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет».

В настоящих методических указаниях представлен достаточно большой объем иллюстративного материала, который может быть полезен не только обучающимся по программам высшего образования по направлениям подготовки 15.03.01 Машиностроение, 15.04.01 Машиностроение, по образовательным программам СПО специальности 15.02.08 Технология машиностроения, а также для специалистов сварочного производства, и контролеров-дефектоскопистов различных уровней.

В указаниях приведены дефекты сварных швов и соединений в соответствии с ГОСТ 30242 (ИСО 6520-82). Классификация дефектов представлена в таблице 1. Название каждого дефекта представлено в виде его трехзначного цифрового обозначения (или четырехзначного обозначения его разновидности); а также буквенного обозначения согласно Классификации дефектов Международного института сварки (МИС). К каждому дефекту имеются:

- дополнения в виде их иллюстрированных изображений дефектов;
- пояснения допустимости дефекта;
- характеристики внешних признаков (при наличии);
- информация о причинах и процессе их возникновения;

- указания на способы предупреждения дефектов (как перед сваркой, так и во время сварки);
- возможные способы их обнаружения и устранения.

Таблица 1 – Классификация дефектов сварных соединений по группам

Группа дефектов	Содержание обобщенного типа дефектов сварных соединений
I	трещины
II	поры, газовые полости
III	твердые включения
IV	несплавления и непровары
V	нарушение формы шва
VI	прочие дефекты, не включенные в вышеперечисленные группы

Прежде чем приступить к анализу всех возможных дефектов, возникающих в сварных соединениях, необходимо уточнить некоторые понятия, представленные в таблице 2.

Таблица 2 – Термины и определения, наиболее применимые к сварным соединениям

Термин	Определение
1	2
Горячие трещины (ГТ)	хрупкое межкристаллитное разрушение металла шва, возникающее в твердожидком состоянии при завершении кристаллизации шва под действием сварочных напряжений
Дефект	несоответствие сварного шва или сварного соединения требованиям нормативной документации
Допустимый дефект	дефект, присутствие которого не ухудшает механических и эксплуатационных свойств сварного шва и разрешено нормативно-технической документацией
Зона термического влияния (ЗТВ)	участок, нагретый при сварке до температуры в интервале от 1300 °С до 2000 °С, в котором произошли структурные и механические изменения основного металла

Продолжение таблицы 2

1	2
Контроль качества	процесс проверки соответствия показателей качества сварных соединений и изделий требованиям нормативных документов
Кратер	усадочная раковина в конце валика сварного шва
Недопустимый дефект	дефект, наличие которого категорически запрещено нормативно-технической документацией
Оксидные включения	соединения кислорода с химическими элементами, например, $\text{SiO}_2 - \text{MnO} - \text{FeO}$; $\text{SiO}_2 - \text{MnO} - \text{Al}_2\text{O}_3$; $\text{SiO}_2 - \text{FeO} - \text{Al}_2\text{O}_3$
Остаточная деформация	деформация, возникающая в сварном изделии к моменту его полного охлаждения
Погонная энергия	показатель сварочного процесса, представляющий собой отношение эффективной мощности источника теплоты к скорости сварки
Режим сварки	совокупность характеристик сварочного процесса, которые должны выполняться для получения сварного соединения
Свариваемость	технологическое свойство металлов или их сочетаний образовывать в процессе сварки соединения, отвечающие конструктивным и эксплуатационным требованиям к ним
Сварка плавлением	процесс сварки, при котором металл в зоне соединения находится в жидком состоянии при нагреве выше температуры плавления
Сварное соединение	совокупность трех участков сварного шва, зоны оплавления и зоны термического влияния
Сварной шов	участок сварного соединения, в пределах которого металл был расплавлен, а затем закристаллизовался
Сварочная ванна	объем металла, находящегося в расплавленном состоянии при сварке
Сварочные деформации	деформации, возникающие в сварной конструкции вследствие нагрева и охлаждения металла при сварке
Твердое включение	частица твердого инородного вещества в металле сварного шва. Такие включения могут быть шлаковыми, флюсовыми, оксидными и металлическими
Термический цикл	характер изменения температуры во времени в данной точке сварного соединения
Трещины основного металла (ТОМ)	трещины при производстве металлопроката, раскрывшиеся под действием термического цикла сварки
Флюс	вещество, вводимое в зону сварки для создания защиты дуги и сварочной ванны от воздуха, а также для металлургических процессов во время сварки

Продолжение таблицы 2

1	2
Холодные трещины (ХТ)	трещины, образующиеся в сварных соединениях преимущественно после охлаждения; возникают под действием сварочных напряжений
Шлак	стекловидный расплав на поверхности шва после затвердевания различных окислов, образующихся в результате металлургических процессов во время сварки
Эвтектика	механическая смесь кристаллов компонентов, образующаяся при затвердевании металла сварочной ванны и имеющая наиболее низкую температуру плавления по сравнению с металлом шва

Стойкость металла к образованию горячих трещин зависит от:

- величины и скорости нарастания действующих в период кристаллизации в металле шва растягивающих напряжений;
- химического состава металла шва и длительности его пребывания в состоянии пониженной пластичности;
- формы сварочной ванны;
- расположения межкристаллитных участков по отношению к растягивающим напряжениям;
- характера (темпа) и изменения упруго-пластической деформации.

Холодные трещины образуются в сварных соединениях при относительно невысоких температурах, когда металл шва и околошовной зоны приобретает высокие упругие свойства, такие трещины зарождаются, как правило, через некоторое время после окончания сварки и затем медленно, на протяжении нескольких часов и даже суток распространяются по длине и глубине.

Отсутствие дефектов соединений при сварке металлов плавлением – единственная гарантия надежности сварных соединений. Дефекты сварных швов уменьшают прочность и эксплуатационную надежность сварных соединений и могут привести к разрушению всей конструкции.

Причинами возникновения дефектов сварных швов являются нарушения технологического процесса при подготовке, сборке, сварке, термообработке соединяемых узлов, а также небрежностью и низкой квалификацией сварщика.

Классификация дефектов приведена в межгосударственном стандарте ГОСТ 30242-97 «Дефекты соединений при сварке металлов плавлением. Классификация, обозначения и определения».

1 Трещины в сварных швах

1.1 Общие положения

К процессу образования трещин в сварных соединениях нужно подходить осознанно и с достаточным уровнем теоретической подготовки по этой тематике. С точки зрения простого здравого смысла трещины в сварных соединениях невозможны: металл при выполнении сварного шва сначала жидкий, а затем при охлаждении – пластичный. Однако факторы (причины и следствия), обуславливающие образование сварного соединения, являются также и факторами (условиями), образования трещин в нём, как-то:

- нагревание;
- плавление;
- кристаллизация;
- охлаждение в жёстком закреплении;
- структурные, фазовые превращения;
- внутренние напряжения;
- микро- и макро- неоднородности, и тому подобное.

Появление (получение) сварного соединения без трещин скорее исключение, чем правило.

В любом сварном соединении (особенно при сварке плавлением) присутствуют трещины (хотя бы микро-), но в благоприятных условиях (в удачном случае) они охлопываются, а в неблагоприятных условиях – (в неудачном случае) – раскрываются, то есть обнаруживают себя.

Трещины в сварных соединениях принято классифицировать так, как показано на рисунке 1.1.

Способность материала сварного соединения воспринимать без разрушения деформации и напряжения, вызываемые термомодеформационным

циклом сварки, называется его технологической прочностью и является важнейшей характеристикой металла, подлежащего сварке.

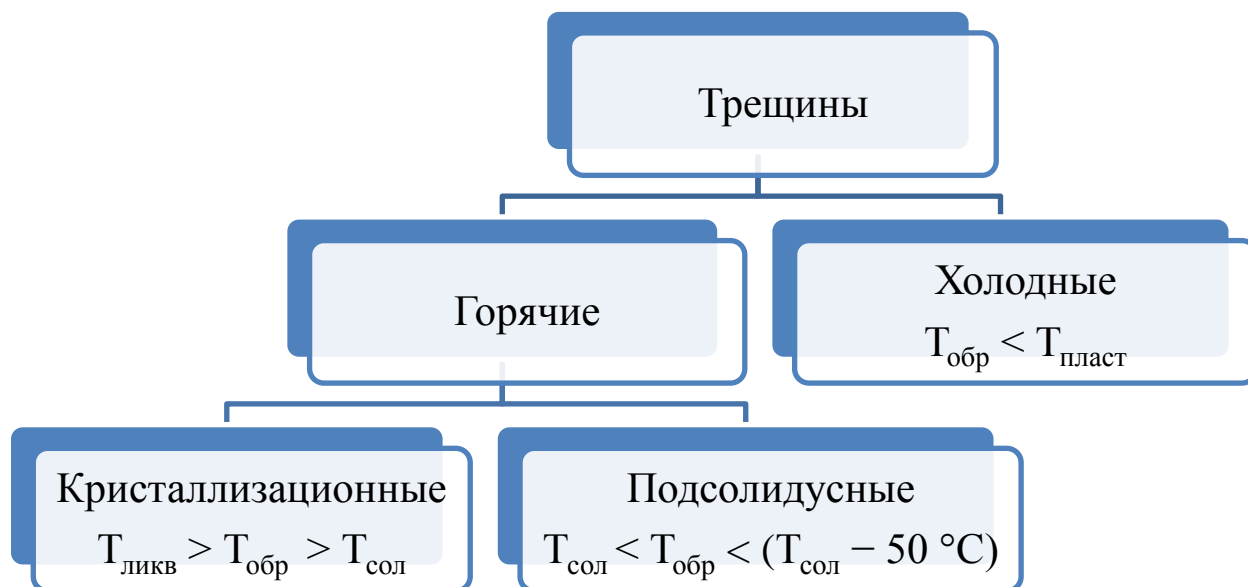


Рисунок 1.1 – Классификация трещин в сварных соединениях

1.2 Горячие трещины

Согласно теории технологической прочности, разработанной профессором Н.Н. Прохоровым, сопротивляемость сварного соединения образованию горячих трещин определяется такими факторами, как:

- пластичностью металла в температурном интервале хрупкости;
- значением (величиной, протяженностью) температурного интервала хрупкости;
- темпом температурной деформации сварного соединения.

Основной вид горячей трещины показан на рисунке 1.2.

Возникновение сварочных деформаций (и напряжений) обусловлено концентрированным местным нагревом при сварке и всегда имеет место быть. Это связано с тем, что нагреваемый объем металла при сварке всегда находится в закреплении соседними не нагреваемыми объемами металла и вынужден претерпевать пластические деформации. Это, в свою очередь, при охлаждении

приводит к возникновению силовых напряжений и дополнительных деформаций.

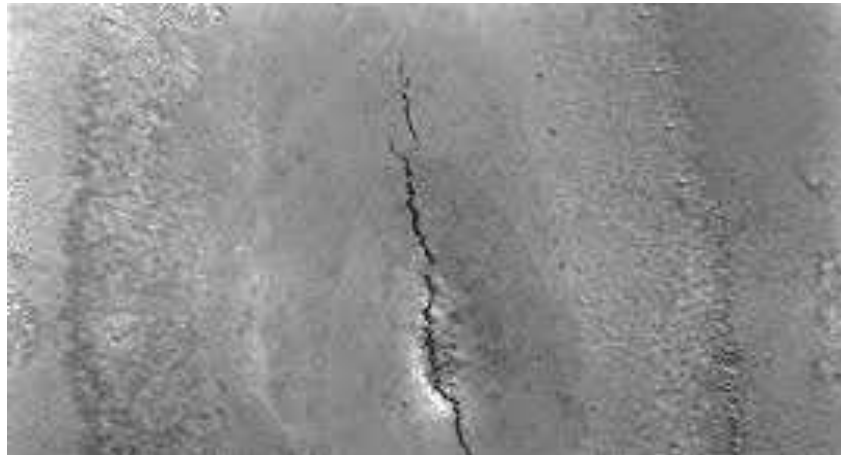


Рисунок 1.2 – Продольная горячая трещина

Деформации в твердом металле реализуются по известным механизмам: двойникования, внутризеренного скольжения (приводящего к появлению линий сдвига) и межзёренного проскальзывания, сопровождающегося появлением ступенек по границам зерен. В такой же последовательности возрастает роль этих составляющих деформаций при повышении температуры металла и уменьшении скорости деформации, причем с повышением температуры сопротивление деформации приграничных участков зерен падает более интенсивно, чем внутризеренных объемов, а запас межзеренной пластичности заметно ниже, чем внутризеренный. Поэтому при высоких температурах обычным является межзеренное разрушение при меньшей пластичности.

Если после затвердевания чистых металлов теоретически можно рассматривать их деформирование только в однофазном твердом состоянии, то для обычно применяемых сплавов приходится считаться с наличием при кристаллизации двухфазного твердо-жидкого состояния (рисунок 1.3).

По мере понижения температуры металл изменяет свое состояние из жидкого в жидкотвердое, затем твердо-жидкое и, наконец, твердое. Как правило, пластичность (или точнее величина, обратная вязкости) жидкости весьма велика.

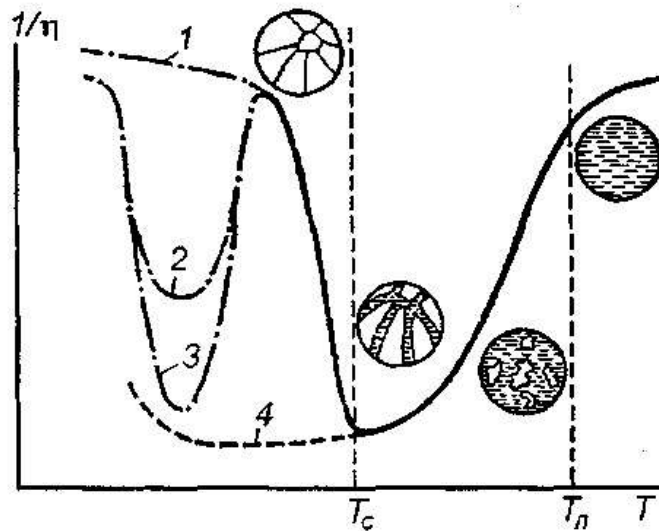


Рисунок 1.3 – Двухфазное твердо-жидкое состояние

При появлении разобщенных кристаллов твердой фазы (жидко-твердое состояние) пластичность заметно уменьшается, но остается достаточно высокой, определяемой в основном жидкой фазой. Когда при дальнейшем снижении температуры растущие кристаллиты срастаются, образуя общий каркас, разъединяющий в той или иной степени остающиеся объемы жидкой фазы, пластичность в основном определяется этим скелетом твердой фазы. Однако при его разрушении (разрывах) достаточное количество подвижной жидкости может заполнять эти разрывы -«залечивать» их в процессе продолжающейся кристаллизации. При уменьшении количества жидкой фазы и ее расположении в объеме двухфазного сплава в виде пленок между кристаллитами деформационная способность сильно снижается (главным образом против сдвига, сохраняя высокую прочность на отрыв) и разъединенные (разорванные) кристаллиты «не залечиваются». При полном затвердевании пластичность однофазного твердого металла значительно возрастает.

Хотя прямых экспериментальных определений деформационной способности различных металлов и сплавов в области высоких температур

очень немного, в целом схематически ее можно охарактеризовать – сплошной линией на рисунке 1.3.

Наиболее низкую (но всегда имеющуюся) пластичность металлы имеют в твердожидком состоянии, в котором после образования общего каркаса твердой фазы начинается и усадка с изменением объема и линейных размеров, определяемых температурным коэффициентом линейного расширения.

Область пониженной пластичности в процессе кристаллизации вблизи так называемого «реального» солидуса называется температурным интервалом хрупкости (ТИХ).

Величина ТИХ зависит от диаграммы состояния сплава. Например, для двухкомпонентного сплава с эвтектикой температурные области различного состояния в зависимости от количества второго компонента показаны на рисунке 1.4 сплошными линиями (А – жидкость; В – жидко-твердое состояние; С – твердо-жидкое состояние; ниже С – твердое состояние.)

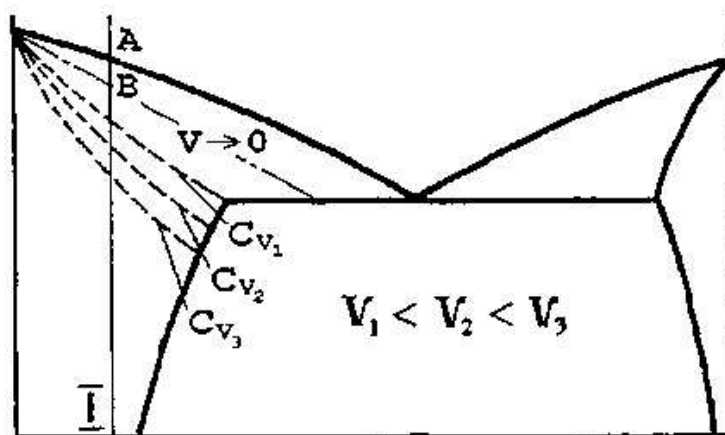


Рисунок 1.4

Увеличение скорости охлаждения (скорости кристаллизации), характерной, в частности, и для сварочных условий, приводит к снижению равновесных критических температур, к более низким ее значениям, причем особенно сильно снижается температура солидуса. Общий характер такого снижения показан на рисунке 1.3 штриховыми линиями. Как правило, это приводит к расширению области твердо-жидкого состояния, к расширению ТИХ и увеличению вероятности получения разрушений (трещин) при твердо-

жидком состоянии металла. Такие горячие трещины называются кристаллизационными.

Расширяет интервал твердо-жидкого состояния и ряд примесей, имеющихся в реальных сплавах, в частности ликвирующих. Так, при наличии достаточного количества серы в сплавах на железной основе эвтектики Fe - FeS и особенно Fe – FeO – FeS значительно снижают температуру «реального» солидуса (примерно до 1000 °С), что приводит к значительному интервалу ТИХ, почти в 500 °С (на рисунке 1.3 это расширение ТИХ условно показано штриховой линией 4.)

Еще более может расширяться область пленочного расположения остаточных количеств жидкости при наличии N и S (температура плавления этой эвтектики – примерно 644 °С). Такие сплавы весьма склонны к образованию кристаллизационных трещин.

Однако, достаточно значительная пластичность – деформационная способность, приобретаемая при завершении затвердевания, не всегда по мере охлаждения сохраняется высокой. Она может опять снижаться. Объяснение такому снижению пластичности при температурах несколько ниже солидуса связано с двумя гипотезами: полигонизации и миграции границ зерен.

Первая гипотеза базируется на том, что в результате кристаллизации в металле образуется большое количество дефектов строения (вакансии в решетке, дислокации – линейные несовершенства кристаллического строения). Появление дислокации определяется разориентировкой при сращивании кристаллитов и внутри кристаллизационных блоков, пластической деформацией при охлаждении и выходом винтовых дислокаций на поверхность зерен – V подкладок, на которых растут кристаллиты в процессе затвердевания.

При повышенных температурах дислокации обладают высокой подвижностью вследствие как внешних напряжений, так и взаимодействия между собственными полями напряжений. Энергетически наиболее вероятно расположение дислокации в виде стенок, которые делят кристаллит на части, сопрягаемые друг с другом под некоторым небольшим углом (как правило,

менее 1°). Создавшиеся в процессе охлаждения стенки дислокации приводят к образованию новых, вторичных границ, которые определяют и снижение деформационной способности металла при высоких температурах.

Вторая гипотеза базируется на том, что: так как внутренняя энергия в металле уменьшается при уменьшении протяженности границ зерен, в целом существует тенденция к общему сокращению длины этих границ. В результате одни зерна за счет поглощения соседних вырастают, что возможно при более высоких температурах, когда диффузионная подвижность атомов достаточно значительна. За счет миграции границ у них идет накопление несовершенств и примесных атомов, приводящих к понижению деформационной способности металла (сплава) вследствие исчерпания запаса межзеренной пластичности в процессе пластической деформации при охлаждении.

Наличие в закристаллизованном металле двух, отличающихся твердых фаз (например, в сталях аустенита и феррита) по обеим гипотезам является препятствием для появления новых границ и в связи с этим нет заметного снижения пластичности металла по мере понижения температуры ниже солидуса. Поэтому такое снижение деформационной способности наиболее характерно для чистых металлов и однофазных твердых растворов, получающихся в результате первичной кристаллизации.

Снижение деформационной способности металла в связи с образованием новых границ зерен при подсолидусных температурах может не обеспечить тех деформаций, которые накапливаются в результате понижения температуры и способствуют образованию горячих подсолидусных (называемых иногда полигонизационными) трещин.

Общий характер возможных вариантов изменения деформационной способности металла в процессе его охлаждения при температурах ниже солидуса показан на рисунке 1.3 штрихпунктирными линиями 2, 3, из которых линия 3 определяет наибольшее снижение пластичности в этих условиях. Сопrotивляемость подсолидусным трещинам также связана с диаграммой состояния сплава. Горячие как кристаллизационные, так и подсолидусные трещины имеют межкристаллитный характер. Разрушение идет межзеренно, по

границам зерен. Схематичная оценка сопротивляемости (или склонности) металла горячим трещинам может быть осуществлена сопоставлением его деформационной способности в области высоких температур и тех фактических деформаций, которые происходят и накапливаются в этот период охлаждения металла.

Одним из наиболее надежных способов исключения горячих трещин в металле швов является выбор металла с повышенной стойкостью против таких разрушений. Это достигается либо повышением деформационной способности металла в области температур возможного возникновения трещин, либо обеспечением «залечивания» их при достаточном количестве подвижной жидкой фазы.

Весьма важными с этой точки зрения являются количество легкоплавких эвтектик в кристаллизующемся металле и величина его температурного интервала хрупкости. Общая зависимость влияния элемента, увеличивающего количество легкоплавких эвтектик в сплаве, на изменение его склонности к образованию горячих трещин изображена на рисунке 1.5.



Рисунок 1.5 – Влияния элемента на изменение его склонности к образованию горячих трещин

Левая часть этой зависимости указывает на усиление вероятности образования таких трещин по мере увеличения элемента, дающего легкоплавкую эвтектику, так как растет количество жидких прослоек между кристаллитами при кристаллизации, они настолько разъединяют кристаллиты,

что деформационная способность сплава падает. При значительном увеличении такого элемента в сплаве количество эвтектики оказывается достаточным для заполнения («залечивания») образующихся несплошностей – стойкость сплава против образования кристаллизационных трещин растет.

Следует отметить, что увеличение содержания такого элемента в сплаве для повышения стойкости против образования трещин в шве применимо далеко не всегда, так как такой сплав может обладать свойствами, недопустимыми с точки зрения эксплуатационных требований к конструкции. Например, при высоком содержании серы в стали можно исключить кристаллизационные трещины, но механические свойства таких швов окажутся весьма низкими.

Обычно либо снижают концентрацию вредных примесей, создающих опасные количества легкоплавких эвтектик, либо связывают их в тугоплавкие прочные соединения, уменьшая тем самым и количество эвтектики. Так, например, при дуговой сварке низкоуглеродистой стали зависимость образования трещин в швах от содержания S, C и Mn показана на рисунке 1.6.

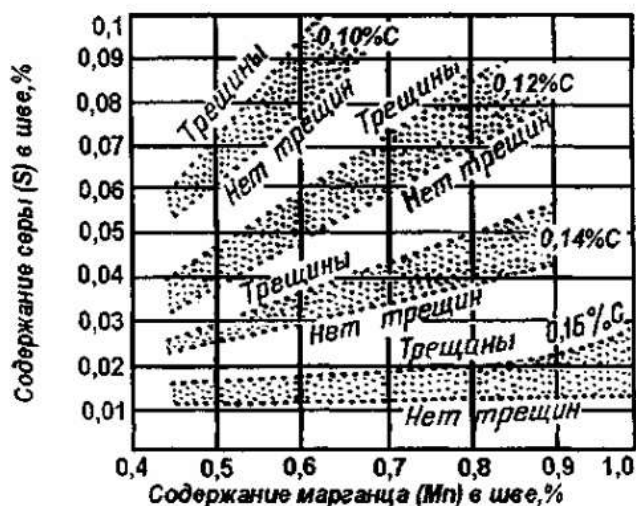


Рисунок 1.6 – Зависимость образования трещин в швах от содержания S, C и Mn

Из этой зависимости следует, что углерод усиливает вредное воздействие серы, а марганец его ослабляет. Это положительное влияние марганца определяется связыванием им серы в тугоплавкое соединение MnS и

уменьшением количества легкоплавких эвтектик Fe – FeS от оставшегося количества не связанной марганцем серы.

К образованию кристаллизационных и подсолидусных трещин склонны однофазные сплавы (например, аустенитные стали и никелевые сплавы). Значительно повышается их сопротивляемость образованию горячих трещин при сварке в случае наличия в металле второй фазы (обычно феррита, иногда карбидов). Ферритная фаза при этом измельчает структуру, лучше растворяет вредные примеси (S, P, Si и другие), дополнительно скрепляет аустенитные зерна.

Общий характер изменения склонности к образованию горячих трещин в сварных швах хромоникелевых сталей и никелевых сплавов от соотношения в металле Cr к Ni (составов, пересчитанных в эквивалентные – заменяющие количества ферритизатора Cr и аустенизатора Ni) показан на рисунке 1.7.

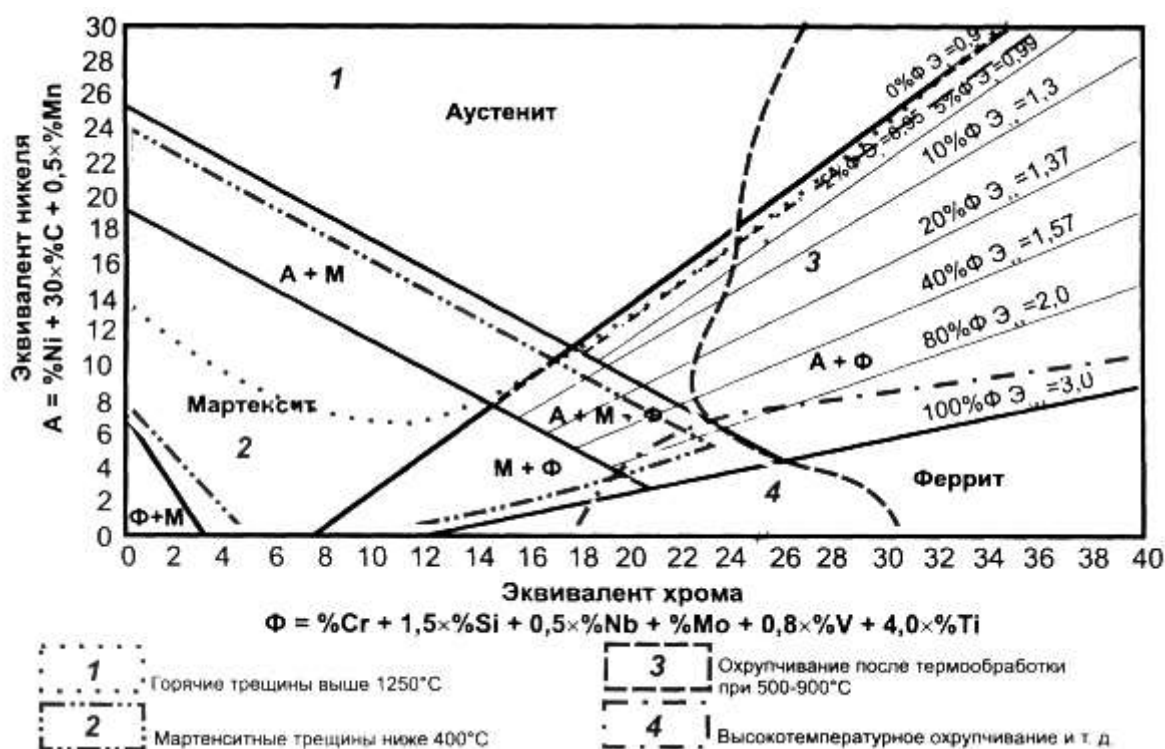
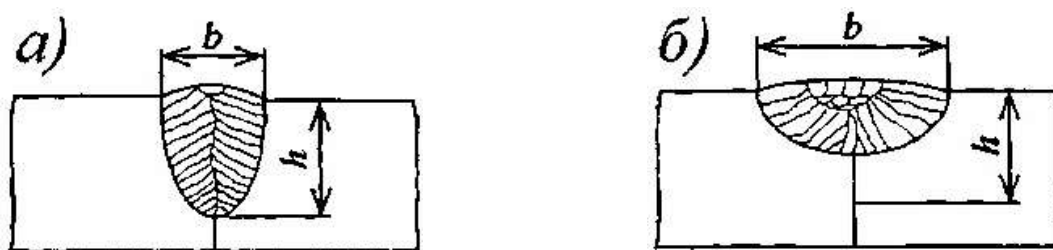


Рисунок 1.7 – Определение склонности к образованию горячих трещин в сварных швах хромоникелевых сталей и никелевых сплавов

Таким образом, оказывается возможным подбирать такие составы сварочных материалов, которые при достаточно высоких эксплуатационных свойствах обладают и необходимой стойкостью против образования при сварке горячих трещин.

Как технологический прием для исключения (ограничения) горячих трещин применяют предварительный подогрев (для низко и среднелегированных сталей), сварку на жестких режимах (для аустенитных сталей), а также выбирают режимы, обеспечивающие благоприятную форму шва, т.е. соотношение ширины и глубины шва (слоя шва). Так, при одном и том же составе металла, швы с глубоким проплавлением при малой ширине (при малом значении b/h – рисунок 1.8, а) более склонны к горячим трещинам, чем швы с отношением $b/h = 1,5-3$ (рисунок 1.8, б).



а) глубокое проплавление; б) неглубокое проплавление.

Рисунок 1.8 – Характеристики проплавления

Для оценки склонности металла швов к образованию горячих трещин существует ряд проб и методик. Технологические пробы основаны, главным образом, на установлении сравнительных характеристик по сопротивляемости металла швов, выполненных различными сварочными материалами в сопоставимых условиях (размеры и формы образца, режимы сварки и прочее). Количественные методики основаны на получении при испытаниях сравнительных численных показателей сопротивляемости (или склонности) металла швов к образованию горячих трещин. Они осуществляются в виде серии испытаний с получением численного показателя стойкости, обычно скорости дополнительного принудительного деформирования свариваемого

образца в период кристаллизации определенного участка сварочной ванны и последующего охлаждения.

1.3 Холодные трещины

В сварных соединениях (как в металле сварных швов, так и в околошовных зонах) ряда металлов образуются так называемые холодные трещины. Свое наименование они получили в связи с тем, что начало их появления фиксируется либо при относительно умеренных температурах (значительно более низких, чем температуры горячей обработки), либо при комнатной и более низкой температурах.

Наиболее типичными холодными трещинами в сварных соединениях являются поперечные трещины в металле швов, поперечные трещины вблизи границы сплавления в околошовной зоне, а также трещины, параллельные границе сплавления, так называемые отколы. Пример холодных трещин показан на рисунке 1.9.



Рисунок 1.9 – Холодные трещины

Обычно холодные трещины образуются в металле с недостаточно высокой деформационной способностью, особенно границ зерен, вызываемой закалкой и пластической деформацией при неравномерном охлаждении и

фазовых превращениях. Холодные трещины образуются либо в процессе завершения охлаждения сварного соединения, либо через некоторое время после полного охлаждения (замедленное разрушение). Образование холодных трещин в процессе продолжающегося охлаждения определяется накоплением пластических деформаций в связи с изменением размеров и формы неравномерно охлаждающегося свариваемого изделия.

Замедленные разрушения связаны с длительным действием поля собственных (сварочных) или создаваемых внешними силами напряжений такой величины, при которой продолжается процесс деформирования, хотя бы с весьма малыми скоростями. В случае наличия закаленного металла сопротивление деформации зерен (например, при мартенситной структуре) весьма значительно. Деформация в этом случае происходит только за счет менее упорядоченных границ зерен (зон металла, прилегающих к границам), главным образом за счет их сдвига. Сдвиги по границам, расположенным параллельно или под углом к направлению действия сил растяжения, приводят к концентрации напряжений (и стоку несовершенств кристаллического строения, дислокации) к границам зерен, расположенным перпендикулярно к растягивающим силам. Эта концентрация напряжений и ослабление таких границ скоплением несовершенств строения приводят к зарождению разрушения, наиболее вероятного в стыке границ этих зерен. Под действием напряжений эти микроразрушения развиваются в трещины, распространяющиеся уже в основном по телу зерен, хотя для некоторых сплавов, когда, например, этот процесс сопровождается и другими (старение и пр.), трещина и далее, после зарождения, распространяется в основном по границам зерен.

Наиболее характерными температурами возникновения холодных трещин при сварке закаливающихся сталей являются температуры, при которых уже произошел распад основной части аустенита, но может продолжаться распад остаточного аустенита. Обычно такими температурами являются 120°C и более низкие. Часто трещины образуются уже при комнатных температурах спустя

некоторое время после окончания сварки (десятки минут, часы, а иногда и через более длительные промежутки времени).

В титановых сплавах в связи с особенностями их кристаллического строения трещины могут образовываться и через более длительное время (недели, месяцы). В закаливаемых сталях образование ряда холодных трещин связано как с получением структур с низкими пластическими свойствами металла, так и с влиянием водорода, растворяющегося при сварке в жидком металле и затем поступающего и в околошовную зону. Возможность закалки при сварке различных сталей как в металле шва, так и в зоне термического влияния весьма вероятна.

С точки зрения возможности возникновения трещин в сварных соединениях необходимо дополнительно рассмотреть некоторые вопросы, связанные с распадом аустенита в условиях сварочного термического цикла.

Если в специальной установке нагревать и охлаждать образец по термическому циклу сварки (с быстрым нагревом и быстрым, но все же более замедленным охлаждением) и при некоторых заданных температурах как на ветви нагрева, так и на ветви охлаждения мгновенным приложением нагрузки его разрушать, то окажется, что свойства стали при одной и той же температуре при нагреве и охлаждении значительно отличаются. Характерное для некоторых сталей изменение пластических свойств на ветвях нагрева и охлаждения при изменении температуры по типовому сварочному термическому циклу. Из сопоставления пластичности при одинаковых температурах следует, что металл на ветви охлаждения, особенно в области температур распада аустенита (ниже $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $600\text{ }^{\circ}\text{C}$), менее пластичен, чем на ветви нагрева. Такое снижение пластичности наблюдается как у незакаливаемых, так и у закаливаемых сталей.

У незакаливаемых сталей после достижения минимальной пластичности на ветви охлаждения с дальнейшим понижением температуры после завершения распада аустенита с получением достаточно пластичных структур наступает повышение относительного сужения. Это повышение пластичности наступает при тем более высоких температурах, чем при более

высоких температурах, заканчивается распад аустенита при охлаждении. Если процесс распада аустенита начинается при более низких температурах и продолжается до достижения комнатных температур, пластичность такой стали остается в широком температурном интервале достаточно низкой. В случае, когда к умеренным температурам заканчивается распад остаточного аустенита, то при температурах, близких к комнатным, пластичность такой стали имеет тенденцию к возрастанию.

Как известно, по мере понижения температуры в достаточно жестких сварных соединениях возрастают внутренние напряжения и происходит накопление пластических деформаций. Это создает возможность образования холодных трещин, если металл не обладает достаточным запасом пластичности. Вероятность появления холодных трещин увеличивается в случае расширения температурного интервала, в котором пластические свойства стали достаточно низки, и когда минимум пластичности смещается к комнатным температурам.

1.4 Методы борьбы с образованием трещин

Методами борьбы с образованием холодных трещин при сварке закаливающихся сталей являются:

- уменьшение степени закалки металла при сварке;
- снижение содержания водорода в металле шва и околошовной зоне;
- снижение содержания водорода в околошовной зоне при металле шва, не склонном к образованию трещин.

Основным методом уменьшения возможности закаливемости металла в сварном соединении, главным образом в околошовной зоне, является снижение скорости охлаждения после сварки, достигаемое практически либо увеличением погонной энергии при сварке, либо предварительным подогревом изделия.

Изменение, в частности увеличение погонной энергии при сварке, допустимо при конкретных способах и условиях сварки только в ограниченных

пределах. Поэтому основным способом, радикально влияющим на изменение (уменьшение) скорости охлаждения металла при сварке, является предварительный подогрев свариваемого изделия. В этом случае согласно соответствующим уравнениям скорость охлаждения при любой схеме воздействия сварочного источника тепла (точечный, линейный) снижается в связи с уменьшением разности температур. Степень необходимого предварительного подогрева зависит от состава свариваемой стали, в частности от степени ее закалывания, то есть от эквивалентного углерода $C_{\text{э}}$.

Расчет эквивалентного углерода позволяет использовать значения $C_{\text{э}}$ для установления необходимой температуры подогрева.

В этом отношении более целесообразной является схема расчета, предложенная Д. Сеферианом. Он обосновал предлагаемую схему расчета необходимости подогрева и его температуры снижением точки мартенситного превращения углеродистых (и низколегированных) сталей при повышении содержания углерода и влиянием на это снижение легирующих добавок. Он предложил формулу для расчета эквивалентного углерода, связав ее не только с химическим составом свариваемой стали, но и с толщиной металла, а также расчетную формулу температуры требуемого предварительного подогрева. Такая схема расчета сводится к следующей цепи определений, в которых численные значения базируются на обобщениях экспериментальных результатов по ряду различных марок сталей:

$$T_{\text{м}} = 550 - 360 \cdot C_{\text{э}},$$

где $T_{\text{м}}$ – температура мартенситного превращения, °С;

$C_{\text{э}}$ – эквивалентный углерод в стали, %;

$$C_{\text{э}} = C \% + (1/9) (Mn \% + Cr \%) + (1/18) Ni \% + (1/13) Mo \%$$

При этом температура подогрева ($T_{\text{под}}$) рассчитывается по формуле:

$$T_{\text{под}} = 350 \cdot \sqrt{C_{\text{э}} - 0,25}, \text{ } ^\circ\text{С}.$$

Следует отметить, что в отечественной практике стараются максимально избегать предварительного подогрева. Ограничение предварительного подогрева в практике наших предприятий осуществляется применением либо аустенитных, либо низководородистых электродов, не содержащих в покрытии органических веществ и подвергнутых перед сваркой высокотемпературной прокалке.

Высокопрочные стали небольшой толщины с пределом прочности более 1180 – 1470 МН/м² предпочитают также сваривать без предварительного подогрева, создавая специальными приспособлениями сжимающие напряжения в районе сварных швов при высоких температурах, что исключает дополнительные растягивающие напряжения при снижении температуры. Кроме того, после сварки применяется термическая обработка сварных изделий.

Холодные трещины характерны не только для сварных соединений закаливаемых сталей. Они встречаются и в сварных соединениях других металлов и сплавов. Так, например, холодные трещины часто сопровождают сварку чугуна. Такие трещины образуются вследствие малой пластичности чугуна в связи с деформациями, возникающими в процессе выполнения сварочной операции не только в области выполняемого шва, но и в металле свариваемой детали. В частности, они возникают и в районе сварных швов, а особенно часто в зонах отбеленного и закаленного чугуна.

При сварке титановых α -сплавов сверхравновесный водород не удаляется из металла, а при температурах ниже 300 °С образует гидриды, имеющие меньшую плотность, чем титан. Это приводит к появлению структурных напряжений. Одновременно усиливается и склонность такого металла к образованию холодных трещин. Такие трещины обычно возникают через длительное время (иногда месяцы) после окончания сварки. Склонность титановых сплавов к образованию холодных трещин во времени усиливается в случае наличия в нем кислорода > 0,15 % и азота > 0,05 %, а также вследствие

концентрации напряжений, образующихся при различных геометрических концентраторах в сварных соединениях.

Большой интерес для промышленности представляют высокопрочные легкие алюминиевые сплавы. Наибольшую прочность такие сплавы получают после двойной термической обработки.

В свариваемом шве и околошовной зоне сварного соединения в результате сварочного теплового цикла металл подвергается дополнительной закалке. Последующее старение при комнатной температуре охрупчивает металл и часто сопровождается образованием в таких зонах трещин. Эти трещины, подобно трещинам в титановых сплавах, образуются не сразу после сварки, а через некоторое, иногда достаточно длительное время, т. е. появляются в сварных соединениях по схеме замедленного разрушения.

В некоторых случаях, в частности, при сварке легированных сталей, когда закаленная зона термического влияния имеет большее значение предела текучести, чем металл шва, а шов обладает невысокими пластическими свойствами, концентрация деформаций в узком участке шва вызывает появление так называемых деформационных трещин. Так, например, при многослойной ручной сварке достаточно толстого металла с V – образной разделкой в результате накапливающихся деформаций по мере заполнения разделки последовательными слоями шва в корне могут образовываться холодные трещины. Часто такие трещины начинаются от местного концентратора, обычно у границы сплавления основного металла с нижней частью корневого валика (рисунок 1.10).

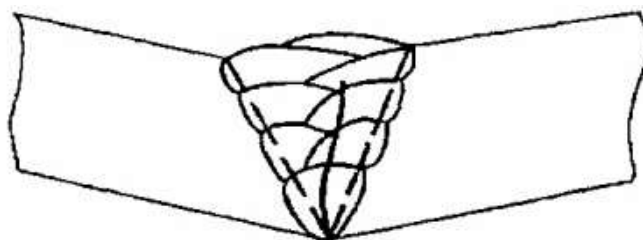


Рисунок 1.10 – Образование холодных трещин в сварных швах с V – образной разделкой кромок

Иногда подобные трещины называют «усами». Для борьбы с ними необходимо получать более пластичный металл корневого валика шва, увеличивать ширину разделки в корне шва для включения в деформацию более широкой зоны металла и применять различные меры для уменьшения угловых деформаций при выполнении сварки.

Холодные трещины являются весьма распространенным пороком также и в процессе производства сварных конструкций из низколегированных сталей и некоторых сплавов. Поэтому всегда требуется тщательный контроль за металлом, применяемым для изготовления изделий, сварочными материалами и технологией выполнения сварочных работ.

2 Содержание обобщенной группы дефектов сварных соединений по типу трещин

2.1 Трещины обычные

Трещиной называется дефект в виде несплошности, вызванной местным разрушением шва и его охлаждением, либо действием нагрузок. Такой вид дефектов (цифровое обозначение дефекта **100; Е**) недопустим, так как представляет собой опасный концентратор напряжений и очаг разрушения. Внешний вид и место локализации возможного образования трещин в сварном соединении представлен на рисунке 2.1.

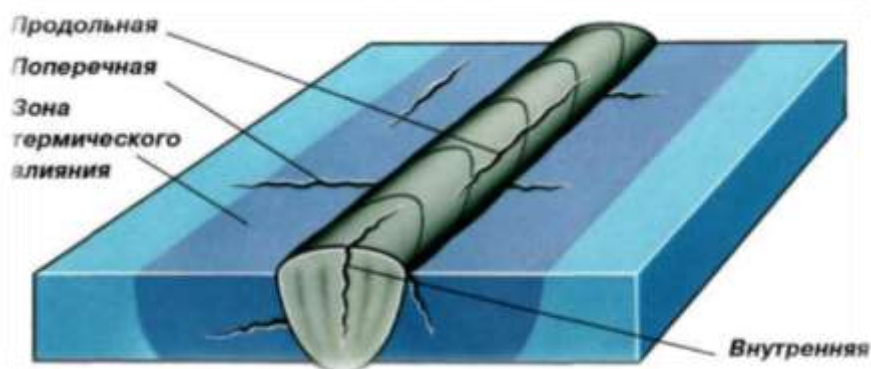


Рисунок 2.1 – Дефекты сварного шва по типу трещин

Внешние признаки: разрывы металла по границам кристаллизующихся зерен или по самим кристаллам металла сварного соединения.

Способ выявления: дефект виден невооруженным глазом или через лупу небольшого (от двух до четырех кратного) увеличения при визуальном контроле.

Процесс возникновения:

– горячие трещины возникают в результате растягивающих напряжений, появляющихся во время охлаждения сварного соединения;

– трещины в околошовной зоне или в основном металле относятся к холодным трещинам и имеют закалочное, водородное или смешанное происхождение.

Причины возникновения:

- высокие сварочные напряжения, возникающие при кристаллизации;
- повышенная жесткость свариваемой конструкции;
- неправильная форма шва из-за несоблюдения режима сварки;
- повышенное содержание углерода в основном металле;
- резкое охлаждение конструкции.

Способы предупреждения возникновения дефектов в виде трещин представлены на рисунке 2.2 в виде схемы.

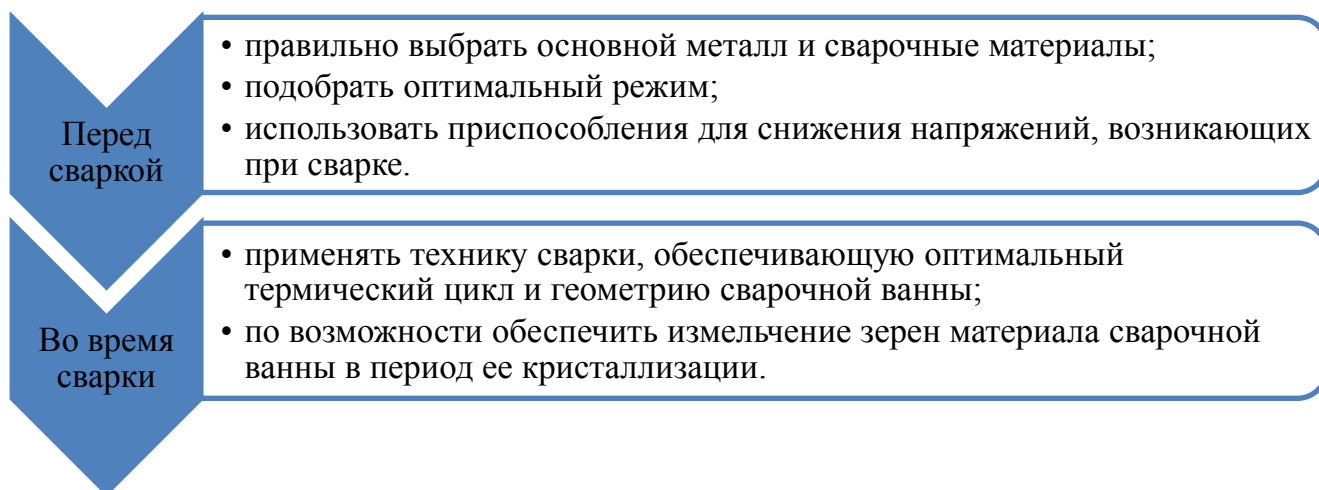


Рисунок 2.2 – Последовательность действий для предупреждения возникновения дефектов в виде трещин

Способ устранения: место образования трещины необходимо удалить шлифовальным инструментом, а образовавшуюся полость заварить.

2.2 Микротрещины

Микротрещиной называется трещина микроскопических размеров, которую обнаруживают физическими методами (не менее чем при десяти

кратном увеличении). Такой дефект (цифровое обозначение **1001**) является недопустимым, так как является очагом развития макротрещины. Иллюстративный пример возникшей микротрещины в сварном соединении представлен на рисунке 2.3.

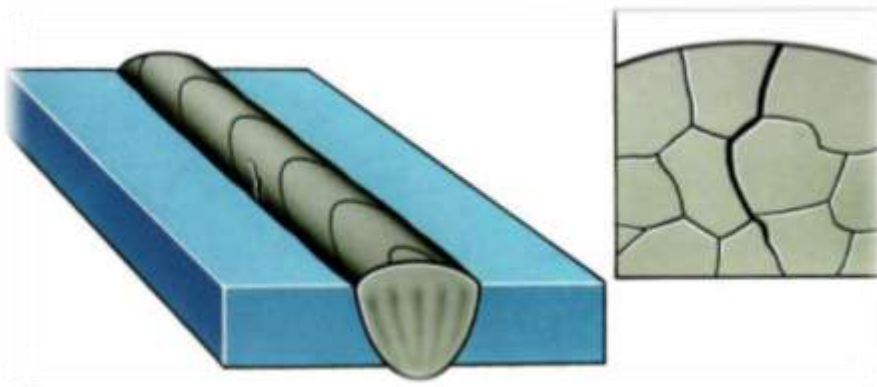


Рисунок 2.3 – Дефекты сварного шва по типу трещин

Внешние признаки: микроскопические разрывы по границам зерен металла.

Способ выявления: дефект виден невооруженным глазом или через лупу небольшого (от двух до четырех кратного) увеличения при визуальном контроле.

Процесс возникновения: легкоплавкие соединения, присутствующие в металле шва, влекут за собой возникновение кристаллизационных трещин. В период, когда сварочная ванна находится в твердожидком состоянии, под действием сварочных напряжений происходит разрыв кристаллов.

Причины возникновения:

- повышенное содержание в основном металле примесей, искажающих кристаллическую решетку;
- повышенная деформация при сварке;
- избыток в сварочной ванне сульфидных и оксисульфидных включений;
- чрезмерная скорость охлаждения, приводящая к укрупнению кристаллов.

Способы предупреждения микротрещин представлены на рисунке 2.4:

Способ устранения: место образования трещины необходимо удалить шлифовальным инструментом, а образовавшуюся полость заварить.

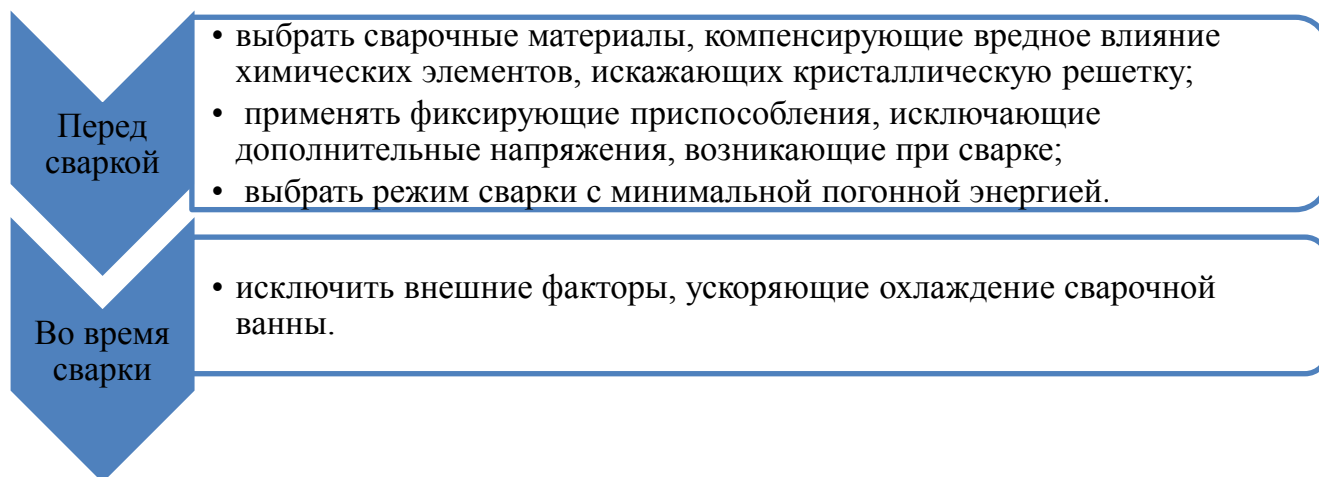


Рисунок 2.4 – Последовательность действий для предупреждения возникновения дефектов в виде микротрещин

2.3 Продольные трещины

Продольной трещиной (цифровое обозначение такого дефекта **101; Ea**) называется трещина, ориентированная вдоль сварного шва. Может располагаться:

- в металле сварного шва (**1011**, здесь и далее цифровое обозначение дефекта по месту его локализации);
- на границе сплавления (**1012**);
- в зоне термического влияния (**1013**);
- в основном металле (**1014**).

Такой дефект является недопустимым, так как представляет собой очаг концентрации напряжений и развития разрушения.

Внешний вид и место локализации возможного образования продольных трещин в различных зонах сварного соединения представлены на рисунке 2.5.

Внешние признаки:

- продольные горячие трещины (1011, 1012) имеют на изломе желтовато-оранжевый оттенок;
- холодные трещины (1013) имеют на изломе чистый, блестящий вид кристаллов;
- трещины в основном металле (1014) имеют на изломе классический цвет металла.

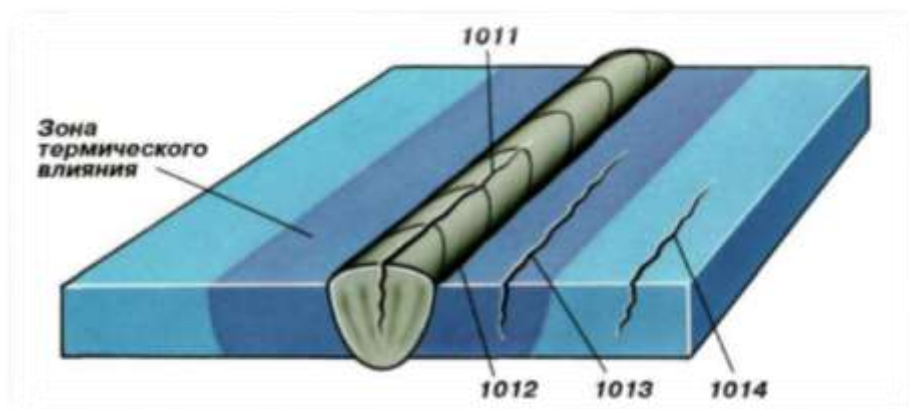


Рисунок 2.5 – Дефекты сварного шва по типу продольных трещин

Способ выявления: дефект виден невооруженным глазом или через лупу небольшого (от двух до четырех кратного) увеличения при визуальном контроле.

Процесс возникновения:

- горячие трещины образуются под действием напряжений по границам кристаллов, когда металл шва находится в твердожидком состоянии;
- холодные трещины образуются по местам, где возникают закалочные структуры, не выдержавшие внутренних напряжений;
- трещины в основном металле раскрываются под действием сварочных напряжений.

Причины возникновения:

- в металле шва (1011) и на границе сплавления (1012) – горячие трещины, возникающие под действием высоких поперечных сварочных напряжений;

– в зоне термического влияния (1013) – холодные трещины, вызванные появлением хрупких закалочных структур;

– в основном металле (1014) – трещины, образовавшиеся в процессе изготовления металла.

Способы предупреждения возникновения дефектов в виде продольных трещин представлены на рисунке 2.6 в виде схемы:

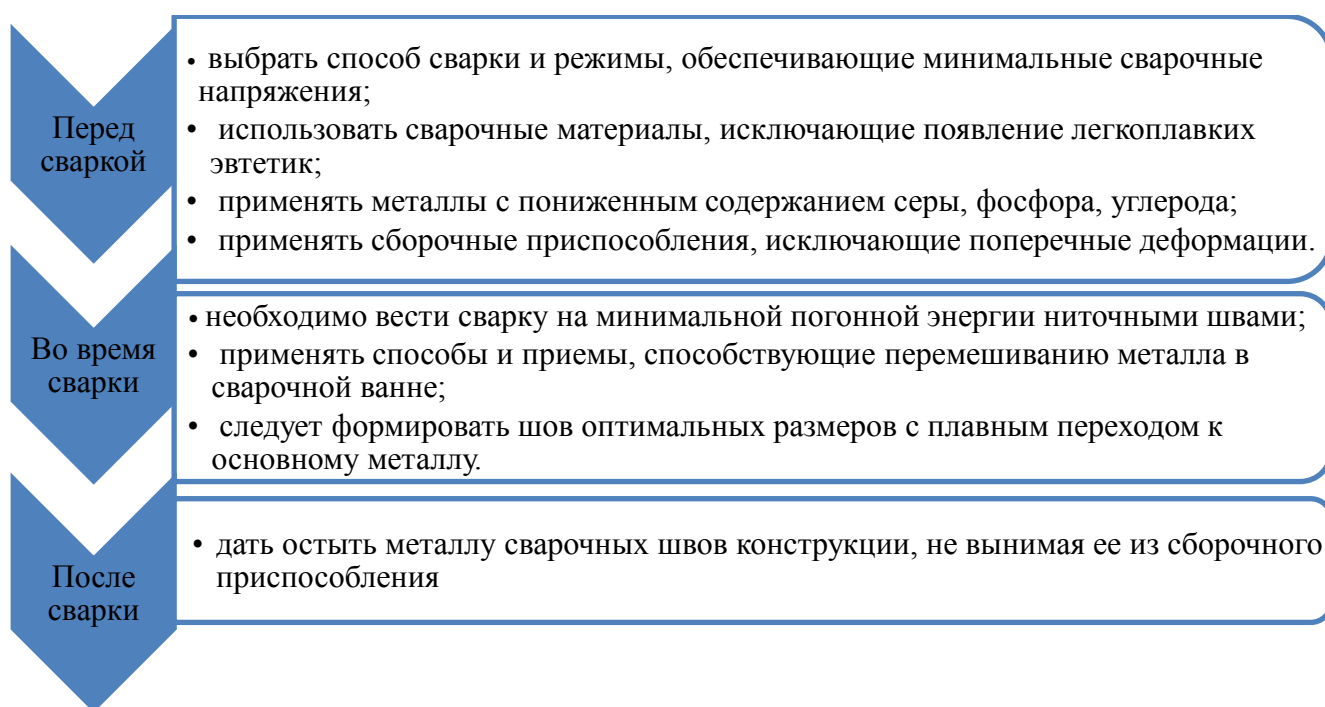


Рисунок 2.6 – Последовательность действий для предупреждения возникновения дефектов сварного соединения в виде продольных трещин

Способ устранения: место образования трещины требуется удалить шлифовальным инструментом, а образовавшуюся полость заварить заново.

2.4 Поперечные трещины

Поперечной трещиной (цифровое обозначение такого дефекта **102; Еb**) называется трещина, ориентированная поперек оси сварного шва. Может располагаться:

– в металле сварного шва (**1021**, здесь и далее цифрами обозначен дефект по месту его локализации);

– в зоне термического влияния (**1023**);

– в основном металле (**1024**).

Такой дефект является недопустимым, так как представляет собой очаг концентрации напряжений и развития разрушения.

Внешний вид и место локализации возможного образования продольных трещин в различных зонах сварного соединения представлены на рисунке 2.7.

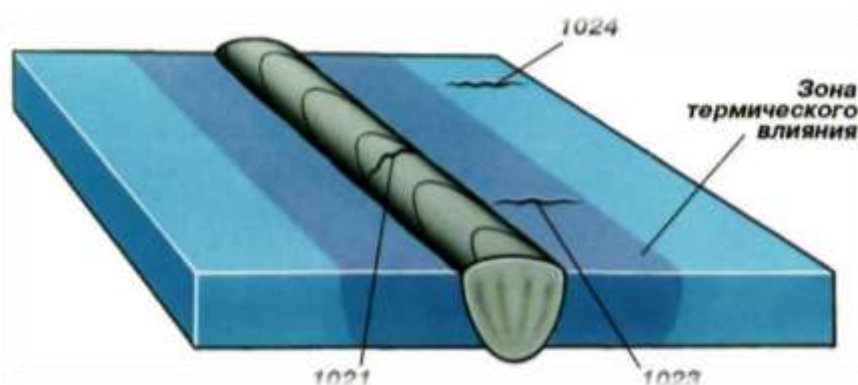


Рисунок 2.7 – Дефекты сварного шва по типу поперечных трещин

Внешние признаки:

– поперечные горячие трещины (1021) имеют на изломе желтовато-оранжевый оттенок;

– холодные трещины (1023) имеют на изломе чистый, блестящий вид кристаллов;

– трещины в основном металле (1024) имеют на изломе цвет металла.

Способ выявления: дефект виден невооруженным глазом или через лупу небольшого (от двух до четырех кратного) увеличения при визуальном контроле.

Процесс возникновения:

– горячие трещины образуются, когда сварочная ванна представляет собой кристаллы и расплав. Легкоплавкие соединения являются причиной возникновения горячих трещин;

– холодные трещины образуются в результате разрушения хрупких закалочных структур при возникновении значительных напряжений;

– трещины в основном металле образуются под действием термического цикла сварки.

Причины возникновения:

– горячие трещины возникают в металле шва (1021) и на границе сплавления под действием растягивающих продольных напряжений, когда металл шва находится в твердожидком состоянии;

– поперечные холодные трещины (1023) возникают в твердом металле околшовоной зоны, где образуются хрупкие закалочные структуры, разрушающиеся под действием сварочных напряжений;

– трещины в основном металле (1024) образуются в результате раскрытия дефектов, существующих при производстве металла.

Способы предупреждения возникновения дефектов в виде поперечных трещин представлены в виде схемы на рисунке 2.8.

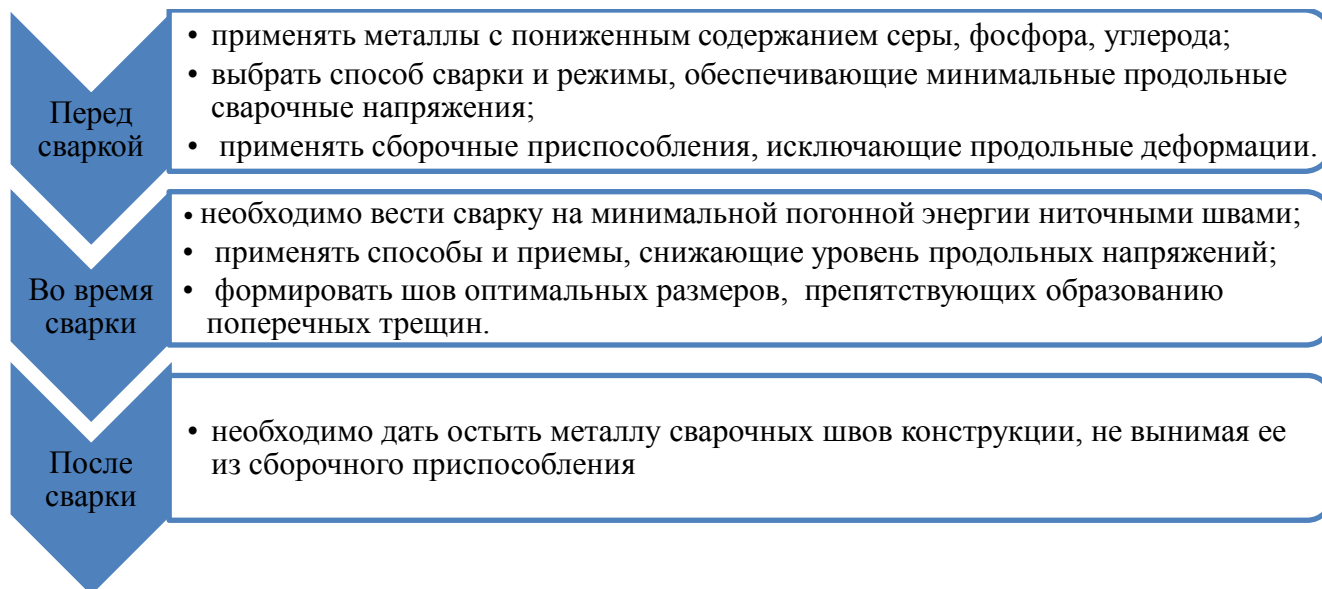


Рисунок 2.8 – Последовательность действий для предупреждения возникновения дефектов сварного соединения в виде продольных трещин

Способ устранения: место образования трещины требуется удалить шлифовальным инструментом, а образовавшуюся полость заварить заново.

2.5 Радиальные трещины

Радиальными трещинами (цифровое обозначение дефекта **103; E**) называются трещины, радиально расходящиеся из одной точки.

Такие дефекты могут располагаться:

- в металле сварного шва (**1031**);
- в зоне термического влияния (**1033**);
- в основном металле (**1034**).

Трещины этого типа, расходящиеся в разные стороны, известны как «звездоподобные».

Такой дефект является недопустимым, так как при действии рабочих нагрузок представляет собой очаг развития разрушения конструкции.

Внешний вид и место локализации возможного образования радиальных трещин в различных зонах сварного соединения представлены на рисунке 2.9.

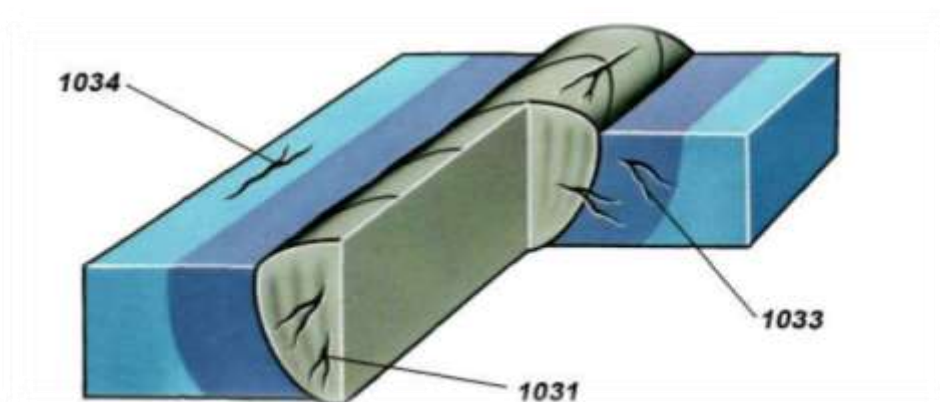


Рисунок 2.9 – Дефекты сварного шва по типу радиальных трещин

Внешние признаки:

- радиальные горячие трещины (1031) имеют на изломе желтовато-оранжевый оттенок;
- холодные трещины (1033) имеют на изломе чистый, блестящий вид кристаллов;
- трещины в основном металле (1034) имеют на изломе цвет металла.

Способ выявления: дефект виден невооруженным глазом или через лупу небольшого (от двух до четырех кратного) увеличения при визуальном контроле.

Процесс возникновения:

– горячие трещины образуются в результате силового воздействия сварочных напряжений по границам кристаллов, омываемых легкоплавкими эвтектиками;

– холодные трещины образуются в результате разрыва хрупких кристаллов в зоне термического влияния под действием сварочных напряжений;

– трещины в основном металле образуются как дефекты изготовления металла.

Причины возникновения:

– горячие трещины (1031) возникают в металле шва под действием растягивающих сварочных напряжений, когда металл шва находится в твердотекучем состоянии;

– радиальные холодные трещины (1033) возникают в твердом металле околошовной зоны, где образуются хрупкие закалочные структуры, которые разрушаются под действием продольных и поперечных сварочных напряжений;

– трещины в основном металле (1034) образуются под действием термического цикла сварки.

Способы предупреждения возникновения дефектов в виде радиальных трещин представлены в виде схемы на рисунке 2.10.

Способ устранения: место образования трещины требуется удалить шлифовальным инструментом, а образовавшуюся полость заварить заново.

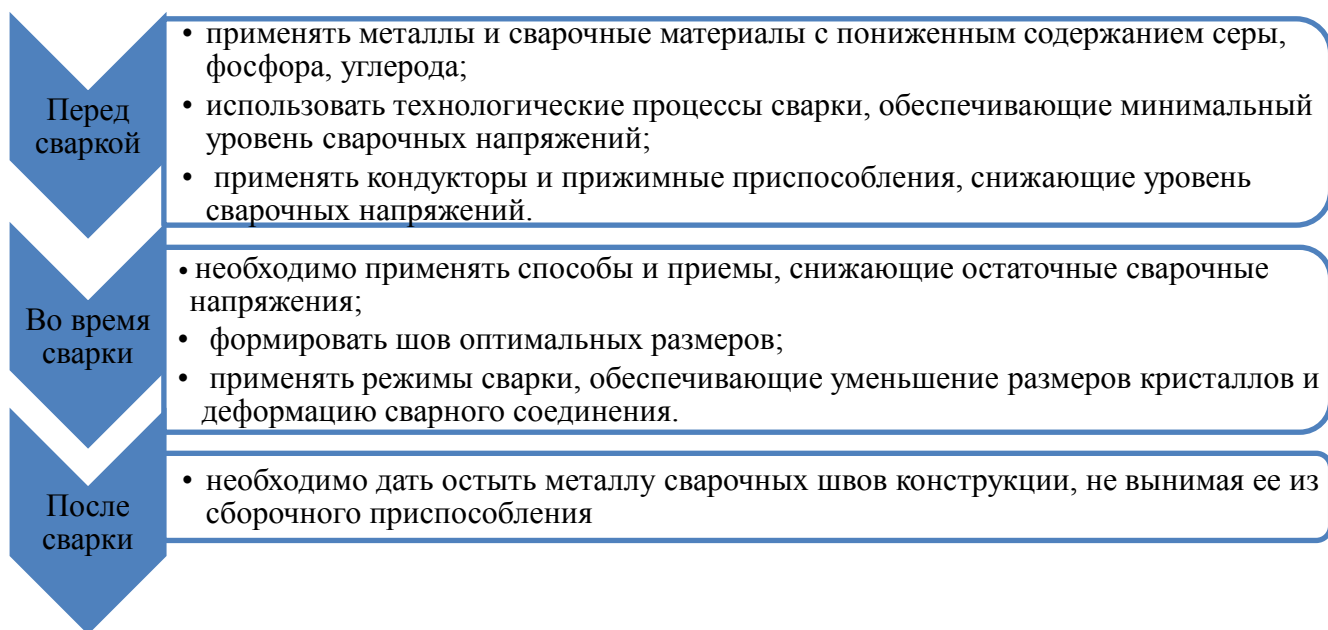


Рисунок 2.10 – Последовательность действий для предупреждения возникновения дефектов сварного соединения в виде продольных трещин

2.6 Трещина в кратере

Трещины в кратере (цифровое обозначение дефекта **104; Ee**) сварного шва являются недопустимыми дефектами любой сварной конструкции, так как при заварке может остаться незаваренная часть трещины. Бывают трех видов:

- продольными (**1045**);
- поперечными (**1046**);
- звездообразными (**1047**).

Способ выявления: дефект виден невооруженным глазом или через лупу небольшого (от двух до четырех кратного) увеличения при визуальном контроле.

Внешний вид и место локализации возможного образования трещин в кратере сварного шва представлены на рисунке 2.11.

Внешние признаки:

- разрывы металла кратера вдоль (**1045**);
- поперек (**1046**);

– в различных направлениях из одной точки (1047).

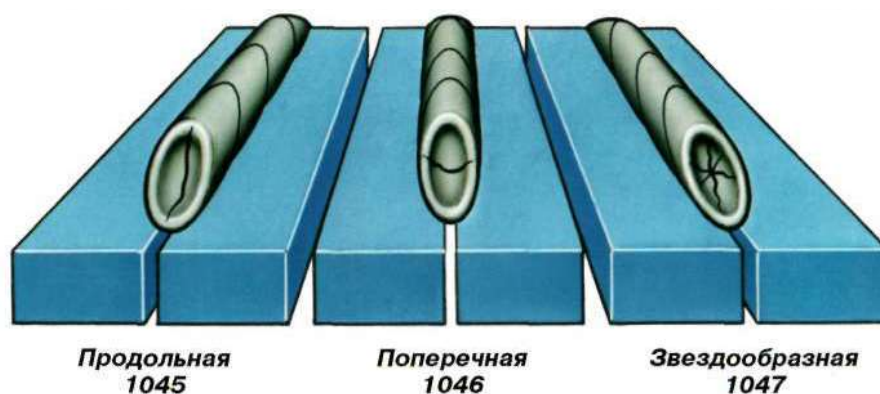


Рисунок 2.11 – Дефекты сварного шва по типу трещин в кратере

Процесс возникновения:

Когда металл кратера еще находится в жидко-твердом состоянии, под действием сварочных напряжений возникает разрыв металла шва по линиям эвтектик – легкоплавких соединений, расположенных между кристаллами.

Причины возникновения:

- продольная трещина (1045) возникает при чрезмерных поперечных напряжениях;
- поперечная трещина (1046) образуется под действием продольных напряжений;
- звездообразная трещина (1047) появляется, когда возникают сварочные напряжения, действующие в различных направлениях.

Способы предупреждения возникновения дефектов в виде трещин в кратере сварного шва иллюстративно представлены на схеме на рисунке 2.12.

Способ устранения:

- 1) место образования трещины удалить шлифовальным инструментом;
- 2) образовавшуюся полость заварить заново.

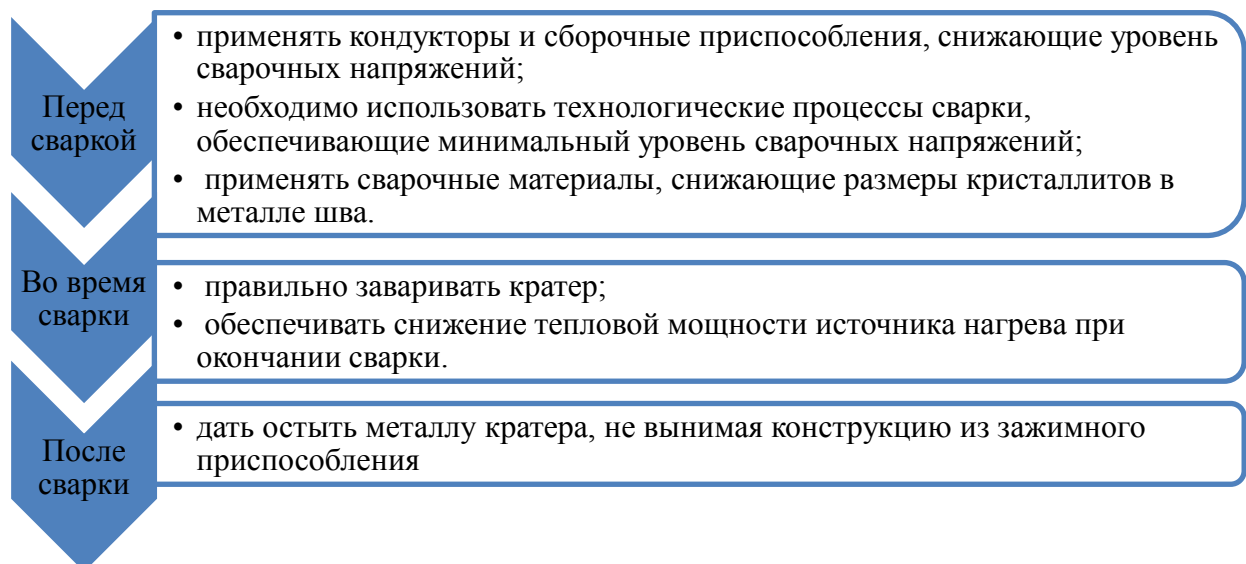


Рисунок 2.12 – Последовательность действий для предупреждения возникновения дефектов сварного шва в виде трещин в кратере

2.7 Раздельные трещины

Раздельными трещинами (цифровое обозначение дефекта **105; E**) называется группа трещин, которые могут находиться в металле сварного шва (**1051**), в зоне термического влияния (**1053**), в основном металле (**1054**). Являются недопустимым дефектом, так как при действии рабочих нагрузок представляют собой очаг развития разрушения конструкции. Внешний вид и место локализации возможного образования раздельных трещин в различных зонах сварного соединения представлены на рисунке 2.13.

Способ выявления: дефект виден невооруженным глазом или через лупу небольшого (от двух до четырех кратного) увеличения при визуальном контроле. Внутренние трещины в сварных соединениях лучше всего выявляются при ультразвуковом контроле.

Внешние признаки:

– горячие трещины (1051) имеют на изломе желтовато-оранжевый оттенок;

- холодные трещины (1053) имеют на изломе чистый, блестящий вид кристаллов;
- трещины в основном металле (1054) имеют на изломе цвет металла.

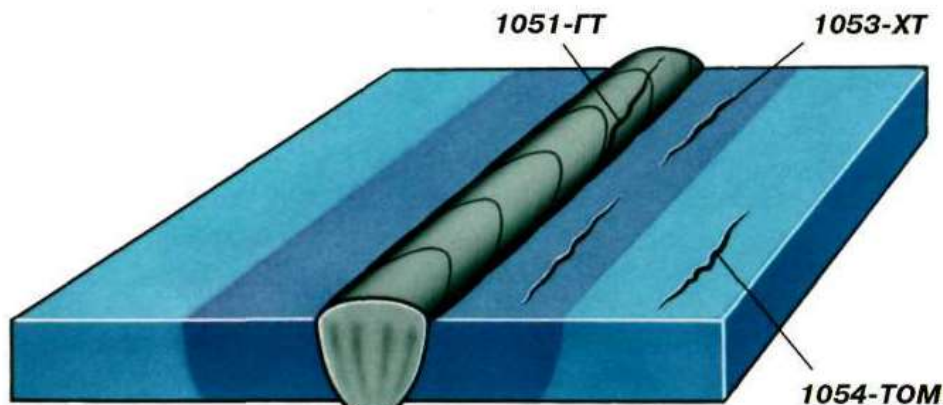


Рисунок 2.13 – Дефекты сварного шва по типу отдельных трещин

Процесс возникновения:

- горячие трещины образуются в результате силового воздействия сварочных напряжений по границам кристаллов, омываемых легкоплавкими эвтектиками;
- холодные трещины образуются в результате разрыва хрупких кристаллов в зоне термического влияния под действием сварочных напряжений;
- трещины в основном металле образуются как дефекты изготовления металла.

Горячие трещины возникают чаще всего при сварке высоколегированных сталей аустенитного класса, алюминиевых, алюминий-магниевого, титановых и никелевых сплавов. Чтобы снизить вероятность образования таких трещин, следует сваривать (с низкими значениями погонной энергии) металлы, содержащие минимальное количество вредных примесей и имеющие мелкозернистую структуру.

Холодные трещины образуются, главным образом, при сварке среднелегированных сталей перлитного и мартенситного классов. Для

предотвращения холодных трещин не следует, где это возможно, жестко закреплять свариваемые элементы, сохраняя их податливость при сварке.

Причины возникновения:

– горячие трещины (1051) возникают в металле шва под действием растягивающих сварочных напряжений, когда металл шва находится в твердом жидком состоянии;

– холодные трещины (1053) возникают в твердом металле околошовной зоны, где образуются хрупкие закалочные структуры, разрушающиеся под действием продольных и поперечных сварочных напряжений;

– трещины в основном металле (1054) образуются под действием термического цикла сварки.

Способы предупреждения возникновения дефектов в виде отдельных трещин иллюстративно представлены на схеме на рисунке 2.14.

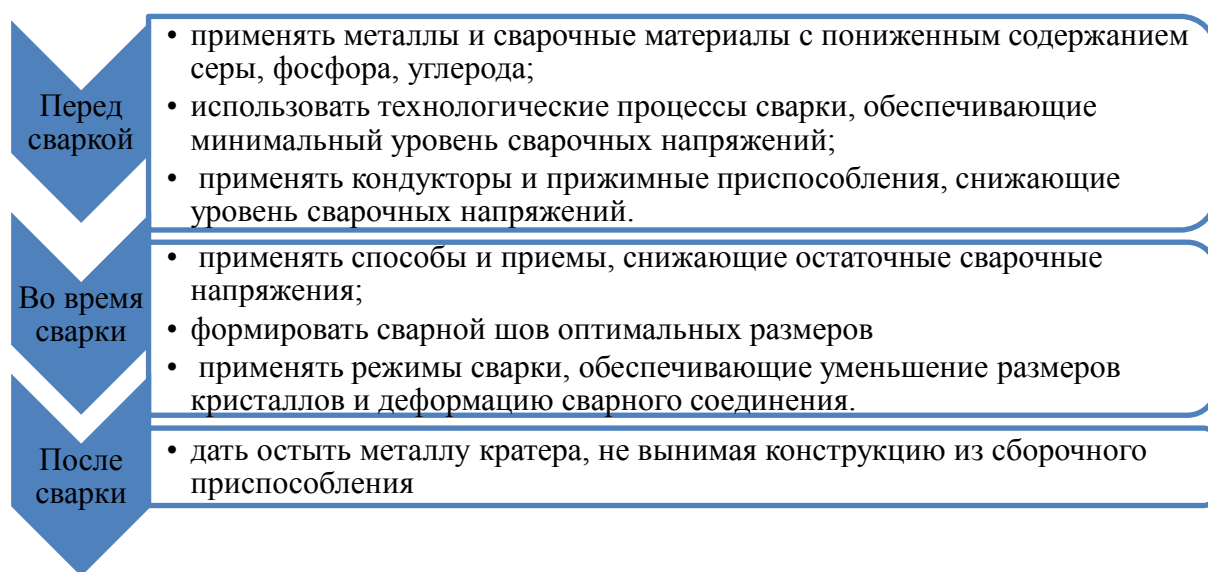


Рисунок 2.14 – Последовательность действий для предупреждения возникновения дефектов сварного соединения в виде отдельных трещин

Способ устранения:

- 1) место образования трещины удалить шлифовальным инструментом;
- 2) образовавшуюся полость заварить заново.

2.8 Разветвленные трещины

Разветвленные трещины (цифровое обозначение дефекта **106; E**) представляют собой группу трещин, возникающих из одной трещины. Могут располагаться:

- в металле сварного шва (**1061**, здесь и далее цифровое обозначение дефекта по месту его локализации);
- в зоне термического влияния (**1063**);
- в основном металле (**1064**).

Такой дефект является недопустимым, так как при действии рабочих нагрузок представляет собой очаг развития разрушения конструкции. Внешний вид и место локализации возможного образования разветвленных трещин в различных зонах сварного соединения представлены на рисунке 2.15.

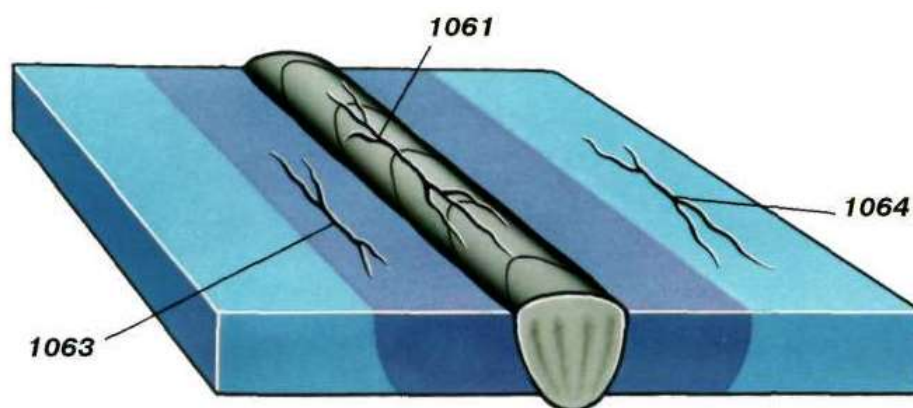


Рисунок 2.15 – Дефекты сварного шва по типу разветвленных трещин

Внешние признаки:

- горячие трещины (1061) имеют на изломе желтовато-оранжевый оттенок;
- холодные трещины (1063) имеют на изломе чистый, блестящий вид кристаллов;
- трещины в основном металле (1064) имеют на изломе цвет металла.

Способ выявления: дефект виден невооруженным глазом или через лупу небольшого (от двух до четырех кратного) увеличения при визуальном контроле.

Процесс возникновения:

– горячие трещины образуются в результате силового воздействия сварочных напряжений по границам кристаллов, омываемых легкоплавкими эвтектиками;

– холодные трещины образуются в результате разрыва хрупких кристаллов в зоне термического влияния под действием сварочных напряжений;

– трещины в основном металле образуются как дефекты изготовления металла.

Причины возникновения:

– горячие трещины (1061) возникают в металле шва под действием растягивающих сварочных напряжений, когда металл шва находится в твердо-жидком состоянии;

– холодные трещины (1063) возникают в твердом металле околошовной зоны, где образуются хрупкие закалочные структуры, разрушающиеся под действием продольных и поперечных сварочных напряжений;

– трещины в основном металле (1064) образуются под действием термического цикла сварки.

Способы предупреждения и устранения – те же, что и для дефекта **105; Е** (пункт 2.6).

3 Вопросы для самоконтроля

1. Назовите нормативно-техническую документацию контроля качества сварных соединений.
2. Назовите критерии оценки качества групп дефектов.
3. Что такое дефект сварного соединения?
4. Какие дефекты бывают в сварном шве?
5. Какие могут быть причины образования дефектов в сварных соединениях?
6. На какие группы классифицированы дефекты сварных соединений?
7. Дайте определения допустимого и недопустимого дефектов.
8. Дайте определение понятию «трещина сварного соединения».
9. Назовите основные причины образования трещин.
10. Какими факторами определяется сопротивляемость сварного соединения образованию горячих трещин?
11. Что называется температурным интервалом хрупкости? От чего он зависит и на что влияет?
12. Что является наиболее надежным способом исключения горячих трещин в металле швов?
13. Поясните зависимость влияния элемента, увеличивающего количество легкоплавких эвтектик в сплаве, на изменение его склонности к образованию горячих трещин.
14. Какие существуют пробы и методики для оценки склонности металла швов к образованию горячих трещин?
15. Образование каких (наиболее типичных) холодных трещин в сварных соединениях известны конструкторам и технологам на стадии проектирования сварной конструкции?
16. Расскажите о методах борьбы с образованием холодных трещин при сварке закаливающих сталей.
17. Что такое эквивалентный углерод в стали? Как он рассчитывается?

18. Как с помощью углеродного эквивалента рассчитать температуру предварительного подогрева составных частей будущего сварного соединения?
19. Кто автор расчета необходимости подогрева и его температуры?
20. Для каких сплавов (кроме закаливаемых сталей) также характерно образование холодных трещин в их сварных соединениях?
21. Какими методами контроля выявляются микротрещины?
22. На каких участках зоны сварного соединения может располагаться продольная трещина?
23. Расскажите о способах предупреждения возникновения дефектов в виде продольных трещин.
24. Какие известны внешние признаки дефектов сварного шва по типу поперечных трещин?
25. Какие способы предупреждения возникновения дефектов в виде поперечных трещин известны сварщикам?
26. Что такое «звездоподобные» трещины? Как они возникают?
27. Какие известны внешние признаки радиальных трещин?
28. Поясните процесс возникновения трещин в кратере. Где основное место локализации таких дефектов сварных соединений?
29. Какие дефекты сварного шва называются отдельными трещинами?
30. Поясните процесс и причины возникновения отдельных трещин в сварном шве.
31. Что представляют собой разветвленные трещины?
32. На каких участках зоны сварного соединения могут располагаться разветвленные трещины?
33. Какие известны внешние признаки дефектов сварного шва по типу разветвленных трещин?
34. Поясните основные закономерности цифрового и буквенного обозначения дефектов согласно Классификации дефектов Международного института сварки (МИС).
35. Какие виды дефектов являются наиболее опасными для эксплуатации?

4 Список рекомендованных источников

1. Винокуров, В. А. Сварные конструкции. Механика разрушения и критерии работоспособности / В. А. Винокуров, Г. А. Николаев ; под ред. Б. Е. Патона. – М. : Машиностроение, 1996. – 576 с., ил.
2. Корчагин, И. Б. Проектирование сварных конструкций : учебное пособие / И. Б. Корчагин. – Воронеж : Воронеж. гос. техн. ун-т, 2004. – 140 с.
3. Мандриков, А. П. Примеры расчета металлических конструкций : учебное пособие / А. П. Мандриков. – 3-е изд., стер. – СПб. : Издательство «Лань», 2012. – 432 с., ил.
5. Николаев, Г. А. Сварные конструкции. Прочность и деформации конструкций : учебное пособие / Г. А. Николаев, С. А. Куркин, В. А. Винокуров. – М. : Высшая школа, 1982. – 272 с.
6. Окерблом, Н. О. Конструктивно-технологическое проектирование сварных конструкций / Н. О. Окерблом. – М.-Л. : Машиностроение, 1964. – 420 с., ил.
7. Пояркова, Е. В. Прочность сварных конструкций : учебное пособие / Е. В. Пояркова, Л. С. Диньмухаметова, Ж. Г. Калеева. – Орск : Изд-во Орского гуманитарно-технологического института (филиала) ОГУ, 2012. – 222 с.
8. Пояркова, Е. В. Лабораторно-практические возможности исследования сварных соединений [Электронный ресурс] : методические указания для обучающихся по программам высшего образования по направлению подготовки 15.04.01 Машиностроение / Е. В. Пояркова. – Оренбург : ОГУ. – 2017. – Загл. с тит. экрана. – Режим доступа: http://artlib.osu.ru/web/books/method_all/36309_20170426.pdf
9. Пояркова, Е. В. Расчет прочности элементов сварных соединений конструкций [Электронный ресурс] : методические указания / Е. В. Пояркова; М-во образования и науки Рос. Федерации, Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования «Оренбург. гос. ун-т», каф. машиноведения. - Оренбург : ОГУ. – 2017. – 46 с. – Загл. с тит. экрана.

10. Пояркова, Е. В. Расчет сварных соединений стальных конструкций [Электронный ресурс] : методические указания / Е. В. Пояркова; М-во образования и науки Рос. Федерации, Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования «Оренбург. гос. ун-т», каф. машиноведения. – Оренбург : ОГУ. – 2017. – 35 с. – Загл. с тит. экрана.

11. ИСО 6520-82. Классификация дефектов швов при сварке металлов плавлением (с пояснениями).

12. ГОСТ 6996–66. Сварные соединения. Методы определения механических свойств. – Введ. 01.01.66. – М. : Изд-во стандартов, 1966. – 28 с.

13. Волченко, В. Н. Контроль качества сварки : учеб. пособие для машиностроительных вузов / В. Н. Волченко [и др.]; под. ред. В. Н. Волченко. – М. : Машиностроение, 1975. – 328 с.

14. Пояркова, Е. В. Диагностика повреждений металлических материалов и конструкций [Электронный ресурс] : учебное пособие / Е. В. Пояркова, С. Н. Горелов. – 2-е изд. – Москва : Флинта. – 2015. – 202 с. – Загл. с тит. экрана.

15. Установление связи между структурой, конструктивной прочностью и эксплуатационной надежностью сварных элементов конструкций [Электронный ресурс] : свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ / Пояркова Е. В., Шамаев С. Ю.; правообладатель Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. проф. образования «Оренбург. гос. ун-т». – № 2014617927, заявл. 08.08.2014, зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 02.10.2014. – 2014. – 1 с.