

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«Магнитогорский государственный технический университет  
им. Г.И. Носова»

**А.Б. Сычков**  
**Д.В. Терентьев**  
**С.В. Михайлицын**  
**М.А. Шекшеев**

## **КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета  
в качестве учебного пособия*

Магнитогорск  
2015

УДК 621.791(075.8)

**Рецензенты:**

Заместитель начальника Центральной лаборатории ОАО «ММК»,  
кандидат технических наук

***В.Л. Корнилов***

Директор ООО «Октант М», кандидат технических наук

***С.Н. Нефедьев***

**Контроль качества сварных соединений:** учеб. пособие / А.Б. Сычков, Д.В. Терентьев, С.В. Михайлицын, М.А. Шекшеев. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2015. – 96 с.

ISBN 978-5-9967-0627-3

Учебное пособие знакомит с особенностями контроля качества сварных соединений. Даны современные представления о методах контроля, дефектах сварных соединений и способах борьбы с ними.

Предназначено для обучающихся, изучающих дисциплину «Контроль качества сварных соединений» и получающих квалификацию инженера по специальности «Оборудование и технология сварочного производства» по направлению «Машиностроительные технологии и оборудование» и бакалавра по профилю «Оборудование и технология сварочного производства» по направлению «Машиностроение», дисциплину «Сварочные материалы» по специальностям «Металловедение и термическая обработка металлов», «Металловедение и термическая обработка металлов и высокопрочных сплавов», «Материаловедение и технология материалов (в машиностроении)» по направлению «Материаловедение и технология материалов», а также при выполнении курсовых и дипломных проектов по соответствующим дисциплинам.

Пособие будет полезно для молодых специалистов и ученых, специализирующихся в своей творческой деятельности по сварочному производству.

УДК 621.791(075.8)

ISBN 978-5-9967-0627-3

© Магнитогорский государственный  
технический университет  
им. Г.И. Носова, 2015

© Сычков А.Б.,  
Терентьев Д.В.,  
Михайлицын С.В.,  
Шекшеев М.А., 2015

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1. КАЧЕСТВО СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ .....	6
2. МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ.....	14
2.1. Классификация методов контроля.....	14
2.2. Методы неразрушающего контроля.....	16
2.2.1. Радиационный контроль .....	16
2.2.2. Акустический контроль .....	21
2.2.3. Магнитный контроль.....	22
2.2.4. Капиллярный контроль .....	24
2.3. Методы механических испытаний.....	26
2.3.1. Правила отбора проб и образцов.....	26
2.3.2. Испытания при статических нагрузках .....	30
2.3.3 Испытания при ударных нагрузках .....	39
2.3.4. Измерение твердости .....	42
2.4. Методы коррозионных испытаний.....	47
2.4.1. Испытания на коррозионное растрескивание металлов и сплавов .....	47
2.4.2. Испытания на питтинговую коррозию .....	49
2.4.3. Металлографическое определение коррозионных поражений .....	49
2.5. Методы технологических испытаний .....	51
2.5.1. Испытания на сопротивляемость образованию холодных трещин при сварке плавлением .....	51
2.5.2. Испытания на сопротивляемость образованию горячих трещин при сварке плавлением .....	52
2.5.3. Оценка влияния сварки плавлением на основной металл .....	52
2.5.4. Оценка хладостойкости сварных соединений по реакции на ожог сварочной дугой .....	53
2.5.5. Определение содержания диффузионного водорода в наплавленном металле и металле шва при сварке.....	54
3. ДЕФЕКТЫ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ .....	55
3.1. Классификация дефектов .....	55
3.2. Трещины .....	55
3.3. Поры .....	66
3.4. Усадочные раковины .....	68
3.5. Непровар .....	69
3.6. Несплавление.....	71
3.7. Неметаллические включения .....	72
3.8. Металлические включения .....	74
3.9. Флокены .....	75
3.10. Подрез .....	76

3.11. Наплыв .....	77
3.12. Прожог .....	78
3.13. Кратер.....	79
3.14. Перегрев металла .....	79
4. ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И ИЗЛОМОВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ.....	80
4.1. Металлографические методы исследования структуры сварных соединений .....	81
4.1.1. Изготовление шлифов.....	81
4.1.2. Выявление структуры сварных соединений .....	84
4.2. Методы исследования поверхностей разрушения сварных соединений.....	86
4.2.1. Очистка поверхностей изломов .....	86
4.2.2. Фотографирование изломов .....	86
4.2.3. Оптические методы исследования строения изломов.....	87
4.2.4. Физические методы исследования структуры и поверхностей разрушения сварных соединений .....	92
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	94
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	95

## ВВЕДЕНИЕ

Целью освоения дисциплины «Контроль качества сварных соединений» является получение теоретической подготовки и практических навыков осуществления контроля качества сварных соединений, обеспечивающих безаварийную эксплуатацию сварных конструкций.

В процессе изучения данной дисциплины необходимо:

- ознакомиться с основами качества сварных соединений;
- изучить основные методы контроля сварных соединений;
- изучить различные виды дефектов сварных соединений и их влияние на эксплуатационные свойства;
- приобрести навыки практического использования методов контроля сварных соединений;
- ознакомиться со специальными методами контроля сварных соединений.

Дисциплина посвящена изучению методов контроля качества продукции. Особое внимание уделяется контролю качества сварных соединений металлических конструкций неразрушающими (внешним осмотром, теческанием, капиллярным, магнитным, ультразвуковым и радиационным) и разрушающими (механическими) методами. Даются основы управления качеством продукции и организации контроля.

Изучение дисциплины «Контроль качества сварных соединений» базируется на знаниях, полученных студентами при изучении физики, материаловедения, металловедения сварки, теории сварочных процессов, технологии производства сварных конструкций.

## 1. КАЧЕСТВО СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Сварка – прогрессивный метод получения неразъемных соединений в промышленности и строительстве. Основным материалом для сварных конструкций служит сталь. Кроме нее в больших объемах применяются также алюминиевые и титановые сплавы, никелевые, медные и тугоплавкие металлы.

Главная задача в области сварки – обеспечение высокого качества соединений и недопущение в них дефектов.

Система контроля сварных и паяных соединений обеспечивает требуемое качество и надежность соединений, позволяет определить степень пригодности этих соединений к эксплуатации\*. При разработке и осуществлении контроля качества сварных соединений следует руководствоваться требованиями, предъявляемыми к сварным и паяным соединениям (технические условия (ТУ), нормативно-техническая документация (НТД)), но прежде всего государственными и международными стандартами.

Для контроля сварных соединений разработаны специальные методы и аппаратура. Контроль готовых сварных соединений в большинстве случаев должен осуществляться стандартными методами и средствами контроля. Главная задача контроля – выявлять дефекты в сварных соединениях, способные вызвать преждевременное разрушение изделий, объяснить причины их появления, предложить способы их предупреждения и устранения.

Причины повреждаемости деталей и сварных конструкций подразделяются на эксплуатационные, конструктивные и технологические.

Технологические причины обусловлены низким качеством исходных металлических материалов, нарушениями технологии в процессе производства сварных и паяных соединений.

Для установления технологических причин используются разрушающие и неразрушающие методы контроля. Разрушающими методами контроля выявляются структурная неоднородность и неоднородность механических свойств металла в различных участках сварных соединений, неразрушающими – трещины, подрезы, неметаллические и металлические включения, непровары, поры и рыхлоты, трещины, несплавления и другие дефекты, которые могут приводить к преждевременному разрушению или выходу из строя сварных и паяных конструкций.

Для выявления технологических причин, приводящих к возникновению дефектов в сварных конструкциях, используются механические,

---

\* Контроль качества сварных и паяных соединений: справ. издание / сост. Л.П. Герасимова. – М.: Интермет Инжиниринг, 2007. – 376 с.: ил. 254.

физические, металлографические, фрактографические и технологические методы контроля.

Для выявления технологических причин, сокращающих срок эксплуатации изделий, проводят испытания, в том числе на коррозионную и эрозионную стойкость, позволяющие установить причины, способные вызывать преждевременное изменение размеров сварных конструкций и, в конечном итоге, разрушение сварного соединения.

Контроль сварных соединений необходим для определения их качества и предупреждения брака. При этом осуществляют три основных вида контроля:

– *предварительный* контроль, заключающийся в проверке марки и состава основного металла, качества электродной и присадочной проволоки, флюса, защитных газов, правильности сборки деталей под сварку, работоспособности сварочного оборудования и др.;

– *контроль в процессе* сварки, заключающийся в проверке исправности используемой аппаратуры и приспособлений, правильности режимов сварки и т.д.;

– *контроль готовой детали или конструкции*, включающий в себя наружный осмотр и обмер швов, определение неразрушающими методами контроля наличия дефектов, испытание свойств сварных образцов и, при необходимости, проведение металловедческих исследований.

При написании учебного пособия использовались материалы справочника «Контроль качества сварных и паяных соединений», а также нормативные документы.

### **Перечень ГОСТ, регламентирующих контроль качества сварных соединений**

166–89 Штангенциркули. Технические условия.

701–89 Кислота азотная концентрированная. Технические условия.

1497–84 Металлы. Методы испытания на растяжение.

1579–93 Металлы. Проволока. Метод испытания на перегиб.

1778–70 Сталь. Металлографические методы определения неметаллических включений.

2263–79 Натр едкий технический. Технические условия.

2309–73 Обозначение шероховатости поверхностей.

2454–78 Головки шлифовальные.

2601–84 Сварка металлов. Основные понятия. Термины и определения.

2789–73 Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики.

2848–77 Металлы. Методы измерения твердости по Роквеллу при малых нагрузках (по Супер-Роквеллу).

2999–75 Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу.

3242–79 Соединения сварные. Методы контроля качества.

3248–81 Металлы. Метод испытания на ползучесть.

3565–80 Металлы. Метод испытания на кручение.  
3722–81 Подшипники качения. Шарик. Технические условия.  
4233–77 Натрий хлористый. Технические условия.  
4461–77 Кислота азотная. Технические условия.  
4543–71 Прокат из легированной конструкционной стали. Технические условия.  
5009–82 Шкурка шлифовальная тканевая. Технические условия.  
5272–69 Коррозия металлов. Термины.  
5639–65 Сталь. Методы выявления и определения величины зерна.  
5962–67 Спирт этиловый ректификованный. Технические условия.  
6032–89 Стали и сплавы коррозионно-стойкие. Методы испытаний на стойкость против межкристаллитной коррозии.  
6130–71 Металлы. Методы определения жаростойкости.  
6507–90 Микрометры. Технические условия.  
6616–94 Преобразователи термоэлектрические. Технические условия.  
6709–72 Вода дистиллированная. Технические условия.  
6996–66 Сварные соединения. Методы определения механических свойств.  
7122–75 Швы сварные и металл наплавленный. Методы отбора проб для определения химического состава.  
7164–78 Приборы автоматические ГСП. Технические условия.  
7268–82 Сталь. Методы испытаний на чувствительность к механическому старению по испытанию на ударный изгиб.  
7512–82 Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Радиографический метод.  
7539–1–87 Металлы и сплавы. Метод испытания на коррозионное растрескивание.  
7539–2–89 Металлы и сплавы. Испытания на коррозионное растрескивание образцов в виде изогнутого бруса.  
7539–4–89 Красители органические.  
7564–97 Металлы. Метод отбора проб для образцов.  
7565–81 Чугун, сталь и сплавы. Методы отбора проб для определения химического состава.  
7851–74 Посуда стеклянная химико-лабораторная. Технические условия.  
7855–84 Машины разрывные и универсальные для статических испытаний металлов.  
8233–56 Сталь. Эталоны микроструктуры.  
8817–82 Металлы. Метод испытания на осадку.  
8818–73 Металлы. Метод испытаний на расплющивание.  
9012–59 Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю.  
9013–59 Металлы. Метод измерения твердости по Виккерсу.  
9031–75 Меры твердости образцовые. Технические условия.

9245–79 Потенциометры постоянного тока измерительные. Технические условия.

9293–74 Азот газообразный и жидкий. Технические условия.

9377–81 Наконечники алмазные для измерения твердости по методам Роквелла и Виккерса.

9450–76 Металлы. Метод измерения микротвердости вдавливанием алмазным наконечником.

9454–78 Металлы. Метод испытаний на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах.

9651–84 Металлы. Методы испытаний на растяжение при повышенных температурах.

9736–91 Приборы электрические для измерения неэлектрических величин. Технические условия.

10006–80 Трубы металлические. Метод испытаний на растяжение.

10145–81 Металлы. Метод испытаний на длительную прочность.

10446–80 Проволока. Метод испытаний на растяжение.

10678–76 Кислота ортофосфорная. Технические условия.

10708–82 Копры маятниковые. Технические условия.

10929–76 Водорода пероксид. Технические условия.

11150–84 Металлы. Метод испытаний на растяжение при пониженных температурах.

11701–84 Металлы. Метод испытания на растяжение тонких листов и лент.

12026–76 Бумага фильтровальная лабораторная. Технические условия.

12503–75 Сталь. Методы ультразвукового контроля. Общие требования.

13585–68 Сталь. Метод валиковой пробы для определения допускаемых режимов дуговой сварки и наплавки.

13813–68 Материалы металлические. Метод испытаний на перегиб листов и лент толщиной менее 4 мм.

14019–2004 Металлы. Метод испытаний на изгиб.

14317–75 Правила разработки процессов контроля.

14782–86 Швы сварных соединений. Методы ультразвуковой дефектоскопии.

14894–96 Термоэлектрические термометры для низких температур.

15150–69 Машины, приборы. Исполнение для различных климатических районов.

15467–79 Управление качеством продукции. Термины и определения

16504–81 Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения.

17299–78 Спирт технический этиловый. Технические условия.

17325–79 Металлы. Термины и определения при испытании на усталость.

17410–84 Трубы металлические бесшовные цилиндрические. Метод ультразвуковой дефектоскопии.

18353–79 Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов.  
18442–80 Качество продукции. Неразрушающий контроль. Капиллярные методы.  
18661–73 Сталь. Измерение твердости методом ударного отпечатка.  
18835–73 Металлы. Метод измерения пластической твердости.  
19521–74 Сварка металлов. Классификация.  
19647–74 Методы и средства радиометрического анализа. Термины и определения.  
20415–82 Контроль неразрушающий. Методы акустические. Общие положения.  
20426–82 Контроль неразрушающий. Радиационные методы дефектоскопии. Область применения.  
20487–75 Пайка. Метод испытаний для оценки влияния жидкого припоя на механические свойства паяемого материала.  
21104–75 Контроль неразрушающий. Феррозондовый метод.  
21105–87 Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод.  
21318–75 Измерение микротвердости царапанием алмазным наконечником.  
21397–75 Контроль неразрушающий. Комплект стандартных образцов для ультразвукового контроля полуфабрикатов и изделий из алюминиевых сплавов. Основные параметры и технические требования.  
21549–76 Пайка. Метод определения эрозии паяемого материала.  
22368–77 Контроль неразрушающий. Классификация дефектности стыковых сварных швов по результатам ультразвукового контроля.  
22706–77 Металлы. Метод испытаний на растяжение при температурах от минус 100 до минус 269 °С.  
22727–88 Прокат листовой. Методы ультразвукового контроля.  
22761–77 Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Бринеллю переносными твердомерами статического действия.  
22762–77 Металлы и сплавы. Метод измерения твердости на пределе текучести вдавливанием шара.  
22848–77 Металлы. Метод испытаний на ударный изгиб при температурах от минус 100 до минус 269 °С.  
22929–85 Аппараты защиты от токов утечки рудничные для сетей напряжением до 1200 В. Общие технические условия.  
23046–78 Соединения паяные. Метод испытаний на удар.  
23055–78 Контроль неразрушающий. Сварка металлов плавлением. Классификация сварных соединений по результатам радиографического контроля.  
23207–78 Металлы. Термины и определения при испытании на усталость.  
23240–78 Конструкции сварные. Метод оценки хладостойкости по реакции на ожог сварочной дугой.

23273–78 Металлы и сплавы. Измерение твердости методом упругого отскока бойка (по Шору).

23338–91 Сварка. Метод определения содержания диффузионно подвижного водорода в наплавленном металле.

23677–79 Твердомеры для металлов. Общие технические требования.

23702–90 Контроль неразрушающий. Преобразователи ультразвуковые. Методы испытаний.

23829–89 Контроль неразрушающий акустический. Термины и определения.

23870–79 Свариваемость сталей. Метод оценки влияния сварки плавлением на основной металл.

24034–80 Контроль неразрушающий радиационный. Термины и определения.

24104–2001 Весы лабораторные. Технические требования.

24289–80 Контроль неразрушающий вихрековый. Термины и определения.

24450–80 Контроль неразрушающий магнитный. Термины и определения.

24521–80 Контроль неразрушающий оптический. Термины и определения.

24522–80 Контроль неразрушающий капиллярный. Термины и определения.

24746–81 Метод испытания твердости по Шору (приборы).

25002–81 Устройства судовые грузовые стреловые.

25225–82 Контроль неразрушающий. Швы сварных соединений трубопроводов. Магнитографический метод.

25347–82 ЕСДП. Поля допусков и рекомендуемые посадки.

25502–79 Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость.

25503–80 Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы испытаний на сжатие.

25505–85 Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Метод испытаний на малоцикловую усталость при термомеханическом нагружении.

25506–85 Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении.

25522–90 Контроль неразрушающий капиллярный. Термины и определения.

25997–83 Сварка металлов плавлением. Статистическая оценка качества по результатам неразрушающего контроля.

26007–83 Свариваемость сталей. Метод оценки влияния сварки плавлением на основной металл.

26388–84 Соединения сварные. Метод испытаний на сопротивляемость образованию холодных трещин при сварке плавлением.

26389–84 Соединения сварные. Метод испытаний на сопротивляемость образованию горячих трещин при сварке плавлением.

27655–88 Акустическая эмиссия. Термины, определения и обозначения

27947–88 Контроль неразрушающий. Рентгенотелевизионный метод. Общие требования.

27964–88 Измерение параметров шероховатости. Термины и определения.

28277–89 Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Электрорадиографический метод.

28868–90 Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу при малых нагрузках (по Супер-Роквеллу).

29090–91 Материалы, используемые в оборудовании для газовой сварки, резки и аналогичных процессов. Общие требования.

29273–92 Свариваемость. Термины и определения.

29297–92 Сварка, пайка. Обозначение процессов.

30242–97 Дефекты соединений при сварке металлов плавлением. Классификация, обозначение и определения.

30415–96 Сталь. Неразрушающий контроль механических свойств и микроструктуры металлопродукции магнитным методом.

30456–97 Металлопродукция. Прокат листовой и трубы стальные. Методы испытаний на ударный изгиб.

30482–97 Сварка сталей электрошлаковых. Требования к технологическому процессу.

2.312–72 Условные обозначения и изображения швов сварных конструкций.

2.313–68 Условные обозначения и изображения швов неразъемных соединений.

3.430–96 Сварка дуговая конструкционных чугунов. Требования к технологическому процессу.

3.1406–74 Правила оформления документов на сварку.

3.1413–73 Правила оформления документации на процессы сварки трением.

3.1419–74 Правила оформления документов на типовые технологические процессы сварки.

3.1426–76 Правила оформления документов, применяемых при автоматизированном проектировании технологических процессов. Сварка.

3.1705–81 Правила записи операций сварки.

8.044–80 Наконечники алмазные к приборам для измерения твердости металлов и сплавов. Методы и средства поверки.

8.298–80 ГСИ приборы для измерения твердости металлов и сплавов. Методы поверки.

8.338–2002 ГСИ преобразователи термоэлектрические. Методы поверки.

8.426–81 ГСИ приборы для измерения твердости металлов методом упругого отскока бойка (по Шору). Методы поверки.

9.019–78 Методы ускоренных испытаний на коррозионное растрескивание алюминиевых и магниевых сплавов без защитных покрытий.

9.021–74 Сплавы алюминиевые. Метод ускоренных испытаний на межкристаллитную коррозию.

9.039–74 Коррозионная агрессивность атмосферы.

9.040–74 Металлы и сплавы. Расчетно-экспериментальный метод ускоренного определения коррозионных потерь в атмосферных условиях.

9.308–85 Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы ускоренных коррозионных испытаний.

9.901.1–89 Металлы и сплавы. Общие требования к методам испытаний на коррозионное растрескивание.

9.901.2–89 Металлы и сплавы. Метод испытания на коррозионное растрескивание образцов в виде изогнутого бруса.

9.901.4–89 Металлы и сплавы. Метод испытания на коррозионное растрескивание образцов при одноосном растяжении.

9.903–81 Стали и сплавы высокопрочные. Методы ускоренных испытаний на коррозионное растрескивание.

9.904–82 Сплавы алюминиевые. Метод ускоренных испытаний на расслаивающую коррозию.

9.905–82 Методы коррозионных испытаний. Общие требования.

9.907–87 Метод удаления продуктов коррозии после коррозионных испытаний.

9.908–85 Металлы и сплавы. Метод определения показателей коррозии и коррозионной стойкости.

9.909–86 Металлы, сплавы, покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы испытания на климатических испытательных станциях.

9.911–89 Сталь атмосферостойкая. Метод ускоренных коррозионных испытаний.

9.912–89 Стали и сплавы коррозионно-стойкие. Методы ускоренных испытаний на стойкость к питтинговой коррозии.

9.913–90 Алюминий, магний и их сплавы. Методы ускоренных коррозионных испытаний.

9.914–91 Стали коррозионно-стойкие аустенитные. Электрохимические методы определения стойкости против межкристаллитной коррозии.

12.3.003–75 Работы электросварочные. Общие требования безопасности.

25.002–80 Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Акустическая эмиссия.

## **2. МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

### **2.1. Классификация методов контроля**

#### ***Методы неразрушающего контроля***

Методы неразрушающего контроля играют особо важную роль при оценке качества сварных соединений. Такой контроль обычно проводится на самих изделиях. При этом оценивают физические свойства свариваемого металла, которые косвенно характеризуют его качество. Выявленные отклонения объясняются наличием дефектов.

Эффективность методов неразрушающего контроля определяется следующими основными факторами: чувствительностью (наименьшими размерами реального дефекта, выявляемого в сварных соединениях); экономичностью; безопасностью (степенью неблагоприятного воздействия на оператора).

Методы неразрушающего контроля, используемые для оценки качества сварных соединений, приведены в ГОСТ 3242–79 (в соответствии с ГОСТ 19521–74 и ИСО 2437–72).

В ГОСТ 25997–83 установлены правила статистической оценки стабильности статистически управляемых технологических процессов сварки соединений из металлов и сплавов для изделий массового или серийного производства по результатам неразрушающего контроля. Этот стандарт устанавливает виды и методы контроля, выявляемые дефекты, чувствительность методов и области их применения.

Нестандартизированные методы контроля должны применяться в соответствии с техническими условиями и инструкциями на данный вид продукции.

ГОСТ 30415–96 нормирует правила прогнозирования механических свойств металлов, в том числе и сварных соединений, по значениям коэрцитивной силы магнитного поля или тока размагничивания. Совместно с ГОСТ 25997–83 и ОСТ 14–1–34–90 этот стандарт может быть использован для статистического управления качеством металлов по корреляционной связи между параметрами.

#### ***Методы механических испытаний***

Общие положения о проведении механических испытаний сварных соединений определяются ГОСТ 6996–66. Этот стандарт устанавливает методы определения механических свойств при следующих видах испытаний:

– испытания металла различных участков сварного соединения и наплавленного металла на статическое (кратковременное) растяжение;

- испытание металла различных участков сварного соединения и наплавленного металла на ударный изгиб (на надрезанных образцах);
- испытание металла различных участков сварного соединения на стойкость против механического старения;
- измерение твердости металла различных участков сварного соединения и наплавленного металла;
- испытание сварного соединения на статическое растяжение; испытание сварного соединения на статический изгиб (загиб); испытание сварного соединения на ударную вязкость.

Стандарт оговаривает требования к отбору образцов, вырезанных непосредственно из контролируемой конструкции или из специальных сваренных контрольных соединений. Приведены условия проведения испытаний и оценка их результатов. Для указанных испытаний приведены виды образцов и определяемые при испытаниях характеристики.

Другие требования к условиям проведения испытаний, определению размеров образцов, оборудованию для испытаний и подсчету результатов должны оговариваться соответствующими стандартами или другой технической документацией. Количество испытываемых образцов, математическая обработка результатов испытаний проводится по соответствующему нормативному документу (НД – ГОСТ, ОСТ, ТУ, ТС) или указывается в технической документации.

### ***Методы коррозионных испытаний***

Коррозия металлов – разрушение металлов, вызванное химическим или электрохимическим взаимодействием их с коррозионной средой. Коррозионное разрушение ускоряется в условиях действия механических и термических напряжений.

Термины, используемые при описании результатов коррозионных испытаний, должны соответствовать ГОСТ 5278–68.

Основные виды коррозии:

- равномерная, поверхностная – коррозионное разрушение, приводящее к равномерному уменьшению толщины изделия;
- питтинговая, точечная, язвенная – местная коррозия металла в виде отдельных точечных поражений, при которой коррозионное разрушение распространяется в глубь металла в виде тонкого канала, на поверхности наблюдается в виде язв;
- межкристаллитная, межзеренная – коррозионное растрескивание, проходящее по границам кристаллов (зерен) металла;
- расслаивающая – устранение сцепления между слоями металла, возникающее с поверхности и распространяющееся в глубь металла под воздействием коррозионной среды;

– растрескивание – коррозионное разрушение металла при одновременном воздействии напряжений (растягивающих, переменных) и коррозионной среды.

Показатели коррозии и коррозионной стойкости определяются по ГОСТ 9.908–85. Настоящий стандарт устанавливает основные показатели коррозии и коррозионной стойкости (химического сопротивления) металлов и сплавов при сплошной, питтинговой, межкристаллитной, расслаивающей коррозии, коррозии пятнами, коррозионном растрескивании, коррозионной усталости и методы их определения.

Показатели коррозии и коррозионной стойкости металлов определяют в заданных условиях, учитывая их зависимость от химического состава и структуры металла, состава среды, температуры, гидро- и аэродинамических условий, вида и величины механических напряжений, а также от назначения и конструкции изделия.

Показатели коррозионной стойкости могут быть количественными, полуколичественными (балльными) и качественными.

Показатели коррозионной стойкости определяются главным образом временем до достижения допустимой глубины коррозионного поражения.

### ***Методы технологических испытаний***

Технологические методы испытаний используются для определения возможности применения металлов и сплавов или конструкций, в частности сварных, при данном способе их производства. При этом, в отличие от методов механических испытаний, определяются не отдельные значения свойств с высокой точностью измерений, а пригодность материала или конструкций для конкретных производственных задач, исходя из условий их изготовления и эксплуатации.

## **2.2. Методы неразрушающего контроля**

### ***2.2.1. Радиационный контроль***

Методы радиационного неразрушающего контроля характеризуются высокой информативностью, так как позволяют получать наглядную картину распределения толщин и плотностей металлических изделий, высокой чувствительностью и возможностью контролирования широкого диапазона толщин металла, сварных деталей и конструкций сложной геометрии. Они основаны на просвечивании контролируемых объектов рентгеновским и гамма-излучением и другими видами проникающих ионизирующих излучений.

Методы радиационного контроля позволяют выявлять внутренние дефекты: трещины, раковины, рыхлость, поры, металлические и неметаллические (шлаковые) включения, непровары и другие дефекты и служат

для обнаружения и анализа внутренних неоднородностей в металле. Но при этом выявляемые дефекты должны иметь поглощающую способность радиационного излучения, отличную от поглощающей способности свариваемого металла. В этом случае регистрируется площадь дефекта в плоскости, перпендикулярной направлению просвечивания.

В ГОСТ 20426–81 изложены области применения радиационных (радиографического, электрорадиографического, радиоскопического и радиометрического) методов дефектоскопии металлических объектов с использованием излучения закрытых радиоактивных источников на основе изотопов  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{192}\text{Ir}$ ,  $^{170}\text{Tm}$  и тормозного излучения бетатронов.

В ГОСТ 24034–80 даны определения и термины радиационных методов контроля, используемых для обнаружения и анализа внутренних неоднородностей в различных материалах.

Классификация методов контроля производится по ГОСТ 18353–79. Радиационные методы дефектоскопии применяют для обнаружения дефектов внутри металлических изделий – нарушений сплошности и однородности металла, внутренней конфигурации и взаимного расположения дефектов, недоступных для визуального контроля.

Выбор метода и средств контроля проводится в соответствии с требованиями ГОСТ, технических условий и рабочих чертежей.

Результаты контроля качества сварных соединений, полученные с помощью радиационных методов, фиксируются различными способами, для которых ниже приведены рекомендуемые толщины просвечиваемых изделий из металлов и сплавов:

– при использовании рентгеновских аппаратов толщина изделий, мм: из сталей – до 40; из титановых сплавов – до 90; из алюминиевых сплавов – до 180; из магниевых сплавов – до 270;

– при использовании закрытых радиоактивных источников толщина изделий, мм: из сталей – до 200; из титановых сплавов – до 300; из алюминиевых сплавов – до 500; из магниевых сплавов – до 700;

– при использовании бетатронов толщина изделий, мм: из сталей – до 450; из титановых сплавов – до 880; из алюминиевых сплавов – до 1800.

При *радиографическом* методе контроля полученное изображение фиксируется: на радиографической пленке без усиливающих экранов; на радиографической пленке с различными комбинациями усиливающих металлических или флюоресцирующих экранов; на фотобумаге.

При *электрорадиографическом* методе контроля в соответствии с ГОСТ 28277–89 оговариваются общие требования к применению его для контроля сварных соединений. Рекомендуемая толщина просвечиваемых материалов, мм: из сталей – до 25; из титановых сплавов – до 52; из алюминиевых сплавов – до 113; из магниевых сплавов – до 165.

Изображение фиксируется на электронорадиографических пластинах, затем оно переносится на бумагу или другой носитель с помощью проявляющего порошка, создающего изображение на электронорадиографической пластине.

При *радиоскопическом* методе рекомендуемая толщина просвечиваемых материалов, мм: из сталей – до 60; из титановых сплавов – до 40; из алюминиевых сплавов – до 50; из магниевых сплавов – до 70.

Изображение фиксируется на: флюороскопическом экране; рентгеновском электронно-оптическом преобразователе (РЭОП); рентгенотелевизионной установке с флуоресцирующим экраном или скintилляционным монокристаллом и электронно-оптическим усилителем яркости изображения или рентгеновидиконом; скintилляционном монокристалле с электронно-оптическим преобразователем (ЭОП).

При *радиометрическом* методе дефектоскопии рекомендуемая толщина просвечиваемых изделий, мм: из сталей – до 150; из титановых сплавов – до 300; из алюминиевых сплавов – до 500.

В этом методе контроля используются следующие преобразователи излучения: газоразрядный счетчик; ионизационная камера; полупроводниковый детектор; счетчик Черенкова.

Новым развивающимся методом радиационного контроля является *рентгенотелевизионный* метод (по ГОСТ 27947–88). В этом стандарте даются общие требования к методу для неразрушающего контроля металлов и изделий из них.

Рентгенотелевизионный метод – метод рентгеновской интроскопии с применением рентгенотелевизионного интроскопа, в котором системой рентгенооптического преобразователя является рентгенотелевизионная установка.

Характеристики рентгеновского интроскопа, рентгенотелевизионной установки, абсолютная и относительная чувствительность измерений должны соответствовать ГОСТ 24034–80.

Рентгенотелевизионный метод применяют для выявления трещин, усадочных раковин, непроваров в сварных соединениях, металлических и неметаллических включений, рыхлот и других неоднородностей в строении объекта контроля. Кроме того, выявляют недоступные для внешнего осмотра дефекты типа надразов, превышений проплавов, прожогов.

Контроль осуществляют в динамическом и статическом режимах (при движении объектов контроля или при их неподвижном состоянии).

Чувствительность контроля определяют по эталонам чувствительности (по ГОСТ 7512–82) или по стандартным образцам, имитирующим нарушения сплошности объектов контроля.

Стандарт определяет также порядок подготовки и проведения рентгенотелевизионного контроля.

## ***Радиографический контроль сварных соединений (по ГОСТ 7512–82)***

Дополнительные сведения при проведении радиографического контроля сварных соединений изложены в ГОСТ 7512–82.

Этот стандарт определяет методы радиографического контроля сварных соединений из металлов и сплавов, выполненных сваркой плавлением, с толщиной свариваемых элементов от 1 до 400 мм с применением рентгеновского, гамма- и тормозного излучений и радиографической пленки.

Радиографический контроль применяют для выявления в сварных соединениях трещин, непроваров, пор, шлаковых, вольфрамовых, оксидных и других включений. Его применяют также для выявления прожогов, подрезов, для оценки величин выпуклости и вогнутости корня шва, недоступных для внешнего осмотра.

Стандарт оговаривает требования к усиливающим экранам, к эталонам чувствительности, к расшифровке снимков, приводит рекомендуемые схемы контроля.

Радиографическому контролю подвергают сварные соединения с отношением радиационной толщины наплавленного металла шва к общей радиационной толщине не менее 0,2, имеющие двусторонний доступ, обеспечивающий возможность установки кассеты с радиографической пленкой и источника излучения в соответствии с требованиями указанного стандарта.

При радиографическом контроле следует использовать источники излучения, предусмотренные ГОСТ 20426–82. Тип радиоактивного источника, усиливающего экран, напряжение на рентгеновской трубке должны устанавливаться технической документацией на приемку сварных соединений.

Аппаратура, методика проведения контроля сварных соединений, схемы контроля, выбор параметров радиографического контроля, расшифровка снимков и метрологическое обеспечение должны проводиться по ГОСТ 7512–82.

Классификация сварных соединений при сварке металлов плавлением по результатам радиографического контроля приведена в ГОСТ 23055–78.

Этот стандарт распространяется на сварные изделия, выполненные сваркой плавлением, на изделия из металлов и их сплавов с толщиной свариваемых элементов от 1 до 400 мм и устанавливает 7 классов сварных соединений по максимально допустимым размерам пор, шлаковых, вольфрамовых и оксидных включений, выявляемых при радиографическом контроле.

За размеры пор, шлаковых и вольфрамовых включений принимают размеры их изображений на радиограммах: диаметр сферических пор и включений; длина и ширина – для удлиненных пор и включений.

За размер скопления пор, шлаковых или вольфрамовых включений принимается их длина, измеренная по наиболее удаленным друг от друга

краям изображений пор или включений в скопления (скопление – три или более расположенных беспорядочно пор, шлаковых или вольфрамовых включений с расстоянием между любыми двумя ближайшими краями изображений пор или включений более одной, но не более трех их максимальной ширины или диаметра).

За размеры оксидных включений, непроваров и трещин принимается их длина.

Поры или включения с расстоянием между ними не более их максимальной ширины или диаметра независимо от их числа и взаимного расположения рассматриваются как одна пора или одно включение, размеры которых определяются в соответствии со сказанным выше.

Чувствительность радиографического контроля должна соответствовать требованиям ГОСТ 7512–82.

В ИСО 2437–72 устанавливаются особенности проведения рентгенографического контроля сварных швов из алюминиевых и магниевых сплавов. Аппаратура для рентгенографического контроля подразделяется в соответствии с этим ИСО на следующие классы: А – аппаратура общего назначения для исследования рентгеновскими лучами; В – более чувствительная рентгеновская аппаратура, которая применяется, когда с помощью аппаратуры класса «А» трудно обнаружить дефекты.

В данном ИСО указываются общие положения защиты от рентгеновских лучей, подготовки поверхностей для исследования, правильное расположение шва на рентгеновском снимке, эталоны чувствительности, расположение пленок и источника излучения в зависимости от формы объекта.

### ***Электрорадиографический контроль сварных соединений (по ГОСТ 28277–89)***

Этот стандарт устанавливает метод неразрушающего радиографического контроля сварных соединений из металлов и сплавов, выполненных сваркой плавлением, с применением тормозного и гамма-излучения и электрорадиографических носителей изображения (электрорадиографических пластин). Даются общие требования к методу.

Электрорадиографический контроль применяют для выявления в сварных соединениях трещин, непроваров, пор, шлаковых, вольфрамовых, оксидных и других включений, а также для выявления в недоступных для внешнего осмотра местах проплавов, подрезов и смещения кромок.

Стандарт определяет требования к аппаратуре и приспособлениям для контроля, к подготовке и проведению контроля. Контроль осуществляется с использованием эталонов чувствительности и/или маркировочных знаков.

Приведены рекомендуемые схемы контроля кольцевых (стыковых, нахлесточных, угловых и тавровых) сварных соединений.

Остальные требования к проведению контроля должны соответствовать ГОСТ 7512–82.

### 2.2.2. Акустический контроль

Для обнаружения внутренних дефектов в металлах используется характеристическое распространение волн в области высоких звуковых частот, т.е. направленное излучение ультразвука. Такие методы позволяют определять размеры, форму и глубину залегания дефектов. Одним из преимуществ этих методов является возможность автоматизации проведения контроля.

Общие положения о методах проведения акустического (ультразвукового) контроля приведены в ГОСТ 20415–82. Этот стандарт устанавливает условия и порядок применения акустических методов неразрушающего контроля, требования к оформлению технической документации на контроль, подготовке дефектоскопистов.

Классификация акустических методов контроля приведена в ГОСТ 18353–79. Классификация дефектности сварных стыковых швов по результатам акустического (ультразвукового) контроля приведена в ГОСТ 22368–77.

Методы акустического контроля сварных соединений подразделяются на:

- теневой – основан на анализе уменьшения амплитуды прошедшей волны, обусловленного наличием дефекта (ГОСТ 23829–85);

- зеркально-теневой – основан на анализе акустических импульсов после многократного их прохождения через объект контроля и регистрации дефектов по обусловленному ими изменению амплитуды сигнала, отраженного от донной поверхности (ГОСТ 23829–85);

- эхо-импульсный – основан на анализе параметров акустических импульсов, отраженных от дефектов и поверхности объекта контроля (ГОСТ 23829–85);

- эхо-сквозной – основан на измерении и регистрации амплитуды отраженных от несплошности металла ультразвуковых импульсов, причем излучение ультразвуковых импульсов производится со стороны одной из поверхностей контролируемого проката, а прием – с противоположной поверхности (ГОСТ 22727–88);

- многократно-теневой – основан на измерении и регистрации амплитуды  $n$ -го ультразвукового импульса,  $n - 1$  раз прошедшего сквозь прокат (ГОСТ 22727–88).

Сведения о правилах проведения акустического контроля сварных соединений приведены в ГОСТ 14782–86. Этот стандарт устанавливает методы акустического (ультразвукового) контроля стыковых, угловых, нахлесточных и тавровых соединений, выполненных дуговой, электрошлаковой, газовой, газопрессовой, электронно-лучевой и стыковой сваркой плавлением в сварных конструкциях из металлов и сплавов для выявления трещин, непроваров, пор, неметаллических и металлических включений.

Стандарт оговаривает требования к ультразвуковым дефектоскопам и стандартным образцам, используемым для настройки дефектоскопов, порядок подготовки к контролю, проведения контроля и оценки его результатов.

Метод акустической (ультразвуковой) дефектоскопии применяется для контроля металлических труб (по ГОСТ 14410–84). Этот стандарт распространяется на прямые однослойные цилиндрические трубы, изготовленные из черных и цветных металлов и сплавов, и устанавливает методы ультразвуковой дефектоскопии сплошности металла труб для выявления неоднородности металла и различных дефектов (типа нарушения сплошности), расположенных на внутренней и наружной поверхностях, а также в толще стенок труб и обнаруживаемых ультразвуковой дефектоскопической аппаратурой.

Суть метода: измерение амплитуды эхо-сигнала от искусственного отражателя в стандартном образце.

Аппаратура, чертежи стандартных образцов, номенклатура параметров преобразователей, схема включения преобразователей указаны в упомянутом стандарте и в ГОСТ 23702–79.

В зависимости от материала, назначения и технологии изготовления трубы проверяют на:

- продольные дефекты при распространении ультразвуковых колебаний в стенке трубы в одном направлении;
- продольные дефекты при распространении ультразвуковых колебаний в стенке трубы в двух направлениях навстречу друг другу;
- продольные и поперечные дефекты при распространении ультразвуковых колебаний в двух направлениях;
- дефекты типа расслоений.

При этом оговариваются: средства контроля; подготовка к контролю; порядок проведения контроля; оценка результатов контроля.

### ***2.2.3. Магнитный контроль***

Методы магнитного контроля основаны на индикации и анализе магнитных полей рассеяния, возникающих в местах нарушения сплошности ферромагнитного сварного шва при воздействии на него магнитного поля. Изменение напряженности магнитного поля в месте дефекта (не сплошности, включения, отличающиеся по магнитным характеристикам от сварного шва) регистрируются с помощью ферромагнитного порошка при магнитопорошковом способе контроля, магнитной пленки при магнитографическом способе и феррозонда при магнитоферрозондовом способе контроля.

В соответствии с ГОСТ 24450–80 установлены термины и определения, применяемые при магнитных методах неразрушающего контроля:

- магнитный неразрушающий контроль – неразрушающий контроль, основанный на регистрации магнитных полей рассеяния, возникающих над дефектами;

- магнитная дефектоскопия – выявление дефектов типа нарушения сплошности материала объекта контроля методами магнитного неразрушающего контроля;

- индикаторный рисунок – рисунок, образованный на поверхности объекта контроля ферромагнитным порошком в местах возникновения магнитного поля рассеяния дефекта.

Метод контроля с помощью магнитного порошка является наиболее часто применяемым методом обнаружения магнитных полей рассеяния. Их обнаружение основано на использовании в качестве средств контроля черных, серебристо-блестящих, цветных или флюоресцирующих ферромагнитных частиц величиной порядка 10 мкм. Эти частицы входят в состав жидкой эмульсии или газовой взвеси. Вследствие больших градиентов магнитного поля вблизи поверхностей дефектов магнитный порошок притягивается, благодаря чему возникает индикаторный рисунок.

#### ***Магнитопорошковый контроль (по ГОСТ 21105–87)***

Этот стандарт распространяется на магнитопорошковый метод неразрушающего контроля деталей, изделий и полуфабрикатов из ферромагнитных материалов с относительной магнитной проницаемостью не менее 40.

Суть метода: он основан на явлении притяжения частиц магнитного порошка магнитными потоками рассеяния, возникающими над дефектами в намагниченных объектах контроля. Наличие и протяженность индикаторных рисунков, вызванных полями рассеяния дефектов, можно регистрировать визуально или автоматическими устройствами обработки изображения.

Метод магнитопорошкового контроля предназначен для выявления поверхностных и подповерхностных нарушений сплошности: волосовин, трещин, непроваров в сварных соединениях, флокенов, закатов, надрывов и т.п. Метод может быть использован для контроля объектов с немагнитными покрытиями.

В зависимости от размеров выявляемых дефектов устанавливаются три условных уровня чувствительности:

Условный уровень чувствительности	А	Б	В
Минимальная ширина раскрытия условного дефекта, мкм	2,0	10,0	25,0
Минимальная протяженность условного дефекта, мм	0,5	0,5	0,5

При контроле магнитопорошковым методом применяют стационарные, передвижные и переносные магнитные дефектоскопы.

Стандарт определяет требования к дефектоскопическим материалам, порядок подготовки и проведения контроля. Даны способы и схемы намагничивания испытываемых объектов.

### ***Магнитометрический (магнитографический) метод контроля швов сварных соединений трубопроводов (по ГОСТ 25225–82)***

Этот стандарт устанавливает магнитографический метод неразрушающего контроля сплошности кольцевых стыковых сварных швов стальных трубопроводов различного диаметра с толщиной стенки от 2 до 25 мм, выполненных сваркой плавлением.

Магнитографический метод контроля выявляет в стыковых сварных швах трубопроводов из низко- и среднелегированных углеродистых ферромагнитных сталей наружные и внутренние трещины, непровары, цепочки шлаковых включений и поры.

Магнитографический контроль следует проводить после окончания сварки труб, остывания сварного шва до температуры ниже 60 °С, до начала изоляционных работ.

Стандарт определяет средства контроля (магнитную ленту, намагничивающие устройства, принадлежности для контроля и др.), порядок подготовки и проведения контроля, обработку результатов.

Дополнительные сведения об использовании указанного метода для контроля механических свойств и микроструктуры металлопродукции приведены в ГОСТ 30415–96.

Этот стандарт распространяется на сортовой, листовой, полосовой, фасонный прокат, листы с немагнитными покрытиями, трубы, многослойные листы и ленты из углеродистых, легированных и электротехнических марок сталей.

Неразрушающий метод магнитного контроля применяется при наличии устойчивых парных или множественных вероятностных соотношений (по корреляционной связи между параметрами) между контролируемыми показателями качества и магнитными характеристиками сталей.

Для неразрушающего магнитного контроля применяют приборы, измеряющие структурно-чувствительные магнитные характеристики.

Отбор образцов для проведения испытаний проводится по ГОСТ 7564–97. Стандарт определяет порядок проведения контроля и обработки результатов испытаний.

#### ***2.2.4. Капиллярный контроль***

Капиллярный неразрушающий контроль основан на проникновении жидких веществ в капилляры на поверхности объекта контроля с целью их обнаружения. Выявляются как поверхностные несплошности – тупиковые капилляры, выходящие на поверхность объекта контроля, так и сквозные несплошности – сквозные капилляры, соединяющие противоположные стенки объекта.

Капиллярный контроль позволяет выявлять дефекты на поверхности сварных соединений (например, трещины, плены, пористость и др.).

Капиллярные методы могут быть использованы независимо от физических свойств материалов при условии, если поверхность материала не обладает поглощающими свойствами и совместима с капиллярными процессами (это касается длительного коррозионного воздействия).

Общие требования к капиллярным методам неразрушающего контроля изложены в ГОСТ 18442–80. Этот стандарт распространяется на капиллярные методы неразрушающего контроля, предназначенные для обнаружения дефектов типа несплошностей металла, выходящих на контролируемую поверхность.

Стандарт оговаривает основные капиллярные методы контроля, дефектоскопические материалы, аппаратуру, порядок проведения контроля и оформления результатов.

Основные принципы методов капиллярного неразрушающего контроля, термины и определения приведены в ГОСТ 2552–90 и ИСО 3452–84.

Суть методов капиллярного контроля: нанесение на очищенную поверхность пенетранта, который в течение определенного времени заполняет все поверхностные несплошности, затем нанесение проявителя для извлечения жидкого пенетранта из несплошности на поверхность с тем, чтобы получить более четкое изображение дефекта.

При капиллярном (пенетрационном) методе контроля выявляется индикаторный рисунок – изображение, образованное пенетрантом в месте расположения несплошности и подобное форме ее сечения у выхода на поверхность объекта.

Пенетрант подразделяют на следующие типы: люминесцентные; цветные; двуцелевые (люминесцентно-цветные).

Проявителями могут быть: сухие порошки; водные суспензии или их растворы; суспензии порошка в летучих безводных растворителях.

Методика испытаний: контролируемую поверхность равномерно смачивают пенетрантом любым способом (кистью, распылителем, погружением детали). Время пропитки зависит от свойств пенетранта, температуры, контролируемого материала и конкретных дефектов. Пенетрант не должен сохнуть в период пропитки. После сушки контролируемой поверхности на нее равномерно наносится проявитель, который выдерживается некоторое время (это зависит от материала, вида дефекта и других факторов) до появления индикаторного следа дефектов. Несплошности воспроизводятся в виде точек или линий.

Чувствительность методов очень высока, например, выявляются мелкие трещины шириной порядка  $10^{-6}$  м.

Для контроля металлических изделий и полуфабрикатов, в том числе сварных соединений, используются следующие методы капиллярного неразрушающего контроля:

– жидкостный – метод контроля проникающими жидкими веществами, растворами, суспензиями, основанный на регистрации жидкости, проникающей в несплошности объекта контроля;

– проникающих растворов – жидкостной метод, основанный на использовании в качестве проникающего вещества жидкого индикаторного раствора;

– фильтрующихся суспензий – жидкостной метод, основанный на использовании в качестве жидкого проникающего вещества индикаторной суспензии, которая образует индикаторный рисунок из отфильтрованных частиц дисперсной фазы;

– люминесцентный – жидкостной метод, основанный на регистрации контраста люминесцирующего в ультрафиолетовом излучении видимого индикаторного рисунка на поверхности объекта контроля;

– цветной – жидкостной метод, основанный на регистрации контраста красного красителя в видимом излучении индикаторного рисунка на поверхности объекта контроля;

– люминесцентно-цветной – жидкостной метод, основанный на регистрации контраста цветного или люминесцирующего индикаторного рисунка на фоне поверхности объекта контроля в видимом или ультрафиолетовом излучении;

– яркостный – жидкостной метод, основанный на регистрации контраста в видимом излучении ахроматического рисунка на поверхности объекта контроля;

– капиллярно-магнитопорошковый – жидкостной метод, основанный на обнаружении комплексного индикаторного рисунка, образованного пенетрантом и ферромагнитным порошком при контроле намагниченного объекта.

## **2.3. Методы механических испытаний**

### **2.3.1. Правила отбора проб и образцов**

Для обеспечения достоверности результатов испытаний механических и технологических свойств сварных соединений необходимо соблюдать правила отбора проб, заготовок и образцов в соответствии с ГОСТ 6996–66.

В правилах использованы сведения из ГОСТ: 1497–84; 7268–82; 8817–82; 9454–78; 9651–84; 11701–84; 14019–2004.

Правила определяют:

– общие требования к отбору проб, заготовок и образцов (маркировка; количество проб и образцов, отбираемых для испытаний; условия, предохраняющие образцы от влияния нагрева и наклепа; припуски от линии реза до края готового образца);

– отбор и подготовку проб и заготовок, места отбора и ориентацию образцов для механических испытаний (место отбора и размеры пробы и ее подготовка, размеры и ориентация образцов для испытаний);

– отбор и подготовку образцов для испытаний механических свойств (вырезка, механическая обработка).

Форма, размеры и допускаемые отклонения по размерам образцов должны соответствовать требованиям перечисленных выше ГОСТ.

Образцы испытывают в механически обработанном, в частично механически обработанном (тонкий прокат) и необработанном (литые образцы) состояниях. Если заготовки обладают анизотропией свойств, то следует различать в деформированных полуфабрикатах продольные (вдоль волокна), поперечные (поперек волокна) и высотные (по толщине заготовки) образцы.

Образцы для испытаний отбирают из проб, вырезанных непосредственно из контролируемой конструкции, или из специально сваренных для проведения испытаний контрольных соединений.

Если форма сварного соединения исключает возможность изготовления образцов данного типа (детали сложной конфигурации, трубы и др.), то образцы могут быть отобраны от специально сваренных плоских контрольных соединений.

При выполнении контрольных соединений характер подготовки под сварку, марка и толщина основного металла, марки сварочных материалов, положение шва в пространстве, начальная температура основного металла, режимы сварки и термической обработки должны полностью отвечать условиям изготовления контролируемого изделия или особому назначению испытания.

Сварку контрольных соединений, предназначенных для испытания сварочных материалов (электродов, сварочных проволок, присадочных прутков, флюсов и др.), если нет специальных требований, производят с остыванием между наложением отдельных слоев. Температура, до которой должен остывать металл, устанавливается ГОСТ или другой технической документацией.

Размеры пластин для изготовления контрольных соединений определяются требованиями, указанными ниже.

Для контрольных соединений, выполняемых дуговой, электрошлаковой и газовой сваркой из плоских элементов, ширина каждой свариваемой пластины (если нет иных указаний в стандарте или другой технической документации) должна быть не менее: 50 мм – при толщине металла до 4 мм; 70 мм – при толщине металла от 4 до 10 мм; 100 мм – при толщине металла от 10 до 20 мм; 150 мм – при толщине металла от 20 до 50 мм; 200 мм – при толщине металла от 50 до 100 мм; 250 мм – при толщине металла от 100 мм.

Ширина контрольного соединения, выполненного из круглого или фасонного проката, должна быть не менее двух диаметров или ширины элементов.

Размеры пластин для контрольных соединений, выполняемых способами сварки, не указанными выше, устанавливаются соответствующими техническими условиями.

В случаях сварки пластин с применением приставных планок для вывода начала и конца шва можно отбирать образцы по всей длине контрольного соединения. Приставные планки изготавливаются из того же материала, что и пластины. Длина приставных планок должна быть не менее размера используемых участков шва.

Длина свариваемых кромок пластин определяется размерами и количеством подлежащих изготовлению образцов с учетом повторных испытаний, припусков на ширину реза и последующую обработку и с добавлением длины неиспользуемых участков шва. Размеры неиспользуемых участков принимают равными:

- при ручной дуговой сварке покрытыми электродами и газовой сварке – не менее 20 мм в начале и не менее 30 мм в конце шва;

- при автоматической и полуавтоматической сварке с любым типом защиты, кроме флюса, при толщине металла до 10 мм – не менее 15 мм в начале и не менее 30 мм в конце шва, а при толщине металла более 10 мм – не менее 30 мм в начале и не менее 50 мм в конце шва;

- при автоматической и полуавтоматической дуговой сварке под флюсом на токе до 1000 А при электрошлаковой сварке и дуговой сварке с принудительным формированием – не менее 40 мм в начале и не менее 70 мм в конце шва;

- при автоматической сварке под флюсом на токе более 1000 А – не менее 60 мм в начале шва. Длину неиспользуемого участка в конце шва для этого случая принимают равной длине кратера шва (участок, имеющий неполное сечение).

Размеры проб, вырезаемых из контролируемой конструкции, определяются количеством и размерами образцов.

При кислородной вырезке проб их размеры определяются с учетом припуска на последующую механическую обработку, обеспечивающую отсутствие металла, подвергавшегося термическому влиянию при резке в рабочей части образцов.

Вырезку заготовок для образцов из проб и контрольных соединений рекомендуется выполнять на металлорежущих станках. Допускается вырезать заготовки на ножницах, штампах, кислородной, плазменной, анодно-механической и другими методами резки.

Припуск на величину заготовки, при котором обеспечивается отсутствие в рабочей части образца металла с измененными в результате резки свойствами, назначается в зависимости от метода резки.

Минимальное значение припуска должно быть:

- при толщине металла до 10 мм в случае кислородной и плазменной резки – 3 мм, механической, в том числе анодно-механической, резки – 2 мм;

- при толщине металла от 10 до 30 мм в случае кислородной резки – 4 мм, плазменной резки – 5 мм, механической, в том числе и анодно-механической, резки – 3 мм;

– при толщине металла от 30 до 50 мм в случае кислородной резки – 5 мм, плазменной резки – 7 мм, механической, в том числе и анодно-механической, – 3 мм;

– при толщине металла не менее 50 мм в случае кислородной резки – 6 мм, плазменной резки – 10 мм, механической, в том числе и анодно-механической, – 3 мм.

При вырезке заготовок из металла, в котором под воздействием резки не изменяются свойства в рабочей части образца, допускается уменьшение указанных выше припусков, но не более чем в 2 раза.

Величина припуска для способов резки, не перечисленных выше, должна быть указана в нормативно-технической документации на данный вид продукции или на метод отбора проб.

При изготовлении образцов необходимо принимать меры, исключая возможность изменения свойств металла в результате нагрева или наклепа, возникающих при механической обработке.

На пробах, контрольных соединениях и заготовках из листового проката и труб следует указывать направление прокатки основного металла по отношению ко шву.

Правка контрольного соединения или пробы, отбираемой от контролируемой конструкции, не допускается. Разрешается править готовые образцы вне их рабочей части. При испытании сварных соединений из труб допустимость правки образцов оговаривается стандартами или другой технической документацией. Если таких указаний нет, то стрела прогиба на длине 200 мм (рис. 2.1) не должна превышать 10% от толщины металла и должна быть не более 4 мм.

Несовпадение плоскостей листов  $h$  в стыковых соединениях (рис. 2.2) не должно превышать 15% от толщины листа и должно быть не более 4 мм.

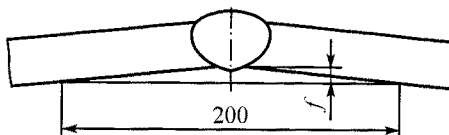


Рис. 2.1. Образец с прогибом:  $f$  – стрела прогиба, мм

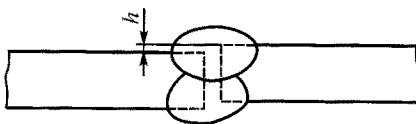


Рис. 2.2. Несовпадение плоскостей листов в стыковых соединениях:  
 $h$  – величина несовпадения, мм

Термическая обработка, если она оговорена нормативно-технической документацией, проводится до чистовой обработки образцов. Термической обработке могут подвергаться пробы, контрольные соединения или вырезанные из них заготовки для образцов. В случае нормализации или закалки термическая обработка заготовок для образцов не допускается.

Термическую обработку контрольных соединений или заготовок для образцов предпочтительно совмещать с термической обработкой контролируемого изделия. Порядок проведения термической обработки при изготовлении образцов из материалов с  $\sigma_b$  более 1000 МПа (100 кгс/мм<sup>2</sup>) оговаривается нормативно-технической документацией.

### 2.3.2. Испытания при статических нагрузках

#### ***Испытание металла различных участков сварного соединения и наплавленного металла на статическое растяжение по ГОСТ 6996–66***

Испытания на растяжение являются одним из основных методов исследования и контроля металлических материалов и сварных соединений.

Испытания металла различных участков сварного соединения и наплавленного металла на статическое (кратковременное) растяжение проводятся на стандартных образцах типов I, II, III (рис. 2.3, табл. 2.1). Для испытаний, проводимых при нормальной и пониженных температурах, применяются образцы всех типов, при повышенных температурах – типов IV и V (рис. 2.4, табл. 2.1).

Таблица 2.1

Параметры стандартных образцов для испытаний на растяжение, мм

Тип образца	$d_0$	$d$	$K$	$D$	$h$	$h_1$	$R$	$l_0$	$l$	$L$
I	3+0,1	-	0,03	6	4	2	1	15	18	30±1
II	6±0,1	-	0,03	12	10	2,5	1,5	30	36	61±1
III	10±0,2	-	0,04	16	10	3	3	50	60	86±1
IV	6±0,1	10	0,03	M12	15	5	5	30	36	86±1
V	10±0,2	12	0,04	M16	15	5	5	50	60	110±1

Примечание.  $K$  – допускаемая разность наибольшего и наименьшего диаметров на длине рабочей части образца.

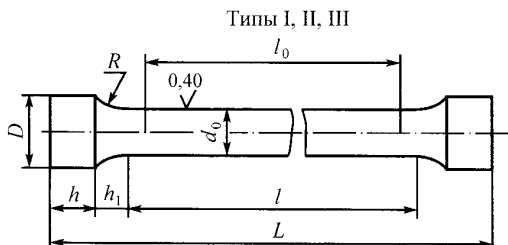


Рис. 2.3. Цилиндрический образец для испытания на статическое (кратковременное) растяжение: типы I – III – при нормальной и пониженной температурах

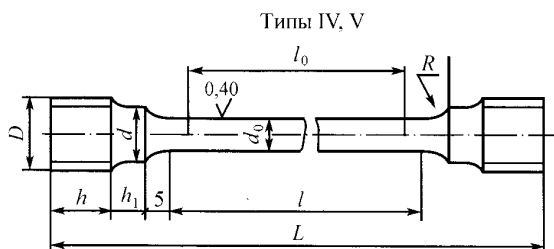


Рис. 2.4. Цилиндрический образец для испытания на статическое (кратковременное) растяжение: типы IV, V – при повышенных температурах

Рабочее сечение образцов всех типов должно состоять из металла испытываемого участка. Все образцы должны располагаться вдоль продольной оси испытываемого участка. Рекомендуемые схемы вырезки образцов при различных видах сварки для различной толщины свариваемых металлов приведены в ГОСТ 6996–66. Допускается применение пропорциональных коротких цилиндрических образцов другого диаметра или типа по ГОСТ 1497–84.

При испытании при повышенных температурах по требованию, оговоренному в стандарте или другой технической документации, допускается применение пропорциональных длинных цилиндрических образцов № 2 и 3 по ГОСТ 9651–84.

При наличии соответствующих приспособлений допускается применение образцов типов I, II и III для испытаний при повышенных температурах.

Рабочее сечение образцов всех типов должно полностью состоять из металла испытываемого участка. В головках образца допускается наличие металла других участков сварного соединения.

Разметку места вырезки образцов производят по макрошлифам, изготовленным на торцах заготовки. Все образцы располагают вдоль продольной оси испытуемого участка. Схема расположения образцов при испытании других участков металла шва или металла околошовной зоны устанавливается стандартами или другой технической документацией.

Дополнительно в соответствии с ГОСТ 1497–84 допускается кроме круглых образцов по ГОСТ 6996–66 применение пропорциональных плоских образцов с головками и без головок рабочим сечением от 3×20 мм до 25×30 мм и общей длиной образца от 200 до 380 мм.

Испытания на растяжение проводятся на разрывных и универсальных испытательных машинах, соответствующих ГОСТ 7855–84.

Для различных задач могут определяться следующие механические свойства при растяжении:

- предел упругости  $\sigma_{0,05}$ , МПа (кгс/мм<sup>2</sup>);
- модуль упругости  $E$ , МПа (кгс/мм<sup>2</sup>);
- физический предел текучести  $\sigma_T$ , МПа (кгс/мм<sup>2</sup>);
- условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$ , МПа (кгс/мм<sup>2</sup>);
- временное сопротивление (предел прочности)  $\sigma_B$ , МПа (кгс/мм<sup>2</sup>);
- относительное удлинение  $\delta$ , %;
- относительное сужение  $\psi$ , %.

Для определения механических свойств чаще всего используются расчетный (с помощью тензометров) и графический (построение диаграмм растяжения в координатах нагрузка-удлинение) способы.

Указанные характеристики определяются по следующим формулам.

*Предел упругости* – максимальное напряжение, при котором появляется остаточная пластическая деформация, равная 0,05 %. По результатам испытаний определяется нагрузка  $P_{0,05}$ , по которой вычисляют предел упругости  $\sigma_{0,05}$  по формуле

$$\sigma_{0,05} = P_{0,05}/F_0,$$

где  $F_0$  – начальная площадь поперечного сечения образца.

*Модуль упругости* (модуль Юнга) – модуль упругости для деформации растяжением-сжатием, равен отношению нормального напряжения к вызванной им упругой деформации и вычисляется по формуле

$$E = (\Delta P l_0)/(\Delta l_{cp} F_0),$$

где  $\Delta P$  – степень нагружения;  $l_0$  – начальная длина расчетной базы образца;  $\Delta l_{cp}$  – приращение удлинения образца к приращению нагрузки на  $\Delta P$ ;  $F_0$  – начальная площадь поперечного сечения образца.

*Физический предел текучести* (нижний предел текучести) – наименьшее условное (расчетное) напряжение, при котором образец деформируется без заметного увеличения нагрузки, определяется по формуле

$$\sigma_T = P_T/F_0,$$

где  $P_T$  – нагрузка, при которой образец деформируется без заметного ее увеличения;  $F_0$  – начальная площадь поперечного сечения образца.

*Условный предел текучести* – наименьшее условное (расчетное) напряжение, при котором остаточное удлинение равно 0,2 % от начальной расчетной длины образца, определяется по формуле

$$\sigma_{0,2} = P_{0,2}/F_0,$$

где  $P_{0,2}$  – нагрузка, соответствующая остаточному удлинению;  $F_0$  – начальная площадь поперечного сечения образца.

*Временное сопротивление разрыву (предел прочности) при растяжении* – условное напряжение, равное отношению  $P_{\max}$  (максимальная нагрузка, наблюдаемая при испытаниях), предшествующему разрушению, к начальной площади поперечного сечения образца  $F_0$ , определяется по формуле

$$\sigma_B = P_{\max}/F_0.$$

*Относительное удлинение при разрыве* – отношение приращения длины образца при растяжении после разрыва к его исходной расчетной длине. Определяется по формуле

$$\delta = \frac{l_K - l_0}{l_0} \cdot 100\%,$$

где  $l_0$  – начальная длина расчетной части образца до испытания;  $l_K$  – длина расчетной части образца после его разрыва.

При определении относительного удлинения перед испытаниями образец размечивается по длине на отрезки кратные 10 или 5 мм путем кернения или рисками, которые наносятся или вручную, или специальной разметочной машиной. Участок, отмеченный рисками, называется измерительным. Длина измерительного участка определяется по НД или по кратности относительно диаметра/толщины, например – 5d, 4d; или фиксированным значением 100, 200 мм и т.п.

*Относительное сужение при разрыве* – отношение уменьшения площади поперечного сечения образца в месте его разрыва (в так называемой шейке) к его исходной площади. Определяется по формуле

$$\psi = \frac{F_0 - F}{F_0} \cdot 100\%,$$

где  $F_0$  – площадь поперечного сечения образца до испытания;  $F$  – поперечное сечение образца после разрыва.

### **Испытание сварного соединения на статический изгиб (загиб) по ГОСТ 6996–66**

Испытания на изгиб служат для определения способности металла и сварных соединений выдерживать заданную степень пластической деформации, характеризуемую углом изгиба, или для оценки предельной пластичности металла в сварных конструкциях при изгибе, характеризуемой углом изгиба до образования первой трещины.

Испытания проводят при комнатной температуре. При испытании определяют способность соединения принимать заданный по размеру и форме изгиб. Эта способность характеризуется углом изгиба (рис. 2.5), при котором в растянутой зоне образца образуется первая трещина, развивающаяся в процессе испытания. Если длина трещин, возникающих в процессе испытания в растянутой зоне образца, не превышает 20 % его ширины, но не более 5 мм, то они не являются браковочным признаком. Определяется также место образования трещины или разрушения (по металлу шва, металлу околошовной зоны или основному металлу). В зависимости от требований нормативно-технической документации испытания проводят до достижения нормируемого угла изгиба или угла изгиба, при котором образуется первая, являющаяся браковочным признаком трещина, до параллельности или соприкосновения сторон образца. Угол изгиба при испытании до образования первой трещины измеряют в ненапряженном состоянии. Образцы типов XXVIa, XXVIIa, толщина которых меньше толщины основного металла, допускается вырезать в различных участках поперечного сечения сварного соединения.

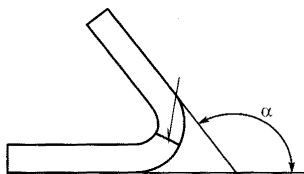


Рис. 2.5. Сварное соединение. Образец для испытания на изгиб:  
 $\alpha$  – угол загиба образца

Если заданный угол изгиба превышает  $150^\circ$ , то после изгиба по схеме, приведенной на рис. 2.6, изгиб можно продолжать между двумя параллельными нажимными плитами. Между концами образца устанавливают прокладку толщиной, равной диаметру оправки (рис. 2.6). После удаления прокладки испытания проводят до соприкосновения сторон.

Выпуклость шва по обеим сторонам образца снимается механическим способом до уровня основного металла. Строгать утолщение с образцов типов XXVI и XXVIa следует вдоль, а с образцов типов XXVII, XXVIIa, XXVIII и XXVIIIa – поперек шва.

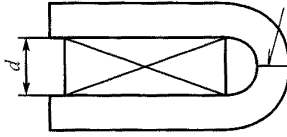


Рис. 2.6. Сварные соединения. Схема испытания образца между двумя параллельными нажимными плитами до параллельности сторон:  $d$  – толщина прокладки, укладываемой между концами образца, равная диаметру оправки, мм (после удаления прокладки испытание проводят до соприкосновения сторон)

Форма и размеры плоских образцов должны соответствовать указанным на рис. 2.7. Ось расположенного поперек сварного шва образца после окончательной обработки должна находиться на его середине.

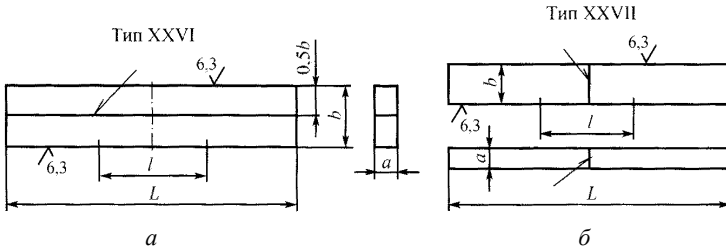


Рис. 2.7. Сварные соединения. Плоские образцы типов XXVI (а) и XXVII (б) для испытания на изгиб:  $L$  – общая длина образца, мм;  $l$  – длина рабочей части образца, мм;  $a$  – толщина образца, мм;  $b$  – ширина образца, мм (стрелками обозначены сварные швы)

Испытания образцов типа XXVI проводят, как указано на рис. 2.8, а, типа XXVII – на рис. 2.8, б. Расстояние между опорами  $K$  (см. рис. 2.8, б) для образцов типа XXVII должно быть  $2,5 D$ , для образцов типа XXVI указано на рис. 2.8, а.

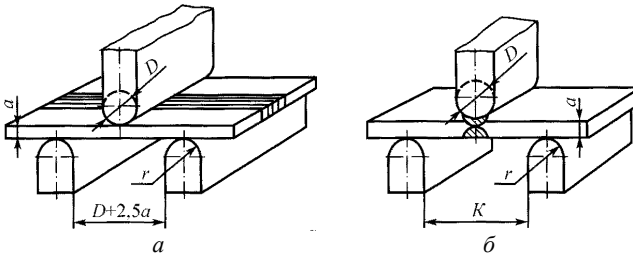


Рис. 2.8. Сварные соединения. Схема испытания на изгиб образцов типов XXVI (а) и XXVII (б):  $D$  – диаметр оправки, мм;  $K$  – расстояние между опорами, мм;  $a$  – толщина образца, мм;  $r$  – радиус закругления опор, мм

Обязательным условием проведения испытаний является плавность возрастания нагрузки на образец (со скоростью не более 15 мм/мин) на испытательных машинах или прессах с использованием опорных роликов. Диаметр оправки обычно принимают равным двум толщине основного металла.

Для стыковых односторонних швов обычно в растянутой зоне располагают поверхностный наиболее широкий или корневой участок шва.

При двусторонних стыковых швах для образцов всех типов, кроме XXVIIIа, в растянутой зоне располагают шов, выполненный вторым. Для образцов типа XXVIIIа в растянутую зону попадает все сечение шва. При сварке многослойных двусторонних стыковых швов с поперечным наложением проходов в растянутой зоне располагают сторону, где был выполнен последний проход.

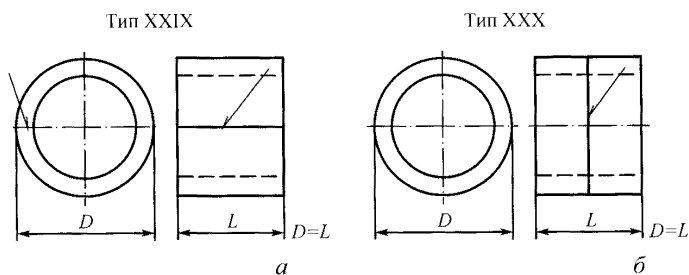


Рис. 2.9. Сварные соединения. Образцы типов XXIX и XXX для испытания на изгиб труб с поперечным (а) и продольным (б) расположением швов: D – наружный диаметр трубы, мм; L – длина образца, мм

Соединения с подварочным швом относятся к односторонним. Испытания стыковых соединений труб на изгиб при поперечном (круговом) расположении шва проводят на образцах со снятым с наружной стороны утолщением.

При диаметре трубы 20 мм применяют образцы в виде отрезков трубы, при диаметре трубы свыше 20 до 45 мм – в виде отрезка труб или плоские (сегментные) образцы, при диаметре трубы свыше 45 мм – плоские (сегментные) образцы типов XXVII и XXVIII.

Испытание труб диаметром 60 мм и менее с поперечным (круговым) и продольным швами можно проводить на образцах, показанных на рис. 2.10. Утолщение шва с наружной стороны трубы снимается механическим путем до уровня основного металла.

На образцах, вырезанных из труб, выполненных стыковой контактной сваркой, грат должен быть снят с наружной и внутренней сторон трубы до уровня основного металла.

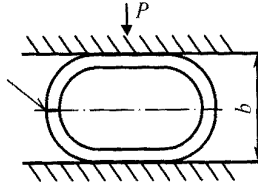


Рис. 2.10. Сварные соединения: схема испытания образцов типов XXIX и XXX до появления на поверхности образцов трещин:  $b$  – величина сплющивания, мм

Результаты испытания образцов типов XXIX и XXX определяются величиной  $b$  (рис. 2.10) при появлении на поверхности образца трещины. Если трещина не образуется, то испытание проводят до соприкосновения сторон. Испытание проводят путем деформации образца, под прессом сжимающей нагрузкой.

При испытании образцов с круговым швом последний располагается по оси приложения сжимающей нагрузки (рис. 2.11), а при испытании образцов с продольным швом шов располагают в диаметральной плоскости, перпендикулярной действию сжимающей нагрузки.

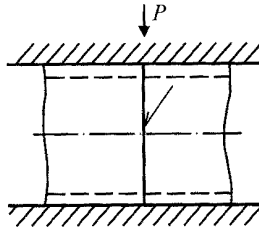


Рис. 2.11. Схема приложения нагрузки при испытаниях образцов с круговым швом

Если в образце, предназначенном для испытания кругового шва, есть продольный шов, он должен располагаться вне растянутой зоны.

При испытании соединений стержней кругового или многогранного сечения рабочая длина образца должна быть  $\geq 250$  мм, а радиус закругления граней многогранника должен равняться  $0,1$  толщины образца, но не более 2 мм.

### ***Испытание на кручение по ГОСТ 3565–80***

Испытание на кручение используется для оценки металла валов или проволоки, а также для определения механических характеристик прочности и пластичности высокопрочных металлов.

Суть метода: один конец образца закрепляют неподвижно, а к другому концу прикладывают пару сил в плоскости, перпендикулярной к оси образца, что вызывает крутящий момент  $M = F \cdot d$ , где  $F$  – действующая сила, МПа (кгс/мм),  $d$  – диаметр образца, мм.

При кручении все поперечные сечения образца сдвигаются (поворачиваются) вокруг общей оси по отношению к закрепленному сечению. Этот сдвиг увеличивается с увеличением расстояния от места закрепления, причем линии, параллельные оси образца, переходят в винтовые.

По результатам испытания образцов на кручение определяют следующие характеристики:

- модуль сдвига  $G$ , МПа (кгс/мм<sup>2</sup>);
- предел текучести при кручении  $\tau_{0,3}$ , МПа (кгс/мм<sup>2</sup>);
- условный предел прочности при кручении  $\tau_{пч}$ , МПа (кгс/мм<sup>2</sup>);
- истинный предел прочности при кручении  $\tau_k$ , МПа (кгс/мм<sup>2</sup>);
- максимальный остаточный сдвиг при кручении  $\gamma_{max}$ , рад;
- характер разрушения при кручении: срез или отрыв.

Модуль сдвига – отношение касательного напряжения к вызванной им условной деформации.

Предел текучести при кручении – касательное напряжение, при котором образец получает остаточный сдвиг, равный 0,3 %.

Условный предел прочности при кручении – касательное напряжение, равное отношению наибольшего момента при кручении, предшествующего разрушению, к полярному моменту сопротивления сечения образца.

Истинный предел прочности при кручении – наибольшее истинное касательное напряжение при разрушении образца.

Максимальный остаточный сдвиг при кручении – максимальная угловая деформация в точке на поверхности образца в момент разрушения.

Характер разрушения при кручении: срез – разрушение от касательных напряжений, отрыв – разрушение от растягивающих напряжений.

Для испытаний на кручение может быть использована испытательная машина, которая обеспечивает: свободное кручение образцов; плавность статического нагружения; свободное перемещение одного из захватов вдоль оси образца; измерение нагрузки с помощью силоизмерителя; измерение угла закручивания.

Требования к испытательному оборудованию, образцам, подготовке и проведению испытаний металлов при комнатной температуре приведены в ГОСТ 3565–80.

Для испытаний на кручение используют цилиндрические образцы с диаметром рабочей части 10 мм и длиной рабочей части 50 и 100 мм с головками на концах для закрепления в захватах испытательной машины. Допускаются испытания образцов и изделий, пропорциональных стандартным, а также трубчатых образцов. Форма и размеры головок образцов зависят от способа крепления образцов в захватах испытательной машины.

Для испытания на кручение металлов при низких и высоких температурах используются специальные приспособления, позволяющие осуществлять нагрев или охлаждение образцов. При нагреве образцов необходимо давать выдержку при температуре испытания, обеспечивающую стабильность структуры.

### ***2.3.3 Испытания при ударных нагрузках***

При эксплуатации деталей и изделий в них могут возникать ударные воздействия, приводящие к их разрушению. Для определения характеристик металлов и конструкций из них в таких условиях проводят испытания с приложением ударных нагрузок.

Поведение металлов и конструкций из них зависит от скорости деформации. Ударной нагрузкой считается нагрузка при скорости деформации свыше  $10^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Увеличение скорости деформации вызывает повышение напряжения течения металла, снижение вязкости и появление микроучастков хрупкого излома. Появление хрупкого излома в металлах происходит и при снижении температуры (хладноломкость). Образование хрупкого излома в значительной степени стимулирует концентрация напряжений вблизи надрезов и трещин и вызывает преждевременное разрушение при эксплуатации.

Склонность металла к хрупкому разрушению зависит не только от внешних факторов (скорость деформации, температура и концентраторы напряжений), но и от структуры и условий обработки структуры и свойств металла (наклеп, термическая обработка, чистота металла, текстура и другие факторы).

#### ***Испытание металла участков сварного соединения и наплавленного металла на ударный изгиб (на надрезанных образцах) по ГОСТ 6996–66 с учетом требований ГОСТ 9454–78***

При испытании на ударный изгиб определяют ударную вязкость или работу удара либо процентное соотношение хрупкой и вязкой составляющих поверхности излома для металла шва, наплавленного металла, зоны сплавления и различных участков околошовной зоны при толщине основного металла 2 мм и более.

Суть метода: разрушение образца с концентратором напряжений при ударном изгибе.

Ударная вязкость – удельная работа разрушения образца при ударном изгибе, определяемая как отношение работы разрушения к начальной площади поперечного сечения образца. Измеряется в Дж/см<sup>2</sup> (кгс·м/см<sup>2</sup>).

Испытания на ударный изгиб проводят на маятниковых копрах, которые должны соответствовать ГОСТ 10708–82.

Нагрев или охлаждение образцов осуществляют в термостатах. Испытания проводят в интервале температур от -100 до 1200 °С.

Для испытания применяют образцы, форма, размер и качество поверхности которых соответствуют указанным на рис. 2.12 (образцы с U-образным надрезом) или рис. 2.13 (образцы с V-образным надрезом). Предпочтение отдается образцам с V-образным надрезом. В зависимости от цели испытания надрез располагают по металлу шва, по зоне сплавления и в различных участках металла околошовной зоны. Место расположения надреза оговаривается нормативно-технической документацией. Выпуклость шва на всех образцах удаляют до уровня основного металла. При наличии в сварном соединении смещения кромок оно удаляется механическим путем.

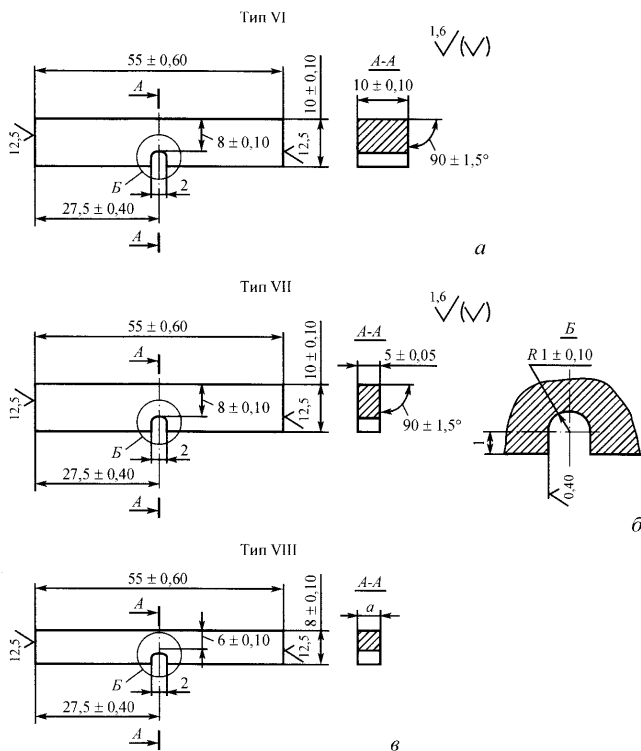


Рис. 2.12. Образцы типов VI (а), VII (б), VIII (в) для испытания на ударный изгиб с U-образным надрезом:  
а – толщина основного металла, мм

Условное обозначение ударной вязкости или работы удара включает в себя: символ ударной вязкости (КС) или работы удара (К); вид надреза (концентратора U, V); температуру испытания (температура 20 °С не ука-

зывается); максимальную энергию удара маятника (максимальная энергия в 300 Дж не указывается); тип образца (типы образцов VI и IX не проставляются); место расположения надреза (Ш – шов, ЗС – зона сплавления, ЗТВ – зона термического влияния, t – расстояние от границы сплавления до оси надреза). Значение t оговаривается в стандартах или другой технической документации. При расположении надреза поперек металла шва, зоны сплавления или зоны термического влияния в конце обозначения ставится буква П.

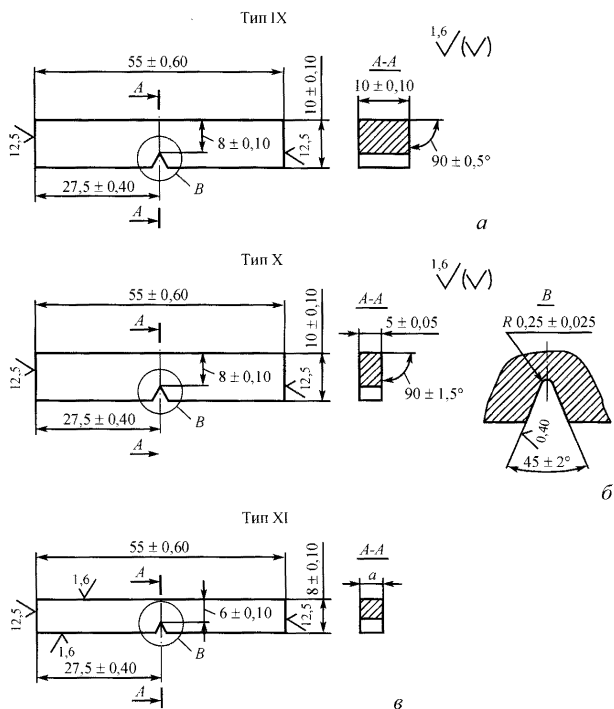


Рис. 2.13. Образцы типов IX (а), X(б), XI (в) для испытаний на ударный изгиб с V-образным надрезом: а – толщина основного металла, мм

**Испытание на ударный изгиб при температурах ниже  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  по ГОСТ 22848–77**

При испытании определяются следующие характеристики: работа А, затрачиваемая на разрушение образца; ударная вязкость а, равная отношению величины работы удара к площади поперечного сечения образца в месте удара; процент вязкой составляющей в изломе образца, разрушенного при ударном изгибе.

Порядок отбора образцов, их размеры должны соответствовать требованиям ГОСТ 6996–66 и 9454–60.

Для испытания на ударный изгиб при температуре до  $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$  применяются маятниковые копры по ГОСТ 9454–78, а для испытаний при температурах до  $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$  – специальные копры.

В качестве хладагента применяются жидкий азот с содержанием кислорода не более 10 % по ГОСТ 9293–74, жидкий водород и жидкий гелий.

Для исключения искрения при ударе ножом маятника копра в отдельных случаях образцы покрывают слоем меди толщиной 9 – 12 мкм после нанесения надреза по ГОСТ 3002–70.

Методика проведения испытаний и обработка результатов изложены в ГОСТ 9454–78.

Процент вязкой и хрупкой составляющих в изломах образцов определяется по методике, приведенной в ГОСТ 4543, или по методикам фрактографических исследований.

### ***2.3.4. Измерение твердости***

Определение твердости относится к наиболее часто используемым методам механических испытаний металлов, поскольку они являются относительно простыми и нетрудоемкими. Большинство методов основывается на вдавливании в испытуемый металл индентора, и образующуюся при этом пластическую или упругую деформацию рассматривают как меру твердости металла. Широко используемые в практике методы определения твердости различаются по типу нагружения (статические и динамические) и форме индентора, вдавливаемого в металл.

Эти методы различаются формой индентора (шарик, пирамида), его материалом (высокопрочные стали, твердые сплавы, алмаз) и величиной прилагаемой нагрузки.

При большом размере отпечатка (определение твердости по Бринеллю, Роквеллу, Виккерсу) получают усредненные значения твердости для макрообъемов металла. При малых размерах отпечатка, соизмеримых со структурными составляющими (метод измерения микротвердости), выявляется твердость отдельных структурных составляющих.

#### ***Измерение твердости металла различных участков сварного соединения и наплавленного металла по ГОСТ 6996–66***

Твердость измеряют в поперечном сечении сварного соединения в соответствии с рис. 2.14 и 2.15. Твердость измеряют по Виккерсу (HV), Бринеллю (HB) и Роквеллу – шкалам А, В и С (HRA, HRC и др. шкалам), отдавая предпочтение замеру по Виккерсу.

Измерение твердости по Виккерсу проводят по ГОСТ 2999–75. Нагрузка на индентор в зависимости от прочности металла участков

сварного соединения и ширины зоны термического влияния должна составлять 98 Н (HV 10) или 49 Н (HV 50). При наличии в стандартах или другой технической документации соответствующих указаний проводится измерение твердости по Виккерсу. Нагрузка на индентор при таких замерах может меняться от 0,04 до 4,9 Н.

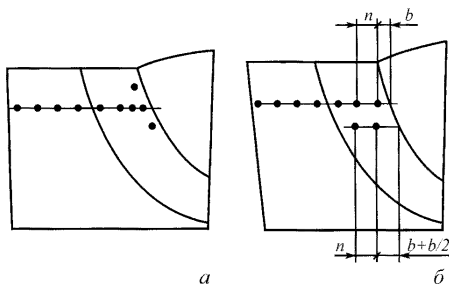


Рис. 2.14. Схемы порядка замеров твердости вблизи границы сплавления:  
а – позиция I, б – позиция II

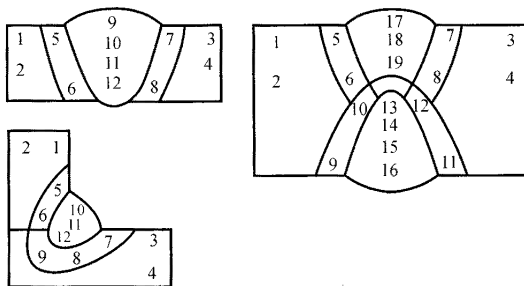


Рис. 2.15. Схемы порядка замеров твердости на участках сварного соединения

Измерение твердости по Бринеллю проводят в соответствии с ГОСТ 9012–59, используя стальной шарик диаметром 2,5 или 5,0 мм.

Измерение твердости по Роквеллу проводят в соответствии с ГОСТ 9013–59 с помощью сфероконического алмазного индентора (шкалы А и С) или шарикового стального наконечника диаметром 1,5875 мм (шкала В).

Твердость определяют для соединений, полученных сваркой плавлением или давлением из сталей различных марок и других металлических конструкционных материалов толщиной не менее 1,5 мм.

Твердость основного металла различных участков зоны термического влияния и металла шва измеряют по одной или нескольким лини-

ям. Если соединение выполнено из металлов различных марок, то твердость измеряют для каждого из них.

При измерениях, выполняемых в непосредственной близости от границы сплавления, рекомендуется проводить 2–3 замера в соответствии с позицией I на рис. 2.14 или дополнительные замеры (позиция II на том же рисунке). Допускается проведение замеров на участках сварного соединения, указанных на рис. 2.15.

Общие требования к образцам и деталям, подвергаемым измерению твердости:

- при подготовке поверхности, на которую наносится отпечаток, механическая или иная обработка не должна вызывать нагрев или наклеп металла, приводящий к изменению его свойств;

- испытываемая поверхность должна быть очищена от окалины и загрязнений;

- образец или деталь должны иметь такую форму и толщину, чтобы отпечаток не вызывал на его обратной стороне следов деформации;

- при измерении твердости должна быть обеспечена перпендикулярность приложения действующего усилия к испытываемой поверхности.

Измерение твердости по Виккерсу проводят на микрошлифах или образцах с полированной поверхностью, если очертания шва видны без травления. Шероховатость поверхности таких образцов должна быть от 0,40 до 0,63 мкм. Измерение твердости по Бринеллю или Роквеллу проводят на макрошлифах или образцах с шлифованной поверхностью, если очертания шва видны без травления. Шероховатость поверхности таких образцов должна быть от 1,25 до 2,00 мкм. В образцах должна быть соблюдена параллельность рабочей и опорной поверхностей.

### ***Измерение твердости по Бринеллю по ГОСТ 9012–59***

Суть метода: шарик, твердость которого выше твердости испытываемого металла, в течение фиксированного времени вдавливается с заданной силой в поверхность испытываемого образца или детали. При этом образует отпечаток в виде полусферы диаметром  $d$  и глубиной  $h$ .

Твердость по Бринеллю HB (при применении стального шарика) или HBW (при применении шарика из твердого сплава) определяют по формуле

$$HB( HBW ) = \frac{2F}{\pi D( D - \sqrt{D^2 - d^2} )},$$

где  $F$  – приложенная нагрузка, кгс;  $D$  – диаметр шарика, мм;  $d$  – диаметр отпечатка, мм.

При определении твердости по Бринеллю, как правило, пользуются таблицами, приведенными в ГОСТ 9012–59 (по измеренному диаметру отпечатка).

Значения твердости по Бринеллю обозначаются безразмерной величиной с указанием символа материала шарика НВ (НВW). После символа указывают диаметр шарика, мм, значение приложенной нагрузки, кгс, продолжительность выдержки, если она не лежит в интервале 10–15 с.

Пример: запись 250 НВ 5/750 означает твердость по Бринеллю 250, определенная при использовании стального шарика диаметром 5 мм при усилии 750 кгс (7355 Н) и продолжительности выдержки от 10 до 15 с.

Критерием пригодности отпечатка для измерения служит четкий край окружности отпечатка.

Твердость по Бринеллю измеряют при комнатной температуре.

При твердости металла менее 450 единиц применяются стальные шарики или шарики из твердого сплава, при твердости 450–650 единиц – шарики из твердого сплава.

Диаметр шарика  $D$  и соответствующую нагрузку  $F$  выбирают так, чтобы диаметр отпечатка находился в пределах от 0,24 до 0,6  $D$ . Расстояние между центром отпечатка и краем образца должно быть не менее  $2,5d$ , а между центрами соседних отпечатков – не менее  $4d$ .

Диаметр отпечатка  $d$  измеряют посредством микроскопов с измерительными шкалами.

### ***Измерение твердости по Роквеллу по ГОСТ 9013–59***

Суть метода: внедрение в поверхность образца алмазного конусного или стального сферического наконечника под действием последовательно прилагаемых предварительного  $F_0$  и основного  $F_1$  усилий, определение глубины внедрения наконечника, которая служит мерой твердости. В отличие от методов определения твердости по Бринеллю и Виккерсу, требующих измерения величины отпечатка индентора и определения с помощью соответствующих таблиц величины твердости, что является достаточно трудоемким процессом, измерение твердости по Роквеллу позволяет сразу получать результат измерения на шкале стрелочно-испытательного прибора.

Твердость измеряют при комнатной температуре. Диапазон измерений единиц твердости от 20 до 100. Толщина образца должна не менее чем в 10 раз превышать глубину внедрения наконечника после снятия основной нагрузки.

Приборы для измерения твердости по Роквеллу должны соответствовать требованиям ГОСТ 23677–79.

Алмазный конусный наконечник типа НК должен соответствовать ГОСТ 9377–81, шариковый стальной наконечник – ГОСТ 3722–81. Номинальные диаметры шариков должны быть 1,588 или 3,175 мм по ГОСТ 3722–81.

Расстояние между центрами двух соседних отпечатков должно быть не менее 2 мм, а расстояние от центра отпечатка до края образца – не менее 1 мм.

Число твердости по Роквеллу определяется по шкале индикатора или показателя отсчетного устройства с округлением до 0,5 единицы твердости.

### ***Измерение твердости по Виккерсу по ГОСТ 2999–75***

Суть метода: внедрение в поверхность образца алмазного наконечника в виде правильной четырехгранной пирамиды под действием нагрузки  $P$ , приложенной в течение определенного времени, и измерение диагоналей отпечатка  $d_1$  и  $d_2$ , оставшихся на поверхности образца после снятия нагрузки.

Твердость измеряют при комнатной температуре. Твердость по Виккерсу HV определяется по формуле

$$HV = 1,854 P/d^2,$$

где  $P$  – нагрузка, кгс;  $d$  – среднее арифметическое значение длин обеих диагоналей отпечатка после снятия нагрузки, мм.

Алмазный наконечник должен соответствовать требованиям ГОСТ 9377–74.

Образцовые меры твердости для поверки прибора должны соответствовать требованиям ГОСТ 9031–63.

Поверхность испытуемого образца или детали должна быть свободной от оксидной пленки и посторонних загрязнений. Минимальная толщина образца для стальных изделий должна быть больше диагонали отпечатка в 1,2 раза, для изделий из цветных металлов – в 1,5 раза.

При измерении твердости алмазной пирамидой применяют следующие нагрузки: 1,0; 2,0; 5,0; 10,0; 20,0; 30,0; 50,0; 100,0 кгс. Продолжительность выдержки должна быть 10–15 с.

Расстояние между центром отпечатка и краем образца или между соседними отпечатками должно быть не менее 2,5 длины диагонали отпечатка.

Обозначение твердости по Виккерсу складывается из следующих символов: индекса HV, величины приложенной нагрузки, кгс, длительности нагружения в секунду, указываемой после косой черточки. Сама величина твердости ставится после тире в конце обозначения.

Пример: HV 30/20 – 420 означает число твердости 420, полученное при нагрузке 30 кгс и времени выдержки 20 с.

При определении твердости по Виккерсу, как правило, пользуются таблицами, приведенными в ГОСТ 2999–75 (по измеренной диагонали отпечатка). Толщина образца или детали должна быть не менее 1 мм.

### ***Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников по ГОСТ 9450–76***

Испытания проводятся двумя методами:

1. По восстановленному отпечатку (основной метод).

Суть метода: нанесение на испытываемую поверхность образца отпечатка под действием статической нагрузки, приложенной к алмазному наконечнику в течение определенного времени; после удаления нагрузки и измерения параметров полученного отпечатка число микротвердости определяется по формулам или чаще всего по таблицам, приведенным в ГОСТ 9450–76.

2. По невосстановленному отпечатку (дополнительный метод).

Суть метода: вдавливание в поверхность образца алмазного наконечника под действием статической нагрузки в течение определенного времени с одновременным измерением глубины отпечатка. Число микротвердости определяется делением приложенной к алмазному наконечнику нормальной нагрузки на условную площадь боковой поверхности отпечатка, соответствующую его измеренной глубине. Число микротвердости определяется по формулам или чаще всего по таблицам, приведенным в ГОСТ 9450–76.

При испытании образцов на микротвердость применяют нагрузки от 5 до 200 гс. При выборе нагрузки исходят из предполагаемой глубины отпечатка. Минимальная толщина образца или слоя должна превышать глубину отпечатка не менее чем в 10 раз. Расстояние от центра отпечатка до края образца должно быть не менее двойного размера отпечатка, а расстояние между центрами отпечатка должно превышать размер отпечатка более чем в 3 раза. Размер отпечатка измеряют на микроскопе, встроенном в прибор, либо на инструментальном микроскопе.

При измерении микротвердости отдельных структурных составляющих необходимо, чтобы получаемый отпечаток относился только к исследуемой структурной составляющей. О нарушении этого требования свидетельствует искажение формы отпечатка или большой разброс значений твердости.

## **2.4. Методы коррозионных испытаний**

### ***2.4.1. Испытания на коррозионное растрескивание металлов и сплавов***

#### ***Испытания на коррозионное растрескивание металлов и сплавов по ГОСТ 9.901.1–89***

***Коррозионное растрескивание*** – поражение металла, вызванное одновременным воздействием коррозионной среды и номинально статического растягивающего напряжения, в результате которого возникают трещины.

**Пороговое напряжение** при коррозионном растрескивании  $\sigma_{кр}$  – напряжение, выше которого трещины от коррозионного растрескивания возникают и растут при определенных условиях испытания.

**Время до разрушения** – период времени от начала испытания до разрушения; за критерий разрушения принимают время первого появления трещин или время полного разрушения испытываемого образца.

Цель испытания на коррозионное растрескивание состоит в более быстром получении результатов по сравнению с условиями эксплуатации. Это достигается за счет использования более высоких напряжений, медленной непрерывной деформации, применения образцов с предварительно нанесенными трещинами, более агрессивной среды при испытаниях по сравнению с эксплуатационными, повышенной температуры и электрохимической активации. При этом необходимо, чтобы механизм разрушения оставался неизменным.

Методы нагружения образцов группируют по следующим признакам: постоянная деформация; постоянная нагрузка; деформация с малой скоростью.

Испытания при постоянной деформации проводятся: листового материала – на изгиб; плит – на растяжение или на С-образных кольцевых образцах; труб – на кольцевых С-образных образцах.

Испытания при постоянной нагрузке проводят на цилиндрических или плоских образцах, чаще всего в виде цепочки образцов, на одной машине при заданных или рабочих постоянных нагрузках.

Испытания с относительно малой скоростью деформации, например  $10^{-6}$  с<sup>-1</sup>, проводят при растяжении или изгибе образца при соответствующем воздействии среды. Скорость деформации выбирают применительно к заданным техническим характеристикам.

ГОСТ 9.901.1–89 определяет требования к испытательным средам, испытываемым образцам, ячейкам, в которые помещаются образцы и растворы, порядок проведения, оценку и обработку результатов испытаний.

Типы образцов в зависимости от приложения нагрузки обозначаются: ОР – осевое растяжение; КИ – консольный изгиб; ВР1 и ВР11 – внецентровое растяжение.

Стандарт определяет требования к вырезке образцов из различных полуфабрикатов и их маркировку в зависимости от направления вырезки: Д – доленое, вдоль главного вектора деформации; В – высотное; П – поперечное; Р – радиальное; Т – тангенциальное.

Для испытаний при постоянной нагрузке применяются машины или приспособления, предназначенные для испытания металлов на ползучесть и длительную прочность в соответствии с требованиями ГОСТ 3248–80 и 10145–80.

Для испытаний при ступенчато изменяемой нагрузке применяются машины и приспособления, предназначенные для статического нагруже-

ния и обеспечивающие возможность плавно нагружать образцы, поддерживать постоянную нагрузку, надежно центрировать образцы.

Для испытаний при постоянной деформации применяются машины и приспособления, жесткость которых не менее чем в 10 раз превышает жесткость образца.

Для наведения усталостной трещины применяются машины или вибраторы, обеспечивающие циклическое нагружение образцов при симметричном или пульсирующем цикле нагружения.

### **2.4.2. Испытания на питтинговую коррозию**

Методы ускоренных испытаний на стойкость к питтинговой коррозии нержавеющей стали и коррозионно-стойких сплавов на железоникелевой основе соответствуют ГОСТ 9.912–89. Стандарт устанавливает химический и электрохимические методы ускоренного испытания материалов на стойкость к питтинговой коррозии в водных средах. Методы допускается использовать для оценки питтингостойкости коррозионно-стойких кристаллических сплавов на основе никеля и мелкокристаллических и аморфных сплавов на железной и железоникелевой основе.

#### **1. Химический метод.**

Суть метода: выдерживание образцов в растворе хлорида железа ( $\text{FeCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) с последующим определением потери массы образца.

Для испытания используют образцы размером  $20 \times 30$  мм толщиной от 0,8 до 5 мм. Испытания проводят в стеклянных сосудах. Объем раствора – не менее  $10 \text{ см}^3$  на  $1 \text{ см}^2$  площади поверхности образцов. Взвешивание проводят с погрешностью не более  $\pm 0,1$  мг.

#### **2. Электрохимический метод.**

Суть метода: измерение потенциала свободной коррозии и проведение гальваностатической и/или потенциодинамической поляризации образцов в водных средах типа морской или загрязненной хлоридами оборотной воды.

Для испытаний используются образцы размером  $20 \times 30$  мм, толщиной от 0,8 до 5 мм. Испытания проводят в трехэлектродной термостатированной ячейке с объемом рабочей части раствора  $100\text{--}300 \text{ см}^3$  и дополнительными приборами и приспособлениями (электронный потенциостат и др.).

В стандарте изложены порядок проведения и обработка результатов испытаний.

### **2.4.3. Металлографическое определение коррозионных поражений**

Суть метода (по ГОСТ 9.905–82): метод основан на определении типа коррозии, формы коррозионного поражения, распределения коррозионного поражения в металлах, сплавах и защитных металлических покрытиях путем сравнения с соответствующими типовыми формами, а

также измерения глубины коррозионного поражения на металлографическом шлифе.

Место отбора образцов из испытуемого материала выбирают на основе результатов визуального (невооруженным глазом или с помощью лупы) осмотра поверхности или неразрушающей дефектоскопии.

Образцы вырезают из следующих мест материала:

1. Если коррозией поражена только часть поверхности материала, образцы отбирают в трех местах: из части, пораженной коррозией; из части, не пораженной коррозией, и на участке между ними.

2. Если имеются участки поверхности материала с различными видами коррозии или с различной глубиной коррозионного поражения, образцы отбирают из всех участков, пораженных коррозией.

3. Если на поверхности материала имеется один тип коррозионного поражения, образцы отбирают не менее чем из трех характерных участков исследуемого материала.

При необходимости отбирают не менее одного образца из не менее пяти функционально необходимых участков испытуемого материала. Размер образца определяют, исходя из размеров зоны коррозионного поражения. Образцы вырезают таким образом, чтобы плоскость шлифа была перпендикулярна исследуемой поверхности. Способ изготовления не должен влиять на структуру материала и разрушать поверхностный слой и кромки образца. Для материалов с защитными покрытиями не допускаются повреждение покрытия и отрыв его от основного материала.

Маркировка образца проводится по ГОСТ 9.905–82.

При изготовлении металлографического шлифа с поверхности образца удаляют все следы вырезки.

При операциях шлифования и полирования шлифа необходимо следить за тем, чтобы не изменились характер и размер коррозионного поражения. Кромки шлифа в месте коррозионного поражения не должны иметь закруглений. Допускаются закругления, не влияющие на точность определения коррозионного поражения. Для этого рекомендуется заливать образец в заливную массу таким образом, чтобы исследуемая кромка находилась на расстоянии не менее 10 мм от края шлифа. Полирование проводят кратковременно с помощью алмазных паст.

Оценку шлифа проводят до и после травления. Травление позволяет установить различие между коррозионным поражением и структурой материала. При травлении не должны быть изменены характер и размеры коррозионного поражения.

При определении и оценке типа коррозии, формы коррозионного поражения и его распределения в материале необходимо учитывать химический состав испытуемого материала, способ его обработки, а также все коррозионные факторы.

Испытания проводят на металлографическом шлифе под микроскопом при увеличениях 50, 100, 500 и 1000 крат.

На одном образце допускается определять несколько типов коррозии.

Глубину коррозионного поражения определяют на шлифе с помощью окулярной шкалы и микрометрического винта микроскопа по разности толщины металла прокорродировавшего участка поверхности шлифа и участка поверхности без наличия коррозии или измерением глубины поражения от поверхности, неразрушенной или незначительно разрушенной коррозией.

При испытании материала с защитным покрытием измерения глубины коррозионного поражения покрытия и основного металла проводят отдельно.

## **2.5. Методы технологических испытаний**

Технологические методы испытаний используются для определения возможности применения металлов и сплавов или конструкций, в частности сварных, при данном способе их производства. При этом, в отличие от методов механических испытаний, определяются не отдельные значения свойств с высокой точностью измерений, а пригодность материала или конструкций для конкретных производственных задач, исходя из условий их изготовления и эксплуатации.

### ***2.5.1. Испытания на сопротивляемость образованию холодных трещин при сварке плавлением***

Стандарт ГОСТ 26388–84 устанавливает методы испытаний на сопротивляемость углеродистых и легированных сталей основного металла в зоне термического влияния и металла шва образованию холодных трещин при однопроходной сварке (в том числе при сварке коренного валика многопроходных швов).

Методы основаны на доведении металла зоны термического влияния или металла шва сварных образцов до образования холодных трещин под действием растягивающих напряжений от внешней постоянной нагрузки или под действием остаточных сварочных напряжений.

Машинный метод применяют при разногласиях в оценке качества сварных соединений.

Методы испытаний, предусмотренные в указанном выше стандарте, применяют при проведении исследовательских испытаний по оценке свариваемости металлов.

Стандарт определяет типы образцов (приводятся чертежи образцов) для испытаний стыковых и угловых сварных соединений для стали толщиной от 1 до 20 мм.

Стандарт рекомендует метод сварки для изготовления образцов, методики проведения испытаний, обработки результатов. Установлены показатели сопротивляемости металла сварных соединений и зоны термического влияния и металла шва образованию холодных трещин.

### ***2.5.2. Испытания на сопротивляемость образованию горячих трещин при сварке плавлением***

Стандарт ГОСТ 26389–84 устанавливает методы испытаний на сопротивляемость образованию горячих трещин металла швов и зоны сплавления сварных соединений конструкционных сплавов толщиной 1,5 мм и более при всех способах сварки плавлением и имитации сварного термического цикла.

Машинные методы применяют при испытаниях на сопротивление металла шва образца и зоны его сплавления образованию трещин отдельных видов для выбора оптимального химического состава шва и режима сварки.

При машинных испытаниях испытуемый металл шва и зоны сплавления деформируют приложением внешней нагрузки для определения сравнительно количественных показателей: критического темпа и критической скорости растяжения, при которых образуются горячие трещины. При этом определяются: критическая скорость растяжения, м/с, критический термический темп растяжения, м/°С (%/°С).

Технологические методы предусматривают изготовление типовых сварных узлов, конструкций и технологию сварки, которые обуславливают повышенные значения темпа высокотемпературных деформаций, приводящих к образованию горячих трещин.

Определяются: критическая скорость сварки, м/с; коэффициенты ширины образца, %; периодичность трещин, м; площади трещин, %; длины трещин, %.

В стандарте описывается изготовление различными способами сварки 12 типов образцов.

Стандарт определяет требования к аппаратуре для испытаний, порядок проведения испытаний, обработки результатов.

### ***2.5.3. Оценка влияния сварки плавлением на основной металл***

Стандарт ГОСТ 23870–79 устанавливает метод оценки влияния сварки плавлением на основной металл в околошовной зоне, при котором тепловое воздействие на металл осуществляется без выполнения сварки.

Околошовная зона – участок зоны термического влияния, нагретый выше температуры начала интенсивного роста зерна.

В результате испытаний на специальной установке (ГОСТ 23870–79) устанавливается зависимость временного сопротивления, относительного

удлинения после разрыва, относительного сужения после разрыва, предела длительной прочности, ударной вязкости, твердости, величины зерна и содержания структурных составляющих от скорости охлаждения металла, имитирующей скорость его охлаждения в околосшовной зоне.

Метод применяется для научно-исследовательских и экспериментальных работ.

Форма и размеры образцов соответствуют либо приведенным в этом стандарте, либо типам I, VIII, IX по ГОСТ 6996–66.

Приведены характеристики установки для имитации теплового воздействия сварки, которая должна обеспечивать регулируемые нагрев и охлаждение испытуемого образца по термическим циклам околосшовной зоны.

Погрешность регулирования температуры не должна превышать 1%, скоростей нагрева и охлаждения – 5%.

Деформация растяжением (сжатием) при нагреве и охлаждении испытуемого образца не должна превышать 2%, прогиб 0,01 мм, угол закручивания 1°.

#### 2.5.4. Оценка хладостойкости сварных соединений по реакции на ожог сварочной дугой

ГОСТ 23240–78 устанавливает метод оценки хладостойкости сварных стальных конструкций по реакции на ожог сварочной дугой.

Суть метода: получение на поверхности образца малопластичной линзы под действием дугового ожога и определение степени ее влияния на склонность стали к переходу в хрупкое состояние при ударном приложении нагрузки.

Образцы с ожогом изготавливают двух типов: I – из стали толщиной 10 мм и более (рис. 2.16, а); II – из стали толщиной от 6 до 10 мм (рис. 2.16, б).

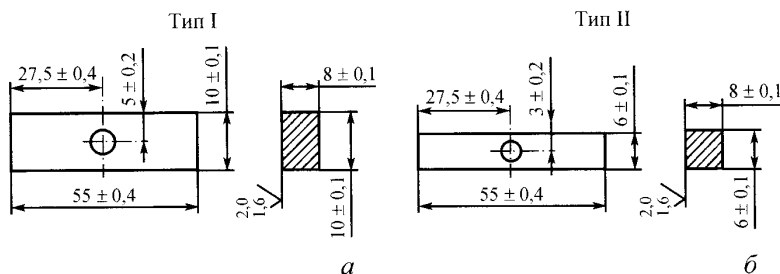


Рис. 2.16. Образцы с ожогом типов I и II для оценки хладостойкости сварных конструкций

Линза ожога располагается в середине образца. Количество образцов для испытаний и место вырезки заготовок и их ориентация по отношению к направлению проката должны приниматься в соответствии с нормативно-технической документацией на металлопродукцию или сварную конструкцию.

### ***2.5.5. Определение содержания диффузионного водорода в наплавленном металле и металле шва при сварке***

ГОСТ 23338–91 устанавливает хроматографический и вакуумный методы определения содержания диффузионного водорода в наплавленном металле и металле шва и распространяется на покрытые электроды, порошковую проволоку, стальную сварочную проволоку, предназначенные для сварки низкоуглеродистых и низколегированных сталей.

Хроматографический метод предназначен для определения содержания диффузионного водорода в образцах швов, выполненных покрытыми электродами, порошковой и стальной сварочной проволоками.

Вакуумный метод предназначен для определения содержания водорода в образцах швов, выполненных покрытыми электродами диаметром от 3 до 6 мм.

Подробно описаны аппаратура и материалы, применяемые при хроматографическом и вакуумном методах, даны схемы приборов для хроматографического и вакуумного методов анализа, порядок подготовки к испытаниям, изготовления образцов с наплавками для проведения испытаний, схемы приспособлений для наплавки образцов, последовательность проведения испытаний и обработка результатов.

В стандарте указаны условия наплавки шва для классификации и контроля партий сварочных материалов.

Измерение содержания диффузионного водорода в наплавленном металле выполняется хроматографическим методом с относительной погрешностью  $\pm 7\%$  и вакуумным методом с относительной погрешностью  $\pm 5\%$ .

### **3. ДЕФЕКТЫ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

При сварке металлов качество выполнения сварных швов имеет особо важное значение. Наряду с механическими свойствами и коррозионной стойкостью сварных соединений к числу важнейших факторов, определяющих работоспособность сварных конструкций, относится отсутствие дефектов в сварном шве, в зоне сплавления, в зоне термического влияния (см. приложение).

#### **3.1. Классификация дефектов**

Дефекты сварных соединений при сварке плавлением подразделяются на: дефекты подготовки и сборки; дефекты формы шва; дефекты строения металла сварных соединений (наружные и внутренние).

Дефекты подготовки и сборки чаще всего обусловлены: нарушениями геометрии скоса кромок шва; непостоянством зазора между кромками по длине стыкуемых элементов; несовпадением плоскостей стыкуемых деталей.

Дефекты формы шва (подрезы, наплывы, прожоги, усадочные канавки и др.) обусловлены: неравномерной шириной швов, образующихся при нарушении движения электродов; неравномерностью зазора кромок при сборке; неравномерностью выпуклостей по длине шва, местных утолщений и впадин (прежде всего они зависят от неудовлетворительного качества электродов при ручной сварке и нестабильности работы механизма автомата при автоматической сварке).

При выборе методов и средств контроля соединений, выполненных сваркой, необходимо иметь четкое представление о характере дефектов и причинах их появления. Наиболее характерные дефекты, возникающие при сварке, указаны в ГОСТ 30242–97. Кроме того, в нем приведены классификация, обозначения, краткое описание дефектов сварных соединений, даны трехзначное цифровое обозначение дефектов и четырехзначное обозначение их разновидностей, буквенное обозначение дефектов, наименование дефектов на русском, английском и французском языках, поясняющий текст, рисунки, дополняющие определения.

В соответствии с указанным стандартом дефекты подразделяются на шесть групп, в основном по их форме и месту расположения в сварном соединении: трещины; поры; твердые включения; несплавления и непровары; нарушения формы шва; прочие дефекты.

#### **3.2. Трещины**

Трещины относятся к наиболее опасным дефектам и по всем нормативно-техническим документам недопустимы.

Трещина – несплошность в сварном соединении в виде щелевого разрыва шва и/или прилегающих к нему зон.

Трещины по ГОСТ 30242–97 подразделяются по ориентации к шву на:

1. Продольные, ориентированные параллельно оси сварного шва и располагающиеся в металле сварного шва, на границе сплавления, в зоне термического влияния, в основном металле.

2. Поперечные, ориентированные поперек оси сварного шва и располагающиеся в металле сварного шва, в зоне термического влияния, в основном металле.

3. Радиальные – радиально расходящиеся из одной точки и располагающиеся в металле сварного шва, в зоне термического влияния, в основном металле.

4. По температуре образования на:

– горячие, возникающие в интервале температур кристаллизации металла;

– холодные, возникающие при температурах ниже интервала кристаллизации металла;

– трещины повторного нагрева.

5. По месту возникновения: в шве; в зоне сплавления; в зоне термического влияния.

Трещины выявляются: наружные (макротрещины) – внешним осмотром, люминесцентным методом и методом красок, микротрещины – металлографическими методами; внутренние – неразрушающими методами контроля: радиационными, акустическими (ультразвуковыми), магнитными (для сталей); разрушающими: металлографическими и фрактографическими (на шлифах или изломах).

### ***Горячие трещины***

#### *Описание*

Горячая трещина – дефект сварки, имеющий признаки хрупкого межкристаллитного разрушения при высоких температурах. Горячие трещины могут быть кристаллизационного (ГТК) или ликвационного (ГТЛ) типа. Они проходят по зонам срастания кристаллитов в металле или по границам зерен в зоне сплавления, на поверхности разрушения которой обнаруживаются следы обособленной кристаллизации жидкого металла или шлака.

Горячая трещина подсолидусного типа (ГТП) – трещина, проходящая по границам зерен в литом металле шва или в металле зоны сплавления, на поверхности разрушения которой не обнаруживаются следы обособленной кристаллизации жидкой фазы.

Горячая подваликовая трещина (ГТМ) – трещина, возникающая при многопроходной сварке в металле предшествующего слоя при выполнении следующего.

Температурный интервал хрупкости (ТИХ) – разность между верхней  $T_{вг}$  и нижней  $T_{нг}$  границами температурного интервала образования горячих трещин:  $ТИХ = T_{вг} - T_{нг}$ .

Время пребывания в температурном интервале хрупкости – разность между временем достижения нижней и верхней границ ТИХ.

Стойкость против образования горячих трещин при сварке – способность металла образовывать шов без горячих трещин при сварке конкретного узла в установленных режимах сварки.

Критическая скорость сварки – сравнительный показатель сопротивляемости образованию горячих трещин при сварке, определяемой минимальной скоростью сварки, при которой возникают трещины в образцах.

#### *Причины образования*

В зависимости от природы образования различают кристаллизационные и полигонизационные горячие трещины.

Кристаллизационные горячие трещины возникают при наличии твердой и жидкой фаз в процессе кристаллизации и располагаются в обогащенных примесями межкристаллитных пространствах.

Полигонизационные горячие трещины образуются при температуре ниже температуры солидуса и располагаются по участкам, где сосредоточены несовершенства кристаллической решетки, – по полигонизационным границам, преимущественно на тех же участках, которые совпадают с участками твердого раствора, обогащенными примесями, т.е. на участках, которые соответствуют бывшим границам при первичной кристаллизации.

Образованию горячих трещин способствуют следующие факторы:

- использование повышенных плотностей сварочного тока при наложении первого слоя многослойного шва толстостенных сосудов и изделий;

- недостаточный зазор между кромками деталей при электрошлаковой сварке;

- слишком глубокие и узкие швы при автоматической сварке под флюсом;

- выполнение сварочных работ при низкой температуре;

- чрезмерное нагромождение швов для усиления конструкции, в результате чего возрастают сварочные напряжения, способствующие образованию трещин в сварном соединении;

- наличие в сварных конструкциях других дефектов, являющихся концентраторами напряжений, под действием которых в области дефектов начинают развиваться трещины;

- химический состав металла шва, определяющий его свойства в период кристаллизации;

- длительное пребывание шва в состоянии, характеризуемом пониженной пластичностью.

### *Способы предупреждения*

Для предупреждения горячих трещин при сварке рекомендуется:

– дополнительное применение присадочного металла, содержащего пониженное количество вредных примесей, способствующих образованию горячих трещин, и повышенное количество полезных элементов;

– уменьшение доли участия основного металла в металле шва за счет применения соответствующих видов и режимов сварки (сварка на малых токах, двумя дугами, по присадочной проволоке);

– выбор типа покрытия, флюса и состава сварочной проволоки; изменение первичной структуры металла шва и характера первичной кристаллизации путем подавления формирования столбчатой структуры, роста первичных кристаллитов и образования разноосных кристаллитов введением в сварочную ванну модификаторов – инокуляторов или воздействием на сварочную ванну ультразвуком, вибрацией электродов, электромагнитными колебаниями и др.;

– уменьшение величины растягивающих напряжений путем:

а) рационального конструирования узлов и элементов;

б) уменьшения количества и сосредоточения сварных швов;

в) выбора оптимального типа разделки свариваемых кромок;

г) устранения излишней жесткости узлов;

д) применения рационального способа и режимов сварки;

е) применения рационального порядка наложения швов;

ж) применения предварительного подогрева, обуславливающего отдаление момента возникновения растягивающих напряжений и снижающего скорость их нарастания в период, когда металл шва обладает пониженной пластичностью;

з) выбор химического состава металла шва, оптимального для сечения свариваемой детали;

– повышение коэффициента формы шва (отношение ширины шва к его глубине) до предела 1,3 : 5 путем изменения способа и режима сварки.

### *Способы исправления*

При обнаружении трещин ограничиваются засверловкой их концов. Производится одно- или двусторонняя разделка трещины электро- или плазменно-дуговой строжкой либо любым механическим способом (абразивным кругом, электро- или пневмозубилом и др.).

Заварка дефектного участка производится любым рациональным способом, обеспечивающим отсутствие дефектов в сварном соединении.

### *Влияние на свойства*

Горячие трещины служат очагом хрупкого, усталостного, коррозионного разрушений конструкций или деталей в процессе изготовления или эксплуатации. Степень отрицательного влияния зависит от величины и количества трещин.

### ***Горячие трещины в сварном шве***

#### ***Описание***

Горячие трещины, выходящие на поверхность шва, имеют темный (вследствие окисления) цвет в кристаллическом изломе. Горячие трещины, не выходящие на поверхность шва, имеют кристаллический излом серебристо-белого цвета без металлического блеска.

Горячие трещины, выходящие на поверхность шва, выявляются визуально, не выходящие – методами просвечивания и магнитного контроля (для сталей). Кроме того, внутренние горячие трещины выявляются металлографическими и фрактографическими методами.

#### ***Причины образования***

Горячие трещины в металле шва образуются в процессе кристаллизации в месте стыка столбчатых кристаллитов (зона слабины) или между соседними кристаллитами вследствие низкой прочности металла в интервале температур кристаллизации и возникновения и развития растягивающих напряжений, под воздействием которых металл шва подвергается пластической деформации, обусловленной усадкой металла.

На процессы появления и развития горячих трещин оказывают влияние величина и скорость нарастания растягивающих напряжений, возникающих при кристаллизации металла шва и его последующем охлаждении, а также величина первичных кристаллов и наличие в металле шва структурных неоднородностей, служащих причиной местной локализации упругопластической деформации.

Образование горячих трещин в шве зависит от химического состава металла, определяющего свойства в период кристаллизации, длительности температурных интервалов в процессе охлаждения и скорости охлаждения.

### ***Горячие трещины в зоне термического влияния***

#### ***Описание***

Горячие трещины в зоне термического влияния (рис. 3.1) располагаются по границам частично оплавленных и/или следующих за ними зерен. Они могут располагаться по зоне термического влияния параллельно шву (продольные трещины) либо распространяться в основной металл или в металл сварного шва (поперечные трещины). Эти трещины развиваются по границам зерен основного металла в околошовной зоне, кратковременно нагретым выше температуры солидуса или микроликвационными процессами во время дендритной кристаллизации и наличием легкоплавких эвтектик.

Горячие трещины в околошовной зоне выявляются двумя группами методов:

– неразрушающими – радиографическим, ультразвуковым, магнитным контролем;

– разрушающими – металлографическими и фрактографическими на шлифах и изломах.

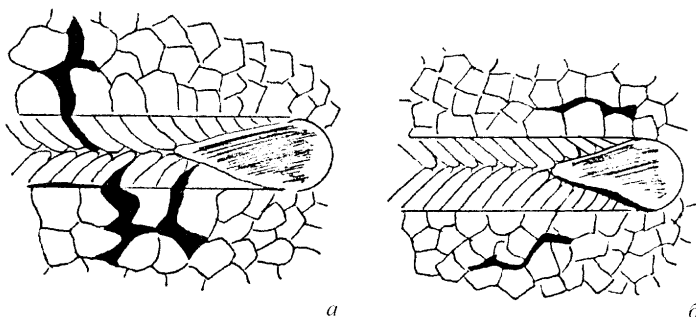


Рис. 3.1. Схематическое изображение горячих трещин в зоне термического влияния: а – поперечные; б – продольные

#### *Причины образования*

Горячие трещины в околошовной зоне образуются при высоких температурах, когда границы зерен металла, прилегающие к зоне сплавления, находятся в твердо-жидком состоянии.

Горячие трещины в околошовной зоне наблюдаются при малой глубине проплавления основного металла при всех видах сварки плавлением в случае применения режимов сварки с высокими значениями погонной энергии.

#### *Способы предупреждения*

Для предотвращения образования горячих трещин в околошовной зоне рекомендуется:

- вести сварку с проваром кромок не менее 4–5 мм;
- применять основной металл, содержащий минимальное количество вредных примесей (кислород, водород, азот и др.);
- применять основной металл, содержащий минимальное количество легкоплавких примесей (для сталей – серы, фосфора, для медных сплавов – висмута, свинца и т.д.);
- применять предварительную термообработку основного металла (или свариваемых кромок) для обеспечения благоприятной мелкозернистой структуры;
- применять наклеп свариваемых кромок;
- применять перед сваркой подогрев кромок;
- снижать температуру солидуса металла шва относительно температуры солидуса основного металла в участках перегрева путем соответствующего выбора сварочных материалов (проволока, флюс, электроды и т.д.);

- осуществлять контроль за отсутствием в основном металле строчечных и других видов сегрегаций неметаллических и прочих включений;
- снижать уровень напряжений в металле зоны термического влияния за счет выбора рациональной конструкции соединений.

#### *Влияние на свойства*

Горячие трещины в околошовной зоне служат причиной (очагом) преждевременного разрушения конструкций и деталей в процессе изготовления или эксплуатации и снижают их конструктивную прочность.

#### **Холодные трещины**

##### *Описание*

Холодные трещины (рис. 3.2, 3.3) образуются после окончания сварки в процессе охлаждения ниже температур 150–100 °С или в течение последующих суток.

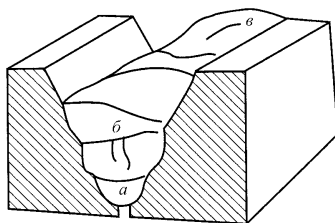


Рис. 3.2. Разновидность продольных холодных трещин в шве (схема):  
а – корневые; б – внутренние; в – поверхностные

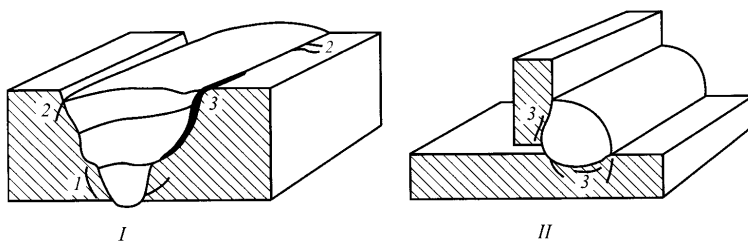


Рис. 3.3. Разновидность холодных трещин в зоне термического влияния:

I – стыковое соединение; II – угловое соединение;

1 – продольные трещины; 2 – поперечные трещины (часть кол); 3 – отрыв

Разрушение может быть транс- или интеркристаллитное.

Холодные трещины имеют светлый блестящий излом без следов высокотемпературного окисления.

По отношению к металлу шва холодные трещины делятся на: корневые и подваликовые.

По природе возникновения холодные трещины делятся на отколы, отрывы и слоистое (ламеллярное) растрескивание.

Наружные холодные трещины выявляются визуально при внешнем осмотре, неразрушающими методами контроля (люминесцентный, метод красок) и разрушающими методами контроля (металлографический, фрактографический).

Холодные трещины могут возникать во всех зонах сварного соединения и располагаться параллельно или перпендикулярно оси шва. Место образования и направления трещин зависит от химического состава шва и основного металла, соотношения компонентов сварочных напряжений и ряда других факторов.

Наиболее часто продольные холодные трещины начинаются с возникновения их очагов на участке околошовной зоны, примыкающей к линии сплавления.

Внутренние холодные трещины выявляются двумя группами методов: неразрушающими – ультразвуковыми, радиационными, магнитными (для сталей); разрушающими – металлографическими и фрактографическими (на шлифах или изломах).

#### *Причины образования*

Образование холодных трещин вызывается:

– изменением структуры металла в результате термического воздействия при сварке, приводящего к понижению его прочностных или пластических свойств по сравнению с аналогичными свойствами металла в состоянии поставки;

– увеличением сварочных напряжений I и II рода, обусловленных возникновением структурной неоднородности металла сварного шва и зоны термического воздействия;

– охрупчиванием металла шва при наличии в нем вредных примесей.

Основные факторы, обуславливающие образование холодных трещин при сварке сталей:

– структурное состояние металла сварных соединений, характеризуемое наличием составляющих мартенситного и бейнитного типа и размером действительного аустенитного зерна;

– концентрация диффузионного водорода в зоне зарождения трещин; уровень растягивающих сварочных напряжений I рода;

– для низко- и среднелегированных сталей – отколы или подваликовые холодные трещины, образующиеся в результате мартенситного превращения аустенита в околошовной зоне или сварном шве;

– для легированных сталей – отрыв по зоне сплавления, происходящий в результате мартенситного превращения аустенита в зоне перемешивания основного и наплавленного металла;

– для ферритно-перлитных сталей – слоистое растрескивание (ламельные холодные трещины), представляющее собой скопление неметаллических включений в областях полосчатой микроструктуры;

– для легированных бейнитных сталей: 1) продольные холодные трещины (отколы) в однослойных и последних многослойных соединениях, образующиеся в результате превращения аустенита в области нижнего бейнита и насыщения водородом; 2) поперечные трещины в многослойных соединениях (частокол), возникающие в результате сегрегации примесей на границах аустенитных зерен при повторном нагреве до 300 – 550 °С и насыщения водородом;

– для мартенситно-старееющих сталей – холодные трещины в однослойных и многослойных сварных соединениях, образующиеся в результате насыщения водородом, сегрегации примесей и фазовых выделений на границах аустенитных зерен при повторном нагреве сталей до 500–700 °С;

– для высокохромистых ферритных сталей – выделение карбонитридных фаз по границам зерен при охлаждении после сварки;

– для высоколегированных сплавов железа с кобальтом и марганцем – выделение интерметаллидных фаз, насыщение водородом.

#### *Способы предупреждения*

Для предотвращения образования холодных трещин к основному металлу предъявляются дополнительные требования, выполнение которых обеспечивает химическую и структурную однородность:

– контроль наличия в металле включений неблагоприятной формы, а также дефектов типа расслоений, резко снижающих стойкость сварных соединений против образования околошовных холодных трещин;

– создание с помощью предварительной термообработки исходной структуры, обладающей минимальной реакцией на воздействие термического цикла сварки;

– применение методов сварки и сварочных материалов, обеспечивающих однородность металла шва и основного металла по химическому составу и структуре;

– уменьшение содержания газов (водорода, кислорода, азота) в основном металле и металле швов;

– замена сварки на переменном токе сваркой на постоянном токе; переход от флюсов мокрой грануляции к флюсам сухой грануляции;

– применение прокалки электродов и флюсов, осушки защитных газов;

– применение очистки свариваемых кромок и сварочной проволоки от масла, ржавчины и других загрязнений;

– удаление конденсированной влаги со свариваемых кромок подогревом газовым пламенем;

– применение режимов сварки, обеспечивающих крупнокапельный или струйный перенос электродного металла;

– применение сопутствующего подогрева сварных соединений;

– регулирование сварочного термического цикла путем применения оптимальных режимов сварки, предварительного, сопутствующего и последующего подогревов;

– применение термической обработки соединения после сварки (низкий или высокий отпуск) в период от момента окончания сварки до момента возникновения холодных трещин;

– уменьшение величины реактивных напряжений путем рационального конструирования узлов и элементов, уменьшения жесткости свариваемых элементов, количества и сосредоточения швов, выбора оптимального типа разделки кромок, рационального порядка наложения швов.

#### *Способы исправления*

При обнаружении наружных холодных трещин ограничиваются засверловкой их концов.

Производится одно- или двусторонняя разделка трещины электро- или плазменно-дуговой строжкой либо любым механическим способом (абразивным кругом, электро- или пневмозубилом и др.).

Заварка дефектного участка производится любым рациональным способом, обеспечивающим отсутствие дефектов в сварном соединении.

#### *Влияние на свойства*

Холодные трещины служат очагом хрупкого, усталостного, коррозионного разрушения конструкции или детали в процессе их изготовления или эксплуатации. Степень отрицательного влияния зависит от величины и количества дефектов.

Холодные трещины относятся к наиболее опасным дефектам и по всем действующим нормативно-технологическим документам являются недопустимыми.

### ***Трещины повторного нагрева***

#### *Описание*

Трещины повторного нагрева представляют собой межкристаллитное разрушение (в стали и других металлах) в зоне перегрева при повторном термическом воздействии на металл.

Трещины повторного нагрева могут быть внутренними и поверхностными. Поверхностные обычно окрашены в цвета побежалости, так как покрыты тонкой пленкой оксидов, внутренние имеют светло-серый цвет без металлического блеска.

В зависимости от температуры образования различают трещины, зарождающиеся в так называемой низкотемпературной зоне, т.е. при нагреве до 200–300 °С, и в высокотемпературной зоне, т.е. при нагреве от 300 °С до температур, близких к температуре солидуса, а также подваликовые разрывы, которые проявляются в виде микротрещин при наплавке низколегированных сталей аустенитными ленточными электродами.

Трещины повторного нагрева, выходящие наружу, выявляются визуально при внешнем осмотре, люминесцентным методом и методом красок, металлографическими методами.

Внутренние трещины выявляются двумя группами методов: неразрушающими – ультразвуковым, радиографическим, магнитным (для сталей); разрушающим – металлографическим и фрактографическим на шлифах или изломах.

#### *Причины образования*

Трещины повторного нагрева образуются при повышении уровня термических напряжений вследствие слишком высокой скорости нагрева сварных конструкций при термической обработке.

Возникновению трещин повторного нагрева способствуют: крупнозернистая структура и перегрев зоны термического влияния; увеличение суммарного содержания вредных легкоплавких примесей; для стали – увеличение содержания ванадия и хрома до 2 %.

#### *Способы предупреждения*

Для предупреждения появления трещин повторного нагрева проводят:

- при сварке: нагрев сварных конструкций (особенно первых проходов) в интервале температур 200–300 °С при замедленной скорости; отпуск после остывания промежуточных слоев шва до 150–300 °С;

- при наплавке: операции нормализации наплавленных изделий;

- меры, предотвращающие появление подваликовых трещин путем нормализации зоны перегрева, например, с помощью двухслойной наплавки: первый слой наплавляют при пониженной тепловой мощности, а второй – при повышенной, чтобы зона нормализации была как можно шире.

#### *Способы исправления*

Для исправления трещин повторного нагрева проводят: засверловку их концов для ограничения дальнейшего развития трещин; одно- или двустороннюю разделку трещины любым механическим способом (абразивным кругом, электро- или пневмозубилом), а также электро- или плазменно-дуговой строжкой; заварку дефектного участка с применением способа сварки и сварочных материалов, которые обеспечивают отсутствие дефектов в сварном соединении.

#### *Влияние на свойства*

Трещины повторного нагрева могут служить причиной усталостного, хрупкого или коррозионного разрушения детали или конструкции в условиях эксплуатации.

### 3.3. Поры

Поры – несплошности в металле или зоне взаимной кристаллизации (зоне сплавления) в сварном шве, заполненные газом и имеющие округлую, продолговатую или более сложные формы (рис. 3.4).

Наблюдаются поры единичные, скопления, цепочки, трубчатой формы. Поры могут быть внутренними или выходить на поверхность шва. Трубчатые поры, выходящие на поверхность шва, называются свищами.

Поры располагаются между кристаллитами по оси шва или по его сечению, реже у границы сплавления.

Поры, выходящие на поверхность, выявляются при внешнем осмотре. Поры, не выходящие на поверхность, обнаруживаются просвечиванием швов методами неразрушающего контроля, при разрушении шва – выявляются на изломе или при исследовании макро- или микро-структуры.

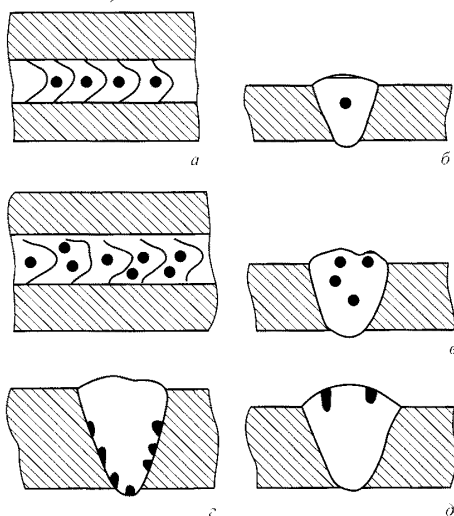


Рис. 3.4. Поры в сварном шве: а – цепочка; б – единичные; в, г – скопления; д – свищи

#### *Причины образования*

Поры представляют собой не успевшие выделиться до затвердевания металла газовые пузыри. Основными причинами образования пор при сварке являются:

– повышенное содержание водорода, азота, углекислого газа, серы (для сталей), водорода – для алюминиевых, титановых и магниевых сплавов, азота, кислорода, водорода – для никелевых и медных сплавов;

- загрязненность кромок свариваемого металла органическими веществами; ржавые кромки (для сталей);
- использование влажного флюса или отсыревших электродов;
- использование при сварке электродов с нарушенной сплошностью покрытия;
- увеличенная скорость или завышенная длина дуги;
- случайные факторы (колебания напряжения в сети и т.п.);
- наличие влаги в присадочных материалах (присадочная проволока, электроды, флюсы).

Образование пор может быть вызвано концентрацией влаги в расслоениях свариваемого металла, выходящих на свариваемую кромку.

#### *Способы предупреждения*

Основными способами предупреждения образования пор являются:

- уменьшение содержания водорода, азота, оксида углерода (для сталей), водорода (для алюминиевых, титановых и магниевых сплавов), водорода и кислорода для медных и никелевых сплавов) в сварочной ванне путем снижения их содержания в атмосфере дуги;
- удаление ржавчины и органических загрязнений с кромок свариваемого металла и поверхности электродов;
- тщательная прокалка покрытия флюсов и электродов;
- зачистка кромок свариваемого металла и проволоки от частиц оксидной пленки для предотвращения ее попадания в зону сварки;
- осушка защитных газов;
- удаление водорода и азота из сварочной ванны до начала кристаллизации;
- подавление реакции образования водяного пара или оксида углерода путем раскисления сварочной ванны с помощью присадки в нее элементов, обладающих большим сродством к кислороду, чем водород или углерод.

#### *Способы устранения*

Поры, размеры которых превышают допустимые по техническим условиям, удаляют электро- или плазменно-дуговой строжкой, а также любым механическим способом. Дефектные участки заваривают.

#### *Влияние на свойства*

Наличие пор при всех условиях нежелательно. Допустимость пор определяется в зависимости от условий эксплуатации сварных конструкций. Особенно опасны поры в сварных швах аппаратуры, работающей под давлением или в вакууме, а также в емкостях для хранения и транспортировки жидких и газообразных веществ.

Поры уменьшают сечение шва и, являясь концентраторами напряжений, могут приводить к образованию трещин.

### 3.4. Усадочные раковины

#### *Описание*

Усадочная раковина – несплошность в металле, образовавшаяся вследствие усадки во время затвердевания металла сварного шва и имеющая поверхность, характерную для свободной кристаллизации металла (рис. 3.5).

Различают открытую усадочную раковину – полость неправильной формы, сообщающуюся с атмосферой, и закрытую усадочную раковину – полость, находящуюся внутри сварного шва. Поверхность открытой усадочной раковины – темная, окисленная, закрытой – светлая, неокисленная.

Открытая усадочная раковина выявляется при внешнем осмотре, закрытая – методами неразрушающего контроля (просвечивание), при разрушении шва она выявляется в изломе либо при исследовании макро- или микроструктуры.

Усадочная раковина в конце валика сварного шва, не заваренная во время выполнения последующих проходов, называется **кратером**. Кратер может являться источником продольных, поперечных или звездообразных трещин.

Усадочные раковины уменьшают сечение сварного шва и, являясь концентратором напряжений, могут приводить к образованию трещин.

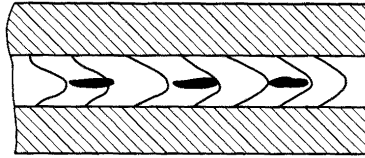


Рис. 3.5 Схематическое изображение усадочных раковин

#### *Причины образования*

Усадочные раковины возникают вследствие недостаточного количества жидкого металла к концу затвердевания сварного шва из-за усадки жидкого металла. Образованию усадочных раковин способствуют: повышенное содержание газов в жидком металле; широкий температурный интервал кристаллизации металла; режимы сварки на больших скоростях (форсированные режимы), двумя или более дугами под флюсом.

#### *Способы предупреждения*

Для предупреждения появления усадочных раковин замедляют скорость кристаллизации сварочной ванны путем снижения скорости сварки, увеличивают расстояние между электродами.

### *Способы исправления*

Усадочные раковины, размеры которых превышают допустимые по нормативной документации, удаляют электро- или плазменно-дуговой строжкой, а также любым механическим способом. Дефектные участки заваривают.

### *Влияние на свойства*

Усадочная раковина в сварном шве снижает механические свойства сварного соединения пропорционально площади поверхности разрушения, занятой этим дефектом.

## 3.5. Непровар

### *Описание*

Непровар – несплошность в виде местного несплавления основного металла в сварном соединении по всей длине шва или на отдельном участке (рис. 3.6). Может представлять собой как зазор между двумя кромками свариваемого металла, так и тонкую прослойку оксидов, а в некоторых случаях – грубую шлаковую прослойку между основным и наплавленным металлом.

В зависимости от расположения и характера различают непровары: по толщине основного металла; по кромке с основным металлом; корня шва (при сварке стыковых швов); вершины угла (при сварке угловых швов и стыковых швов с разделкой кромок); между отдельными валиками при многопроходной сварке.

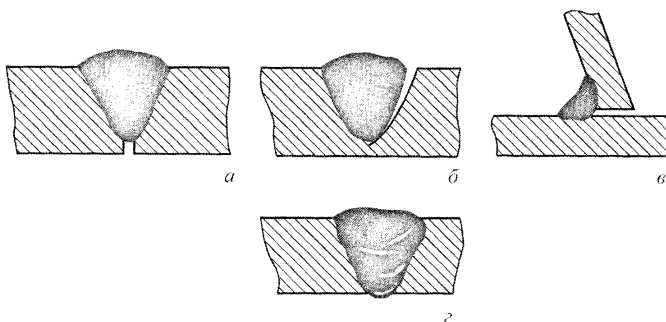


Рис. 3.6. Непровар:

а, в – корня шва; б – кромки; г – между слоями шва

Непровары, выходящие на поверхность (наружные), выявляются внешним осмотром. Непровары, не выходящие на поверхность (внутренние), выявляются двумя группами методов: неразрушающими – радиографическим, ультразвуковым, магнитным (для сталей) и разрушающими – металлографическими или фрактографическими.

### *Причины образования*

Причинами образования непроваров могут быть:

- плохая зачистка кромок свариваемых деталей от окалины, ржавчины, краски, шлака, масла и других загрязнений;
- блуждание или отклонение дуги под влиянием магнитных полей, особенно при сварке на постоянном токе;
- электроды из легкоплавкого материала (при выполнении шва такими электродами жидкий металл натекает на неоплавленные свариваемые кромки);
- чрезмерная скорость сварки, при которой свариваемые кромки не успевают расплавиться;
- значительное смещение электрода в сторону одной из свариваемых кромок, при этом расплавленный металл натекает на вторую нерасплавленную кромку, прикрывая непровар;
- неудовлетворительное качество основного металла, сварочной проволоки, электродов, флюсов и т. д.;
- плохая работа сварочного оборудования: колебания силы сварочного тока и напряжения дуги в процессе сварки;
- недостаточный угол скоса вертикальных кромок или нарушение угла наклона изделия, большая величина их притупления;
- маленький зазор между кромками свариваемых деталей;
- большое сечение электрода или присадочной проволоки, укладываемой в разделку шва, что затрудняет расплавление основного металла.

### *Способы предупреждения*

Для предотвращения непроваров необходимо следить: за правильным введением электродов в разделке; за параметрами режимов сварки; за раскладкой валиков в разделке; применять колебания электродов попеременно в разделке кромок.

Для предотвращения непроваров в начале и конце сварного шва сварку следует начинать и заканчивать на заводных планках.

Для правильного возобновления процесса сварки после перерыва необходимо обеспечить достаточное перекрытие прерванного шва последующим.

### *Способы исправления*

Участок шва с непроваром, превышающим регламентируемую соответствующими документами величину, должен быть удален и заварен.

Непровар удаляют либо механическим способом (абразивным кругом, электро- или пневмозубилом), а также электро- или плазменно-дуговой строжкой.

Дефектный участок заваривают любым рациональным способом сварки.

### *Влияние на свойства*

Непровар уменьшает сечение сварного шва и вызывает значительную концентрацию напряжений, что может приводить к образованию трещин в сварных конструкциях.

Непровар, обусловленный конструкцией сварного соединения, так называемый конструктивный непровар, в сварных конструкциях исправлению не подлежит и допускается с разрешения соответствующих технических условий.

## **3.6. Несплавление**

### *Описание*

Несплавление – отсутствие металлической связи (взаимной литой зоны) между основным металлом сварного шва и свариваемым металлом или между отдельными валиками сварного шва.

Зона несплавления представляет собой зазор, заполненный затекшим шлаком или обусловленный наличием на поверхности зазора оксидных включений.

Несплавления, выходящие на поверхность сварного соединения, выявляются при внешнем осмотре. Несплавления, не выходящие на поверхность сварного соединения, обнаруживаются методами неразрушающего контроля – просвечиванием, магнитным (для сталей) и методами разрушающего контроля – металлографическими и фрактографическими (на шлифах и изломах).

### *Причины образования*

Начальной стадией несплавления являются глубокие подрезы по границе шва с одновременным утолщением металла шва, конечной стадией дефекта – отсутствие сплавления по периметру шва или между валиками.

При сварке зона несплавления образуется при повышенных скоростях сварки, если к моменту заполнения канавки металлом сварочной ванны жидкая пленка, покрывающая ее поверхность, успела закристаллизоваться, а запас теплоты, накопленный в сварочной ванне, недостаточен для повторного расплавления основного металла.

Зона несплавления при электрошлаковой сварке образуется чаще, чем при дуговой, что связано с большим разрывом по времени между образованием полости и ее заполнением.

### *Способы предупреждения*

Для предупреждения образования зоны несплавления с увеличением скорости сварки необходимо: увеличение коэффициента формы провара; применение мер, обеспечивающих уменьшение разрыва по времени между образованием и заполнением канавки (сварка на спуск наклонным электродом углом вперед, двумя и тремя дугами, с подогревом и др.).

### *Способы исправления*

Зона несплавления устраняется электро- или плазменно-дуговой строжкой либо механическим способом: абразивным кругом, электро- или пневмозубилом и др., затем производится разделка зоны несплавления. Заварка дефектного участка выполняется любым рациональным способом.

### *Влияние на свойства*

Зона несплавления резко снижает конструктивную прочность сварного соединения. Дефект не допускается.

## **3.7. Неметаллические включения**

### *Описание*

Неметаллические включения – это частицы шлаковых, оксидных, нитридных, карбидных и других включений, находящихся в металле сварного шва.

Неметаллические включения являются дефектом при сварке сталей. В цветных металлах неметаллические включения также встречаются в виде нитридов, карбидов, легкоплавких эвтектик и т.п.

В зависимости от формы различают несколько видов включений: пленочные, сферические (округлые), вытянутые, игольчатые и др.

Неметаллические включения разделяют на макро- и микроскопические.

Шлаковые включения, имеющие веретенообразную вытянутую форму, называют шлаковыми каналами.

Неметаллические включения могут располагаться в металле шва как между ветвями дендритов, так и между кристаллизационными слоями.

Неметаллические включения могут быть внутренними, не выходящими на поверхность, и наружными, выходящими на поверхность шва.

Неметаллические включения выявляются методами неразрушающего контроля – просвечиванием и магнитным (для сталей) и разрушающего контроля – металлографическими, механическими, фрактографическими, рентгеноструктурными и химическими (при этом определяются их природа и свойства).

### *Причины образования*

По происхождению неметаллические включения делятся на два вида: естественные (эндогенные) включения, образующиеся в результате химических реакций, протекающих в жидком металле; случайные (экзогенные) включения, возникшие в результате механического опадания частичек покрытия электродов, флюса или других материалов, соприкасающихся с жидким металлом шва, которые не успели всплыть на поверхность ванны.

Для сварки плавлением типичен первый вид неметаллических включений.

Эндогенными шлаковыми включениями являются частицы корунда  $Al_2O_3$ , силикатного типа  $MnSiO_2$  и кварца  $SiO_2$ , содержащиеся в покрытиях электродов или флюсах. Эти включения взаимодействуют с находящимися в металле шва оксидами ( $MnO$ ,  $FeO$ ,  $Fe_2O_3$  и др.), образуя сложные легкоплавкие шлаковые включения.

Шлаковые включения может образовывать сера, переходящая в металл шва из покрытий и флюсов. В сварочной ванне сера образует сульфид железа  $FeS$ .

Еще одним источником шлаковых включений являются нитриды – химические соединения азота с различными металлами.

Количество и величина неметаллических включений в металле шва зависят от размеров частиц, их плотности, от плотности и вязкости жидкого металла: чем больше радиус частиц, тем выше скорость их всплывания.

Вероятность образования неметаллических включений зависит от марки сварочного электрода. При сварке электродами с тонким покрытием вероятность образования неметаллических включений возрастает. При сварке электродами с толстым покрытием, дающим много шлака, расплавленный металл дольше находится в жидком состоянии, и неметаллическое включение успевает всплыть на его поверхность.

Шлаковые каналы образуются при сварке под флюсом двусторонних швов на флюсовой подушке или при первом проходе двустороннего стыкового шва с обязательным зазором.

#### *Способы предупреждения*

Для уменьшения количества неметаллических включений рекомендуется замедлять процесс кристаллизации сварочной ванны: вводить в нее (через покрытие, флюс или другим путем) вещества, понижающие температуру плавления неметаллических включений и способствующие образованию комплексных соединений, легко всплывающих из металла шва на поверхность.

Для предупреждения образования неметаллических включений в наплавленном металле рекомендуется:

- удалять органические загрязнения и ржавчину с поверхности свариваемого металла;
- проводить промежуточную зачистку швов от шлака при многослойной сварке или наплавке;
- замедлять остывание наплавленного металла (применять толстый слой шлака, соответствующий режим сварки и т. п.);
- контролировать качество электродного покрытия или флюса.

Для предупреждения появления шлаковых каналов следует:

- уменьшать содержание водорода и азота в сварочной ванне путем снижения их содержания в атмосфере дуги;

- подавлять реакции замедленного образования водяного пара или оксида углерода путем раскисления металла сварочной ванны;
- замедлять кристаллизацию сварочной ванны.

#### *Способы устранения*

Неметаллические включения удаляют электро- или плазменно-дуговой строжкой, а также любым механическим способом (абразивным кругом, электро- или пневмозубилом и т. д.).

Заварка дефектного участка производится любым рациональным способом.

#### *Влияние на свойства*

Наличие неметаллических включений, обладающих повышенной хрупкостью, протяженного размера приводит к снижению ударной вязкости металла шва, а в швах высокопрочных сталей – и к снижению прочностных характеристик. Снижается деформационная способность металла шва как при холодной, так и при горячей деформации. Особенно резко понижается длительная прочность.

Крупные неметаллические включения могут вызвать нарушения герметичности аппаратуры, работающей в условиях высокого давления или вакуума, а также предназначенной для хранения и транспортировки жидких или газообразных продуктов.

Допустимость неметаллических включений определяется соответствующими требованиями технических условий.

Шлаковые каналы резко снижают конструктивную прочность сварных соединений. Наличие шлаковых каналов в сварных швах недопустимо.

### **3.8. Металлические включения**

#### *Описание*

Металлические включения – это частицы инородного металла, попавшие в металл сварного шва.

Металлические включения выявляются неразрушающими методами контроля и идентифицируются на изломах или микро- и макрошлифах. Они характерны для алюминиевых сплавов при аргонодуговой сварке вольфрамовым электродом.

#### *Причины возникновения*

Образуются при сварке в среде защитных газов вольфрамовым электродом в основном из-за несоответствия марки вольфрама или при чрезмерных сварочных токах для выбранного электрода, вызывающих образование капель вольфрама. Вольфрамовые включения, как правило, образуются в местах обрыва дуги, при этом вольфрам скапливается в вершине кратеров, способствуя образованию трещин. Включения из других металлов обусловлены аналогичными причинами.

### *Способы предупреждения*

Для предотвращения попадания металлических включений в металл шва необходимо соблюдать технологические режимы сварки.

### *Способы устранения*

Выявленные металлические включения, размеры которых превышают допустимые по техническим условиям, удаляют электро- или плазменно-дуговой строжкой, а также любым механическим способом зачистки. Дефектные участки заваривают.

### *Влияние на свойства*

Наличие металлических включений нежелательно. Их допустимость (размеры) определяется в зависимости от условий эксплуатации сварных конструкций. Особенно опасны металлические включения в сварных швах аппаратуры, работающей под давлением или в вакууме, а также в емкостях для хранения и транспортировки жидких и газообразных веществ, так как между металлом шва и поверхностью металлического включения могут возникать несплошности, нарушающие герметичность.

Металлические включения уменьшают рабочее сечение шва, служат концентраторами напряжений и могут приводить к образованию трещин.

## **3.9. Флокены**

### *Описание*

Флокены – внутренние междендритные локальные участки в сварном шве с повышенным содержанием водорода, обуславливающие повышенную хрупкость и разрушение металла в этих участках.

В отличие от флокенов, наблюдаемых в литых и катаных сталях, флокены в сварных швах не являются несплошностями и не обнаруживаются ни металлографическими способами, ни неразрушающими методами контроля, а выявляются только на изломах, представляя собой четко очерченные зоны повышенной хрупкости серебристого цвета, отличающиеся от излома основного металла. Иногда в центральной части флокена расположены шлаковые включения или поры, способствующие местной концентрации водорода и служащие инициаторами развития флокена. Флокены являются дефектами в сталях.

### *Причины образования*

Образование флокенов связано со снижением пластичности металла швов при наличии в нем повышенного содержания водорода, который, скапливаясь в дефектных участках кристаллической решетки и на стыках дендритов, развивает большое давление, причем разрушению металла способствуют напряжения, возникающие в сварных конструкциях.

Границы раздела металл-неметаллическое включение также являются своеобразными линзами-барьерами на пути диффузии атомарного водорода, что и вызывает появление флокенов.

В швах, сваренных на высоколегированных хромоникелевых и марганцовистых сталях, образования флокенов не наблюдается.

#### *Способы предупреждения*

Образованию флокенов препятствует нагрев сварных соединений до 150–250 °С, способствующий более полному удалению водорода из металла шва. Тот же эффект достигается при длительном вылеживании стальных сварных конструкций.

#### *Способы исправления*

Флокены исправлению не подлежат.

#### *Влияние на свойства*

Наличие в металле флокенов приводит к некоторому снижению пластических и прочностных свойств и ударной вязкости металла швов при статических испытаниях.

### 3.10. Подрез

#### *Описание*

Подрез – углубление по линии сплавления сварного шва с основным металлом (рис. 3.7).

Подрезы могут быть одно- или двусторонними, т.е. располагаться с одной или с двух сторон шва. При сварке угловых швов наклонным электродом или с оплавлением кромки наблюдается односторонний подрез с наплывом металла на горизонтально расположенную деталь.

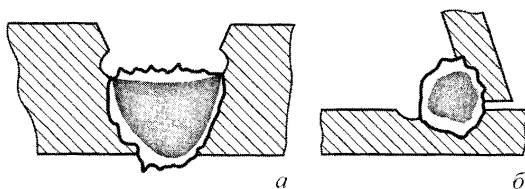


Рис. 3.7. Подрез зоны сплавления:

а – стыковое соединение; б – угловое соединение

Подрезы, образовавшиеся в глубине многослойного шва, если они не были заварены при наложении последующих слоев, являются внутренними дефектами и, как правило, заполнены шлаком.

Наружные подрезы выявляются внешним осмотром, внутренние – двумя группами методов: неразрушающим – радиографическим, ультразвуковым, магнитным контролем и разрушающим металлографическим на шлифах.

### *Причины образования*

Причинами возникновения подрезов могут быть: слишком высокое напряжение дуги; неточное ведение электрода по оси соединения; при сварке стыковых швов без разделки кромок – плохое растекание металла; при электрошлаковой сварке – соприкосновение свариваемых деталей с ползунами (подрезы появляются на поверхности деталей) при повышении напряжения, увеличении продолжительности остановки электрода в конечном положении и плохом охлаждении ползунов.

### *Способы предупреждения*

Для предупреждения образования подрезов необходимо: точно вести электрод по оси сварного соединения; соблюдать режимы и технологию сварки.

### *Способы исправления*

Если размеры наружного подреза превышают допускаемые технической документацией, острую грань его следует сглаживать механическим путем для создания плавного перехода от основного металла к металлу шва. При глубине подреза более 1–2 мм дефектный участок заваривают швом достаточного сечения.

Допустимость внутреннего подреза решают в каждом конкретном случае. Для исправления необходимо разделить шов любым механическим способом (абразивным кругом, электро- или пневмозубилом и др.), а также электро- или плазменно-дуговой строжкой. Дефектный участок заваривают любым рациональным способом.

### *Влияние на свойства*

Подрез приводит к резкой концентрации напряжений в тех случаях, когда он расположен перпендикулярно к направлению главных напряжений, действующих на сварное соединение. Для конструкций, работающих при вибрационных нагрузках, подрез существенно снижает прочность сварного соединения.

## **3.11. Наплыв**

### *Описание*

Наплыв – металл шва, натекший на поверхность основного металла или ранее выполненного валика без сплавления с ним (рис. 3.8).

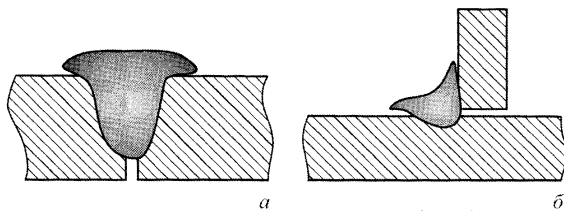


Рис. 3.8. Наплыв на сварном соединении:

а – стыковом; б – угловом

Наплыв наблюдается преимущественно при сварке однослойных стыковых швов без разделки кромок, при сварке угловых швов наклонным электродом или с оплавлением кромки и при наплавке. Наплывы выявляются внешним осмотром.

*Причины образования*

Наплывы образуются:

- при неправильном выборе режима сварки из-за большого сварочного тока и длинной дуги;
- при наличии на свариваемых кромках толстого слоя окалины;
- при неплотном поджатии ползунов в условиях электрошлаковой сварки;
- когда выемка в ползуне значительно превышает ширину шва.

*Способы предупреждения*

Для предупреждения образования наплывов необходимо увеличить ширину шва, повысив напряжение дуги, уменьшить количество металла, образующего усиление металла шва.

*Способы исправления*

Наплывы устраняют механическим удалением избыточного металла.

*Влияние на свойства*

На свойства сварных соединений наплывы не влияют.

### 3.12. Прожог

*Описание*

Прожог – сквозное отверстие в сварном шве, образовавшееся в результате вытекания части металла сварочной ванны.

Прожог имеет неправильную воронкообразную форму с оплавленной поверхностью. Прожоги выявляются при внешнем осмотре.

*Причины образования*

Прожоги возникают: при избыточной силе тока; при увеличенном зазоре между свариваемыми кромками; при изменении угла наклона электрода или изделия в процессе сварки; при неплотном прилегании флюсовой, флюсомедной или стальной подкладки к свариваемым местам.

*Способы предупреждения*

Для предупреждения образования прожогов необходимо: снижать величину сварочного тока; следить за углом наклона между электродом и свариваемым изделием; контролировать соблюдение технологии сборки и сварки.

*Способы исправления*

Места прожогов зачищают любым механическим способом и заваривают заново любым рациональным способом сварки.

*Влияние на свойства*

Прожог – недопустимый дефект сварного соединения, резко снижающий прочностные свойства изделий.

### 3.13. Кратер

#### *Описание*

Кратер – углубление в конце сварного шва, образующееся после обрыва дуги. Углубление имеет неправильную воронкообразную форму и вытянуто вдоль оси шва. Стенки кратера имеют оплавленную поверхность.

На участке кратера шов имеет уменьшенное сечение. В кратере, как правило, обнаруживаются усадочные рыхлости, трещины. Длина кратера зависит от режима сварки и составляет от нескольких единиц до десятков миллиметров. Кратер выявляется при внешнем осмотре.

#### *Причины образования*

Кратеры образуются из-за: обрыва дуги в конце шва при недостатке жидкого металла, необходимого для заполнения канавки сварочной дугой; неправильного выполнения конечного участка шва.

#### *Способы предупреждения*

Образование кратера предупреждают: путем вывода конца шва на выводные планки; при механизированных способах сварки – путем остановки в конце шва и постепенного обрыва дуги по мере заварки кратера; при ручном способе сварки – обрывом дуги на заваренном участке шва.

#### *Способы исправления*

В особо ответственных конструкциях металл шва на участке кратера удаляют любым механическим способом (абразивным кругом, электро- или пневмозубилом) или выплавляют электро- или плазменно-дуговой строжкой. Затем дефектный участок заваривают любым рациональным способом сварки.

#### *Влияние на свойства*

Кратер может служить источником продольных, поперечных или звездообразных трещин. Рыхлости и трещины в кратере могут служить очагами хрупкого разрушения сварных конструкций.

### 3.14. Перегрев металла

#### *Описание*

Перегрев металла – зоны повышенной хрупкости в металле шва или в зоне термического влияния, подвергшиеся перегреву в процессе сварки.

Перегрев наблюдается в литых и деформированных сталях, выявляется фрактографическими методами на изломах.

Нафталинистый излом – однородная поверхность разрушения, характеризующаяся наличием крупных гладких плоских участков (фасеток) с характерным блеском, напоминающим блеск нафталина. Такой излом проходит по кристаллографическим плоскостям крупных зерен, образо-

вавшихся при высокой температуре, и не имеет явных признаков макропластической деформации.

Камневидный излом – однородная поверхность разрушения, гладкая светло-серого цвета, чаще всего с металлическим блеском. Такой излом проходит по границам крупных зерен, образовавшихся при высокой температуре и имеющих грубую (камневидную) огранку.

#### *Причины образования*

Нафталинистый излом обусловлен наследованием продуктами распада текстуры крупных зерен аустенита после превращения  $\gamma - \alpha$ . Разрушение проходит по мелким зернам  $\alpha$ -фазы, объединенным в отдельные текстурированные группы в пределах объемов, отвечающих крупному зерну исходной структуры аустенита.

Камневидный излом обусловлен выделением на границах зерен избыточных, ограниченно растворимых в  $\gamma$ -фазе нитридов, сульфидов, фосфидов, карбидов, а также некоторых легирующих элементов.

#### *Способы исправления*

Стали, имеющие нафталинистый излом, подвергают высокотемпературной нормализации (нагрев на 150–200 °С выше  $A_{c3}$ ) с последующим высоким отпуском.

Стали, имеющие камневидный излом, подвергают высокотемпературной гомогенизации при 1100–1200 °С.

#### *Влияние на свойства*

В зонах металла сварного соединения с нафталинистым или камневидным изломом пластические характеристики и ударная вязкость понижены.

## **4. ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И ИЗЛОМОВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

Свойства сварных соединений в значительной степени определяются не только технологией сварки, но и особенностями строения соединяемых металлов.

Традиционные методы исследования структур (строения) металлов проводят на шлифах. Исследование изломов (поверхностей разрушения) позволяет выявлять наиболее слабые участки в строении металла, обусловленные прежде всего его неоднородностью и наличием в нем дефектов.

Под структурой металлов и сплавов понимают их строение, т.е. наличие различных по природе фаз, их размеры, количество, взаимное расположение, форму, неметаллические и металлические включения, несплошности.

Под изломом понимают поверхность, образующуюся при разделении твердого тела трещиной.

### *Исследование макроструктуры*

Для оценки поведения сварных и паяных конструкций большое значение имеет получение информации о макростроении металла в сварном соединении. Такая информация позволяет:

- оценивать влияние на разрушение неоднородности химического состава (например, в стали – распределение серы и фосфора, в жаропрочных сплавах – точно-пятнистую неоднородность и т.д.);
- идентифицировать макронесплошности, выявленные на макроструктуре (трещины, поры, рыхлоты, расслоения и др.);
- выявлять ликвационную неоднородность, дендритную структуру и другие особенности строения металла;
- выявлять изменения макроструктуры металла, обусловленные термическим воздействием при сварке и пайке.

### *Исследование микроструктуры*

При микроскопическом исследовании рекомендуется изучать структуру шва, зоны термического влияния, соединяемого металла, особенно в зоне разрушения. Это позволяет:

- определять структурные составляющие металла;
- определять величину зерна;
- устанавливать природу неметаллических включений;
- идентифицировать микронесплошности, выявляемые на поверхности разрушения (микрорасслоения, микротрещины, микрорыхлоты, микропоры и т.д.).

### *Исследование изломов*

Фрактография является одним из объективных и информативных способов оценки качества свариваемого металла и их швов. Этот способ изучения поверхности разрушения (изломов) позволяет выявлять слабые зоны в строении металла и оценивать причины преждевременного разрушения деталей и конструкций. Он находит самое широкое применение в производственных условиях.

## **4.1. Металлографические методы исследования структуры сварных соединений**

### ***4.1.1. Изготовление шлифов***

Шлифы из сварных соединений изготавливаются аналогично шлифам из свариваемых материалов. Стандартная технология изготовления шлифов должна отвечать следующим условиям:

- быть применимой к различным группам материалов и структур;
- обеспечивать хорошее качество шлифов для рядовых исследований как при ручном, так и при механизированном изготовлении шлифов;
- состоять из минимального количества операций;

– быть экономичной по затратам времени и средств.

Стандартная технология изготовления шлифов состоит из следующих операций:

– вырезки образцов – абразивная резка с обильным охлаждением с использованием абразивных кругов минимальной толщины из корунда на резиновой или из искусственных смол связке;

– заделки шлифов (при необходимости) в обойму, пластмассу и т.п.;

– плоского шлифования с водой на водостойкой шлифовальной бумаге;

– предварительного полирования алмазной пастой на тонком гладком носителе из натурального или искусственного шелка с повышающей эффект полирования спиртосодержащей жидкостью для улучшения скольжения;

– окончательного полирования суспензией глинозема на эластичном носителе с ворсистой поверхностью.

Основной набор оборудования состоит из отрезного станка и шлифовально-полировального станка с вращающимися кругами.

Вырезка, шлифование и полирование образца должны осуществляться таким образом, чтобы на поверхности шлифа оставался минимальный по глубине слой деформированного металла, что необходимо для выявления истинной структуры металла при травлении. На поверхности шлифа не должно быть царапин, ямок, пятен и др. Шлиф должен быть достаточно плоским, тогда появляется возможность изучать его при больших увеличениях.

### *Вырезка образцов*

Место вырезки образцов из участков со сварными или паяными швами определяется задачами исследования. При вырезке образцов из крупных деталей допускается механическая или огневая резка, но при этом необходимо, чтобы металл в плоскости будущего шлифа не нагревался во избежание искажения его структуры.

### *Монтаж образцов*

Монтаж образцов в различные приспособления осуществляется при изготовлении микрошлифов из образцов, имеющих сложную конфигурацию или малые размеры. Монтаж образцов необходим при использовании автоматических установок. Наиболее простой способ – заделка образцов в металлические зажимы-струбины либо запрессовка или заливка их в различные пластмассы и легкоплавкие сплавы.

### *Шлифование*

Для удаления грубого рельефа и наклепа на поверхности образца, получающегося при вырезке, применяется обработка его шлифовкой.

Шлифовка осуществляется путем истирания поверхности образца при последовательном переходе ко все более мелкозернистому абразивному материалу. Зернистость абразивных материалов определяется по ГОСТ 3647–71. Для изготовления микрошлифов механическим способом применяется шлифовальная бумага.

### *Полирование*

При полировании поверхности образца получают зеркальную поверхность с шероховатостью  $R_z = 0,05-0,04$  мкм, свободную от царапин.

Механическое полирование производится на станках и приборах, подобных используемым для шлифования. Полирование проводится одним или несколькими сортами абразивов, в качестве которых используют оксиды алюминия, хрома, магния, железа, алмазные смеси. Наиболее употребимыми являются пасты с алмазными зёрнами 15; 7; 2; 1 и 0,25 мкм. Обычно полируют на войлоке (ГОСТ 6989) или на бархате (ГОСТ 7081–93).

Электрохимическое полирование наиболее успешно применяется при работе с однофазными материалами (аустенитные и ферритные стали, медь, алюминий, титан, никель и т.п.), но этот метод малоприменим при работе с перлитными сталями, чугунами, многофазными сплавами.

### *Приготовление микрошлифов на крупных деталях*

При механическом приготовлении микрошлифа непосредственно на изделии (конструкции) предназначенное для исследования место шабруют, шлифуют абразивными кругами и полируют с помощью паст. Шлифование выполняют также с помощью наждачной бумаги, наложенной на эластичную подкладку, или абразивными порошками в виде суспензии, нанесенной на сукно.

Полирование производят валиком с фетром или сукном, смачиваемым водной суспензией оксида хрома или оксида алюминия. Для приготовления шлифов непосредственно на трубах пользуются переносной шлифовально-полировальной машинкой с гибким валом.

Существует несколько способов электрохимического полирования на поверхности изделия. Простейший из них: используется электролиз в тонкой пленке электролита между полируемой поверхностью и накладным катодом, представляющим собой пластину из нержавеющей стали, которая покрыта пористым кислотостойким материалом, обладающим эластичностью и хорошо удерживающим электролит. При этом используются переносные приборы, состоящие из блока питания, тампона с катодом и кюветы для электролита.

Составы электролитов при этом идентичны употребляемым при электрополировании образцов, но плотность тока и напряжение должны быть повышены, а время полирования остается прежним.

#### ***4.1.2. Выявление структуры сварных соединений***

При сварке металлографические шлифы позволяют исследовать следующие характеристики: форму шва, строение шва, глубину проплавления, протяженность зоны термического влияния, направление кристаллизации, фронт кристаллизации, зоны ликвации, дефекты шва (подрезы, трещины, различной природы включения, пористость, непровар и др.). Виды структур: первичная структура с перекристаллизацией или без нее, столбчатая, дендритная, волокнистая, глобулярная, структура зоны сплавления, незавершенность превращений, образование твердых растворов, эвтектик, интерметаллидных соединений.

Кроме того, контролируются металлографическим методом следующие характеристики: форма и геометрия шва, направление кристаллизации, зона соединения. Возникшие дефекты – плохое смачивание поверхности деталей припоем, недостаток припоя, включения, поры, трещины, структурные образования.

При наплавке на детали слоев из основного или инородного металла контролируются металлографические характеристики: структура слоя, толщина слоя, протяженность зоны термического влияния, возникшие дефекты, типы структур.

##### *Выявление макроструктуры*

Макроскопические исследования сварных и паяных соединений обычно проводят для изучения структурных изменений, происходящих в результате сварки. При этом выявляют: дефекты в строении металла сварных соединений (трещины, поры, рыхлоты, расслоения, неметаллические и металлические включения и др.); дендритную структуру, ликвационную неоднородность; для сталей – распределение серы и фосфора.

Исследования проводят на макрошлифах, но в случаях, когда вырезка образца из изделия невозможна, выявление макроструктуры проводят непосредственно на изделии. Исследования проводят визуально и при увеличении до 30 – 40 крат.

##### *Выявление микроструктуры*

Оно сводится к обнаружению границ между отдельными структурными составляющими и получению между ними рельефа на поверхности шлифа, что позволяет выяснить расположение отдельных фаз, двойниковых образований, норму, размеры, ориентировку отдельных зерен и т.п.

При наличии в структуре двух и более фаз основная задача травления сводится к выявлению границ между различными по природе фазами и избирательному выявлению зерен разных фаз. В многофазных сплавах вначале выявляют общую микроструктуру, т.е. межзеренные границы. Затем применяют способ избирательного выявления фаз.

Основными способами выявления микроструктуры металлов и сплавов являются химическое и электрохимическое травление. Реже используются окрашивание фаз и структурных составляющих путем создания на них тонких оксидных пленок (пленочное травление), магнитная металлография, метод осаждения тонких слоев металла из газовой фазы, ионное травление и др.

#### *Химическое травление растворами*

Химическое травление осуществляется путем погружения образца в травящий реактив или протирания образца реактивом с помощью тампона. Продолжительность травления чаще всего устанавливается опытным путем.

#### *Электрохимическое травление*

Электрохимическое травление – это травление, осуществляемое реагентами в условиях приложения извне электрического потенциала. Этот вид травления особенно эффективен при выявлении структуры чистых металлов и твердых растворов, а также сплавов, фазы которых мало различаются по своим электродным потенциалам.

Основные условия, обеспечивающие достаточно хорошее выявление микроструктуры, сводятся к следующему:

- электролит в отсутствие внешнего потенциала не должен быть агрессивным по отношению к отдельным структурным составляющим;
- при наложении потенциала взаимодействие электролита и металла должно в течение короткого времени приводить к избирательному воздействию на составляющие структуры или границы между ними;
- регулирование рабочего режима (плотности тока, напряжения, состава электролита, температуры) должно быть удобным и быстрым.

#### *Цветное (пленочное) травление*

Цветное (пленочное) травление основано на получении на поверхности шлифа тонких пленок оксидов или каких-либо иных химических соединений. Образование пленок приводит к изменению отражательной способности покрытых ими участков. При падении белого света на полированную поверхность металла, покрытую тонкой пленкой, возникает интерференция отраженных лучей, вследствие чего отдельные участки пленки кажутся окрашенными в разные цвета (эти цвета зависят от химического состава, физических свойств, ориентации элементов структуры).

Существуют три способа получения цветных оксидных пленок:

- химическое травление в горячих растворах сильных окислителей;
- электрохимическое травление в электролитах, образующих при взаимодействии с металлом комплексные соединения или соли;

– тепловое травление (нагрев в воздушной среде до температур, не нарушающих структуру металла).

#### *Химическое пленочное травление*

При этом способе травления в качестве окислителей применяют растворы, содержащие сильные щелочи (NaOH, KOH) и окисляющие травители с перманганатом, бихроматом, перекисью водорода и др. В этих растворах происходит избирательное травление карбидов, нитридов и фосфидов, на которых образуются пленки.

#### *Электрохимическое пленочное травление*

Электрохимический способ получения пленок имеет несколько вариантов.

При катодном травлении из раствора осаждается тонкий слой металла. Вследствие различия электрохимических потенциалов фаз пленки будут образовываться избирательно, и фазы будут окрашены в разные цвета.

При анодном травлении на поверхности шлифа будут возникать пленки оксидов металла шлифа. Пленки, образующиеся на зернах разных фаз, будут отличаться не только по толщине, но и по химическому составу.

## **4.2. Методы исследования поверхностей разрушения сварных соединений**

### ***4.2.1. Очистка поверхностей изломов***

Поверхность разрушения сварных соединений (изломов), возникшая при эксплуатации или натуральных испытаниях сварных конструкций, или в результате проведения испытаний образцов перед проведением дальнейших исследований, требует обязательной очистки в следующих случаях:

- при наличии масла, пыли, а также защитных покрытий, нанесенных для защиты изломов от повреждений;
- при наличии продуктов коррозии, образовавшихся при длительном хранении; при окислении изломов (например, после испытаний при низких температурах);
- при подготовке к электронно-микроскопическим исследованиям.

Консервация изломов необходима, если изломы подлежат длительному хранению или необходима их транспортировка.

### ***4.2.2. Фотографирование изломов***

Фотографирование изломов производят в следующих случаях:

- если излом при дальнейших исследованиях разрезают на части;

- если существует вероятность повреждения излома при исследовании, длительном хранении и т.д.;
- если затруднена транспортировка крупногабаритных изломов, подлежащих дальнейшему исследованию;
- если имеется необходимость иллюстрации изображений изломов в заключениях, отчетах и других материалах.

При фотографировании изломов предварительно определяют вид изображения (плоское, объемное), требуемое увеличение и размеры фотоизображения.

#### *Плоское изображение*

Фотоснимок должен быть максимально четким, хорошо передавать объем, форму и детали рельефа объекта. Объект фотосъемки должен быть тщательно подготовлен, должно быть правильно установлено освещение, обеспечена необходимая глубина резкости и точность экспозиции.

Для создания необходимого фона фотографируемого объекта используют белую или черную бумагу, картон или ткань, которые помещают за объектом. Для выявления таких дефектов в изломе, как кристалличность, светлые пятна и т.д., лучше применять черный фон. Общий вид излома, особенно волокнистое состояние, лучше фотографировать на белом фоне, чтобы избежать повышенной контрастности изображения. Наиболее достоверную передачу формы поверхности разрушения обеспечивает естественное рассеянное дневное освещение излома. Поверхность разрушения при этом освещается одинаково равномерно, на ней отсутствуют тени и блики. Фотовспышку при съемке изломов не применяют.

#### *Стереофотографическое изображение*

Стереофотографическое изображение поверхности разрушения позволяет представить излом трехмерным, объемным. Суть этого способа заключается в том, что получают два изображения изучаемого объекта под углом одно к другому  $10\text{--}14^\circ$ , которые затем рассматривают одновременно.

#### *Объемное изображение*

Плоская фотография, фиксирующая выбранную проекцию объекта, дает неполную информацию и недостаточно объективна, что особенно важно при экспертной оценке качества металла по виду изломов.

### **4.2.3. Оптические методы исследования строения изломов**

#### ***Изучение макростроения изломов***

Цель исследования макростроения изломов, в том числе сварных соединений, – установление характера излома, определение влияния на него металлургических и технологических факторов, выявление макро-

дефектов. При качественном анализе макростроения изломов устанавливают:

- вид и характер разрушения металлов по признакам, характеризующим качество металла;
- структурные элементы поверхности разрушения, отличающиеся от оптимального строения излома и обусловленные отклонениями от оптимальной технологии изготовления основного металла и сварочного соединения;
- дефекты структуры, приводящие к снижению свойств сварного соединения;
- макронесплошности, имеющиеся в свариваемом металле и сварном соединении (трещины, флокены, поры, расслоения и др.);
- макронесплошности, образующиеся при поломке на поверхности разрушения (шиферность, расслоения и др.);
- величину дендритов, ликвационных неоднородностей.

С помощью количественного анализа устанавливают количество, размеры и распределение элементов строения поверхности разрушения, отличающихся от оптимальных, и определяют степень их отрицательного влияния на свойства металла.

При макроскопическом исследовании изломов устанавливают также участки поверхности разрушения, которые необходимо исследовать методами микроанализа.

В зависимости от условий и причин образования изломы по морфологии поверхности разрушения делятся на следующие три группы: изломы волокнистые и кристаллические; изломы, особенности строения которых обусловлены неоднородностью металла; изломы, в которых проявляются несплошности в металле.

К первой группе относятся все разновидности волокнистых и кристаллических (вязких и хрупких) изломов, которые образуются при различных структурных составляющих стали.

Ко второй группе изломов относятся изломы, отклонения в строении которых от волокнистых и кристаллических обусловлены неоднородностью строения металла.

К третьей группе относятся изломы, особенности строения которых обусловлены несплошностями, существующими в металле.

Типичными изломами конструкционных сталей являются волокнистый и кристаллический.

Волокнистое строение изломов служит признаком вязкого разрушения металла, которое сопровождается большей затратой энергии, чем разрушение того же образца с кристаллическим строением излома.

Вид излома зависит от температуры испытания, а температурный интервал, в котором определяют характер разрушения, называют температурным интервалом хрупкости, выше которого строение излома полно-

стью волокнистое, ниже – кристаллическое. Температуру, при которой наблюдается отчетливо выраженная смена механизма разрушения с вязкого на хрупкое, называют критической температурой хрупкости (КТХ) и определяют на образцах, изготовленных по ГОСТ 9454–78.

На температурный интервал хрупкости могут оказывать влияние скорость деформации, масштабный фактор (размеры технологических проб) и геометрия надреза. Чем меньше влияние перечисленных факторов на образование волокнистого излома при данной температуре испытания, тем «более устойчивым» можно считать волокнистый излом. Устойчивость волокнистого излома повышается при увеличении интервала между температурой испытания и критической температурой хрупкости.

Волокнистые изломы в конструкционных сталях подразделяются на собственно волокнистые, наблюдаемые после закалки с высоким отпуском, сухие волокнистые – после закалки с низким отпуском, неоднородные волокнистые – в деформированных сталях.

Вид кристаллических изломов связан с размером фасеток разрушения, обусловленных величиной зерен. Различают кристаллические и мелкокристаллические изломы, подразделяющиеся, в свою очередь, на бархатистые и фарфоровидные.

### ***Изучение микростроения изломов***

#### *Методы световой микроскопии*

Цели исследования – разрешение тех элементов строения поверхности разрушения, которые не разрешаются при небольших увеличениях, а также определение участков поверхности разрушения, которые необходимо исследовать при значительно больших увеличениях.

При исследовании предварительно просматривают изломы при минимально возможном увеличении и выявляют элементы микрорельефа, требующие изучения при больших увеличениях: фасетки, выделения по границам зерен, различные включения и микронесплошности.

Для исследования используются металлографические микроскопы, позволяющие получать увеличение от 40–50 до 900–2000 крат. Для удобства изучения изломов используют гониометр.

Микроскопическое строение отдельных участков излома изучают с использованием прямого, косого и темнопольного освещения. При исследовании изломов в прямом свете рекомендуется выбирать положение поверхности элементов рельефа так, чтобы чередование света и тени создавало объемную картину. Применение косого освещения позволяет увеличить контрастность изображения в связи с образованием теней от рельефа поверхности излома. Применение темнопольного освещения дает возможность высвечивать отдельные плоские участки изломов (фасетки), что важно при определении их размеров. Однако необходимо учитывать, что освещенность отдельных участков поверхности разрушения в этом случае будет неравномерной.

### *Методы электронной микроскопии*

Методы электронной микроскопии позволяют расширить и дополнить сведения, получаемые с помощью макро- и микроисследований структуры и изломов, более подробно изучить особенности их тонкого строения, элементы микрорельефа, необходимые для определения механизма разрушения, механизмы пластической деформации в зоне разрушения, элементы структуры, являющиеся источником зарождения микротрещин, а также микронеоднородности в строении металла, проявляющиеся в изломе.

Для проведения микрофрактографического исследования изломов используют просвечивающие (ПЭМ) и растровые (РЭМ) электронные микроскопы.

Методы просвечивающей и растровой микроскопии характеризуются сложностью аппаратуры и методическими особенностями. Поэтому ниже приводится краткое описание возможностей этих методов при исследовании металлических материалов для того, чтобы специалисты могли выбрать в случае необходимости подходящие методики, позволяющие решать конкретные задачи, связанные с разработкой оптимальных технологических процессов, устранением причин брака или установлением причин преждевременного разрушения сварных конструкций. Более полно эти методы изложены в специальной литературе.

Разрешающая способность ПЭМ значительно выше (2,5–5 нм), чем РЭМ (7–10 нм); ПЭМ позволяет изучать более мелкие детали на поверхности разрушения, чем РЭМ.

Выбирая тот или иной метод исследования изломов (ПЭМ или РЭМ), прежде всего следует учитывать различия в подготовке объектов исследования. С помощью РЭМ изучают непосредственно поверхность разрушения, с помощью ПЭМ – реплики с изломов. Изготовление реплик для ПЭМ – процесс очень трудоемкий. Исследование изломов методом РЭМ менее трудоемко: требуется только вырезка образцов, размеры которых соответствуют размерам объектодержателя. Кроме того, РЭМ позволяет исследовать пластиковые реплики, оттененные металлом, снимаемые с крупногабаритных изломов. РЭМ дает возможность существенно проще, чем ПЭМ, изучать точечные или единичные элементы структуры излома (например, источники зарождения разрушения); РЭМ позволяет исследовать образцы с площадью излома до  $20 \times 70$  мм, в то время как максимальный размер реплик для ПЭМ –  $3 \times 3$  мм. Благодаря этому при использовании РЭМ можно регистрировать одновременно многие элементы излома и устанавливать взаимосвязь между ними. Для этой же цели при применении ПЭМ для получения сравнимой достоверности необходимо исследовать на репликах по меньшей мере в два раза большую площадь поверхности, так как необходимо обеспечить перекрытие реплик; кроме того, значительная часть площади реплики экранируется

поддерживающей сеткой. Однако ПЭМ дает возможность изучать отдельные участки массивных изломов, не разрезая их, проводить структурный анализ отдельных интерметаллических и неметаллических частиц и карбидов, экстракционных реплик.

Недостатки исследования поверхности разрушения с помощью РЭМ:

- искажение размеров элементов излома, располагающихся под большими углами к электронному пучку;
- затрудненность изучения изломов со слабо выраженным плоским рельефом поверхности.

Недостатки исследования поверхности разрушения с помощью ПЭМ:

- возможность повреждения поверхности излома при снятии реплик; погрешности, вносимые при изготовлении реплик;
- невозможность снятия реплик с изломов, имеющих грубую и сильно развитую поверхность;
- невозможность исследования микротрещин, не совпадающих с поверхностью разрушения.

Большой дополнительный материал может быть получен путем сопоставления растрового изображения с изображением, полученным методом просвечивающей микроскопии. Так как разрешающая способность РЭМ составляет 7–10 нм, а ПЭМ 2,5–5,0 нм, это позволяет при исследовании на ПЭМ выявлять более мелкие детали микрорельефа, не разрешаемые при использовании РЭМ. В связи с этим методы РЭМ и ПЭМ дополняют друг друга.

Полезным методическим приемом является нанесение на поверхность изломов пластиковой координационной сетки, позволяющей точно фиксировать место, которое будет изучаться с помощью того или иного электронного микроскопа.

Кроме того, сопоставление фрактограмм с данными электронно-микроскопических исследований структуры металла вблизи зоны разрушения позволяет: сравнить морфологию выделений в матрице металла и на поверхности разрушения; оценить влияние субструктуры на процесс разрушения; определить толщину пленочных выделений на границах зерен и их протяженность и т.д.

Важное значение может иметь сопоставление фрактограмм РЭМ и ПЭМ, полученных с участков поверхности разрушения, имеющих близкое строение. ПЭМ, обладающий большей разрешающей способностью, чем РЭМ, позволяет выявить более мелкие детали микрорельефа, а РЭМ – исследовать большую площадь поверхности разрушения и при этом рассматривать отдельные участки последовательно от малых до больших увеличений. Это особенно необходимо при наличии на поверхности разрушения дисперсных выделений.

Увеличение при работе на электронном микроскопе выбирают в зависимости от решаемой задачи: общее строение изломов рекомендуется изучать при увеличении до 10 000 крат, характер распределения вторичных фаз и пластической деформации – до 30 000 крат.

#### ***4.2.4. Физические методы исследования структуры и поверхностей разрушения сварных соединений***

При изучении качества металла сварных соединений, в том числе их поверхности разрушения, нередко необходимо исследовать химический и фазовый составы поверхности, атомно-кристаллическое строение, а также строение и химический состав включений, оказывающих влияние на процесс разрушения. Эти включения могут представлять собой пленочные прослойки толщиной в несколько атомных слоев или быть точечными размером в несколько долей микрометра.

Традиционные методы определения химического состава (макрометоды) в этом случае неэффективны, и в настоящее время для этих целей применяются физические методы анализа микроколичеств вещества, отличающиеся высокой локальностью, позволяющие получать информацию о составе тончайших поверхностных слоев, а также микрообъектов на поверхности разрушения.

Широкому внедрению физических методов при исследовании структуры и изломов способствует освоение серийного производства специализированной аппаратуры, которая не требует специфических мер подготовки объектов исследований.

Ниже приведены методы микроанализа, достаточно надежные при проведении экспериментов и интерпретации результатов, в том числе при исследовании природы разрушения металлических материалов:

- рентгеноспектральный микроанализ (РСМА);
- оже-электронная спектроскопия (ОЭС);
- масс-спектрометрия вторичных ионов (МСВИ);
- электронная спектроскопия для химического анализа (ЭСХА);
- лазерный спектральный микроанализ (ЛСМА).

Эти методы, основанные на анализе вторичного излучения (фотоны, электроны, ионы), возникающего при энергетическом воздействии на поверхность металлических материалов, подробно рассмотрены в специальной литературе. При выборе физического метода микроанализа химического состава поверхности разрушения следует учитывать требования, обусловленные ее специфическим строением.

При анализе тонких пленочных выделений, по которым прошло разрушение, целесообразно исследовать обе половины излома, так как разрушение могло произойти по границам раздела «матрица металла – пленочное выделение». В этом случае изучаемое выделение будет нахо-

даться только на одной половине излома. Следует учитывать, что хрупкие включения могут частично выкрашиваться.

При исследовании изломов очень важно предусматривать возможность повторного анализа элементов строения изломов и учитывать это при выборе методов микроанализа.

По эффективности применения для решения наиболее часто встречающихся практических задач методы микроанализа можно разделить на две группы:

1. Методы ЭСХА, МСВИ позволяют проводить интегральное измерение химического состава тонких поверхностных слоев изломов (определяющим является разрешающая способность по глубине и чувствительность анализа). Методы этой группы особенно эффективны при изучении поверхностей разрушения, образование которых связано с наличием в материале тонких пленочных выделений, зернограничных прослоек и других элементов строения изломов, имеющих большую площадь при незначительной толщине, что затрудняет их идентификацию при использовании световой или электронной микроскопии. Особенность этих методов – повышенные требования к чистоте поверхности образцов.

2. Методы РСМА, ОЭС, ЛТСМА позволяют определять химический состав микроколичеств материала в точечном объеме (определяющим является локальность по площади, возможность проведения анализа на заданном участке поверхности и локальная чувствительность анализа). Методы этой группы особенно эффективны при исследовании включений, имеющих размеры в несколько микрометров.

В последнее время для изучения атомно-кристаллической структуры и фазового состава поверхности разрушения успешно используется метод ядерного гамма-резонанса (ЯГР). В отличие от других физических методов исследования этот метод позволяет проводить фазовый анализ поверхности с развитым рельефом, исследовать структуру в поверхностных слоях толщиной менее 1 мкм и изучать структурные и концентрационные неоднородности на атомарном уровне.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учебное пособие предназначено для студентов университета, изучающих дисциплины «Контроль качества сварных соединений» и «Сварочные материалы» и получающих квалификацию инженера по специальности «Оборудование и технология сварочного производства» по направлению «Машиностроительные технологии и оборудование» и бакалавра по профилю «Оборудование и технология сварочного производства» по направлению «Машиностроение», для студентов специальностей «Металловедение и термическая обработка металлов», «Металловедение и термическая обработка металлов и высокопрочных сплавов», «Материаловедение и технология материалов (в машиностроении)» по направлению «Материаловедение и технология материалов», а также при выполнении курсовых и дипломных проектов по соответствующим дисциплинам.

В нем приведены сведения об основных методах контроля сварных соединений. Рассмотрены специальные и разрушающие методы контроля. Описываются методы технологических испытаний.


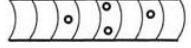









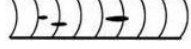





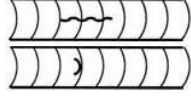








В пособии рассмотрены основные типы дефектов сварных соединений, встречающиеся при производстве металлоконструкций.

Рассмотрены металлографические методы исследования структуры сварных соединений; методы исследования поверхностей разрушения сварных соединений.




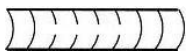
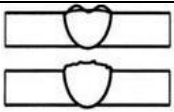
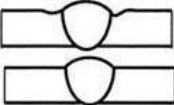
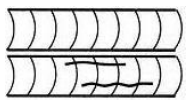
Все эти сведения дают студентам представление о контроле качества сварных соединений и позволяют практически использовать полученные знания при обеспечении высокого качества выпускаемой продукции.

**ПРИЛОЖЕНИЕ**

**ОБОЗНАЧЕНИЯ ВИДА И ХАРАКТЕР ДЕФЕКТОВ  
СТЫКОВЫХ ШВОВ**

Обозначение		Наименование дефекта	Схематическое изображение дефекта	
ГОСТ	Междунар.		по сечению	по радиограмме
Л	<i>Aa</i>	Пора сферическая		
	<i>A</i>	Пора канальная		
ЦП	<i>Ab</i>	Цепь пор		
СП	<i>Ad</i>	Группа пор		
	<i>Ae</i>	Пора линейная (протяженная)		
Ш	<i>Ba</i>	Шлак компактный		
ЦШ	<i>Bb</i>	Шлак линейный (протяженный)		
В	<i>Bc</i>	Включение металлическое		
О	<i>C</i>	Несплавление		
Нк	<i>Da</i>	Непровар в корне одностороннего шва без подреза		
Нв	<i>Db</i>	Непровар в корне одностороннего шва с подрезом		
Нр	<i>Dc</i>	Непровар двустороннего шва		
Тв	<i>Ea</i>	Трещина продольная		

Окончание приложения

Обозначение		Наименование дефекта	Схематическое изображение дефекта	
ГОСТ	Междунар.		по сечению	по радиограмме
Тп	<i>Eb</i>	Трещина поперечная		
Тр	<i>Ec</i>	Трещина разветвленная		
	<i>Fa</i>	Чрезмерный провар корня		
	<i>Fb</i>	Неровности шва		
	<i>Fc</i>	Подрезы		

Учебное издание

СЫЧКОВ Александр Борисович  
ТЕРЕНТЬЕВ Дмитрий Вячеславович  
МИХАЙЛИЦЫН Сергей Васильевич  
ШЕКШЕЕВ Максим Александрович

## **КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

Учебное пособие

Редактор Н.П. Боярова  
Компьютерная верстка Т.В. Леонтьевой

Подписано в печать 20.03.2015. Рег. № 15-15. Формат 60x84 1/16. Бумага тип. № 1.  
Плоская печать. Усл.печ.л. 6,25. Тираж 50 экз. Заказ 147.



Издательский центр ФГБОУ ВПО «МГТУ»  
455000, Магнитогорск, пр. Ленина, 38  
Полиграфический участок ФГБОУ ВПО «МГТУ»