Л.П. Герасимова

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА

Сварных и паяных соединений

Москва
Интермет Инжиниринг
2007

УДК 621.791.052/.3:658.652
ББК 30.607;7*3,1)+34.441.(я2)
Г27

Издано при финансовой поддержке Федерального агентства
по печати и массовым коммуникациям в рамках
Федеральной целевой программы «Культура России»

Герасимова Л.П.

Г27 Контроль качества сварных и паяных соединений: справочное издание / Л.П. Герасимова. – М.: Интермет Инжиниринг, 2007. – 376 с.: ил. 254.

ISBN 5-89594-137-0

Систематизированы и подробно описаны методы контроля свойств сварных и паяных соединений, проводимые в соответствии с государственными и международными стандартами. Рассмотрены дефекты в сварных соединениях конструкционных материалов и свариваемых металлах, причины их образования, методы надежной идентификации, предупреждения и устранения, влияние на свойства. Представлен обширный иллюстративный материал характерных структур и дефектов.

Предназначено для инженерно-технических и научных работников предприятий всех отраслей промышленности, применяющих сварку, пайку и термическую резку металлов, а также для специалистов, занимающихся контролем качества сварных и паяных соединений. Может быть полезен студентам вузов машиностроительного профиля.

УДК 621.791.052/.3:658.652
ББК 30.607;7*3,1)+34.441.(я2)

СПРАВОЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Герасимова Лилия Петровна

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ И ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Редактор *В.П. Молокова*
Корректор *И.М. Мартынова*
Технический редактор *Н.П. Новикова*
Компьютерная верстка *Л.П. Ушанкиной*
Обложка художника *Н.П. Новиковой*

Изд. лиц. код 221ЛР № 090171 от 17.04.97. Подписано в печать . Формат
Бум. офсетная № 1. Печать офсетная. Гарнитура . Усл. печ. л. 23,5.
Уч.-изд. л. 30,6. Тираж экз. Заказ

«Интермет Инжиниринг»
103006, Москва, Старопименовский пер., д. 8, стр. 1–1А

ППП «Типография «Наука» Академиздатцентр РАН
121099, Москва, Шубинский пер., 6

ISBN 5-89594-137-0

© Герасимова Л.П., 2007
© Оформление. «Интермет Инжиниринг», 2007

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 7

Глава 1. Контроль свойств сварных соединений 9

1.1. Методы неразрушающего контроля 9
1.1.1. Общие положения 9
1.1.2. Радиационный контроль 14
1.1.3. Акустический контроль 18
1.1.4. Магнитный контроль 19
1.1.5. Течеискание 21
1.1.6. Капиллярный контроль 21
1.2. Методы механических испытаний 22
1.2.1. Общие положения 22
1.2.2. Правила отбора проб, заготовок и образцов 24
1.2.3. Испытания при статических нагрузках 26
1.2.4. Измерение твердости 56
1.2.5. Испытания при ударных нагрузках 64
1.2.6. Испытания при циклических нагрузках 70
1.3. Методы коррозионных испытаний 74
1.3.1. Виды и показатели коррозии 74
1.3.2. Испытания на коррозионное растрескивание 76
1.3.3. Испытания на коррозионное расслаивание 80
1.3.4. Испытания на межкристаллитную коррозию 82
1.3.5. Испытания на питтинговую коррозию 84
1.3.6. Испытания на коррозионные потери в атмосферных условиях 84
1.3.7. Электрохимические коррозионные испытания 88
1.3.8. Металлографическое определение коррозионных поражений 89
1.4. Методы технологических испытаний 90
1.4.1. Испытания на сопротивляемость образованию холодных трещин при сварке плавлением 91
1.4.2. Испытания на сопротивляемость образованию горячих трещин при сварке плавлением 91
1.4.3. Оценка влияния сварки плавлением на основной металл 92
1.4.4. Оценка хладостойкости сварных конструкций по реакции на ожог сварочной дугой 92
1.4.5. Испытания на релаксацию напряжений 95
1.4.6. Определение коррозионных поражений металлографическим методом. 96
1.4.7. Определение содержания диффузионного водорода в наплавленном металле и металле шва при сварке 96

Перечень ГОСТов, регламентирующих контроль качества сварных соединений 96

Глава 2. Контроль свойств паяных соединений 103
2.1. Общие положения 103

2.2. Методы неразрушающего контроля 105
2.3. Методы механических испытаний 109
2.3.1. Испытания на растяжение и длительную прочность 109
2.3.2. Испытания на удар 113
2.3.3. Испытания на изгиб 116
2.3.4. Испытания на усталость паяных образцов из металлов в много- и малоцикловой упругой и упругопластической областях при растяжении–сжатии, изгибе и кручении, при симметричных и асимметричных циклах напряжений 117
2.4. Методы технологических испытаний 119

Перечень ГОСТов, регламентирующих контроль качества паяных соединений 123

Глава 3. Дефекты в сварных соединениях 125

3.1. Классификация и обозначения 125
3.2. Трещины 128
3.3. Поры 151
3.4. Усадочные раковины 157
3.5. Непровар 158
3.6. Несплавление 161
3.7. Слипание 162
3.8. Неметаллические включения 163
3.9. Металлические включения 167
3.10. Флокены 169
3.11. Подрез 171
3.12. Наплыв 172
3.13. Прожог 174
3.14. Кратер 175
3.15. Перегрев металла 176

Глава 4. Основные дефекты в свариваемом металле, влияющие на качество сварных соединений 179

4.1. Общие положения 179
4.2. Газовая раковина 179
4.3. Газовая пористость 181
4.4. Газовые пузыри (пузырьки) 184
4.5. Усадочная раковина 189
4.6. Усадочная рыхлость 191
4.7. Неметаллические включения 193
4.8. Точечная неоднородность 197
4.9. Интерметаллидные (интерметаллические) включения 199
4.10. Инородные металлические включения (корольки) 200
4.11. Трещины 203
4.12. Волосовины 210
4.13. Скворечник 211
4.14. Надрывы 213
4.15. Расслоения 213
4.16. Закаты 216
4.17. Флокены 218
4.18. Плены 221

4.19. Наслоения 223
4.20. Крупнокристаллическая структура (разнозернистость) 224
4.21. Перегрев 226
4.22. Пережог (зернограничено-окисленный излом) 232

Глава 5. Исследование структуры (строения) и изломов (поверхностей разрушения) сварных и паяных соединений и соединяемых металлов 235

5.1. Общие положения 235
5.2. Металлографические методы исследования структуры сварных и паяных соединений 236
5.2.1. Изготовление шлифов 236
5.2.2. Практические рекомендации по изготовлению шлифов из конструкционных материалов 240
5.2.3. Практические рекомендации по изготовлению специальных шлифов 243
5.2.4. Выявление структуры сварных и паяных соединений 245
5.2.5. Характерные структуры свариваемых и паяемых конструкционных материалов 258
5.3. Методы исследования поверхностей разрушения сварных и паяных соединений 274
5.3.1. Очистка поверхностей изломов и их консервация 274
5.3.2. Фотографирование изломов 276
5.3.3. Оптические методы исследования строения изломов 282
5.3.4. Основные физические методы исследования структуры и поверхностей разрушения сварных соединений 293
5.3.5. Фрактографические способы определения критической температуры хрупкости (КТХ) стали 300
5.3.6. Оценка влияния включений на разрушение металлов 306

Глава 6. Применение метода температурной микроскопии для исследования сварных соединений 308

6.1. Возможности и преимущества метода 308
6.2. Методики проведения исследований металлических материалов при термодеформационном воздействии 309
6.3. Методические особенности исследования процессов деформирования и разрушения образцов 315
6.4. Сочетание метода температурной микроскопии с другими методами исследования структуры металлов 321
6.5. Особенности пластической деформации и разрушения сварных соединений 329
6.6. Примеры использования метода температурной микроскопии для исследования структурных особенностей и разрушения сварных соединений в условиях термодеформационного воздействия 334
6.6.1. Формирование зеренной структуры и внутризеренной неоднородности при образовании аустенита в околошовной зоне при нагреве 334
6.6.2. Моделирование термодеформационных циклов сварки 336
6.6.3. Формирование структурной неоднородности в сварных соединениях из стали 30ХНМ 337
6.6.4. Возникновение трещин в сварных разнотолщинных стальных отливках 337

Термины и определения 343

Библиографический список 351

Приложения..... 353

I. Перечень основных государственных стандартов, используемых в процессе производства сварных и паяных изделий и термической резки 353

II. Перечень основных международных стандартов (ИСО), рекомендуемых для использования в процессе производства сварных и паяных изделий и конструкций 364

III. Характеристика основного оборудования для контроля качества сварных и паяных соединений 370

ПРЕДИСЛОВИЕ

Сварка и пайка – прогрессивные методы получения неразъемных соединений в промышленности и строительстве. Основным материалом для сварки и пайки конструкций служит сталь. Кроме нее в больших объемах применяются также алюминиевые и титановые сплавы, никелевые, медные и тугоплавкие металлы.

Главная задача в области сварки и пайки – 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 и паяных соединений следует руководствоваться требованиями, предъявляемыми к сварным и паяным соединениям (ТУ, НТД), но прежде всего государственными и международными стандартами.

Вопросы качества приобретают особую актуальность в условиях дальнейшей интеграции России в единое мировое экономическое пространство. Сегодня для многих российских экспортно-ориентированных предприятий соответствие их металлопродукции требованиям российских и международных стандартов становится средством конкурентной борьбы с иностранными компаниями на внутреннем и международном рынках. Это вынуждает предприятия совершенствовать свои производственные технологии.

Для контроля сварных и паяных соединений разработаны специальные методы и аппаратура. Контроль готовых сварных и паяных соединений в большинстве случаев должен осуществляться стандартными методами и средствами контроля. Главная задача контроля – выявлять дефекты в сварных и паяных 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, которые здесь не рассматриваются, 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 и паяных 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 и паяных конструкциях, используются механические, 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 и паяных конструкций.

Контроль сварных и паяных соединений необходим для определения качества швов 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 или пайки, заключающийся в проверке исправности используемой аппаратуры и приспособлений, правильности режимов сварки, пайки 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 и паяных образцов и, при необходимости, проведение металловедческих исследований.

Первые два вида контроля широко освещены в специальной литературе и в данном справочнике изложены кратко.

Третий вид контроля рассмотрен подробно. В него включены следующие виды контроля и исследований: методы неразрушающего физического контроля; испытания механических свойств; технологические испытания; коррозионные испытания; металловедческие исследования.

С целью унификации определенных качеств сварных и паяных соединений большинство методов контроля их свойств, рассмотренных в справочнике, стандартизованы и должны проводиться в соответствии с ГОСТами (государственными стандартами) и ИСО (международными стандартами), указанными в Приложениях I и II.

Автор считает своим долгом отметить внимание, проявленное к его работе докторами технических наук А.А. Ежовым и Ф.А. Хромченко. Автор благодарит кандидатов технических наук А.И. Савченко и А.М. Глаголеву за предоставленный ими иллюстративный материал, а также Д.Е. Голубкова и Н.И. Голубкову – за участие в оформлении рукописи справочника.

Глава 1
КОНТРОЛЬ СВОЙСТВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

1.1. МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

1.1.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

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 ГОСТе 3242–79 (в соответствии с ГОСТом 19521–74 и ИСО 2437–72).

В ГОСТе 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. Термины, применяемые в стандарте, и их определения приводятся в соответствии с ГОСТами 15467–79; 15895–77; 16504–81; 2601–84.

Стандарт 25997–83 устанавливает виды и методы контроля, выявляемые дефекты, чувствительность методов и области их применения (табл. 1). В этой таблице приводятся и другие действующие ГОСТы и ИСО на отдельные методы контроля.

Ниже более подробно рассмотрены сведения о технических возможностях стандартизованных методов неразрушающего контроля, указанных в табл. 1 для сварных соединений.

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

Таблица 1. **Неразрушающие методы контроля качества сварных соединений (с учетом ГОСТа 3242–79)**

Номер п/п	Вид контроля (ВК)	Метод контроля (МК)	Выявляемые дефекты (ВД)	Чувствительность метода (ЧМ)	Стандарт на метод контроля и область применения метода (СОП)
1	Технический осмотр	Внешний осмотр и измерение	Поверхностные дефекты	Выявляет дефекты минимальных размеров при осмотре и измерении сварного соединения с использованием оптических (с увеличением до 10 крат) и измерительных приборов. Выявляет несплошности, отклонения размера и формы сварного соединения от заданных более чем на 0,1 мм, а также поверхностное окисление сварного соединения	Не ограничивается
2	Радиационный	Радиографический, радиоскопический, радиометрический	Внутренние и поверхностные дефекты (несплошности), а также дефекты формы соединения	Зависит от характеристик контролируемого сварного соединения и средств контроля в пределах от 0,5 до 10 % контролируемой толщины металла	ГОСТы 7512–82; 18353–70; 20426–82; 24034–80; 23055–78
3	Акустический	Ультразвуковой	Внутренние и поверхностные дефекты (несплошности)	Размер, количество и характер дефектов определяют в условных показателях по ГОСТ 14782–86. Предельная чувствительность зависит от толщины сварного соединения, мм	ГОСТы 14782–86; 22727–88
4	Капиллярный	Цветной, люминесцентный, люминесцентно-цветной	Дефекты (несплошности), выходящие на поверхность	Чувствительность и достоверность метода зависят от качества подготовки поверхности соединения к контролю. Условные уровни чувствительности – по ГОСТ 18442–80	ГОСТы 18442–80; 25222–80
5	Магнитный	Магнитоферрозондовый	Поверхностные и подповерхностные несплошности	Выявляет внутренние несплошности, расположенные на глубине до 10 мм от поверхности соединения, и разнонаправленные дефекты. Условные уровни чувствительности – по ГОСТ 21104–75	ГОСТы 21104–75; 21105–75; 24450–80; 25225-82, 30415–96

6	»	Магнитопорошковый	То же	Выявляет внутренние несплошности, расположенные на глубине до 2 мм включительно. Условные уровни чувствительности – по ГОСТ 21105–75	ГОСТ 21105–75
7	»	Магнитографический	Поверхностные, подповерхностные и внутренние несплошности в ферромагнитных материалах	Выявляет внутренние несплошности толщиной от 2 до 7 % от толщины контролируемого металла. Контролируемая толщина не более 25 мм	Сварные стыковые соединения, выполненные дуговой газовой сваркой, конструкции из ферромагнитных материалов
8	Течеискание	Радиационный	Сквозные дефекты	От $1 \cdot 10^{-9}$ до $1 \cdot 10^{-14}$ мм^3·МПа/с	Места течей в сварных соединениях, работающих под давлением, а также в замкнутых конструкциях при невозможности применения других методов течеискания. Контролируемая толщина не ограничивается
9	»	Масс-спектрометрический	То же	По способу накопления при атмосферном давлении – до $1 \cdot 10^{-6}$ мм^3·МПа/с; по способу вакуумирования – от $1 \cdot 10^{-7}$ до $1 \cdot 10^{-4}$ мм^3·МПа/с; по способу щупа – до $1 \cdot 10^{-5}$ мм^3·МПа/с	Способ накопления давления – для определения суммарной степени утечек замкнутых конструкций; способ вакуумирования – для определения суммарной степени утечек замкнутых и открытых конструкций; способ щупа – для определения локальных течей в сварных соединениях крупногабаритных конструкций. Контролируемая толщина не ограничивается
10	»	Манометрический	Сквозные дефекты	По способу падения давления – от $1 \cdot 10^{-3}$ до $7 \cdot 10^{-3}$ мм^3·МПа/с; по способу дифференциального манометра – до $1 \cdot 10^{-8}$ мм^3·МПа/с	Сварные соединения замкнутых конструкций, работающих под давлением: способ падения давления – для определения величины суммарных утечек; способ дифференциального манометра – для определения локальных утечек. Контролируемая толщина не ограничивается

Продолжение табл. 1

Номер п/п	ВК	МК	ВД	ЧМ	СОП
11	Течеискание	Галоидный	Сквозные дефекты	По способу щупа атмосферного – до $5\cdot10^{-4}$ мм^3·МПа/с; по способу щупа вакуумного – до $1\cdot10^{-6}$ мм^3·МПа/с	Места и величины локальных течей в сварных соединениях замкнутых конструкций, работающих под давлением. Контролируемая толщина не ограничивается
12	То же	Газоаналитический	То же	По фреону 12 (90 %) в смеси с воздухом – от $2\cdot10^{-4}$ до $4\cdot10^{-4}$ мм^3·МПа/с	Места локальных течей в сварных соединениях замкнутых конструкций, работающих под давлением. Контролируемая толщина не ограничивается
13	»	Химический	»	По аммиаку – до $6{,}65\cdot10^{-4}$ мм^3·МПа/с; по аммонию – от $1\cdot10^{-1}$ до 1 мм^3·МПа/с	Места локальных течей в сварных соединениях открытых и закрытых конструкций, работающих под давлением или предназначенных для хранения жидкостей. Контролируемая толщина не ограничивается
14	»	Акустический	»	Не менее $1\cdot10^{-2}$ мм^3·МПа/с	Места течей в сварных соединениях подземных водо- и газопроводах высокого давления. Контролируемая толщина не ограничивается
15	»	Капиллярный	»	Люминесцентный метод – от $1\cdot10^{-2}$ до $5\cdot10^{-2}$ мм^3·МПа/с; люминесцентно-цветной – от $1\cdot10^{-2}$ до $5\cdot10^{-2}$ мм^3·МПа/с; люминесцентно-гидравлический – от $1\cdot10^{-4}$ до $5\cdot10^{-4}$ мм^3·МПа/с; смачиванием керосином – до $7\cdot10^{-3}$ мм^3·МПа/с	ГОСТ 18442–80
16	»	Наливом воды под напором	»	От $3\cdot10^{-4}$ до $2\cdot10^{-2}$ мм^3·МПа/с	Места локальных течей в сварных соединениях закрытых конструкций, работающих под давлением. Контролируемая толщина не ограничивается

17	»	Наливом воды без напора	»	Не более $1 \cdot 10^{-3}$ мм^3·МПа/с	Места локальных течей в сварных соединениях открытых конструкций. Контролируемая толщина не ограничивается
18	»	Поливание струей воды под напором	»	Не более $1 \cdot 10^{-1}$ мм^3·МПа/с	То же
19	»	Поливание рассеянной струей воды	»		Места локальных течей в сварных соединениях открытых конструкций. Контролируемая толщина не ограничивается
20	»	Пузырьковый	»	Пневматический: надувом воздуха – от $7 \cdot 10^{-4}$ до $1 \cdot 10^{-3}$ мм^3·МПа/с; обдувом струей сжатого воздуха – до $1 \cdot 10^{-2}$ мм^3·МПа/с; пневмогидравлический: аквариумный – до $1 \cdot 10^{-3}$ мм^3·МПа/с; бароаквариумный – от $5 \cdot 10^{-4}$ до $1 \cdot 10^{-5}$ мм^3·МПа/с; вакуумный (с применением вакуум-камер) – до 1·10 мм^3·МПа/с	Места локальных течей. Пневматический: надувом воздуха – сварные соединения замкнутых конструкций, рабочим веществом которых является газ или жидкость; обдувом струей сжатого воздуха – сварные соединения открытых крупногабаритных конструкций; пневмогидравлические – сварные соединения малогабаритных замкнутых конструкций, работающих под давлением; вакуумный – при одностороннем подходе к контролируемым соединениям. Контролируемая толщина не ограничивается

1.1.2. РАДИАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ

Возможности контроля

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, рыхлоты, поры, металлические и неметаллические (шлаковые) включения, непровары, неслитины 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 ГОСТе 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}Co, ^{137}Cs, ^{192}Ir, ^{170}Tm и тормозного излучения бетатронов.

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

Классификация методов контроля производится по ГОСТу 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 ГОСТов, 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 ГОСТом 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 электрорадиографической 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 сцинтилляционным монокристаллом и электронно-оптическим усилителем яркости изображения или рентгеновидиконом;
сцинтилляционном 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* (в соответствии с ГОСТом 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 ГОСТу 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 надрезов, превышений проплавов, прожогов, утяжин.

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

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

Стандарт определяет также порядок подготовки и проведения рентгенотелевизионного контроля.

Радиографический контроль сварных соединений (в соответствии с ГОСТом 7512–82)

Дополнительные сведения при проведении радиографического контроля сварных соединений изложены в ГОСТе 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 ГОСТом 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 ГОСТу 7512–82.

Классификация сварных соединений при сварке металлов плавлением по результатам радиографического контроля приведена в ГОСТе 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 принимаются 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 скоплении (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 ГОСТа 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 (в соответствии с ГОСТом 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 ГОСТу 7512–82.

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

Термины и определения акустических неразрушающих методов контроля даны в ГОСТах 23829–85 и 22727–88, применяемых совместно с ГОСТами 16504–81; 15467–79; 25.002–80.

Методы акустического контроля сварных соединений подразделяются на:

теневой – основан на анализе уменьшения амплитуды прошедшей волны, обусловловленного 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-ного ультразвукового импульса, n – 1 раз прошедшего сквозь прокат (ГОСТ 22727–88).

Дополнительные сведения об использовании этих методов изложены в ГОСТах 22727–88 и 17410–84.

Сведения о правилах проведения акустического контроля сварных соединений приведены в ГОСТе 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 (в соответствии с ГОСТом 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 неодно-

родности 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 ГОСТе 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.

1.1.4. 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 (несплошности, 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 ГОСТом 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 (в соответствии с ГОСТом 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

Примечание. Условный дефект – поверхностный дефект в виде плоской щели с параллельными стенками с отношением глубины к ширине, равным 10, ориентированный перпендикулярно к направлению магнитного поля.

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 (в соответствии с ГОСТом 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 металопродукции приведены в ГОСТе 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 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 ГОСТу 7564–97. Стандарт определяет порядок проведения контроля и обработки результатов испытаний.

1.1.5. ТЕЧЕИСКАНИЕ

Методами течеискания выявляют места локальных течей в сварных соединениях открытых и замкнутых конструкций.

Виды течеискания:

негостированные – радиационный, масс-спектрометрический, манометрический, галоидный, газоаналитический, химический, акустический, капиллярный;

по ГОСТу 3285–77 – наливом воды под напором, наливом воды без напора, поливанием струей воды под напором, поливанием рассеянной струей воды, пузырьковый.

Толщины контролируемого этими методами металла не ограничиваются. Выявляемые дефекты, чувствительность и области применения этих методов приведены в табл. 1 в соответствии с ГОСТом 3242–79.

1.1.6. 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 ГОСТе 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 ГОСТе 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:

жидкостной – метод контроля проникающими жидкими веществами, растворами, суспензиями, основанный на регистрации жидкости, проникающей в (или через) 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.

1.2. МЕТОДЫ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

1.2.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Общие положения о проведении механических испытаний сварных соединений определяются ГОСТом 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 ударный разрыв.

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.

Аппаратура, материалы и реактивы должны соответствовать:

для испытаний на статическое растяжение – ГОСТам 1497–84; 11150–84; 9651–84; 22706–77; 7855–84;

для испытаний на ударный изгиб – ГОСТу 9454–78;

для измерений твердости – ГОСТам 2999–75; 9013–59;

для выявления и определения величины зерна – ГОСТу 5639–65;

для определения содержания структурных составляющих – ГОСТу 8233–56.

Дополнительная аппаратура и приспособления должны соответствовать:

регулирующие и измерительные приборы – ГОСТам 7164–78; 9245–79; 9736–80;

штангенциркули – ГОСТу 166–80;

микрометры – ГОСТу 6507–78;

тензометры – ГОСТу 18957–73;

термопары – ГОСТам 6616–74; 3044–84 (при повышенных температурах), ГОСТам 9177–74; 14894–96 (при пониженных температурах).

Погрешность регулирования температур не должна превышать 1 %, скорость нагрева и охлаждения ±5 %.

Погрешность измерения деформации растяжением (сжатием) при нагреве и охлаждении испытываемого образца не должна превышать 2 %, прогиба – 0,01 мм, угла закручивания – 1°.

Порядок проведения испытаний и обработки результатов исследования указан в ГОСТе 6996–66 в соответствии с приведенными ниже ГОСТами:

определение временного сопротивления, относительного удлинения, относительного сужения – ГОСТы 1497–84; 11150–84; 9651–84;

определение предела длительной прочности – ГОСТ 10145–81;

определение ударной вязкости – ГОСТ 9454–78;

определение твердости – ГОСТы 2999–75; 9013–59;

определение величины зерна – ГОСТ 5639–65;

определение содержания структурных составляющих – ГОСТ 8233–56.

Испытания считаются недействительными в случаях, указанных в приведенных выше ГОСТах.

Другие требования к условиям проведения испытаний, определению размеров образцов, оборудованию для испытаний и подсчету результатов должны оговариваться соответствующими стандартами или другой технической документацией. Количество испытуемых образцов, математическая обработка результатов

испытаний проводится по соответствующему ГОСТу или указывается в технической документации.

1.2.2. ПРАВИЛА ОТБОРА ПРОБ, ЗАГОТОВОК И ОБРАЗЦОВ

Для обеспечения достоверности результатов испытаний механических и технологических свойств сварных соединений необходимо соблюдать правила отбора проб, заготовок и образцов в соответствии с ГОСТом 6996–66. В приведенных правилах использованы сведения из следующих ГОСТов: 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 ГОСТов.

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 ГОСТами 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 ширин 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 изготавливают 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 > 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 > 30 до 50 мм в случае кислородной резки – 5 мм, плазменной резки – 7 мм, механической, в том числе и анодно-механической, 3 мм;

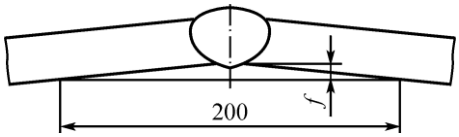


Рис. 1.1. Образец с прогибом; f – стрела прогиба, мм

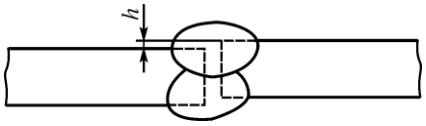


Рис. 1.2. Несовпадение плоскостей листов в стыковых соединениях; h – величина несовпадения, мм

при толщине металла более 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, исключающие 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. 1.1) не должна превышать 10 % от толщины металла и должна быть не более 4 мм.

Несовпадение плоскостей листов h в стыковых соединениях (рис. 1.2) не должно превышать 15 % от толщины листа и должно быть не более 4 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 $\sigma_в$ более 1000 МПа (100 кгс/мм^2) оговаривается нормативно-технической документацией.

1.2.3. ИСПЫТАНИЯ ПРИ СТАТИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

Испытание металла различных участков сварного соединения и наплавленного металла на статическое (кратковременное) растяжение в соответствии с ГОСТом 6996–66 и с учетом ГОСТа 1497–84 (при комнатной температуре), ГОСТа 11150–84 (при пониженных температурах), ГОСТа 9651–84 (при повышенных температурах)

Испытания на растяжение являются основным методом исследования и контроля металлических материалов и сварных соединений.

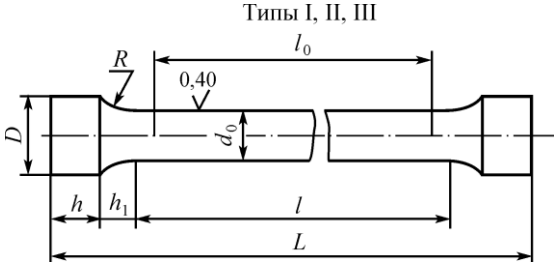


Рис. 1.3. Цилиндрический образец для испытания на статическое (кратковременное) растяжение; типы I–III – при нормальной и пониженной температурах

Испытания металла различных участков сварного соединения и наплавленного металла на статическое (кратковременное) растяжение проводятся на стандартных образцах типов I, II, III (рис. 1.3, табл. 2), Для испытаний, проводимых при нормальной и пониженных температурах, применяются образцы всех типов, при повышенных температурах – типов IV и V (рис. 1.4, табл. 2.)

Таблица 2. **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.

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

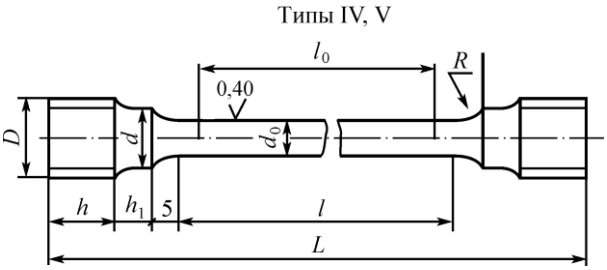


Рис. 1.4. Цилиндрический образец для испытания на статическое (кратковременное) растяжение; типы IV, V – при повышенных температурах

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 ГОСТом 1497–84 допускается кроме круглых образцов по ГОСТу 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 ГОСТу 7855–84.

Для различных задач могут определяться следующие механические свойства при растяжении:

предел упругости $\sigma_{0,05}$, МПа (кгс/мм^2);

модуль упругости E, МПа (кгс/мм^2);

физический предел текучести $\sigma_т$, МПа (кгс/мм^2);

условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа (кгс/мм^2);

временное сопротивление (предел прочности) $\sigma_в$, МПа (кгс/мм^2);

относительное удлинение δ, %;

относительное сужение ψ, %.

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

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

где ΔP – степень нагружения; l_0 – начальная длина расчетной базы образца; $\Delta l_{ср}$ – приращение удлинения образца к приращению нагрузки на ΔP; 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

$$\sigma_т = P_т/F_0,$$

где $P_т$ – 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}, предшествующему разрушению, к начальной площади поперечного сечения образца F_0, определяется по формуле

$$\sigma_в = P_{max}/F_0.$$

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

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

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

Относительное сужение при разрыве – отношение уменьшения площади поперечного сечения образца в месте его разрыва 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 статическое растяжение (в соответствии с ГОСТом 6996–66)

Определение прочности наиболее слабого участка стыкового и нахлесточного соединений

При испытании сварного соединения на статическое растяжение определяют временное сопротивление наиболее слабого участка стыкового или нахлесточного соединения либо прочность металла шва в стыковом соединении. Подсчет временного сопротивления ведется по ГОСТу 1497–84. При испытании определяют место разрушения образца (по металлу шва, по металлу околошовной зоны, по основному металлу).

Испытания проводят, как правило, на образцах, толщина или диаметр которых равен толщине или диаметру основного металла. При испытании сварного соединения или листов разной толщины более толстый лист путем механической обработки должен быть доведен до толщины более тонкого листа.

Форма и размеры плоских образцов (типы XII, XIII и XIIIа) для испытания стыковых соединений должны соответствовать указанным на рис. 1.5 и в табл. 3. Допускается применение цилиндрических образцов типов I–V. Металл шва в этих образцах должен располагаться посередине их рабочей части. Разрешается применение образца по ГОСТу 1497–84.

Форма и размеры цилиндрических образцов для испытания стыковых соединений стержней круглого или многогранного сечения (тип XIV) должны соответствовать указанным на рис. 1.6 и в табл. 4.

Утолщение шва должно быть снято механическим способом до уровня основного металла. Удаление основного металла с поверхности образца производят только с той стороны, с которой снимают утолщение шва или имеется уступ. Строгать утолщение следует поперек шва.

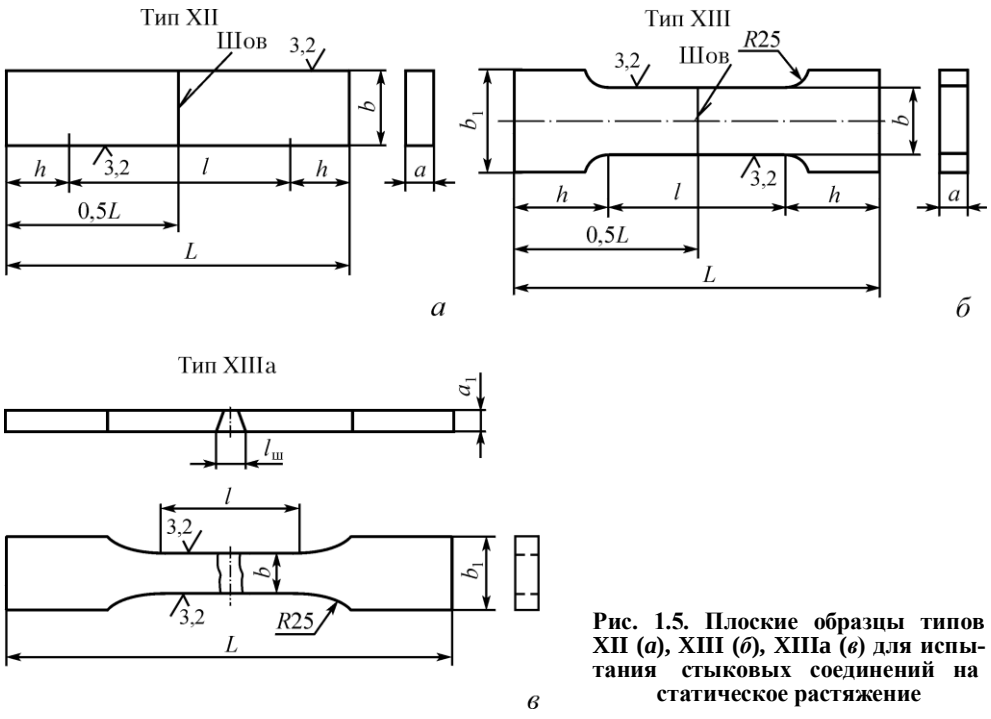


Рис. 1.5. Плоские образцы типов XII (*а*), XIII (*б*), XIIIa (*в*) для испытания стыковых соединений на статическое растяжение

Испытания образцов типов XII, XIII, XIIIa и XIV разрешается проводить без снятия утолщения, если это оговорено в нормативно-технической документации. В этом случае в формулу расчета временного сопротивления вводят значение площади сечения образца вне шва.

При недостаточной мощности разрывной машины разрешается испытывать плоские образцы типа XV (рис. 1.7, *а*) или цилиндрические образцы типов XVI, XVII (рис. 1.7, *б*, *в*). Разрешается применять цилиндрические образцы с другими рабочими диаметрами и другим типом захватной части в соответствии с ГОСТом 1497–84.

Для контроля прочности сварных соединений труб применяют сегментные образцы (см. рис. 1.5, *а–в*), а также цилиндрические образцы в виде отрезков труб (рис. 1.8). Образцы типов XII, XIII, XIIIa не выправляют. Форму их в поперечном сечении определяет естественная кривизна трубы.

Сегментные образцы вырезают при диаметре трубы более 20 мм.

Цилиндрические образцы типов XVIII и XVIIIa вырезают при диаметре трубы до 100 мм. Образцы этих типов можно вырезать и при трубах больших диаметров.

В формулу расчета временного сопротивления для таких образцов вводят значение площади сечения трубы вне шва. В образцах типов XII, XIII и XIIIa выпуклость швов удаляют с двух сторон. В образцах типов XVIII и XIX выпуклость шва не удаляют, в образцах типа XVIIIa выпуклость шва удаляют только с наружной стороны.

При недостаточной мощности испытательной машины разрешается применять образцы типов I–V. Металл шва располагают посередине образца.

Сварные соединения, выполненные точечной сваркой и электрозаклепками, испытывают на срез путем растяжения образца типа XX (рис. 1.9) или на отрыв

***Таблица 3*. Параметры стандартных образцов для испытаний стыковых соединений на растяжение, мм**

Тип образца	Толщина основного металла a	Толщина образца a_1	Ширина рабочей части образца b	Ширина захватной части образца b_1	Длина рабочей части образца l	Общая длина образца L	Номер чертежа
XII, XIII	До 6 Св.6 до 10 включ. Св. 10 до 25 включ. Св. 25 до 50 включ. Св. 50 до 75 включ.	Равна толщине основного металла	15±0,5 20±0,5 25±0,5 30±0,5 35±0,5	25 30 35 40 45	50 60 100 160 200	$L + 2h$	20 или 21
XIIIa	Равна и менее 20 Св. 20 до 40 Св. 40	Равна толщине металла Равна толщине металла или 20 20 или 40	Не менее 1, 2 толщины образца, но не менее 10 и не более 50	$b + 12$	$l_ш + 60$	Равна или более 200	21a

Примечания. 1. $l_ш$ – максимальная ширина шва. 2. Длину захватной части образца h устанавливают в зависимости от конструкции испытательной машины. 3. Размеры образцов типов XII и XIII при толщине основного металла более 75 мм устанавливаются стандартом или другой нормативно-технической документацией. 4. Длину рабочей части образца можно увеличить, если конструкция испытательной машины делает невозможным испытание образца предписанной длины.

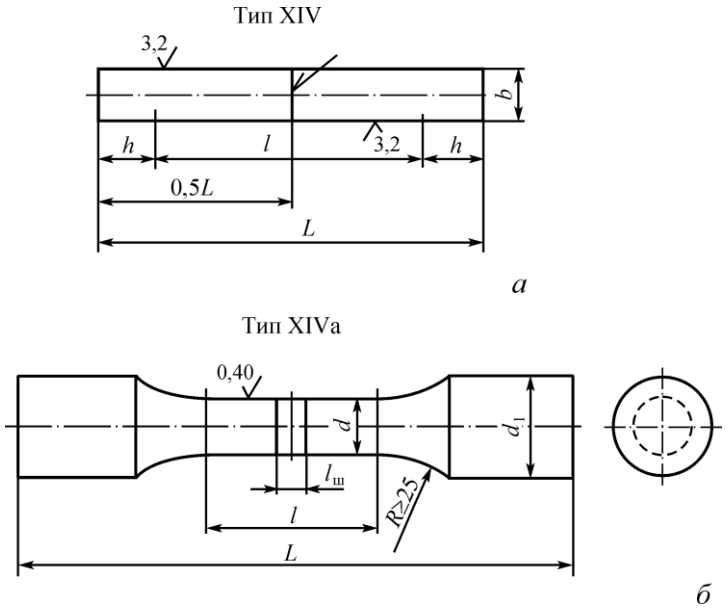


Рис. 1.6. Цилиндрические образцы типов XIV (*а*), XIVa (*б*) для испытаний стыковых соединений стержней круглого сечения

растяжением образца типа XXI (рис. 1.10). При испытании электрозаклепок ширина образца во всех случаях должна быть равна 50 мм.

Сварные соединения листов, выполненные шовной сваркой, испытывают на срез путем растяжения образцов типов XXII и XXIII (рис. 1.11). При толщине металла до 1,0 мм испытывают образцы типа XXIII, при толщине металла более 1,0 мм выбор типа образца не устанавливается.

***Таблица 4*. Параметры стандартных цилиндрических образцов для испытаний стыковых соединений, мм**

Тип образца	Диаметр круглого стержня или диаметр окружности, вписанной в многогранный стержень, B	Диаметр захватной части образца d_1	Диаметр рабочей части образца d	Длина рабочей части образца l	Общая длина образца L	Номер чертежа
XIV	До 10 Св. 10 до 25 вкл. Св. 25 до 50 вкл. Св. 50 до 70 вкл.	–	D_c или B	60 100 160 200	$l + 2h$	22
XIVa	Не ограничивается	D_c или B, но не более 40	0,8 d_1	$l_ш + 60$	≥200	22а

Примечания. 1. $l_ш$ – максимальная ширина шва. 2. Длину захватной части образца h устанавливают в зависимости от конструкции испытательной машины. 3. При D_c более 75 мм размеры образца типа XIV устанавливаются стандартом или другой нормативно-технической документацией.

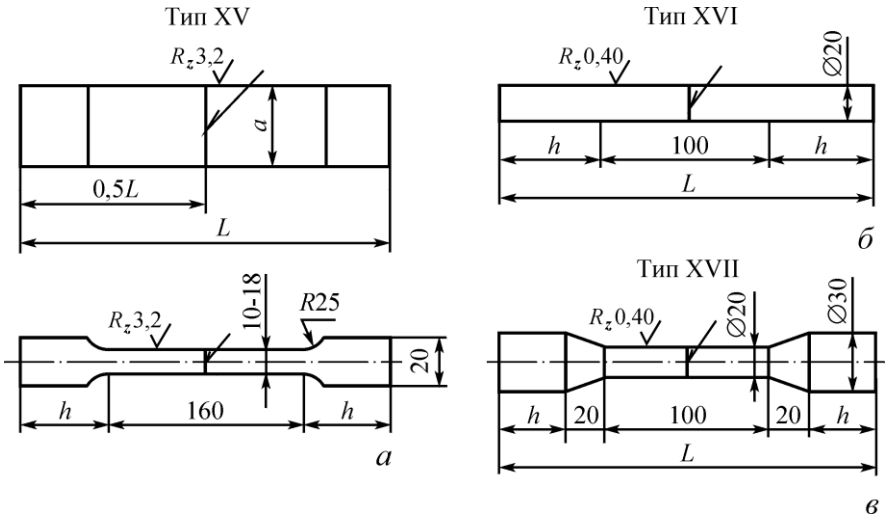


Рис. 1.7. Плоские образцы типов XV (*а*), XVI (*б*), XVII (*в*) стыковых соединений для испытаний на статическое растяжение; *а* – толщина основного металла, мм

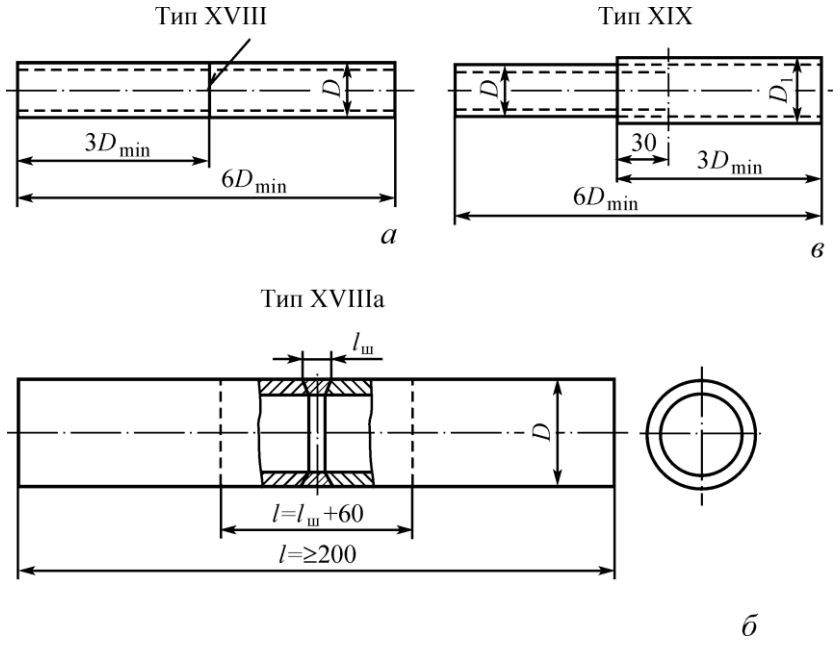


Рис. 1.8. Цилиндрические образцы типов XVIII (*а*), XVIIIа (*б*), XIX (*в*) для испытаний сварных труб на статическое растяжение

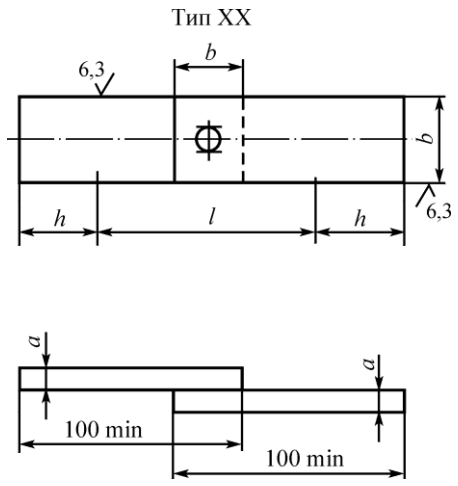


Рис. 1.9. Сварные соединения; образец для испытаний на срез; *a* – толщина основного металла, мм; *b* – ширина образца, мм; *l* – длина рабочей части образца, мм; *h* – длина захватной части образца (выбирается в зависимости от конструкции испытательной машины), мм

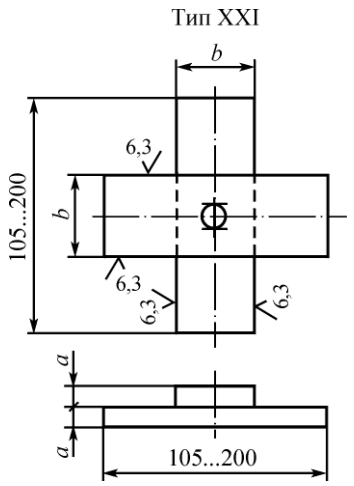


Рис. 1.10. Сварные соединения; образец для испытаний на отрыв растяжением; *a* – толщина основного металла, мм; *b* – ширина образца, мм

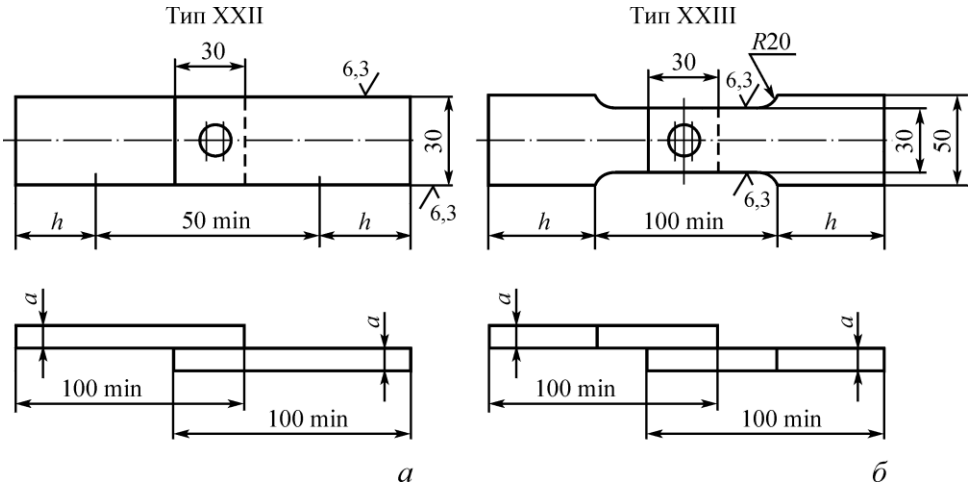


Рис. 1.11. Сварные соединения листов, выполненные шовной сваркой. Образцы типов XXII (*а*), XXIII (б) для испытаний на срез путем растяжения; *a* – толщина основного металла, мм; *h* – длина захватной части образца (выбирается в зависимости от конструкции испытательной машины), мм

Определение прочности металла шва в стыковом соединении

При испытании прочности металла шва в стыковом соединении на образцах типов XXIV и XXV его временное сопротивление определяют по формуле

$$\sigma_в = kP/F,$$

где $\sigma_в$ – временное сопротивление, МПа (кгс/мм^2); k – поправочный коэффициент; P – максимальное усилие, Н (кгс); F – площадь поперечного сечения образца в наименьшем сечении до испытания, мм^2 (м^2).

***Таблица 5*. Параметры плоских образцов для испытаний стыковых соединений, мм**

Толщина основного металла a	Ширина захватной части образца b_1	Ширина рабочей части образца b	Радиус закругления R	Длина рабочей части образца l	Общая длина образца L
До 6	25	15±0,5	6±1	40	
Св. 6 до 10	30	20±0,5	12±1	60	
Св. 10 до 25	38	25±0,5	20±2	70	$L = l + 2h$
Св. 25до 40	45	30±0,5	25±2	90	
Св. 40 до 50	55	35±0,5	30±2	110	

Примечания. 1. Длину захватной части образца h устанавливают в зависимости от конструкции испытательной машины. 2. Размеры образца при толщине металла более 50 мм устанавливаются соответствующими техническими условиями.

***Таблица 6*. Параметры цилиндрических образцов для испытаний тавровых соединений, мм**

Диаметр захватной части образца d_1	Диаметр рабочей части образца d	Радиус закругления R	Длина рабочей части образца l	Общая длина образца L
До 5 Св. 5 до 10 Св. 10 до 15	$d = 0{,}6\ d_1$	$R = 0{,}5\ d_1$	40 60 70	$L = l + 2h$
Св. 15до 30 Св. 30 до 50	$d = 0{,}7\ d_1$		90 110	

Примечания. См. в табл. 5.

Тип XXIV

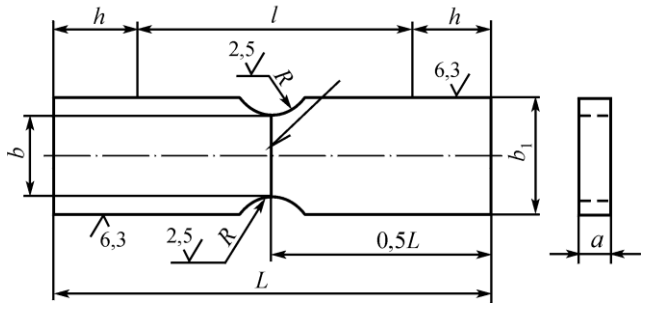


Рис. 1.12. Плоский образец типа XXIV для испытаний прочности металла шва в стыковом соединении; *a* – толщина образца, мм; *h* – длина захватной части образца, мм; *b* – ширина образца в зоне надреза, мм; b_1 – ширина образца, мм; *R* – радиус надреза, мм; *L* – общая длина образца, мм; *l* – длина рабочей части образца, мм

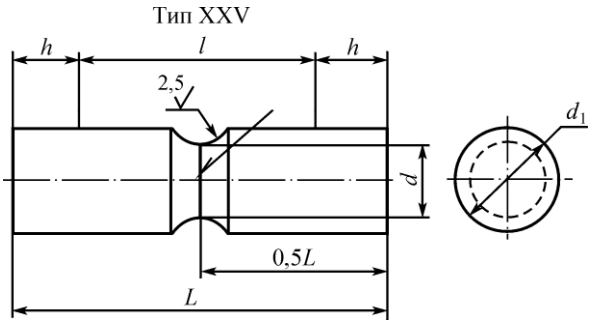


Рис. 1.13. Цилиндрический образец типа XXV для испытаний прочности металла шва в стыковом соединении; *L* – общая длина образца, мм; *l* – длина рабочей части образца, мм; *h* – длина захватной части образца, мм; d_1 – наружный диаметр образца, мм; *d* – внутренний диаметр образца, мм

Для углеродистых и низколегированных сталей коэффициент *k* принимают равным 0,9, для других металлов значение *k* устанавливается соответствующей технической документацией.

Толщина образца типа XXIV должна равняться толщине основного металла. Диаметр захватной части образца типа XXV должен равняться толщине основного металла или диаметру свариваемых элементов.

Форма и размеры плоского образца должны соответствовать указанным на рис. 1.12 и в табл. 5, цилиндрического образца – на рис. 1.13 и в табл. 6.

Поперечная ось образцов типов XXIV и XXV должна совпадать с осью шва. Для односторонних швов разметку поперечной оси образца осуществляют по узкой части шва (при электродуговой сварке) или по грату (при контактной или газопрессовой сварке).

Для двусторонних швов разметку поперечной оси выполняют после шлифовки и травления боковых поверхностей образца по макрошлифу или посередине выпуклости шва, сваренного со второй стороны. Выпуклость шва для образцов типа XXIV должна быть удалена.

Испытание на растяжение образцов, вырезанных поперек шва (в соответствии с рекомендуемым приложением к ГОСТу 6996–66 и с учетом ИСО 4126–89)

Указанный международный стандарт устанавливает размеры и процедуру испытания на растяжение образцов, вырезанных поперек шва из стыкового соединения, выполненного сваркой плавлением. Стандарт распространяется на стыковые соединения из сплавов на основе железа, выполненные любым способом сварки плавлением.

Разрушение образца, вырезанного поперек сварного соединения, достигается приложением к нему растягивающего усилия. Образец нагружают постепенно и непрерывно в направлении, перпендикулярном к оси сварного шва, вплоть до разрушения. При проведении испытаний необходимо руководствоваться основными положениями ИСО 6892–84.

Поверхность образца подвергают механической обработке для удаления выпуклости шва (с двух сторон) и неровностей шва и основного металла. Как правило, толщина образца должна равняться толщине основного металла вблизи шва. Допускается вместо одного образца, толщина которого равна толщине сварного соединения, вырезать несколько образцов, при этом их суммарная толщина должна быть больше толщины сварного соединения.

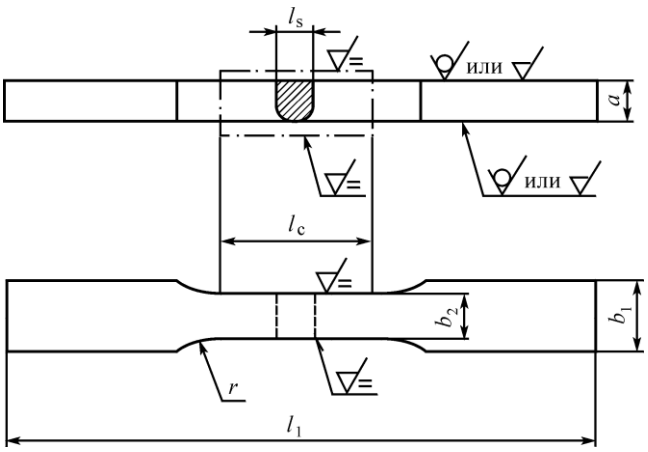


Рис. 1.14. Положение образцов для испытания сварного соединения большой толщины; a – толщина образца, мм; b_1 – ширина захватной части образца, мм; b_2 – ширина рабочей части образца, мм; l_s – ширина сварного шва, мм; l_c – длина рабочей части образца, мм

Для образцов, вырезанных из труб, допускается правка захватной части. Форма и размеры образца должны соответствовать данным, приведенным на рис. 1.14 и ниже:

Общая длина l_1	Устанавливается в зависимости от конструкции испытательной машины
Ширина захватной части b_1	b_2 + 12 мм
Ширина рабочей части b_2:	
пластины	25 мм
трубы	Не менее 20 мм
Длина рабочей части l_c	Не менее L_1 + 60 мм
Радиус захватной части r	Не менее 35 мм

Примечание. Для труб малого диаметра размер при необходимости может быть уменьшен. l_c – максимальная ширина шва после механической обработки. Для труб малого диаметра при необходимости могут применяться трубчатые образцы. Диаметр их должен равняться внешнему диаметру трубы.

После разрушения необходимо осмотреть поверхность образца в месте разрыва на наличие дефектов.

Испытание на растяжение металлических труб (в соответствии с ГОСТом 10006–80)

Испытываются бесшовные, сварные, биметаллические трубы при комнатной температуре. Определяются следующие характеристики:

физический предел текучести;

условный предел текучести;

временное сопротивление (предел прочности);

истинное сопротивление разрыву;

относительное удлинение после разрушения;

относительное сужение после разрушения.

Термины и определения, методики проведения испытаний, обработка результатов должны соответствовать ГОСТу 1497–84.

Испытания проводят на разрывных и испытательных машинах, соответствующих требованиям ГОСТа 7855–84.

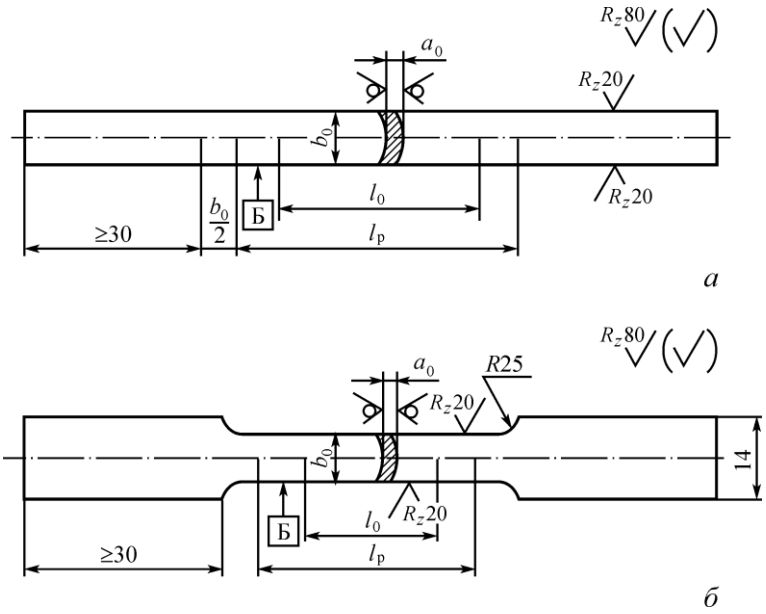


Рис. 1.15. Продольные образцы, вырезанные из трубы, для испытания на растяжение без головок (*а*) и с головками (*б*); a_0 – толщина стенки трубы, мм; b_0 – ширина рабочей части образца, мм; $l_р$ – рабочая длина образца, мм

Испытания проводят на продольных и поперечных образцах, форма и размеры которых следующие, мм:

Наружный диаметр трубы	От 16 до 20	> 20	> 20
Толщина стенки	До 3,0	До 10,0	> 10 до 12 вкл.
Ширина рабочей части	8	10	12

Продольные образцы изготавливают в виде отрезка трубы полного сечения без ограничения наружного диаметра или в виде полосы для труб с толщиной стенки до 12 мм, вырезанной вдоль оси трубы (сегмент) с шириной рабочей части, указанной выше. Продольные образцы могут изготавливаться без головок и с головками (рис. 1.15).

Цилиндрические образцы типа III по ГОСТу 1497–84 могут изготавливаться из труб с толщиной стенки 5 мм и более. Продольные цилиндрические образцы и образцы в виде полос из сварных труб изготавливаются из проб (заготовок), вырезанных из основного металла на расстоянии от сварного шва, обеспечивающем отсутствие термического влияния сварки.

Для толстостенных труб большого диаметра испытания механических свойств проводят на поперечных цилиндрических образцах, вырезанных из тела трубы перпендикулярно ее продольной оси.

Допускается проводить испытания труб со сплющенными концами.

При испытании образцов в виде отрезков труб полого сечения концы образцов, захватываемые зажимами машин, закрепляют цилиндрическими или коническими пробками (рис. 1.16).

Особенности испытания на растяжение при повышенных, пониженных и низких температурах рассмотрены ниже.

Испытания на растяжение при повышенных температурах (до 1200 °С) осуществляются в соответствии с ГОСТом 9651–84. Испытания проводятся на про-

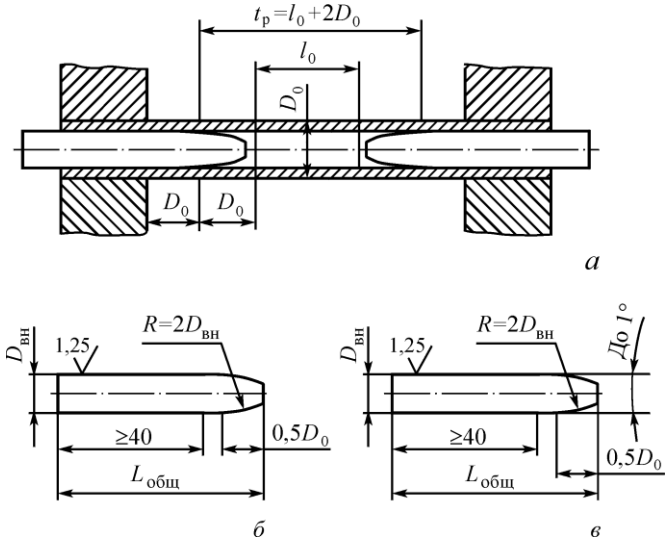


Рис. 1.16. Схема испытания образца трубы полого сечения с пробками (*а*) и пробки цилиндрического (*б*) и конического (*в*) сечения; D_0 – наружный диаметр трубы, мм; $l_р$ – рабочая длина образца, мм; l_0 – расчетная длина образца, мм

порциональных плоских образцах толщиной от 0,5 до 10 мм, головки которых имеют отверстия, или на пропорциональных цилиндрических образцах с резьбовыми головками с диаметром рабочей части 5–10 мм. Требования к изготовлению образцов указаны в ГОСТе 1497–84.

Испытания на растяжение при пониженных температурах (от 20 до –100 °С) проводятся в соответствии с ГОСТом 11150–84. Требования к изготовлению образцов указаны в ГОСТе 1497–84. Испытания проводятся на пропорциональных плоских образцах толщиной 5–10 мм, головки которых имеют отверстия, или на пропорциональных цилиндрических образцах с диаметром рабочей части от 3 до 10 мм и различной формой головок, зависящей от хрупкости металла при температуре испытания. Требования к изготовлению образцов указаны в ГОСТе 1497–84.

Испытания на растяжение при низких температурах (от –100 до –269 °С) проводятся в соответствии с ГОСТом 22706–77:

на пропорциональных цилиндрических образцах размером рабочей части от 3 до 12 мм и образцах диаметром 4–6 мм с надрезом;

на пропорциональных плоских образцах сечением от 0,5 до 10 мм^2 без надреза (типы 1; 2) и сечением от 0,5 до 5 мм^2 с надрезом (тип 3).

Испытания образцов с надрезом проводятся параллельно с испытаниями образцов без надреза для определения чувствительности металлов к концентраторам напряжений при низких температурах.

Испытание сварного соединения на статический изгиб (загиб) (в соответствии с ГОСТом 6996–66 и с учетом ГОСТа 14019–2003 и ИСО 7438-85)

Испытания на изгиб служат для определения металла и сварных соединений выдерживать заданную степень пластической деформации, характеризуемую углом изгиба, или для оценки предельной пластичности металла в сварных конст-

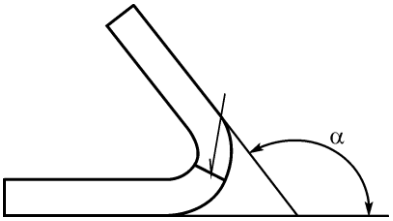


Рис. 1.17. Сварное соединение: образец для испытания на изгиб; α – угол загиба образца

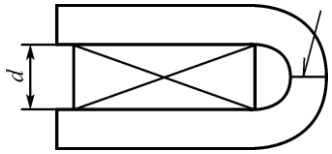


Рис. 1.18. Сварные соединения; схема испытания образца между двумя параллельными нажимными плитами до параллельности сторон; *d* – толщина прокладки, укладываемой между концами образца, равная диаметру оправки, мм (после удаления прокладки испытание проводят до соприкосновения сторон)

рукциях 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. 1.17), 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 замеряют в ненапряженном состоянии с погрешностью до 2°. Образцы типов XXVIa, XXVIIIa, толщина которых меньше толщины основного металла, допускается вырезать в различных участках поперечного сечения сварного соединения.

Если заданный угол изгиба превышает 150°, то после изгиба по схеме, приведенной на рис. 1.18, изгиб можно продолжать между двумя параллельными нажимными плитами. Между концами образца устанавливают прокладку толщиной, равной диаметру оправки (рис. 1.18). После удаления прокладки испытания проводят до соприкосновения сторон.

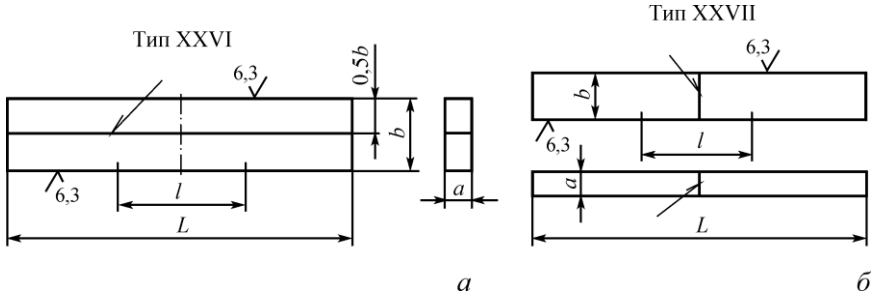


Рис. 1.19. Сварные соединения; плоские образцы типов XXVI (*а*) и XXVII (*б*) для испытания на изгиб; *L* – общая длина образца, мм; *l* – длина рабочей части образца, мм; *a* – толщина образца, мм; *b* – ширина образца, мм. Стрелками показаны сварные швы

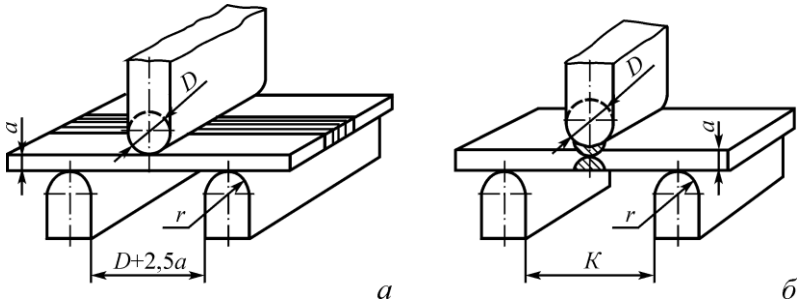


Рис. 1.20. Сварные соединения; схема испытания на изгиб образцов типов XXVI (*а*) и XXVII (*б*); *D* – диаметр оправки, мм; *K* – расстояние между опорами, мм; *a* – толщина образца, мм; *r* – радиус закругления опор, мм

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.

Форма и размеры плоских образцов должны соответствовать указанным на рис. 1.19. Ось расположенного поперек сварного шва образца после окончательной обработки должна находиться на его середине.

Испытания образцов типа XXVI проводят, как указано на рис. 1.20, *а*, типа XXVII – на рис. 1.20, *б*. Расстояние между опорами *K* (рис. 1.20, *б*) для образцов типа XXVII должно быть 2,5 *D*, для образцов типа XXVI указано на рис. 1.20, *а*.

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 толщинам 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 XXVIIIa, в растянутой зоне располагают шов, выполненный вторым. Для образцов типа XXVIIIa 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.

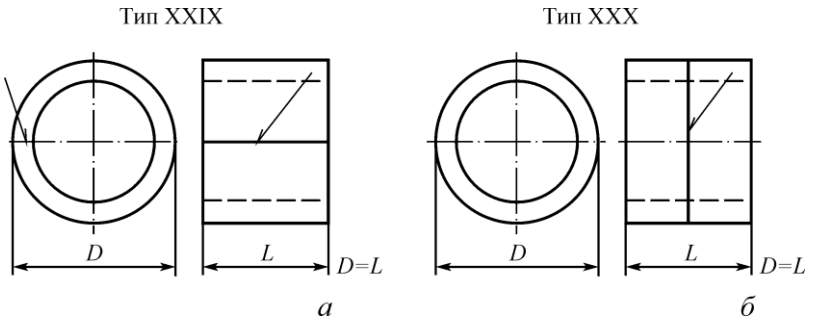


Рис. 1.21. Сварные соединения; образцы типов XXIX и XXX для испытания на изгиб труб с поперечным (*а*) и продольным (*б*) расположением швов; *D* – наружный диаметр трубы, мм; *L* – длина образца, мм

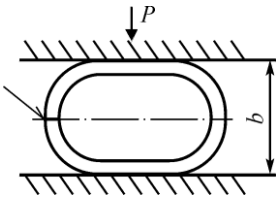


Рис. 1.22. Сварные соединения; схема испытания образцов типов XXIX и XXX до появления на поверхности образцов трещин; *b* – величина сплющивания, мм

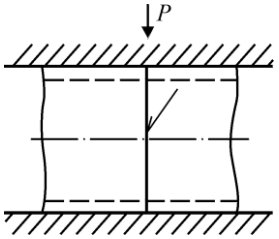


Рис. 1.23. Схема приложения нагрузки при испытаниях образцов с круговым швом

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. 1.21. 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.

Результаты испытания образцов типов XXIX и XXX определяются величиной *b* (рис. 1.22) 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. 1.23), а при испытании образцов с продольным швом шов располагают в диаметральной плоскости, перпендикулярной действию сжимающей нагрузки.

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 ≥ 250 мм, а радиус закругления граней многогранника должен равняться 0,1 толщины образца, но не более 2 мм.

Испытания сварного соединения на ударный разрыв (в соответствии с ГОСТом 6996–66)

Испытания на сопротивление ударному разрыву проводят для сварных стыковых соединений листов толщиной до 2 мм. Форма и размеры образца должны соответствовать указанным в ГОСТе 6996–66. При испытании материалов высокой прочности разрешается изменять конструкцию захватной части образца.

Испытания проводят на маятниковых копрах с приспособлениями для закрепления плоских образцов. Удельную ударную работу определяют по формуле

$$a_y = A_y/V,$$

где A_y – работа удара, затраченная на разрыв образца, Дж (кгс·м); V – объем расчетной части образца, равный произведению толщины основного металла (a) на расчетную длину и ширину образца, см^3 (м^3).

Кроме того, в соответствии с ГОСТом 14019–2003 и ИСО 7438–85 на изгиб испытывается свариваемый металл: ленты, полосовой широкополосный, листовой, сортовой, фасонный и периодический профили проката из металлов и сплавов, а также поковки и отливки.

Испытания на статический изгиб (в соответствии с ГОСТом 14019–2003 и ИСО 7438–85)

Эти испытания служат для определения возможности металла выдерживать заданную степень пластической деформации, характеризуемую углом изгиба, или для оценки предельной пластичности металла при изгибе, характеризуемой углом изгиба до образования первой трещины. Испытания проводят при комнатной температуре (рис. 1.24–1.26).

Суть метода: образец с постоянной площадью поперечного сечения подвергают изгибу сосредоточенной нагрузкой в середине пролета между опорами. При этом в одной из наружных зон возникают растягивающие, а в противоположной – сжимающие напряжения. Если напряжения при этом достигают предела текучести, наступает пластическое течение с последующим возникновением трещин.

Испытания на изгиб проводят:

до заданного угла изгиба (рис. 1.27);

до появления первой трещины в растянутой зоне образца с определением угла изгиба;

до параллельности сторон образца (рис. 1.28, *а*);

до соприкосновения противоположных сторон образца (рис. 1.28, *б*).

Испытания на изгиб проводят на испытательных машинах или прессах. Образцы толщиной менее 4 мм испытывают на изгиб вокруг жестко закрепленной в тисках оправки (рис. 1.29). Допускается проводить испытания на изгиб до заданного угла на специальных приспособлениях, имеющих углубления V- или U-образной формы (см. рис. 1.26).

Места вырезки заготовок для изготовления образцов на изгиб и величины припусков, предохраняющих металл образца от влияния нагрева и наклепа, должны соответствовать ГОСТу 7564–97.

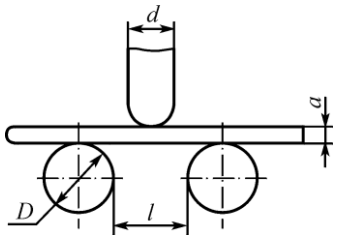


Рис. 1.24. Схема установки образца на опоры; *d* – диаметр оправки, мм; *a* – толщина образца, мм; *l* – расстояние между опорами изгибающего устройства, мм; *D* – диаметр опоры, мм

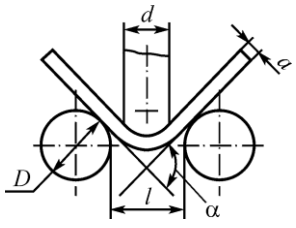


Рис. 1.25. Схема изгиба образца с помощью оправки на опорах; α – угол изгиба образца, град. Остальные обозначении см. на рис. 1.24

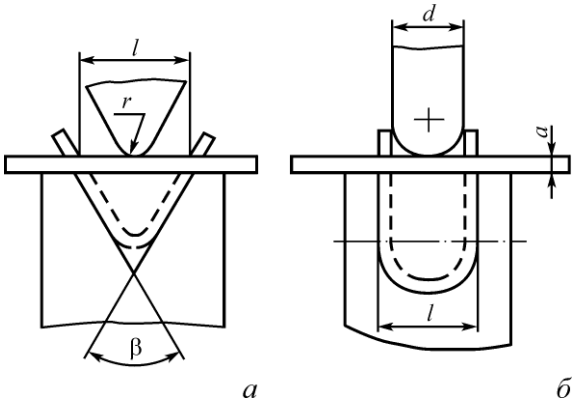


Рис. 1.26. Схема изгиба образца на матрицах разной формы: *а* – V-образная; *б* – U-образная; *r* – внутренний радиус изогнутой части образца после испытания, мм; β – угол изгиба образца, град. Остальные обозначения см. на рис. 1.24

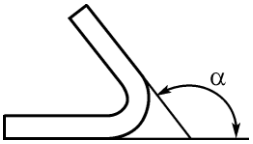


Рис. 1.27. Измерение угла изгиба α образца после снятия нагрузки

При толщине проката до 30 мм включительно образцы изготавливают с сохранением поверхностных слоев проката, при большей толщине – изготавливают механически обработанные образцы толщиной 25 мм, при этом одну сторону образца оставляют необработанной. Эта сторона должна находиться в растянутой зоне. Ширина образцов должна быть равна двум толщинам, а для образцов толщиной менее 5 мм – 10 мм.

Испытания на изгиб металлических образцов круглого или многоугольного сечения проводят в сечении, равном сечению полуфабриката. Из массивных поковок и отливок вырезают образцы толщиной 20 ± 5 мм.

При испытании до заданного угла загиба образец устанавливают на опоры (рис. 1.24) или матрицу (рис. 1.26) и изгибают с помощью оправки (рис. 1.25) или приспособления (рис. 1.26) до заданного угла. При испытании на изгиб на жестко закрепленной в тисках оправке образец одним концом зажимают в тисках и изгибают на заданный угол (рис. 1.27)

Испытания на изгиб до появления первой трещины проводят по той же методике, что и изгиб до заданного угла. Угол изгиба измеряют без снятия нагрузки (рис. 1.25). Допускается измерять угол изгиба после снятия нагрузки (рис. 1.27).

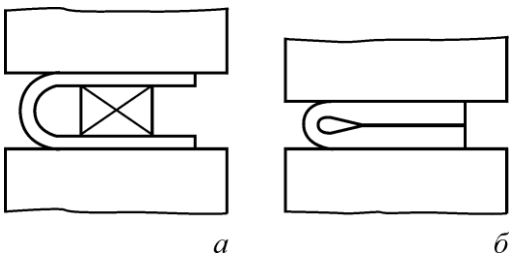


Рис. 1.28. Схема испытания образца до параллельности сторон (*а*) и до соприкосновения сторон (*б*)

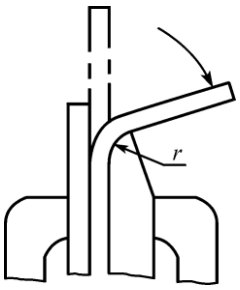


Рис. 1.29. Схема изгиба образца в тисках на оправке; *r* – радиус изгиба, град

Испытания на изгиб до параллельности или соприкосновения сторон проводят после предварительного изгиба образца на угол не менее 150° по схемам (рис. 1.25; 1.26; 1.29). Догиб продолжают между параллельными плоскостями до соприкосновения сторон образца с прокладкой, толщина которой равна толщине (диаметру) оправки (рис. 1.28, *а*), или продолжают догиб между двумя параллельными плоскостями плавно нарастающим усилием до соприкосновения сторон образца с образованием естественной петли (рис. 1.28, *б*).

Испытания на изгиб до появления первой трещины проводят по той же методике, что и изгиб до заданного угла. Угол изгиба измеряют без снятия нагрузки. Момент появления первой трещины определяют визуально.

Испытания на изгиб корнем шва или его лицевой поверхностью наружу образцов, вырезанных поперек шва (рекомендуем приложение к ГОСТу 6996–66 в соответствии с ИСО 5173–81)

Настоящий стандарт распространяется на стыковые соединения из сплавов на основе железа, выполненные любым способом сварки плавлением, и устанавливает два способа проведения испытаний на изгиб образцов, вырезанных поперек шва из стыковых соединений, для определения пластичности сварного соединения и наличия дефектов на поверхности растянутой зоны образца. Испытания проводят при расположении образцов корнем шва или его лицевой поверхностью наружу. Стандарт также регламентирует размеры образцов.

Испытания выполняют одним из двух способов: на изгиб с использованием оправки и на изгиб с использованием роликов.

Образец для испытаний отбирают непосредственно от контролируемого изделия или от специально сваренного для проведения испытания контрольного соединения. Образец вырезают поперек сварного соединения так, чтобы после его механической обработки ось шва располагалась посередине длины образца. Вырезка образцов должна выполняться любым способом, исключающим влияние реза на результаты испытания.

Образец по всей длине должен иметь прямоугольное практически постоянное сечение. Форма поперечного сечения приведена на рис. 1.30. При односторонних швах различают образцы для испытаний на изгиб лицевой поверхностью наружу, когда в растянутой зоне находится лицевая, наиболее широкая поверхность шва, и корнем шва наружу, когда в растянутой зоне находится корень шва. При двустороннем шве лицевой считается сторона, сваренная первой. Сторона, сваренная второй, приравнивается к корню шва. Выпуклость шва с обеих сторон должна зачищаться заподлицо с основным металлом. Толщина образца должна, как правило, равняться толщине основного металла вблизи сварного соединения. При толщине металла более 30 мм допускается вместо одного образца, толщина которого равна толщине соединения, испытывать несколько образцов при условии, что толщина каждого из них не менее 30 мм и что они охватывают всю толщину соединения (рис. 1.31). Кромки образца, попадающие при испытании в рас-

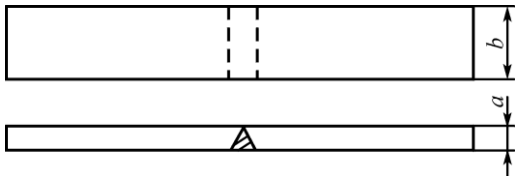


Рис. 1.30. Образец для испытания на изгиб, вырезанный поперек сварного шва; *а* – толщина образца, мм; *b* – ширина образца, мм

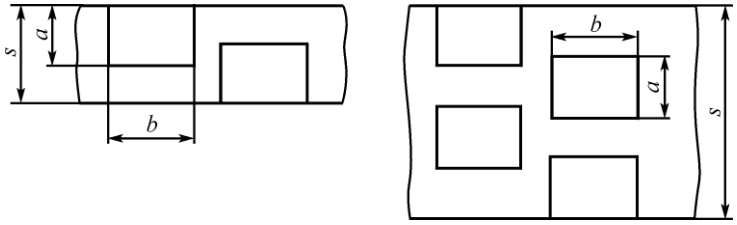


Рис. 1.31. Схема вырезки образцов для испытания на изгиб свариваемого металла толщиной более 30 мм; *s* – толщина соединения, мм; *a* – толщина образца, мм; *b* – ширина образца, мм

тянутую зону, должны быть закруглены механическим способом по радиусу, не превышающему 0,2 толщины образца, но не более 3 мм.

Способ испытания на изгиб с использованием оправки

Испытуемый образец помещается на две параллельно расположенные роликовые опоры (рис. 1.32). Образец медленно и непрерывно деформируют путем приложения в средней части образца по оси шва перпендикулярно поверхности образца концентрированной нагрузки (трехточечный изгиб).

Нагрузка на образец передается с помощью оправки с закругленным концом диаметром *D*, который должен соответствовать требованиям нормативно-

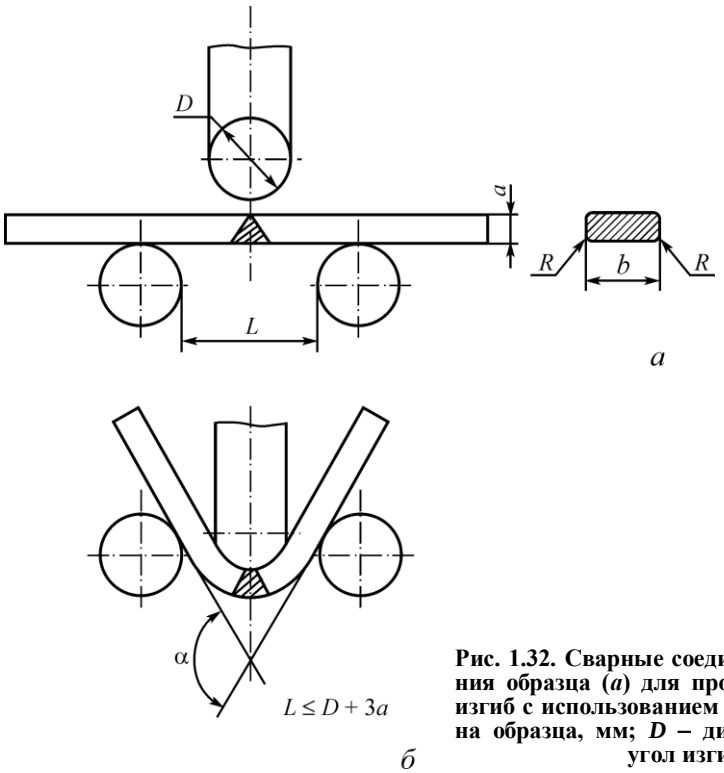


Рис. 1.32. Сварные соединения; схема закрепления образца (*а*) для проведения испытаний на изгиб с использованием оправки (*б*); *a* – толщина образца, мм; *D* – диаметр оправки, мм; α – угол изгиба, град

технической документации на контролируемое изделие. Расстояние между опорами должно быть не более чем $L = D + 3a$ (рис. 1.32), где a – толщина образца.

Способ испытания на изгиб с использованием ролика

Один конец образца жестко закрепляют в устройстве, имеющем два параллельных ролика (рис. 1.33). Испытание должно проводиться медленно и непрерывно сосредоточенной нагрузкой, прикладываемой на образец через вращающийся внешний ролик радиусом R. Изгиб осуществляется по дуге, центр которой совпадает с центром внутреннего ролика. Диаметр D внутреннего ролика должен соответствовать требованиям, оговоренным в нормативно-технической документации на контролируемое изделие.

В обоих способах испытание считается законченным, когда угол загиба α (рис. 1.33) достигает величины, установленной в нормативно-технической документации на контролируемое изделие.

Оценка результатов испытания должна проводиться в соответствии с требованиями нормативно-технической документации.

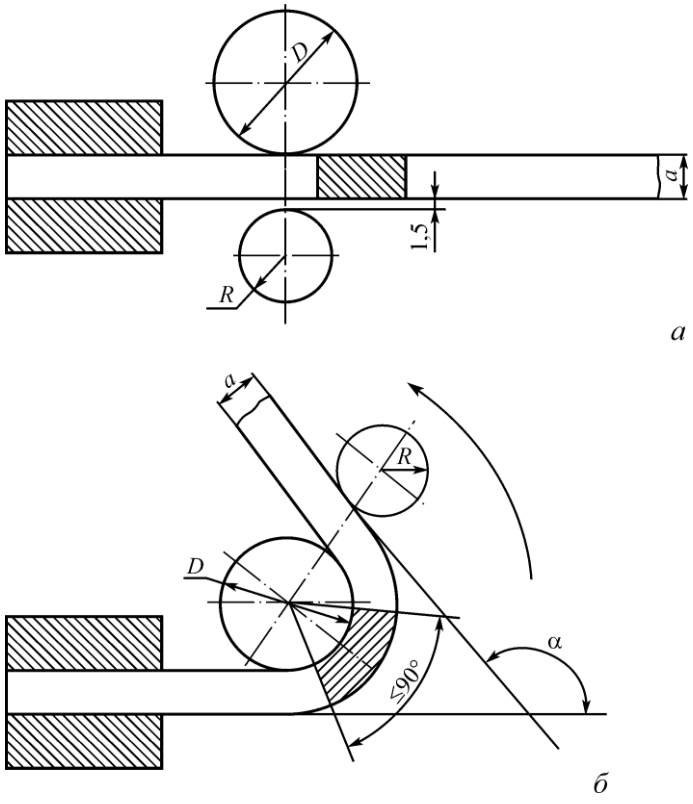


Рис. 1.33. Сварные соединения; схема закрепления образца (*а*) для проведения испытания на изгиб с использованием ролика (*б*); *a* – толщина образца, мм; *D* – диаметр внутреннего ролика, мм; *R* – диаметр вращающегося ролика, мм; α – угол изгиба образца, град

Метод испытания на боковой изгиб образцов, вырезанных поперек шва (рекомендуемое приложение к ГОСТу 6996–66 в соответствии с ИСО 5177–81)

Настоящий стандарт распространяется на стыковые соединения из сплавов на основе железа толщиной не менее 10 мм, выполненные любым способом сваркой плавлением, и устанавливает способ испытания на боковой изгиб образцов, вырезанных поперек шва из стыковых соединений, для определения пластичности соединения и наличия в нем внутренних дефектов. Стандарт регламентирует размеры образцов.

Пластическая деформация образцов осуществляется без изменения направления изгиба. Образцы вырезаются из сварного соединения поперек шва таким образом, что ширина образца совпадает с толщиной соединения. Испытания выполняются одним из двух способов: на изгиб с использованием оправки и на изгиб с использованием роликов.

Образцы для испытаний вырезают непосредственно из контролируемого изделия или из специально сваренного для проведения испытаний контрольного соединения. Образцы вырезают поперек сварного соединения так, чтобы после механической обработки сечение шва располагалось посередине длины образца и являлось его шириной (рис. 1.34).

В пределах рабочей длины образца на его поверхности не должно быть поперечных рисок и царапин. Выпуклость шва с обеих сторон должна быть зачищена механическим способом заподлицо с основным металлом.

Толщина образца должна быть не менее 10 мм и соответствовать диаметру оправки или ролика, устанавливаемому нормативно-технической документацией. Ширина образца должна равняться толщине основного металла вблизи шва.

При исходной толщине соединения, превышающей 40 мм, допускается вместо одного образца, ширина которого равна полной толщине соединения, отбирать несколько образцов шириной 20–40 мм каждый при условии, что они охватывают всю толщину соединения (рис. 1.35).

Испытуемый образец помещают на две расположенные параллельно роликовые опоры. Он медленно и непрерывно деформируется за счет приложения в его средней части по оси шва сосредоточенной нагрузки. Нагрузка на образец передается с помощью оправки.

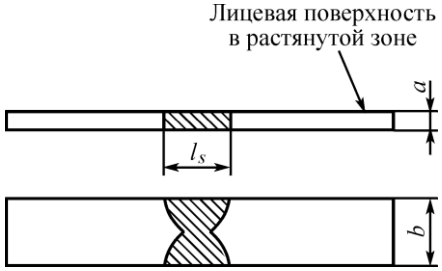


Рис. 1.34. Образец для испытаний на боковой изгиб, вырезанный поперек сварного шва; *a* – толщина образца, мм; *b* – ширина образца, мм; L_s – ширина сварного шва, мм

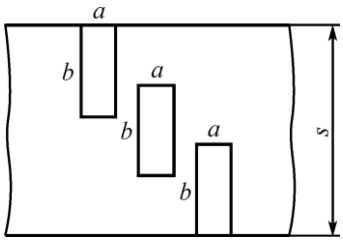


Рис. 1.35. Схема вырезки образцов по толщине сварного соединения; *a* – толщина образца, мм; *b* – ширина образца, мм; *s* – толщина сварного соединения, мм

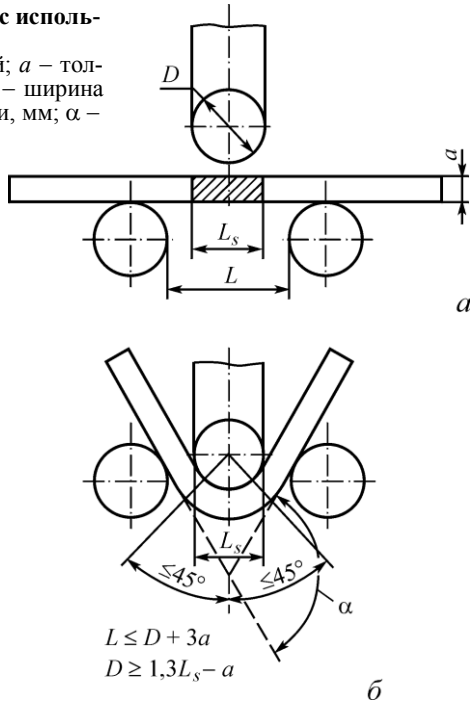


Рис. 1.36. Схема способа испытания на изгиб с использованием оправки:
а – начальный момент; *б* – окончание испытаний; *а* – толщина образца, мм; *D* – диаметр оправки, мм; L_s – ширина сварного шва, мм; *L* – расстояние между опорами, мм; α – угол изгиба образца, град

Испытание считается законченным, когда угол изгиба α (рис. 1.36) достигает значения, установленного нормативно-технической документацией.

Испытания металла на длительную прочность при растяжении (в соответствии с ГОСТом 10145–81)

Длительные испытания применяются для изучения поведения металла, в том числе сварных соединений, при постоянном нагружении растяжением в зависимости от температуры и времени.

Суть метода: доведение образца до разрушения под действием постоянной растягивающей нагрузки при постоянной температуре.

В результате испытаний определяют предел длительной прочности, т.е. напряжение, вызывающее разрушение металла за определенное время испытания при постоянной температуре, или (при приемно-сдаточных и других контрольных испытаниях) устанавливают контрольную характеристику – время до разрушения при заданном напряжении, которое равно или превышает норму времени, указанную в стандартах или технических условиях на металлопродукцию.

Время до разрушения при заданной нагрузке, отнесенной к начальной площади поперечного сечения образца, является основным показателем данного вида испытания.

Принятые обозначения:

σ – предел длительной прочности, МПа (кгс/мм^2). К этому символу добавляется сверху температура испытания, °С, и снизу – время испытания, ч. Например, запись σ_{1000}^{800} означает предел длительной прочности за 1000 ч испытания при температуре 800 °С;

δ – относительное удлинение образца (см. раздел 1.2.3) после разрыва, %, подсчитываемое по формуле

$$\delta = \frac{l_к - l_0}{l_0} \cdot 100;$$

ψ – относительное сужение образца (см. раздел 1.2.3) после разрыва, %, подсчитываемое по формуле

$$\psi = \frac{F_0 - F_к}{F_0} \cdot 100\,.$$

Для испытания на длительную прочность применяют следующие образцы:

цилиндрические – диаметром 5 мм с начальной расчетной длиной рабочей части 25 мм;

цилиндрические – диаметром 7 мм с начальной расчетной длиной рабочей части 70 мм;

цилиндрические – диаметром 10 мм с начальной расчетной длиной рабочей части 50 мм;

плоские – с начальной расчетной длиной рабочей части образца $l_0 = 5{,}65\sqrt{F_0}$, мм, где F_0 – начальная площадь поперечного сечения рабочей части образца, мм^2.

Допускается применение пропорциональных образцов других размеров и форм по согласованным техническим условиям на металлопродукцию. Допускается изготовление плоских образцов из проката, если шероховатость поверхности проката не превышает R_z =2,5 мкм по ГОСТу 2789–73.

Испытания на длительную прочность проводятся на испытательных машинах, позволяющих осуществлять постоянное нагружение образца при фиксированной температуре до 1200 °С. Требования к испытательным машинам должны соответствовать ГОСТу 15533–80.

Для приведения структуры испытуемого металла в равновесное для данной температуры состояние образец закрепляют в захватах испытательной машины и нагревают до заданной температуры в печи (время нагрева – не более 8 ч), выдерживают при этой температуре не менее 1 ч, после чего к нему прикладывают нагрузку.

Испытания на ползучесть черных и цветных металлов и сплавов при температуре до 1200 °С (в соответствии с ГОСТом 3248–81 с учетом ИСО /Р–203, ИСО/Р – 204)

Ползучесть – непрерывная пластическая деформация, происходящая при постоянной температуре и постоянном напряжении (постоянной нагрузке) в зависимости от времени.

Предел ползучести – наибольшее условное растягивающее напряжение, при котором скорость или деформация ползучести за определенный промежуток времени не превышает заданной величины.

Пример условного обозначения: $\sigma^{700}_{0,2/100}$ – предел ползучести при допуске на деформацию 0,2 % за 100 ч испытания при температуре 700 °С. При этом необходимо дополнительно указывать суммарную деформацию, при которой определяется предел ползучести. $\sigma^{600}_{1\cdot10^{-5}}$ – предел ползучести при скорости ползучести

$1 \cdot 10^{-5}$ %/ч при температуре испытания 600 °С. При этом необходимо дополнительно указать время испытания, за которое была достигнута заданная скорость ползучести.

Суть метода: образец подвергается воздействию постоянной растягивающей нагрузки при постоянной температуре при фиксировании деформации образца во времени. В результате испытания определяют предел ползучести материала.

Испытания на ползучесть проводят на образцах различной формы:

на цилиндрических – диаметром 10 мм с расчетной длиной рабочей части образца 100; 150 и 200 мм;

на плоских – шириной 15 мм с расчетной длиной рабочей части образца 100 мм (толщина образца определяется толщиной проката).

Допускается применение пропорциональных образцов других размеров и форм. Требования к точности измерения образцов до испытаний должны соответствовать ГОСТу 9651–84.

Для приведения структуры испытуемого металла в равновесное для данной температуры испытания состояние образец закрепляют в захватах испытательной машины, нагревают до заданной температуры в печи (время нагрева не более 8 ч) и выдерживают при этой температуре не менее 1 ч, после чего к нему прикладывают нагрузку.

Головки образцов и переходная часть от головки к рабочей длине подбираются в зависимости от способа крепления измерителя удлинений на образце и способа крепления образца в захватах испытательной машины.

Общие технические требования к машинам для испытаний на ползучесть приведены в ГОСТе 15533–80, требования к поверке термопар – в ГОСТе 8.338–78, требования к регулирующей измерительной аппаратуре – в ГОСТах 7164–78; 9245–79; 9736–80.

Определение предела ползучести рекомендуется проводить при допусках на удлинение от 0,1 до 1 % при длительности испытания от 50 до 10 000 ч.

Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении (в соответствии с ГОСТом 25.506–85)

Согласно механике разрушения, разрушение элементов конструкций (в том числе сварных) является следствием развития трещин, которые возникли либо при изготовлении деталей, либо во время их эксплуатации из-за воздействия нагрузок или коррозии. Механика разрушения позволяет установить количественную связь между напряжением, размерами трещин и сопротивлением металла стабильному и нестабильному развитию трещин, описать интенсивность поля напряжений в зоне вершины трещины и определить коэффициент интенсивности напряжений K, МПа·м$^{1/2}$ (кгс/мм$^{3/2}$).

Вязкость разрушения – критическое значение коэффициента интенсивности напряжений, характеризующее момент начала закритического развития трещины, когда ее длина достигает критической величины.

ГОСТ 25506–85 устанавливает методы механических испытаний, позволяющие определять характеристики вязкости разрушения металлов при статическом кратковременном нагружении на образцах толщиной не менее 1 мм в интервале температур от –269 до 600 °С.

Суть метода: для определения вязкости разрушения образцы с предварительно нанесенной усталостной трещиной испытывают с записью диаграмм нагрузка – смещение или нагрузка – прогиб. По результатам испытаний определяют основные характеристики вязкости разрушения:

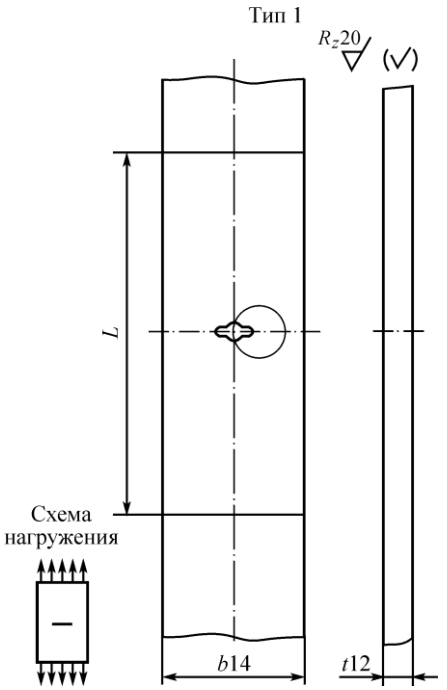


Рис. 1.37. Образец плоский, прямоугольный с центральной трещиной (тип 1) для испытаний на осевое растяжение; *b* – ширина образца, мм; *t* – толщина образца, мм; *L* – расстояние между частями образца, служащими для крепления в захватах, мм

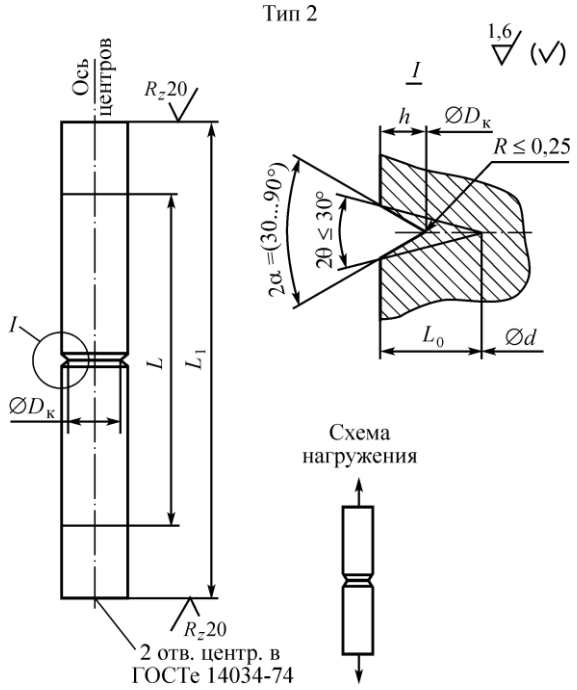


Рис. 1.38. Образец цилиндрический с плоской кольцевой трещиной (тип 2) для испытаний на осевое растяжение; *L* – расстояние между частями образца, служащими для крепления в захватах; L_1 – длина образца, мм; *d* – диаметр образца, мм; $D_к$ – диаметр образца в месте вытачки, мм

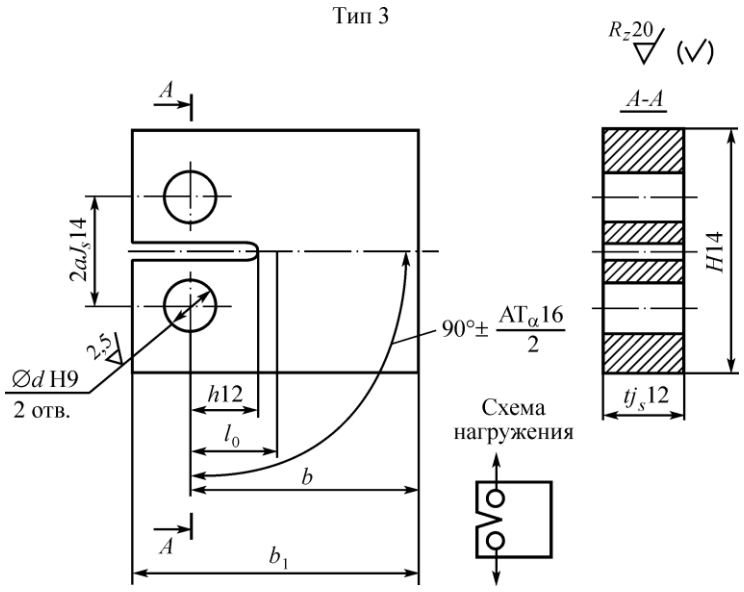


Рис. 1.39. Образец прямоугольный с краевой трещиной (тип 3) для испытаний на внецентренное растяжение

K – коэффициент интенсивности напряжений, МПа·м$^{1/2}$ (кгс/мм$^{3/2}$);

K_1 – коэффициент интенсивности напряжений для трещины отрыва, МПа·м$^{1/2}$;

K_{1c} – критический коэффициент интенсивности напряжений, МПа·м$^{1/2}$ (кгс/мм$^{3/2}$);

δ_c – раскрытие в вершине трещины при максимальной нагрузке, м/мм$^{3/2}$.

Испытания проводят на испытательных машинах, метрологические параметры которых соответствуют ГОСТу 7855–84.

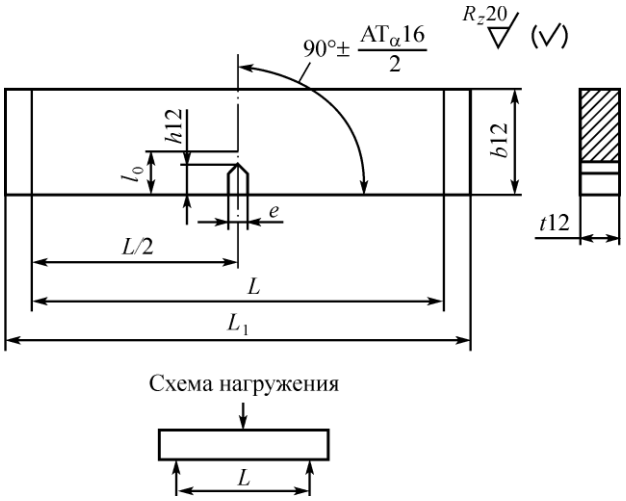


Рис. 1.40. Образец плоский с краевой трещиной для испытаний на трехточечный изгиб; L – расстояние между опорами, мм; L_1 – длина образца, мм

Для определения характеристик вязкости разрушения используют образцы четырех типов:

тип 1 – плоский прямоугольный образец с центральной трещиной для испытаний на осевое растяжение (рис. 1.37);

тип 2 – цилиндрический образец с кольцевой трещиной для испытаний на осевое растяжение (рис. 1.38);

тип 3 – прямоугольный компактный образец с краевой трещиной для испытаний на внецентренное растяжение (рис. 1.39);

тип 4 – плоский прямоугольный образец с краевой трещиной для испытаний на трехточечный изгиб (рис. 1.40).

Усталостную трещину наносят таким образом, чтобы концентратор нагрузки находился между прямыми, пересекающимися под углом 20–30° в вершине трещины. Усталостные трещины в плоских образцах типов 1; 3; 4 наносят при переменном растяжении, а в образцах типа 2 – при круговом изгибе.

Методика испытаний и порядок обработки результатов приведены в ГОСТе 25506–85.

Испытание металлов на сжатие (в соответствии с ГОСТом 25503–80)

Суть метода: образец подвергается одноосному сжатию в широком интервале температур.

В результате испытаний на сжатие определяют:

модуль упругости, E МПа (кгс/мм^2);

предел упругости $\sigma_{п.у}$, МПа (кгс/мм^2);

физический предел текучести, $\sigma_т^c$, МПа (кгс/мм^2);

условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа (кгс/мм^2);

предел прочности $\sigma_в^c$, МПа (кгс/мм^2).

Модуль упругости при сжатии – отношение нормального напряжения к вызванной им линейной деформации.

Предел упругости при сжатии – напряжение, при котором относительная остаточная деформация (укорочение) образца достигает 0,05 % от первоначальной расчетной высоты образца.

Физический предел текучести при сжатии – наименьшее напряжение, при котором образец деформируется без заметного увеличения сжимающей нагрузки.

Условный предел текучести при сжатии – напряжение, при котором относительная остаточная деформация (укорочение) образца достигает 0,2 % от первоначальной расчетной высоты образца.

Предел прочности при сжатии – напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке, предшествующей разрушению.

Для испытаний на сжатие используются цилиндрические образцы двух типов: с гладкими торцами диаметром от 10 до 30 мм и высотой от 30 до 90 мм (для определения предела упругости) и высотой 160 мм (для определения модуля упругости) и торцевыми вытачками с диаметром образцов от 10 до 30 мм (для построения кривой упрочнения).

Требования к аппаратуре, образцам, подготовке и проведению испытаний металлов на сжатие при комнатной температуре приведены в ГОСТе 25503–80.

В качестве испытательных машин применяются машины всех систем, отвечающие требованиям ГОСТов 7855–74 и 8905–73.

При проведении испытаний на сжатие испытательные машины должны быть оснащены преобразователем силы и тензометром или преобразователем силы и

перемещений с самопишущим прибором. При этом класс точности тензометров должен быть 1 по ГОСТу 18956–73.

Общие правила отбора проб, заготовок и образцов для испытаний на сжатие приведены в ГОСТе 7654–73.

Подготовка и методика проведения испытаний на сжатие при комнатной температуре изложены в ГОСТе 25503–80. Для испытаний на сжатие при низких и высоких температурах используются специальные приспособления, позволяющие производить нагрев или охлаждение образцов. При нагреве образцов необходимо давать выдержку при температуре испытания, позволяющую обеспечить стабильность структуры.

Испытание на кручение (в соответствии с ГОСТом 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 $M = F/d$, 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^2);

предел текучести при кручении $\tau_{0,3}$, МПа (кгс/мм^2);

условный предел прочности при кручении $\tau_{пч}$, МПа (кгс/мм^2);

истинный предел прочности при кручении $\tau_к$, МПа (кгс/мм^2);

максимальный остаточный сдвиг при кручении γ_{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 ГОСТе 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.

1.2.4. 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.

Измерение твердости при статическом нагружении

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 (в соответствии с ГОСТом 6996–66)

Твердость измеряют в поперечном сечении сварного соединения в соответствии с рис. 1.41 и 1.42. Твердость измеряют по Виккерсу (HV), Бринеллю (HB) и Роквеллу – шкалам A, B и C (HRA, HRB и HRC), отдавая предпочтение замеру по Виккерсу.

Измерение твердости по Виккерсу проводят по ГОСТу 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.

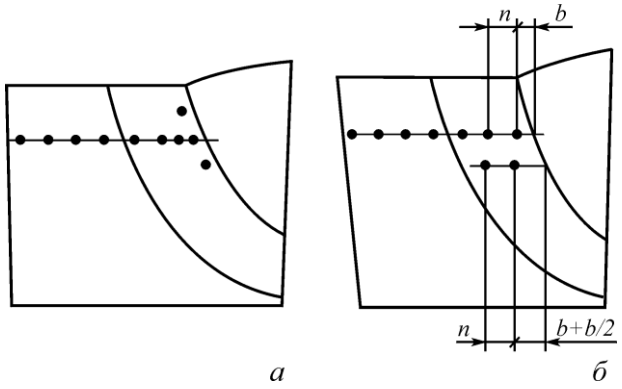


Рис. 1.41. Схемы порядка замеров твердости вблизи границы сплавления:
а – позиция *I*; *б* – позиция *II*

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

Измерение твердости по Роквеллу проводят в соответствии с ГОСТом 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 линиям. 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. 1.41 или дополнительные замеры (позиция *II* на том же рисунке). Допускается проведение замеров на участках сварного соединения, указанных на рис. 1.42.

Общие технические требования к твердомерам для измерения твердости металлов по методам Бринелля, Роквелла, супер-Роквелла и Виккерса приведены в ГОСТе 23777–79, который полностью соответствует рекомендациям ИСО/Р80–68, ИСО/Р81–67, ИСО/Р79–68. Общие требования к алмазным нако-

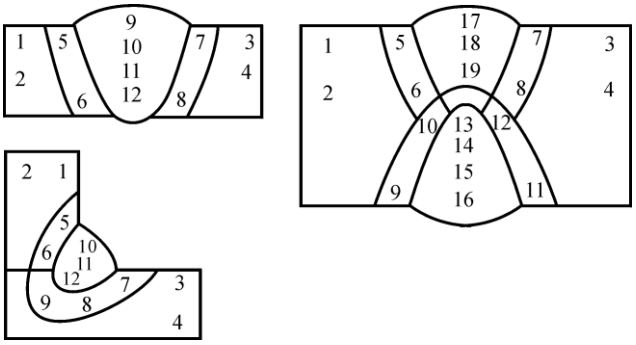


Рис. 1.42. Схемы порядка замеров твердости на участках сварного соединения

нечникам для приборов по измерению микротвердости металлов и сплавов, методы и средства их поверки изложены в ГОСТе 8.044–80, общие требования к методам и средствам поверки – в ГОСТе 8.398–80.

Общие требования к образцам и деталям, подвергаемым измерению твердости, следующие:

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

испытуемая 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 испытуемой 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 на 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 (в соответствии с ГОСТом 9012–59 и ИСО 6506–81, ИСО 4100–82)

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

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

$$\text{НВ(HBW)} = \frac{2F}{\pi D\left(D - \sqrt{D^2 - d^2}\right)},$$

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

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

Значения твердости по Бринеллю обозначаются безразмерной величиной с указанием символа материала шарика НВ (HBW). 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.

Твердость по Бринеллю определяют также с помощью переносных твердомеров статического действия в соответствии с ГОСТом 22761–77. Этот стандарт устанавливает аппаратуру, подготовку образцов и деталей к измерениям, методику измерений и обработку результатов.

Суть метода: шарик из стали или карбида вольфрама диаметром 1 или 2,5 мм вдавливается в измеряемую поверхность.

Поверка переносных приборов проводится в соответствии с требованиями ГОСТа 8.043–72.

Твердость определяют по формуле, приведенной в ГОСТе 9012–59, но, как правило, при измерении пользуются таблицами из ГОСТа 22761–77. Диаметр отпечатка измеряют с помощью микроскопов, имеющих измерительные шкалы.

Значения твердости НВ дополняются индексами, указывающими условия измерения: цифра перед НВ указывает твердость в МПа (кгс/мм^2), первая цифра после НВ указывает диаметр шарика, мм, вторая – нагрузку, Н (кгс), и третья – продолжительность выдержки, с. Например, 3000 НВ 2,5/1838/10 означает твердость по Бринеллю, равную 3000 МПа при испытании шариком диаметром 2,5 мм под нагрузкой 1838 Н и выдержке в течение 10 с.

При испытании шариком из карбида вольфрама к обозначению НВ добавляется буква W с сохранением вышеуказанных индексов.

Измерение твердости по Роквеллу (в соответствии с ГОСТом 9013–59 с учетом рекомендаций ИСО 6508–86)

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 ГОСТа 23677–79.

Алмазный конусный наконечник типа НК должен соответствовать ГОСТу 9377–81, шариковый стальной наконечник – ГОСТу 3722–81. Номинальные диаметры шариков должны быть 1,588 или 3,175 мм по ГОСТу 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 (в соответствии с ГОСТом 2999–75 с учетом рекомендаций ИСО Р 81–67)

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 ГОСТа 9377–74.

Образцовые меры твердости для поверки прибора должны соответствовать требованиям ГОСТа 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.

Например: 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 ГОСТе 2999–75 (по измеренной диагонали отпечатка).

Толщина образца или детали должна быть не менее 1 мм.

Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников (в соответствии с ГОСТом 9450–76)

Испытания проводятся двумя методами:

1. По восстановленному отпечатку (основной метод).

Суть метода: нанесение на испытуемую 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 ГОСТе 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 ус-

ловную площадь боковой поверхности отпечатка, соответствующую его измеренной глубине. Число микротвердости определяется по формулам или, чаще всего, по таблицам, приведенным в ГОСТе 9450–76.

Для измерения микротвердости наиболее часто используются микротвердомеры типа ПМТ-5. Приборы комплектуются алмазными наконечниками в виде:

четырехгранной пирамиды с квадратным основанием (наиболее применяемая);

трехгранной пирамиды с основанием в виде равностороннего треугольника;

четырехгранной пирамиды с ромбическим основанием;

бицилиндрического наконечника.

Шероховатость измеряемой поверхности образца не должна быть грубее R_a = = 0,32 мкм, определяемой по ГОСТу 2789–73.

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.

Измерение пластической твердости (в соответствии с ГОСТом 18835–73)

Суть метода: метод основан на измерении пластической твердости металлов при вдавливании в них шариков или сферических наконечников.

При измерении пластической твердости металлов стальной и твердосплавный шарик или сферический наконечник, размер кривизны которого равен половине диаметра, вдавливается в поверхность испытуемого образца или детали последовательно прилагаемыми нагрузками P_1 и P_2, действующими в течение определенного времени. После снятия каждой нагрузки измеряют отвечающую ей глубину отпечатка на поверхности испытуемого объекта.

Испытания проводятся при комнатной температуре. Используются испытательные машины по ГОСТу 9030–64 или твердомеры ТШ-2 с приспособлениями, указанными в ГОСТе 18835–73.

Глубину отпечатка шарика на испытуемой поверхности и поверхности контрольного бруска измеряют индикаторным глубиномером с ценой деления 0,001.

Число пластической твердости (HD) вычисляют по формуле

$$\mathrm{HD} = P - P_1\,\pi D(h - h_1),$$

где P_1 и P – нагрузка, кгс; D – диаметр шарика или удвоенный радиус кривизны сферической вершины наконечника, мм; h_1 и h – глубины отпечатков, измеренные после снятия нагрузок P_1 и P соответственно.

При определении пластической твердости, как правило, пользуются таблицами, приведенными в ГОСТе 18835–73.

Измерение твердости на пределе текучести вдавливаемого шара (в соответствии с ГОСТом 22762–77)

Твердость на пределе текучести характеризуется средним напряжением в лунке при вдавливании шара, когда в ней появляется средняя остаточная деформация, близкая к 0,2 %, возникающая при отношении диаметра лунки к диаметру шара, равном 0,09.

Суть метода: шар вдавливают в поверхность испытуемого образца или детали нагрузкой P_1 таким образом, чтобы измеренный диаметр отпечатка был меньше $0{,}09D$, и выдерживают под нагрузкой 1 с. После снятия нагрузки измеряют диаметр отпечатка в двух взаимно перпендикулярных направлениях. В эту же лунку производят последующее вдавливание шара с нагрузкой P_2 таким образом, чтобы измеренный диаметр отпечатка был больше $0{,}09D$ на 5 %. По значениям P_1 и P_2 методом интерполяции определяют нагрузку на пределе текучести $P_{0,2}$.

Твердость на пределе текучести $H_{0,2}$, кгс/мм^2, определяют по формуле

$$H_{0,2} = 156{,}9\ P_{0,2}/D^2.$$

При определении твердости на пределе текучести, как правило, пользуются таблицами, приведенными в ГОСТе 22762–77.

Твердость на пределе текучести обозначается символом $H_{0,2}$. Число твердости в кгс/мм^2 ставится перед символом. Например, 1200 $H_{0,2}$ МПа (122,4 $H_{0,2}$ кгс/мм^2).

Измерение твердости при динамическом нагружении

Суть метода: индентор воздействует на поверхность металла, падая с определенной высоты или под действием ударной нагрузки. Твердость определяется по высоте отскока или по размеру полученного отпечатка.

Приборы для определения твердости методом удара характеризуются малыми размерами, легкостью транспортировки, что позволяет их использовать не только в лабораторных, но и в производственных условиях. Кроме того, этот метод позволяет испытывать крупногабаритные полуфабрикаты или детали больших размеров. Однако меньшая по сравнению со статическими методами испытания точность этого метода во многих случаях позволяет получать лишь предварительные оценки величины твердости.

Измерение твердости посредством упругого отскока бойка по Шору (в соответствии с ГОСТом 23273–78)

Суть метода: боек определенной массы с алмазным наконечником вертикально падает с заданной высоты на испытуемую поверхность. Высота отскока бойка h принимается за характристику твердости и измеряется в условных единицах.

Испытания проводятся при комнатной температуре. Масса детали при измерении твердости прибором, установленным непосредственно на деталь, должна быть не менее 5 кг. Образцы, устанавливаемые на столик твердомера, должны иметь массу не менее 0,1 кг и толщину не менее 10 мм.

Величиной твердости служит высота отскока, и по шкале с произвольно нанесенными делениями 100 единиц можно непосредственно считывать значения твердости. По шкале Шора за 100 единиц твердости принята максимальная твердость стабилизированного после закалки на мартенсит образца из эвтектоидной инструментальной стали по ГОСТу 1435–74.

Прибор для измерения твердости должен обеспечивать высоту отскока бойка h_1 = 13,6±0,3 мм для 100 единиц твердости по Шору, высоту падения бойка – 19,0±5 мм. Остальные требования к твердомерам Шора, выпускаемым по ГОСТу 24746–81, должны соответствовать также ГОСТу 8.426–81.

Поверхность испытуемой детали должна иметь шероховатость не более R_a = 2,5 мкм по ГОСТу 2789–73.

Детали больших размеров испытывают посредством съемной части прибора. Прибор устанавливают вертикально по уровню, вмонтированному в корпус прибора в соответствии с требованиями ГОСТа 3059–75. Расстояние между двумя соседними отпечатками и от края детали до отпечатка должно быть не менее 2 мм.

Твердость по Шору обозначается индексом HSD, например, 85 HSD.

Величина твердости по Шору не имеет точного метода перевода ее на другие величины твердости или прочности при растяжении.

Измерение твердости посредством ударного отпечатка (в соответствии с ГОСТом 18661–73 для сталей и ГОСТом 28868–90 для цветных металлов)

Суть метода: индентор (шарик или конус) внедряют с помощью ударно действующей нагрузки одновременно в поверхность испытуемого металла и в поверхность испытуемого бруска.

Испытания проводятся при температуре от −10 до +50 °С. Используются переносные твердомеры с энергией удара от 0,03 до 2,5 кгс·м (для конического индентора) и от 0,03 до 0,7 кгс·м (для шарового индентора) при начальной скорости удара от 1 до 5 м/с.

Диаметры ударных отпечатков измеряют посредством отсчетного оптического микроскопа с погрешностью ±0,01 мм на одно деление шкалы для конического индентора и ±0,05 мм для шарового индентора. Глубину отпечатка шарика измеряют индикаторным глубиномером с ценой деления 0,01 мм.

Стальные шарики из термически обработанной стали с твердостью не менее HV 850 диаметром 5 или 10 мм должны иметь предельные отклонения диаметра в соответствии с ГОСТом 3722–60. Шероховатость шарика должна быть $R_a \leq 040$ мкм по ГОСТу 2789–73.

Двусторонний конус из твердого сплава должен иметь углы при вершинах 136° и радиус закругления не более 0,2 мм. Поверхность испытуемой детали и контрольного бруска должна иметь шероховатость не более $R_a \leq 1{,}25$ мкм в соответствии с ГОСТом 2789–73. Минимальная толщина испытуемой детали должна быть не менее 10-кратной глубины отпечатка.

При испытаниях коническими инденторами применяют стальные контрольные бруски сечением 4,5×4,5 мм любой твердости в интервале HV 100–360, а при испытании шаровыми инденторами применяют стальные контрольные бруски сечением 10×10 мм любой твердости в интервале НВ 120–200.

При измерении сравнительной твердости контрольного бруска и детали (образца) конический индентор внедряют путем кратковременной динамической нагрузки, создаваемой ударным механизмом. После испытания индентор снимают с испытуемой поверхности и с помощью оптического микроскопа измеряют диаметры отпечатков конуса на поверхности контрольного бруска и испытуемой детали.

Твердость по конусу обозначается символом $НК_{136}$ с углом при вершине 136° и равна твердости по Виккерсу, измеренной посредством четырехгранной алмазной пирамиды с углами между противоположными гранями, равными 136°.

Сравнительную твердость детали, испытываемой коническим индентором (аналогично твердости по Виккерсу HV_c), определяют расчетным путем или по таблицам в зависимости от HV – среднего значения твердости, измеренной на контрольных брусках.

Аналогично определяют HB_C – твердость детали, испытываемой шариковым индентором (аналогично испытанию твердости по Бринеллю).

Твердость, измеряемая с помощью стального шарика, обозначается символом HB_C, а с помощью конического индентора – HV_C.

Сравнительная твердость испытуемого стального образца HV_C в зависимости от отношения диаметров отпечатков на контрольном бруске и на образце и твердости стального контрольного бруска определяется по таблицам, приведенным в ГОСТах 18661–73 и 28868–90.

Сравнительная твердость испытуемого стального образца HB_C в зависимости от отношения диаметров отпечатков на контрольном бруске и на образце и твердости стального контрольного бруска определяется также по таблицам, приведенным в ГОСТе 18661–73.

Измерение микротвердости царапанием алмазными наконечниками (в соответствии с ГОСТом 21318–75)

Этот стандарт устанавливает метод измерения микротвердости царапанием поверхностного слоя (нанесением канавки) четырехгранной или трехгранной алмазной пирамидой.

Метод имеет ограниченное применение при проведении металлографических исследований.

1.2.5. ИСПЫТАНИЯ ПРИ УДАРНЫХ НАГРУЗКАХ

При эксплуатации деталей и изделий из 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} $с^{-1}$. 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 условий обработки структуры и свойств металла (наклеп, термическая обработка, чистота металла, текстура и другие факторы).

Испытание металла различных участков сварного соединения и наплавленного металла на ударный изгиб (на надрезанных образцах) (в соответствии с ГОСТом 6996–66 с учетом ГОСТа 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 раз-

личных 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^2 (кгс·м/см^2).

Испытания на ударный изгиб проводят на маятниковых копрах, которые должны соответствовать ГОСТу 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. 1.43 (образцы с U-образным надрезом)

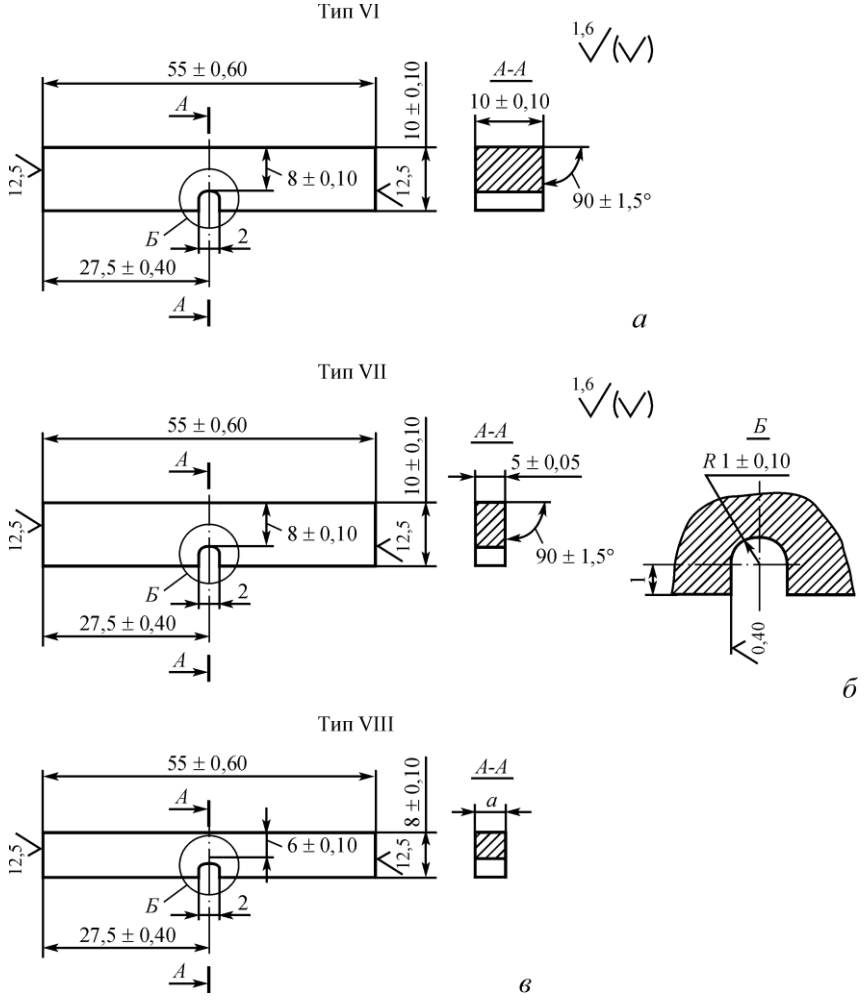


Рис. 1.43. Образцы типов VI (*а*), VII (*б*), VIII (*в*) для испытаний на ударный изгиб с U-образным надрезом:

а – толщина основного металла, мм

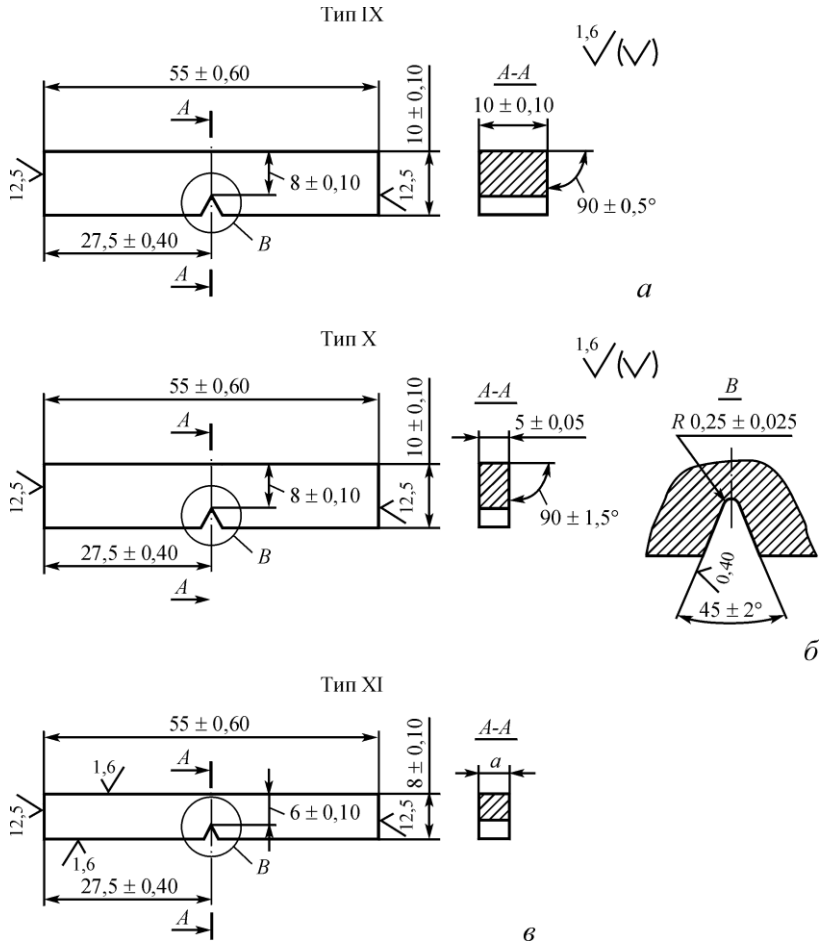


Рис. 1.44. Образцы типов IX (*а*), X (*б*), XI (*в*) для испытаний на ударный изгиб с V-образным надрезом:
а – толщина основного металла, мм

или рис. 1.44 (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.

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 указывается); 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.

Примеры условных обозначений

1. Ударная вязкость, определяемая на образце типа VII при температуре 100 °С, при максимальной энергии удара маятника 150 Дж, с надрезом вида U, расположенным по зоне сплавления: KCU^{100} 150 VII ЗС.

2. Ударная вязкость, определяемая на образце типа XI при температуре –40 °С, при максимальной энергии удара маятника 50 Дж, с надрезом вида V, расположенным по зоне термического влияния на расстоянии *t*, мм, от границы сплавления до оси надреза: KCV^{-40} 50 XI ЗТВ.

3. Ударная вязкость, определяемая на образце типа VI при температуре 20 °С, при максимальной энергии удара маятника 300 Дж, с надрезом вида U, расположенным по металлу шва: *KC*U Ш.

4. Ударная вязкость на образце типа IX при температуре 20 °С, при максимальной энергии удара маятника 300 Дж, с надрезом вида V, расположенным поперек металла шва: KCV III П.

В большинстве случаев испытания проводят на образцах квадратного сечения с шириной от 2 до 10 мм с надрезом. Применяют три типа концентраторов напряжений: U-, V- и Т-образный. В последнем случае (Т-образный концентратор) в вершине V-образного надреза наводится усталостная трещина, образующаяся при плоском циклическом изгибе образца.

Образцы с U-образным концентратором применяются при обычных приемно-сдаточных испытаниях металла, с V-образным концентратором – при приемно-сдаточных испытаниях металлов, используемых для конструкций повышенной степени надежности, с Т-образным концентратором – для приемо-сдаточных испытаний металлов, применяемых для особо ответственных конструкций, при эксплуатации которых могут возникать трещины, приводящие к катастрофическому разрушению.

Работа удара обозначается символом К, ударная вязкость обозначается символом КС, вид концентратора обозначается буквами U, V, Т, расположенными после символа.

Для обозначения работы удара и ударной вязкости при повышенных и пониженных температурах вводится цифровой индекс, помещаемый после буквенных составляющих, указывающий температуру испытания. Например: KV^{-40} 50/2/2 – работа удара, определенная на образце с концентратором вида V при температуре –40 °С. Максимальная энергия удара маятника 50 Дж, глубина концентратора 2 мм, ширина образца 2 мм; $КСТ^{100}$ 150/3/7,5 – ударная вязкость, определенная на образце с концентратором вида Т при температуре 100 °С. Максимальная энергия удара маятника 150 Дж, глубина концентратора 3 мм, ширина образца 7,5 мм.

Допускается обозначать ударную вязкость двумя символами a_i; первый (a) – символ ударной вязкости, второй (i) – символ типа образца в соответствии с таблицей, приведенной в ГОСТе 9454–78.

Методика испытаний на ударный изгиб, место вырезки заготовки для изготовления образцов, ориентация оси концентратора, технология вырезки заготовок и изготовления образцов приведены в ГОСТах 6996–66 и 7565–74 (для черных металлов). Для цветных металлов и сплавов все это должно быть указано в нормативно-технической документации.

Испытание на ударный изгиб при температурах от –100 до –269 °С (в соответствии с ГОСТом 22848–77)

При испытании определяются следующие характеристики:

работа A, затрачиваемая на разрушение образца;

ударная вязкость a, 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 ГОСТов 6996–66 и 9454–60.

Для испытания на ударный изгиб при температуре до –253 °С применяются маятниковые копры по ГОСТу 9454–78, а для испытаний при температурах до –269 °С – специальные копры.

В качестве хладагента применяются жидкий азот с содержанием кислорода не более 10 % по ГОСТу 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 ГОСТу 3002–70.

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

Процент вязкой и хрупкой составляющих в изломах образцов определяется по методике, приведенной в ГОСТе 4543, или по методикам фрактографических исследований, изложенных в главе 5.

Испытание металла различных участков сварного соединения на стойкость против механического старения (в соответствии с ГОСТом 6996–66)

Стойкость против механического старения характеризуется изменением ударной вязкости металла, подвергнутого старению, по сравнению с ударной вязкостью его в исходном состоянии. О стойкости металла против механического старения судят по выраженному в процентах отношению этих величин или по абсолютному (нормативному) значению ударной вязкости после старения. Испытания проводят для металла шва и различных участков металла околошовной зоны.

Заготовки подвергают искусственному старению по методике: деформация растяжением из расчета получения (10±0,5) % остаточного удлинения в пределах расчетной длины L, ограниченной кернами или рисками. Рекомендуется на поверхности образцов через каждые 10 мм наносить риски для проверки равномерности деформации по длине расчетной части.

После удлинения заготовку подвергают равномерному нагреву в течение 1 ч при температуре 250 °С с последующим охлаждением на воздухе. Из рабочей части заготовок (рис. 1.45) отбирают образцы типов VI, VII, IX, X. Ось надреза должна совпадать с осью симметрии шва. Затем проводят испытания образцов на ударный изгиб в соответствии с ГОСТом 9454–78 на маятниковых копрах, которые должны соответствовать ГОСТу 10708–82.

Указанная методика старения применяется для сварных соединений из сталей. Методика старения для других металлов и сплавов, а также иная температура нагрева или величина деформации для соединений из стали оговариваются стандартами или другой технической документацией.

Механическому старению подвергают заготовки, отбираемые от стыкового соединения в соответствии с рис. 1.45. Ось симметрии заготовки должна совпадать с продольной осью шва или с осью будущего надреза.

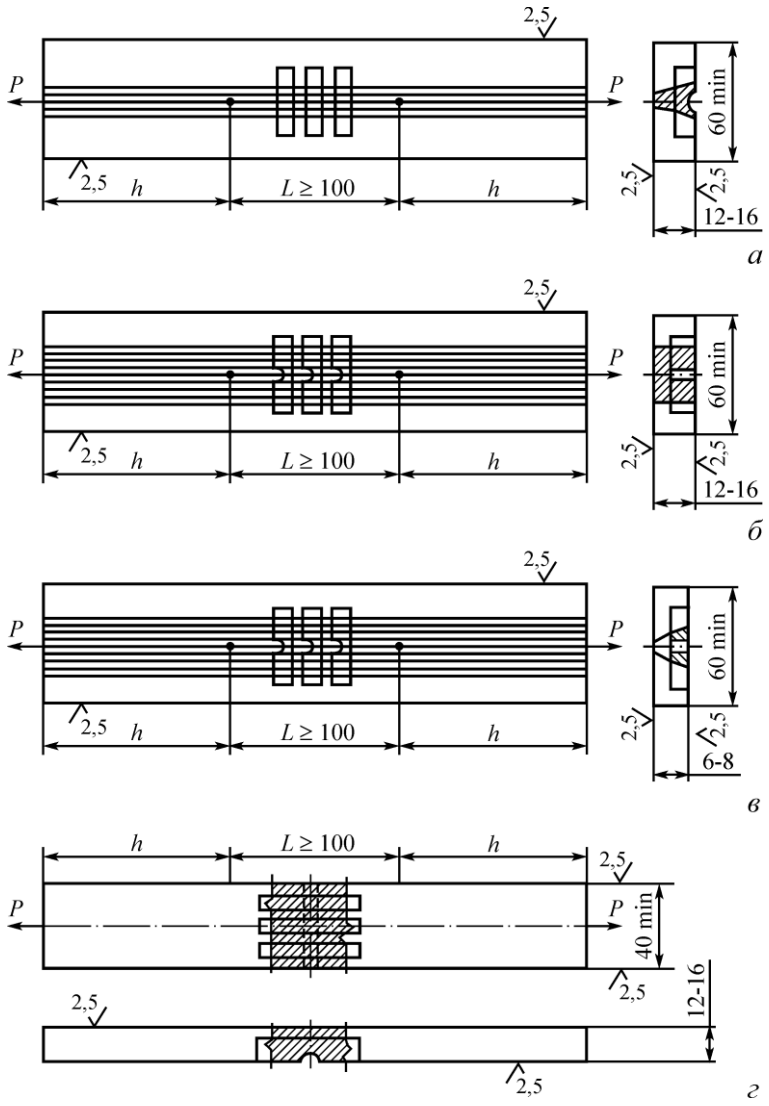


Рис. 1.45. Схемы вырезки образцов из различных участков сварного соединения при испытаниях на стойкость против механического старения. Образцы типов VI и IX вырезаются по схемам *а, б, г*; типов VII и X – по схеме *в*; *L* – длина растянутой зоны заготовки, мм; *h* – длина участков заготовки в захватах испытательной машины, мм

Длину захватной части заготовок h устанавливают в зависимости от конструкции испытательной машины.

Методика проведения испытаний и обработка результатов осуществляются в соответствии с ГОСТом 7268–82.

Условные обозначения: ударная вязкость при испытаниях на стойкость против механического старения – КС; ударная вязкость сварных стальных образцов – КСстШ, где индексы «ст» обозначают сталь, «Ш» – шов.

В соответствии с ГОСТом 7268–82 показатель склонности сталей к механическому старению (C, %) вычисляется по формуле

$$C = \frac{\text{KC}_{\text{ср}} - \text{KCA}}{\text{KC}_{\text{ср}}} \cdot 100,$$

где $\text{KC}_{\text{ср}}$ – среднее арифметическое значение ударной вязкости стали в исходном состоянии, Дж/см^2; KCA – среднее арифметическое значение ударной вязкости стали после старения, Дж/см^2.

Вязкость разрушения определяется по ГОСТу 25506–85.

Испытание сварного соединения на ударный разрыв (в соответствии с ГОСТом 6996–66)

Испытания на сопротивление ударному разрыву проводят для сварных стыковых соединений листов толщиной до 2 мм. Форма и размеры образца типа XXXI должны соответствовать указанным на рис. 1.46. При испытании материалов высокой прочности разрешается изменять конструкцию захватной части образца.

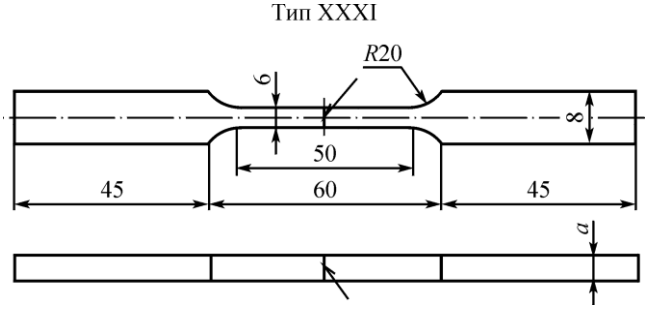


Рис. 1.46. Форма и размеры образца типа XXXI для испытания на ударный разрыв; *a* – толщина образца, мм

Испытания проводят на маятниковых копрах с приспособлениями для закрепления плоских образцов. Удельную ударную работу определяют по формуле

$$a_{\text{у}} = A_{\text{у}}/V,$$

где $A_{\text{у}}$ – работа удара, затраченная на разрыв образца, Дж (кгс·м); V – объем расчетной части образца, равный произведению толщины основного металла (a) на расчетную длину и ширину образца, см^3 (м^3).

1.2.6. ИСПЫТАНИЯ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

Основные определения

В практике большинство разрушений деталей и элементов конструкций, в частности сварных, происходит под действием динамических нагрузок в режиме колебаний. Подобные разрушения наступают после определенного числа циклов нагружения, причем номинальные напряжения в металлах не превышают статического предела упругости. Это явление называется *усталостью*, а вызванное им разрушение – *усталостным*. При таком виде нагружения происходят процессы,

обусловливающие необратимые изменения в металле, которые и приводят к полному разрушению.

Основные термины и определения, относящиеся к методам испытаний металлов и сплавов при циклических нагрузках, приведены в ГОСТах 23207–78; 17325–78 (с учетом рекомендаций ИСО Р 373).

Усталость – процесс постепенного накопления повреждений металла под действием переменных напряжений, приводящих к изменению структуры, свойств, образованию трещин, их развитию и разрушению изделия.

Сопротивление усталости (циклическая прочность, усталостная прочность) – способность металла противостоять усталостному разрушению.

Усталостная трещина – трещина, возникшая под действием переменных напряжений (циклических нагрузок).

Скорость роста усталостной трещины – отношение приращения длины усталостной трещины к интервалу времени.

Усталостное разрушение – разрушение металла вследствие распространения усталостной трещины.

Усталостный излом – излом, возникающий при усталостном разрушении под действием знакопеременных или циклических нагрузок.

Долом в усталостном изломе – часть усталостного излома, возникшая в завершающей части разрушения из-за превышения прочности металла в оставшемся сечении.

Малоцикловая усталость – процесс постепенного накопления повреждения металла под действием высоких переменных напряжений и малого числа циклов нагружения.

Многоцикловая усталость – усталость металла, при котором усталостное повреждение или разрушение происходит в основном при упругом деформировании.

База испытаний – предварительно задаваемая наибольшая продолжительность испытаний на усталость (по числу циклов).

Предел выносливости (предел усталости) – максимальное по абсолютному значению напряжение цикла, при котором еще не происходит усталостное разрушение до базы испытания (заданного числа циклов).

Испытания на усталость проводят при растяжении–сжатии, изгибе и кручении:

при симметричных и асимметричных циклах напряжений или деформаций;

при наличии или отсутствии концентраторов напряжений;

при комнатной, повышенной и пониженной температурах;

при наличии или отсутствии агрессивной среды;

в много- или малоцикловой упругой и упругопластической области.

Испытания на усталость (в соответствии с ГОСТом 25502–79)

Для испытаний на усталость применяются различные виды испытательных машин. По виду нагружения их разделяют на испытательные машины для циклического растяжения – сжатия, изгиба и кручения. Эти машины должны обеспечивать нагружение образцов по одной или нескольким схемам, приведенным на рис. 1.47–1.50.

Испытания на усталость проводятся:

на гладких образцах круглого сечения (рис. 1.47);

на гладких образцах прямоугольного сечения (рис. 1.48 и 1.49);

на образцах с V-образными надрезами (рис. 1.50);

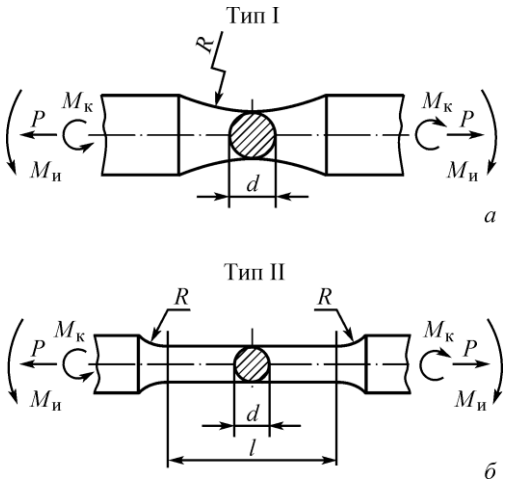


Рис. 1.47. Рабочая часть образцов типов *I* и *II* для испытания на усталость; *d* – диаметр образца в проточке, мм. Схема приложения нагрузки – растяжение с кручением и изгибом

на плоских образцах с центральным круглым отверстием или боковыми надрезами.

Рабочая часть образцов должна иметь шероховатость в соответствии с ГОСТами 25347–82; 2789–73.

Методика испытаний изложена в ГОСТе 25502–79. Испытания при повышенных и пониженных температурах проводят при тех же видах деформаций и на тех же образцах, что и при комнатной температуре. Температура образцов контролируется с помощью термопар. Нагружение образцов производят после установившегося теплового режима системы образец – печь при достижении образцом заданной температуры.

Испытания в условиях агрессивной среды проводят при тех же видах деформации и на тех же образцах, что и при ее отсутствии. При этом образец непрерывно находится в указанной среде.

Испытания на малоцикловую усталость (при долговечности до $5 \cdot 10^4$ циклов) проводятся при нагружении по схеме растяжение–сжатие.

Испытания на малоцикловую усталость при термомеханических нагружениях в условиях повышенных температур (до 1100 °С) на воздухе проводятся в соответствии с ГОСТом 25505–85. В качестве основных приняты методы испытания при независимом нагружении и нагревании (термомеханическая усталость), а также при нагружении стеснением тепловых деформаций (термоусталость).

Малоцикловая усталость при термомеханическом нагружении – разрушение в результате циклического упругопластического деформирования, сопровождаемого изменением температуры. Малоцикловая усталость – частный случай мало-

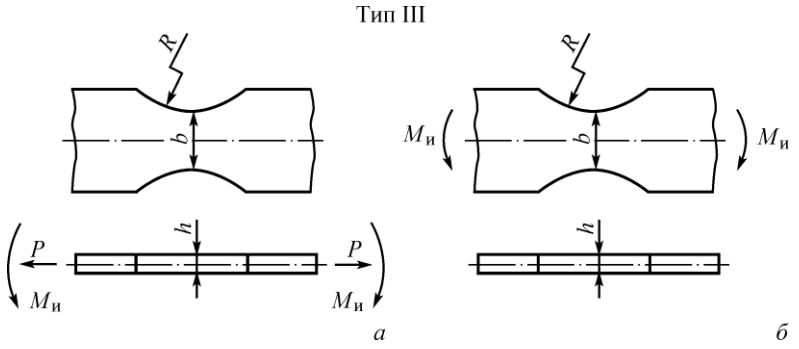


Рис. 1.48. Рабочая часть образца типа III для испытания на усталость.
Схема приложения нагрузки:
а – растяжение с изгибом; *б* – изгиб; *h* – толщина образца, мм; *b* – ширина образца в проточке, мм

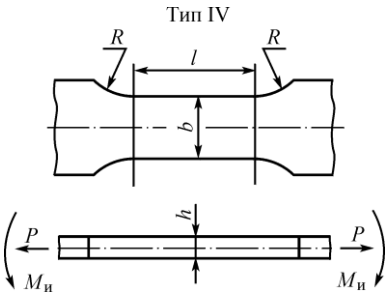


Рис. 1.49. Рабочая часть образца типа IV. Схема приложения нагрузки – растяжение с изгибом; *h* – толщина образца, мм; *b* – ширина рабочей части образца, мм; *l* – длина рабочей части образца, мм

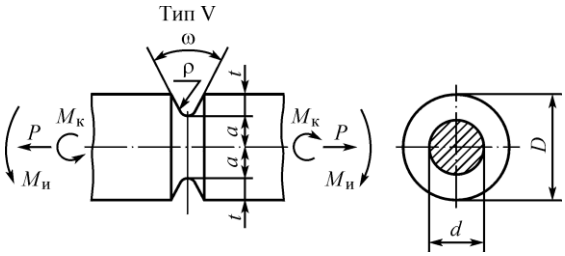


Рис. 1.50. Рабочая часть образца типа V. Схема приложения нагрузки – растяжение с изгибом; *D* – исходный диаметр образца, мм; *d* – диаметр образца в проточке, мм

цикловой термомеханической усталости, при которой нагружение обусловлено стеснением тепловых деформаций при циклическом нагреве – охлаждении.

Машины и аппаратура для испытаний при малоцикловом термомеханическом нагружении должны соответствовать ГОСТу 9651–73 и ГОСТу 7855–84. Температура рабочей зоны образцов изменяется термопарами или пирометрами.

Испытания проводятся на гладких образцах с рабочей частью круглого сечения:

трубчато-цилиндрических (рис. 1.51, *а*) по ГОСТу 25505–85;

сплошных цилиндрических (рис. 1.51, *б*);

трубчатых корсетных (рис. 1.52, *а*);

сплошных корсетных (рис. 1.52, *б*).

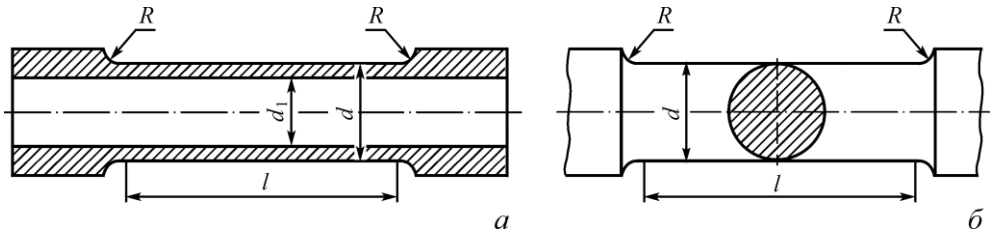


Рис. 1.51. Рабочая часть образцов для испытания на малоцикловую усталость:
а – трубчато-цилиндрический образец; *б* – сплошной цилиндрический образец; *d* – диаметр рабочей части образца, мм; d_1 – внутренний диаметр трубы, мм; *l* – длина рабочей части образца, мм

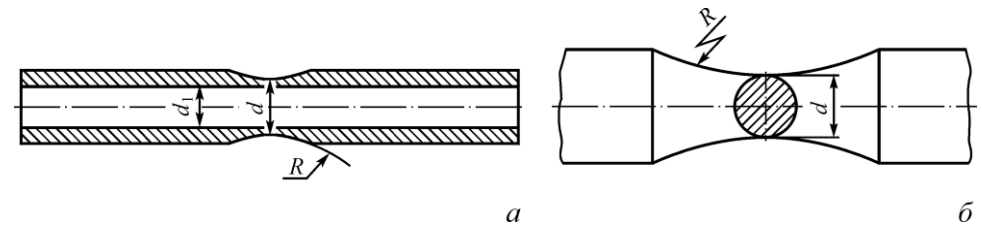


Рис. 1.52. Рабочая часть образцов для испытания на малоцикловую усталость:
а – трубчато-корсетный образец; *б* – сплошной корсетный образец; *d* – диаметр образца в проточке, мм; d_1 – внутренний диаметр трубчато-корсетного образца, мм

Образцы изготавливают в соответствии с требованиями ГОСТа 25502–79. Проведение испытаний на малоцикловую усталость при термомеханическом нагружении и обработка результатов изложены в ГОСТе 25505–85.

1.3. МЕТОДЫ КОРРОЗИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ

1.3.1. ВИДЫ И ПОКАЗАТЕЛИ КОРРОЗИИ

Коррозия металлов – самопроизвольное 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 ГОСТу 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 ГОСТу 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. Типы коррозии в виде схем приведены в приложении к указанному стандарту.

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

Определяются следующие показатели коррозии.

1. Сплошная коррозия.

Потеря массы на единицу площади поверхности Δm, кг/см^2, вычисляется по формуле

$$\Delta m = (m_0 - m_1)/S,$$

где m_0 – масса образца до испытания, кг; m_1 – масса образца после испытания, кг; S – площадь поверхности образца, м^2.

Данный показатель коррозии металла в газах при высокой температуре определяется по ГОСТу 6130–71.

2. Коррозия пятнами.

Площадь каждого пятна определяется планиметром или другими более современными методами. Степень поражения поверхности металла коррозионными пятнами (G) в % вычисляется по формуле

$$G = \left(\sum_{i=1}^{n} S_i / S \right) \cdot 100 ,$$

где S_i – площадь i-того пятна, м^2; n – количество пятен; S – площадь поверхности образца, м^2.

3. Питтинговая коррозия.

Максимальная глубина проникновения питтинговой коррозии определяется:

микроскопически;

механическим индикатором с игольчатым щупом;

последовательным механическим удалением слоев металла до исчезновения последних питтингов.

4. Межкристаллитная коррозия.

Глубина межкристаллитной коррозии определяется металлографическим методом по ГОСТу 1778–70.

Изменение механических свойств определяют сравнением свойств образцов металла, подвергающихся и не подвергающихся коррозии. Образцы изготавливают по ГОСТам 1497–84; 11701–83 и 9454–78.

Допускается применять физические методы контроля глубины проникновения коррозии по ГОСТу 6032–89.

5. Коррозионное растрескивание и коррозионная усталость.

При этом трещина выявляется визуально или с применением оптических или других дефектоскопических средств контроля.

Изменение механических свойств определяют так же, как в п. 4.

6. Расслаивающая коррозия.

Степень поражения поверхности при расслаивающей коррозии определяется долей в процентах площади с отслаиванием от общей площади поверхности образца по ГОСТу 9.904–82.

Суммарную длину торцов с трещинами для каждого образца (L, %) вычисляют по формуле

$$L = \sum_{i=1}^{n} L_i / n ,$$

где L_i – длина участка торца, пораженного трещинами, м; n – периметр образца, м.

Допускается использовать в качестве полуколичественного (балльного) показателя расслаивающей коррозии балл условной шкалы по ГОСТу 9.904–82.

Основные методы коррозионных испытаний следующие:

1) на коррозионное растрескивание;
2) на коррозионное расслаивание;
3) на межкристаллитную коррозию;
4) на питтинговую коррозию;
5) на коррозионные потери в атмосферных условиях;
6) электрохимические коррозионные испытания;
7) металлографический метод определения коррозионных поражений.

1.3.2. ИСПЫТАНИЯ НА КОРРОЗИОННОЕ РАСТРЕСКИВАНИЕ

Общие требования к методам испытаний на коррозионное растрескивание металлов и сплавов (в соответствии с ГОСТом 9.901.1–89 с учетом ИСО 7539/1–87)

Данный стандарт устанавливает следующие термины.

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 испытуемого 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} $с^{-1}$, 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, испытуемым 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 – долевое, 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 ГОСТов 3248–80 и 10145–80.

Для испытаний при ступенчато изменяемой нагрузке применяются машины и приспособления, предназначенные для статического нагружения и обеспечивающие возможность плавно нагружать образцы, поддерживать постоянную нагрузку, надежно центрировать образцы (например, разрывная машина типа Р-5 по ГОСТу 7855–80).

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, типа универсальной испытательной машины МУП-20 по ГОСТу 7855–80.

Испытание на коррозионное растрескивание образцов при одноосном растяжении (в соответствии с ГОСТом 9.901.4–89 с учетом ИСО 7539/4–89)

Данный стандарт устанавливает общие требования к подготовке и методу испытаний образцов при одноосном растяжении с целью определения сопротивления коррозионному растрескиванию.

Общие требования к испытаниям на коррозионное растрескивание и термины должны соответствовать ГОСТу 9.901.4–89.

Стандарт определяет требования к образцам, изготавливаемым из прутков, плит, проволоки, листов, труб, а также из соединений, выполненных сваркой, клепкой и другими способами. Оговариваются порядок проведения испытаний и оценка их результатов.

Ускоренные испытания на коррозионное растрескивание алюминиевых и магниевых сплавов без защитных покрытий (в соответствии с ГОСТом 9.019–78)

Данный стандарт устанавливает два метода испытаний:

при заданной деформации;

при постоянной осевой растягивающей нагрузке.

Критерием оценки сопротивляемости коррозионному растрескиванию являются:

уровень безопасных напряжений – максимальное напряжение, при котором не происходит разрушения образцов за установленный срок испытаний;

время до появления первой, визуально обнаруживаемой трещины при испытании на одном уровне напряжений;

характер коррозионного разрушения.

Схемы вырезки образцов из различных видов деформированных полуфабрикатов, в том числе из сварных соединений, приведены на рис. 1.53.

Образцы из литейных сплавов вырезают в направлениях, определяемых программой испытаний.

При испытаниях методом заданной деформации применяют образцы размером 110×15×2,5 мм. Допускается применение кольцевых образцов высотой 20 мм, диаметром не менее 10 мм и толщиной стенки не более 0,1D (внешнего диаметра) (рис. 1.54).

При испытаниях методом постоянной осевой растягивающей нагрузки применяют образцы по ГОСТу 17332–71.

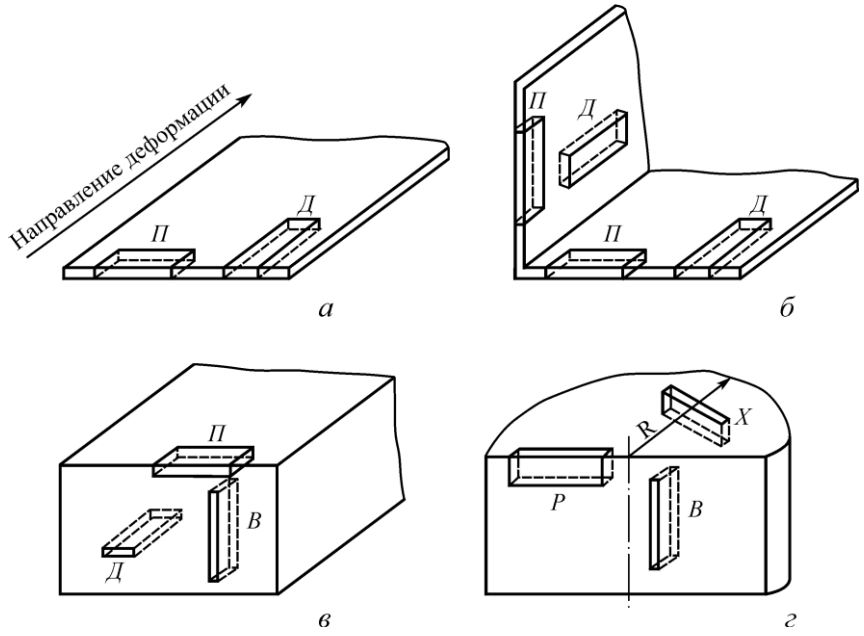


Рис. 1.53. Схемы вырезки образцов для ускоренных испытаний на коррозионное растрескивание:
а – лист; *б* – прессованный профиль; *в* – прессованная полоса; *г* – поковка. Направление вырезки: *Д* – долевое; *П* – поперечное; *В* – высотное; *Р* – радиальное; *Х* – хордовое

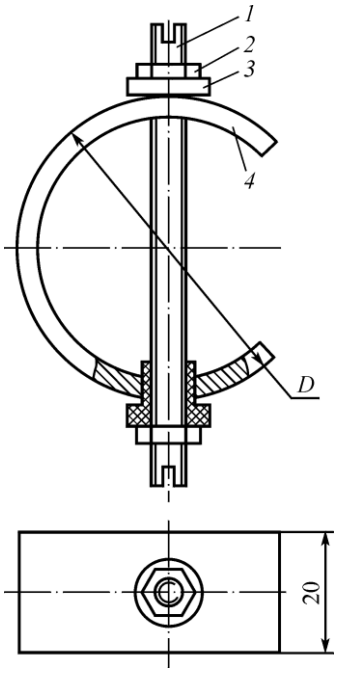


Рис. 1.54. Схема приспособления для деформации кольцевого образца стяжной шпилькой:
1 – стяжная шпилька из сплава титана или из стали марки 12Х18Н9Т; *2* – гайка из сплава титана или стали марки 12Х18Н9Т; *3* – текстолитовая прокладка; *4* – кольцевой образец

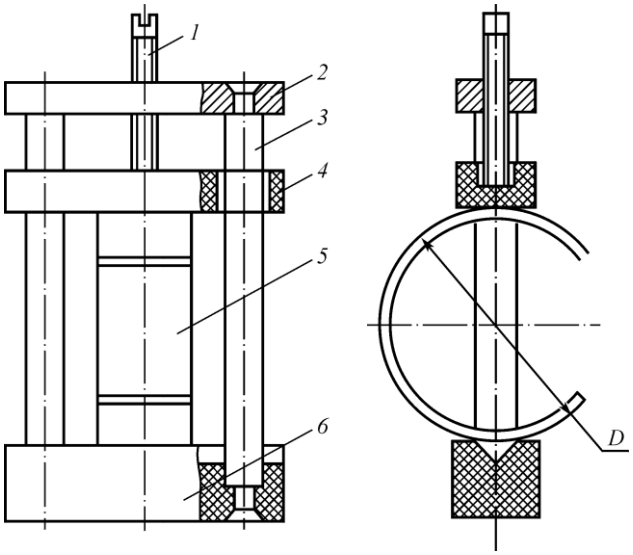


Рис. 1.55. Схема приспособления для деформации кольцевого образца в струбцине:
1 – нажимной винт из сплава титана или из стали марки 12Х18Н9Т; *2* – верхняя перекладина из сплава титана или стали марки 12Х18Н9Т; *3* – направляющая из сплава титана или из стали марки 12Х18Н9Т; *4* – подвижная текстолитовая перекладина; *5* – нижняя текстолитовая перекладина; *6* – основание

Приспособление для деформации кольцевого образца в струбцине показано на рис. 1.55, приспособление для испытания плоских образцов при заданной деформации в сложнонапряженном состоянии (изгиб с кручением) – на рис. 1.56.

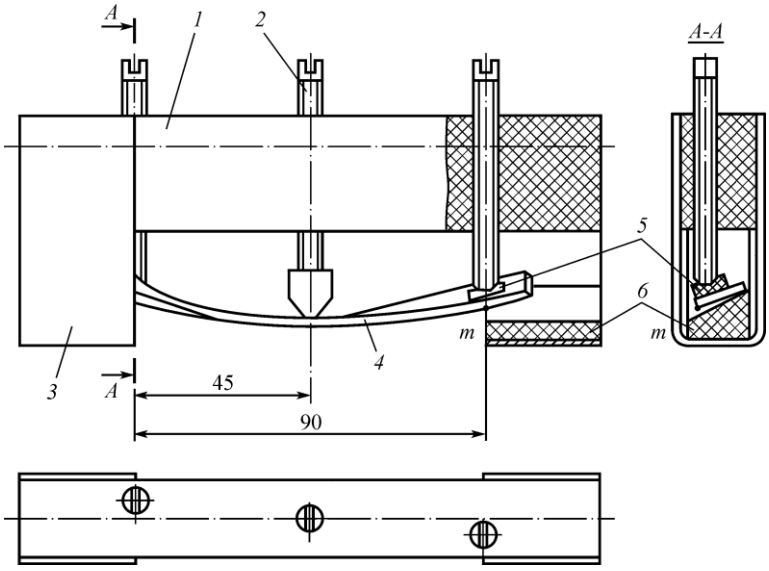


Рис. 1.56. Схема приспособления для испытаний плоских образцов при заданной деформации в сложнонапряженном состоянии (изгиб с кручением):
1 – скоба; *2* – шпилька; *3* – серьга; *4* – образец; *5, 6* – прокладки. Материал: поз. *1, 3, 5, 6* – текстолит; поз. *2* – титан или сталь марки 12Х18Н9Т

Испытания на коррозионное растрескивание образцов в виде изогнутого бруса (в соответствии с ГОСТом 9.901.2–89 с учетом ИСО 7539/2–89)

Данный стандарт определяет общие требования к подготовке образцов в виде изогнутого бруса и методы их испытания с целью определения сопротивления коррозионному растрескиванию.

Суть метода заключается в изгибе бруса с прямоугольным или круглым сечением и последующем воздействии на напряженный образец испытательной среды. Суммарное приложенное растягивающее напряжение поверхностного слоя изогнутого бруса рассчитывают по модулю упругости материала и стреле прогиба. Стандарт оговаривает шесть способов нагружения образцов по схемам двух-, трех- и четырехточечного нагружения.

Для испытаний листов, плит, прессованных изделий изготавливают плоские образцы прямоугольного сечения, а для испытаний отливок, сварных соединений, проволоки, прутков – механически обработанные образцы круглого сечения.

Данный ГОСТ устанавливает требования к условиям проведения испытаний, к оценке и оформлению результатов испытаний.

Ускоренные испытания на коррозионное растрескивание высокопрочных сталей и титановых сплавов (в соответствии с ГОСТом 9.903–81)

Испытываются образцы с предварительно созданными усталостными трещинами.

Суть метода: образцы подвергают одновременному воздействию коррозионной среды и растягивающих напряжений, при котором поверхности наведенной трещины расходятся в направлении действующих напряжений симметрично относительно плоскости исходной трещины.

Стандарт устанавливает три метода испытаний:

при постоянной нагрузке;

при ступенчато изменяемой нагрузке;

при постоянной деформации.

Критерием оценки стойкости материала против коррозионного растрескивания служит пороговый коэффициент интенсивности напряжений $K_{1кр}$, характеризующий сопротивление материала росту трещины при коррозионном растрескивании, ниже которого рост трещины отсутствует или скорость роста трещины не превышает 0,0001 мм/ч.

1.3.3. ИСПЫТАНИЯ НА КОРРОЗИОННОЕ РАССЛАИВАНИЕ (В СООТВЕТСТВИИ С ГОСТОМ 9.904–82)

Настоящий стандарт устанавливает метод ускоренных испытаний на расслаивающую коррозию алюминиевых сплавов без защитных покрытий.

Суть метода: испытания проводят в емкостях при полном погружении образцов в раствор для испытания.

Испытания проводят на плоских образцах размером 60×40 мм. Плакирующий слой на образцах удаляют в соответствии с ГОСТом 9.021–74. Торцевые стороны по периметру образца подвергают механической обработке, параметр шероховатости R_z должен быть не более 2,5 мкм по ГОСТу 2789–73. При испытании сварных соединений сварной шов располагают в середине образца перпендикулярно к его длинной стороне.

Площадь с отслоениями на торцевых поверхностях образцов определяют визуально (рис. 1.57) или с использованием методов количественной металлогра-

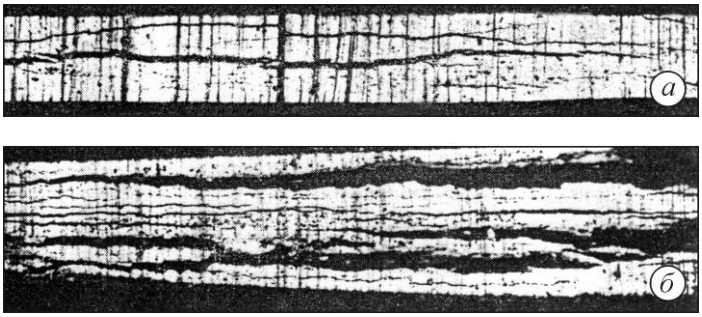


Рис. 1.57. Торцевая поверхность образцов после испытаний:
а – балл 9; *б* – балл 10 (в соответствии с ГОСТом 9.904–82)

фии и выражают в процентах от площади оцениваемых поверхностей. Суммарную длину торцов с трещинами (L, %) для каждого образца в процентах определяют по формуле

$$L = (\sum l_i / П) \cdot 100,$$

где l_i – длина участка торца, пораженного трещинами, мм; $П$ – периметр образца, мм.

Образцы в растворе располагаются вертикально. Раствор для испытаний и продолжительность испытаний выбирают в зависимости от состава сплава и его термической обработки в соответствии с табл. 7.

Стойкость сплава при РСК оценивают в баллах по десятибалльной шкале, приведенной в табл. 8.

Таблица 7. **Растворы для проведения испытаний**

Номер раствора	Сплавы, состояние	Содержание компонентов, мм					Продолжительность испытаний, сут
		калий двухромовокислый	кислота соляная	натрий хлористый	калий азотнокислый	кислота азотная	
1	Сплавы системы Al–Zn–Mg в естественно состаренном состоянии	20	9	–	–	–	7
2	Сплавы систем: Al–Cu–Mg	10	–	225	50	5,5	2
3	Al–Cu–Mg–Fe–Ni в искусственно состаренном состоянии	–	–	225	50	5,5	2
4	Все сплавы, кроме указанных выше систем и состояний, при всех режимах старения	20	13,5	–	–	–	7

Примечания. 1. Раствор № 3 применяется вместо раствора № 2 в случае, если продукты коррозии не затрудняют оценку РСК (расслаивающая коррозия). 2. В растворе № 2 допускается замена двухромовокислого калия на смесь: оксид хрома (VI) 9 г/дм^3 и калий двухромовокислый 1,5 г/дм^3. 3. Для исследовательских испытаний допускается увеличенная продолжительность испытания в растворах №№ 1 и 4 до 14 сут, в растворах №№ 2 и 3 – до 4 сут.

Таблица 8. **Шкала для определения стойкости сплавов к РСК**

Балл	Суммарная длина торцов с трещинами, %	Площадь с отслоениями на каждой поверхности, %	Характер изменения внешнего вида образца
1	0	0	Без изменений
2	0	0	Изменение цвета, потемнение
3	0	До 2 вкл.	Отслоения и язвы с наибольшим диаметром до 2 мм вкл.
4	0	Св. 2 до 5 вкл.	Отслоения наибольшей протяженностью до 4 мм вкл. и язвы диаметром более 2 мм
5	0	Св. 5 до 10 вкл.	Отслоения наибольшей протяженностью до 5 мм вкл.
6	До 10 вкл.	Св. 10 до 25 вкл.	Отслоения протяженностью св. 5 мм
7	Св. 10 до 25 вкл.	Св. 25 до 50 вкл.	То же
8	Св. 25 до 50 вкл.	Св. 50	» »
9	Св. 50	–	Увеличение толщины образца менее чем на 10 %
10	Св. 50	–	Увеличение толщины образца более чем на 10 %

1.3.4. ИСПЫТАНИЯ НА МЕЖКРИСТАЛЛИТНУЮ КОРРОЗИЮ (В СООТВЕТСТВИИ С ГОСТОМ 9.021–74)

Настоящий стандарт распространяется на алюминий и его сплавы без защитных покрытий и устанавливает методы ускоренных испытаний на межкристаллитную коррозию. Сравнение следует проводить со сплавами, характер и степень коррозионного разрушения которых (при выбранном методе испытаний) известны.

Испытания проводят в растворах:

1) содержащем 3%-ный раствор хлористого натрия +1 % соляной кислоты (30 г/л хлористого натрия +10 мл/л соляной кислоты плотностью 1,19 г/см^3); температура раствора 18–25 °С, время испытания 24 ч;

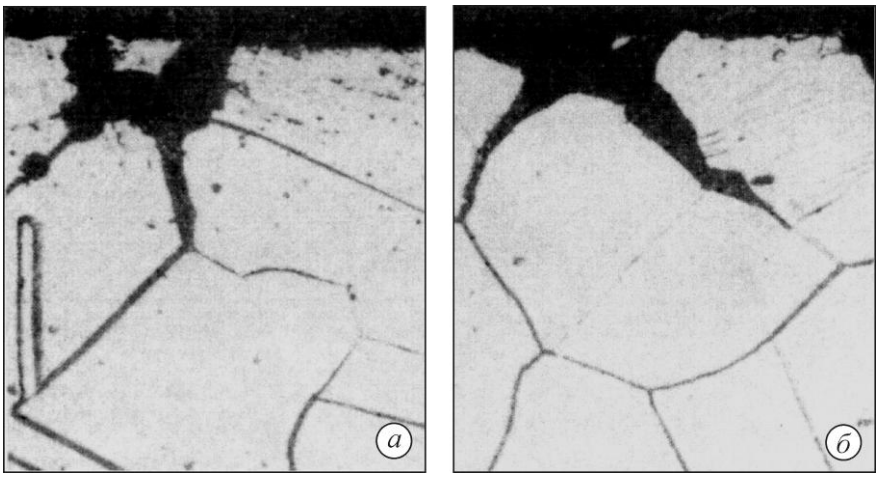


Рис. 1.58. Межкристаллитное коррозионное растрескивание литого алюминиевого сплава: *а* – основной металл; *б* – зона термического влияния. Микроструктура. ×200

2) содержащем 1 н. раствор хлористого натрия + 0,3 % перекиси водорода (58 г/л хлористого натрия +10 мл/л 33%-ного раствора перекиси водорода); температура раствора 30±5 °С, время испытания 6 ч.

Для испытания применяют плоские образцы размером 20×10 мм, толщиной до 5 мм. Допускаются другие формы и размеры образцов (например, кольца из труб, образцы со сварным швом, заклепки и т.д.). Поверхность образцов должна быть обработана до шероховатости R_a не более 2,5 мкм по ГОСТу 2789–73.

Образцы из плакированных сплавов следует испытывать без плакировки. Плакирующий слой удаляют травлением в 5–10%-ном растворе едкого натра по ГОСТу 2263–71 или в 25–30%-ном растворе азотной кислоты по ГОСТу 701–68. Литейные сплавы следует испытывать с литейной коркой.

Подготовка образцов к испытаниям проводится по ГОСТам 9.021–74 и 5962–67.

Результаты испытаний оценивают металлографическим методом с учетом ГОСТа 1778–70.

При необходимости выявления микроструктуры сплавов изготавливаются шлифы, которые подвергаются травлению в растворе следующего состава, мл: кислота азотная (70%-ная) – 2,5 мл; кислота соляная (концентрированная) – 1,5 мл); вода дистиллированная – 95,0, мл.

Допускается применение других растворов, выявляющих микроструктуру металла.

Характерные примеры межкристаллитного коррозионного растрескивания приведены на рис. 1.58 и 1.59.



Рис. 1.59. Межкристаллитное коррозионное растрескивание деформированного алюминиевого сплава.
Микроструктура. ×500

1.3.5. ИСПЫТАНИЯ НА ПИТТИНГОВУЮ КОРРОЗИЮ

Методы ускоренных испытаний на стойкость к питтинговой коррозии нержавеющей стали и коррозионностойких сплавов на железоникелевой основе соответствуют ГОСТу 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 коррозионностойких 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 ($FeCl_2 \cdot 6H_2O$) с последующим определением потери массы образца.

Для испытания используют образцы размером 20×30 мм толщиной от 0,8 до 5 мм. Испытания проводят в стеклянных сосудах. Объем раствора – не менее 10 $см^3$ на 1 $см^2$ площади поверхности образцов. Взвешивание проводят с погрешностью не более ±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 20×30 мм с толщиной от 0,8 до 5 мм. Испытания проводят в трехэлектродной термостатированной ячейке с объемом рабочей части раствора 100–300 $см^3$ и дополнительными приборами и приспособлениями (электронный потенциостат и др.).

В стандарте изложены порядок проведения и обработка результатов испытаний.

1.3.6. ИСПЫТАНИЯ НА КОРРОЗИОННЫЕ ПОТЕРИ В АТМОСФЕРНЫХ УСЛОВИЯХ

Расчетно-экспериментальный метод ускоренного определения коррозионных потерь в атмосферных условиях (в соответствии с ГОСТом 9.040–71)

Настоящий стандарт распространяется на металлы и сплавы и устанавливает расчетно-экспериментальный метод ускоренного определения коррозионных потерь в зависимости от коррозионной агрессивности атмосферы.

Суть метода: определение коррозионных потерь на основе результатов ускоренных испытаний металлов и сплавов и значений параметров, характеризующих коррозионную агрессивность атмосферы по ГОСТу 9.039–74.

Метод может быть использован для ускоренного определения коррозионных потерь анодных покрытий.

Метод не применяется в тех случаях, когда потери массы полностью не характеризуют коррозионную стойкость металлов и сплавов в атмосферных условиях (например, в условиях, характерных для загрязнений в химической и металлургической промышленности).

Ожидаемые коррозионные потери за первый год эксплуатации (M, в $г/м^2$) рассчитывают по формуле

$$M = (K^{\circ}_{\text{адс}} + a[C])\,\tau_{\text{адс}} + K^{\circ}_{\text{фаз}}\,\tau_{\text{фаз}},$$

где $K^{\circ}_{\text{адс}}$ и $K^{\circ}_{\text{фаз}}$ – скорости коррозии соответственно под адсорбционной и фазовой пленками влаги в условно чистой атмосфере, за которую принимают атмо-

сферу, не содержащую коррозионно-активных агентов, г/(м^2·ч); a – ускорение коррозии под адсорбционной пленкой влаги при наличии в атмосфере коррозионно-активного агента (наличие в воздухе сернистого газа и хлоридов), г/(м^2·ч); [C] – концентрация коррозионно-активного агента в воздухе; $\tau_{адс}$ и $\tau_{фаз}$ – продолжительность увлажнения поверхности соответственно адсорбционной и фазовой пленками влаги, ч/г.

Аппаратура для испытаний описана в ГОСТе 9.908–85, раздел 3.

Подготовка образцов к испытаниям проводится по ГОСТу 17332–71, раздел 3.

Порядок проведения испытаний должен соответствовать ГОСТу 9.040–74. Определение значений $K_{адс}$ проводится несколькими способами в соответствии с тем же ГОСТом.

Требования к технике безопасности должны соответствовать ГОСТу 9.908–85.

В ГОСТе 9.040–74 приведены примеры ожидаемых коррозионных потерь за длительное время эксплуатации для различных металлов и сплавов (стали, алюминий и его сплавы, магний и его сплавы, цинк, кадмий, медь и ее сплавы, никель и его сплавы) в различных климатических условиях для различных регионов СНГ.

Ускоренные коррозионные испытания (в соответствии с ГОСТом 9.913–90)

Настоящий стандарт распространяется на алюминий, магний и их сплавы без защитных покрытий и устанавливает методы ускоренных и имитационных коррозионных испытаний для получения сравнительных данных по коррозионной стойкости металлов и сплавов (общие требования к проведению испытаний приведены в ГОСТе 9.905–82).

Оценку результатов испытаний проводят в соответствии с видом коррозии по следующим показателям:

изменение внешнего вида поверхности образцов;

изменение по глубине и количеству коррозионных поражений;

изменение механических свойств;

изменение массы;

изменение глубины и характера коррозионных поражений (металлографический метод);

количество выделившегося водорода.

Испытания проводят в искусственно создаваемых условиях, имитирующих воздействие климатических факторов атмосферы (табл. 9).

Вид, форму и размеры образцов выбирают в зависимости от цели испытаний. Допустимая погрешность размеров образцов +0,1 мм, толщина образцов – от 0,5 до 3 мм.

Для оценки коррозионной стойкости по изменению механических свойств при растяжении применяются пластины размером 220×150 мм, из которых после коррозионных испытаний вырезают образцы для определения механических свойств по ГОСТу 1497–84.

При оценке зависимости коррозионной стойкости образцов от технологии их изготовления (отливка, штамповка, прессовка и т.д.) применяются образцы круглой формы диаметром 5–25 мм или прямоугольной формы размерами 30×15 мм и толщиной от 1 до 5 мм.

Допускается применение образцов других размеров и формы с целью определения типа коррозии, глубины коррозионных поражений или потери массы. Шероховатость поверхности образцов R_a по ГОСТу 2780 должна быть не более 2,5 мкм.

Таблица 9. **Методы испытаний и их применение**

Метод испытаний	Материал	Условия эксплуатации изделий по ГОСТу 15150–69	Назначение
Полное погружение в раствор, содержащий 3 % хлористого натрия и 0,1 % перекиси водорода	Алюминий и его сплавы	М	Имитация воздействия морского климата при периодическом или постоянном контакте с морской водой
Полное погружение в 3%-ный раствор хлористого натрия	Магний и его сплавы	»	»
Воздействие нейтрального соляного тумана	Алюминий, магний и их сплавы	ТМ, ОМ	Имитация воздействия тропического климата, включая морской туман
Переменное погружение в 3%-ный раствор хлорида натрия	Алюминий и его сплавы	У, УХЛ, О	Имитация воздействия умеренного климата с воздействием и без воздействия хлоридов
Переменное погружение в 0,001%-ный раствор хлористого натрия	Магний и его сплавы	»	»
Воздействие влаги при периодической конденсации, повышенных значениях относительной влажности и температуры	Алюминий, магний и их сплавы	Т, ТС, ТВ	Имитация воздействия тропического климата, включая атмосферные осадки и температуры

Примечание. Обозначение изделий: М – изделия, предназначенные для эксплуатации в макроклиматических районах с морским климатом; ТМ – изделия, предназначенные для эксплуатации в макроклиматических районах с тропическим морским климатом; В – изделия, предназначенные для эксплуатации во всех макроклиматических районах, кроме очень холодного климата; ОМ – изделия, предназначенные для эксплуатации в макроклиматических условиях с умеренно-холодным и тропическим климатом; У – изделия, предназначенные для эксплуатации в макроклиматических районах с умеренным климатом; УХЛ – изделия, предназначенные для эксплуатации в макроклиматических районах с умеренным и холодным климатом; О – изделия, предназначенные для эксплуатации в макроклиматических районах с очень холодным климатом; Т – изделия, предназначенные для эксплуатации в макроклиматических районах с сухим и влажным тропическим климатом; ТС – изделия, предназначенные для эксплуатации в макроклиматических районах с сухим тропическим климатом; ТВ – изделия, предназначенные для эксплуатации в макроклиматических районах с влажным тропическим климатом.

Контрольные образцы и образцы, снятые с испытаний, хранят в условиях, исключающих развитие коррозии в соответствии с требованиями ГОСТа 9.909–86.

Аппаратура и реактивы

Для подготовки коррозионной среды применяются химические реактивы квалификации ч.д.а. и дистиллированная вода – по ГОСТу 6709–72.

Конструкция камеры должна обеспечивать стабильный режим работы и колебания температуры не более ±2 °С.

Подготовка к испытаниям

Образцы из алюминия и его сплавов обезжиривают по ГОСТу 443–76, затем травят по ГОСТу 2263–79, осветляют по ГОСТу 4461–77, промывают и высушивают по ГОСТу 12026–76, затем промывают в спирте по ГОСТу 17299–78.

Образцы из магния и его сплавов зачищают шкуркой из белого электрокорун-

да по ГОСТу 5009–82, протирают этиловым спиртом по ГОСТу 17299–78 и, при необходимости, взвешивают на аналитических весах по ГОСТу 24104–2001.

Допустимы травление образцов из деформируемых магниевых сплавов в реактивах по ГОСТу 4461–77 при температуре 18–25 °С и обработка в растворе: хромовый ангидрид 80–100 г/дм^3, азотнокислый натрий 5–8 г/дм^3 в течение 0,5–1,0 мин. Затем образцы промывают и сушат.

Проведение испытаний

Для различных металлов и сплавов используются разные методы испытаний.

1. Метод испытания алюминия и его сплавов при полном погружении в электролит с добавкой перекиси водорода.

Суть метода: ускорение коррозионного процесса при полном погружении образцов при температуре 18–25 °С в 3%-ный раствор хлористого натрия по ГОСТу 4233–77 с добавкой перекиси водорода по ГОСТу 10929–76.

Продолжительность испытаний 90 сут. Допускается увеличение продолжительности испытаний до 180 сут и уменьшение до 15–30 сут.

2. Метод испытания магния и его сплавов при полном погружении в электролит.

Суть метода: ускорение коррозионного процесса при полном погружении образцов при температуре 18–25 °С в 3%-ный раствор хлористого натрия по ГОСТу 4233–77. Продолжительность испытания 1–2 сут.

3. Метод испытания алюминия, магния и их сплавов при воздействии нейтрального соляного тумана.

Суть метода: ускорение коррозионного процесса повышением температуры, относительной влажности и введением в атмосферу раствора хлористого натрия.

Испытания проводятся распылением 5%-ного раствора хлористого натрия при температуре (35±2) °С и относительной влажности 95–98 % в течение 3 мин через каждые 20 мин. Общая продолжительность испытаний для алюминия и его сплавов 90–360 сут, для магния и его сплавов 60–90 сут.

4. Метод испытания алюминия и его сплавов при переменном погружении в электролит.

Суть метода: ускорение коррозионного процесса чередованием погружения образца при температуре 18–25 °С в 3%-ный раствор хлористого натрия и высушивание его на воздухе. Продолжительность пребывания образца в растворе 10 мин, на воздухе 50 мин. Продолжительность испытания 90 сут. Допускается продолжительность испытаний до 180; 270 и 360 сут.

5. Метод испытания магния и его сплавов при полном погружении в электролит.

Суть метода: ускорение коррозионного процесса чередованием погружения образца при температуре 18–25 °С в 0,001%-ный раствор хлористого натрия и высушивания на воздухе. Продолжительность пребывания образцов в растворе и на воздухе 10 и 50 мин соответственно. Продолжительность испытания 180 сут. Допускается увеличение продолжительности испытания до 360 сут.

6. Метод испытания алюминия, магния и их сплавов при повышенных значениях относительной влажности воздуха и температуры с периодической конденсацией влаги.

Суть метода: ускорение коррозионного процесса повышением относительной влажности воздуха и температуры с периодической конденсацией влаги.

Испытания являются циклическими с непрерывным следованием циклов продолжительностью 24 ч каждый. Цикл состоит из двух этапов:

1 этап – испытания при температуре (55±2) °С и относительной влажности воздуха 95–98 % в течение 8 ч;

2 этап – испытания при температуре 18–25 °С и относительной влажности воздуха 95–98 % в течение 16 ч, включая период охлаждения. Продолжительность испытания 180 сут.

Перед проведением оценки коррозионных испытаний с поверхности удаляют продукты коррозии по ГОСТу 9.907–87 в реактивах:

для алюминия и его сплавов: ортофосфорная кислота (1,59 г/см^3) по ГОСТу 10678–76 – 50 см^3/дм^3, хромовый ангидрид по ГОСТу 2518 – 200 г/дм^3 при температуре 80–85 °С и продолжительности 5–10 мин или азотная кислота (1,41 г/см^3) по ГОСТу 4461–77 – 300 см^3/дм^3 при температуре 18–25 °С и продолжительности 10–20 мин;

для магния и его сплавов: ангидрид хромовый – 200 г/дм^3 при температуре 18–25 °С и продолжительности 1–5 мин.

Затем образцы промывают и высушивают в сушильном шкафу при температуре 100±2 °С в течение 5 мин и в течение 24 ч выдерживают в эксикаторе, а затем взвешивают.

1.3.7. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ КОРРОЗИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ (В СООТВЕТСТВИИ С ГОСТОМ 9.905–82)

Настоящий стандарт распространяется на металлы и сплавы, средства противокоррозионной защиты и устанавливает требования к методам электрохимических испытаний.

При испытаниях используются образцы четырех типов:

плоские образцы (пластины);

детали или сборочные единицы (узлы);

макеты изделий или конструкций;

изделия.

Вид, форму и размеры образцов выбирают в зависимости от цели испытаний. Образцы должны воспроизводить основные качества изделий, в том числе сварных изделий:

материалы и их контакты;

форму;

технологию изготовления;

состояние поверхности;

вид, толщину и технологию получения покрытий.

Площадь поверхности всех образцов должна быть не менее 50 см^2. Число образцов на одно испытание должно быть не менее трех. Предпочтительны следующие размеры плоских образцов: 150×100×0,5÷1,5; 100×50×0,5÷1,5; 50×50×0,3÷1,5 мм.

Для испытаний с оценкой изменения механических свойств форма образца должна соответствовать стандартам на методы механических испытаний.

Для испытаний с оценкой изменения физических свойств поверхности образцов форма и размеры образцов должны соответствовать требованиям выбранного метода оценки и обеспечивать необходимую точность измерения исследуемых величин.

Способы изготовления образцов должны исключать механические и термические напряжения, не характерные для изделия.

Для размещения образцов на испытательных стендах допускается сверлить

отверстия на их углах или кромках. Аппаратура при всех методах испытаний должна соответствовать требованиям ГОСТа 9.308–82.

Для подготовки коррозионной среды применяют химические реактивы квалификации ч.д.а. и дистиллированную воду, если применение реактивов другой степени чистоты не предусмотрено документами.

Конструкция испытательной аппаратуры должна исключать попадание солнечного излучения и примесей из атмосферы, а также колебания температуры, влияющие на результаты испытаний, если это не предусмотрено программой испытаний. В программе испытаний должны быть представлены:

описание испытуемого объекта и контролируемых свойств;

цель испытаний (вид и точность получаемой информации);

условия и режимы испытаний;

методика обработки и периодичность воздействия и измерений.

При испытаниях применяются образцы сравнения, поведение которых в данных условиях известно.

При ускоренных испытаниях с целью предварительной оценки коррозионной стойкости условия испытаний ужесточают по сравнению с реальными условиями эксплуатации, не допуская изменения механизма коррозии.

При ускоренных испытаниях с целью контроля качества образца допускается ужесточать условия испытаний по сравнению с условиями эксплуатации, если по поведению образцов во время испытаний можно заключить о поведении материала в условиях эксплуатации.

Не допускается одновременно испытывать в жидкой коррозионной среде в одном сосуде образцы из разных материалов или образцы с разным покрытием (если это не предусмотрено программой).

Испытания образцов из различных материалов или с различными покрытиями в газовой среде допускаются в том случае, если все образцы подвергаются одинаковому воздействию и их взаимное влияние исключено или если исследуют возможность такого влияния.

Если необходимо выявить ход коррозии во время испытания, то периодичность съемов устанавливают в геометрической прогрессии, например, 1; 3; 6; 12 ч; 1; 2; 4; 8 сут; 3; 6; 12 мес; 2; 4 года и т.д.

Параметры коррозионной среды (состав и др.) периодически контролируют.

1.3.8. МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОРРОЗИОННЫХ ПОРАЖЕНИЙ (В СООТВЕТСТВИИ С ГОСТОМ 9.908–85)

Суть метода: метод основан на определении типа коррозии, формы коррозионного поражения, распределения коррозионного поражения в металлах, сплавах и защитных металлических покрытиях (далее – материалах) 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 ГОСТу 9.905–82.

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

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.

1.4. 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.

Ниже изложены наиболее важные стандартизованные методы технологических испытаний.

1.4.1. ИСПЫТАНИЯ НА СОПРОТИВЛЯЕМОСТЬ ОБРАЗОВАНИЮ ХОЛОДНЫХ ТРЕЩИН ПРИ СВАРКЕ ПЛАВЛЕНИЕМ (В СООТВЕТСТВИИ С ГОСТОМ 26388–84)

Данный стандарт 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.

1.4.2. ИСПЫТАНИЯ НА СОПРОТИВЛЯЕМОСТЬ ОБРАЗОВАНИЮ ГОРЯЧИХ ТРЕЩИН ПРИ СВАРКЕ ПЛАВЛЕНИЕМ (В СООТВЕТСТВИИ С ГОСТОМ 26389–84)

Данный стандарт 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 сопротивляемость 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 темп растяжения, м/°С (%/°С).

Технологические методы предусматривают изготовление типовых сварных узлов, конструкций и технологию сварки, которые обусловливают 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.

1.4.3. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ НА ОСНОВНОЙ МЕТАЛЛ (В СООТВЕТСТВИИ С ГОСТОМ 23870–79)

Настоящий стандарт 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 околошовной 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 ГОСТу 6996–66.

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

Остальная аппаратура, материалы и реактивы, порядок проведения испытаний и обработка результатов должны соответствовать :

для испытания на статическое растяжение – ГОСТам 1497–73; 11150–75; 9651–73; 6996–66;

для испытания на ударный изгиб – ГОСТу 9454–78;

для измерения твердости – ГОСТам 2999–75; 9013–59;

для выявления и определения величины зерна – ГОСТу 5639–65;

для определения содержания структурных составляющих – ГОСТу 8233–56;

для испытания на длительную прочность – ГОСТу 10145–62.

Испытания считаются недействительными в случаях, указанных в приведенных выше ГОСТах.

1.4.4. ОЦЕНКА ХЛАДОСТОЙКОСТИ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПО РЕАКЦИИ НА ОЖОГ СВАРОЧНОЙ ДУГОЙ (В СООТВЕТСТВИИ С ГОСТОМ 23240–78)

Настоящий стандарт устанавливает метод оценки хладостойкости сварных стальных конструкций по реакции на ожог сварочной дугой.

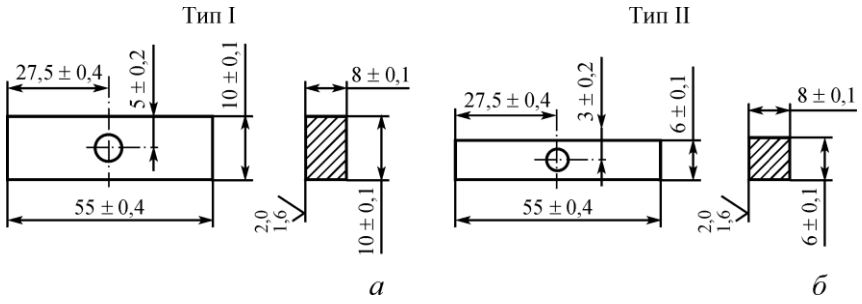


Рис. 1.60. Образцы с ожогом типов I и II для оценки хладостойкости сварных конструкций

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. 1.60, *а*);

II – из стали толщиной от 6 до 10 мм (рис. 1.60, *б*).

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.

Схема установки для нанесения ожога на образец приведена на рис. 1.61.

Установка состоит из электрододержателя специальной конструкции с приводом, зажимов для плавкой вставки, контрольных приборов и источника питания сварочной дуги.

Электрододержатель *4* движется в направляющих *7*, укрепленных на панели *13* и соединенных вверху пластиной *19* с регулировочным винтом *8*, ограничивающим подъем электрода *2*, что обеспечивает необходимый зазор между электродом и образцом *1*. Электрододержатель с электродом приводится в движение электромагнитом *12* при нажатии кнопки *14* через двухплечий рычаг *11*, который одним концом входит в окно *20* и может перемещаться в нем по

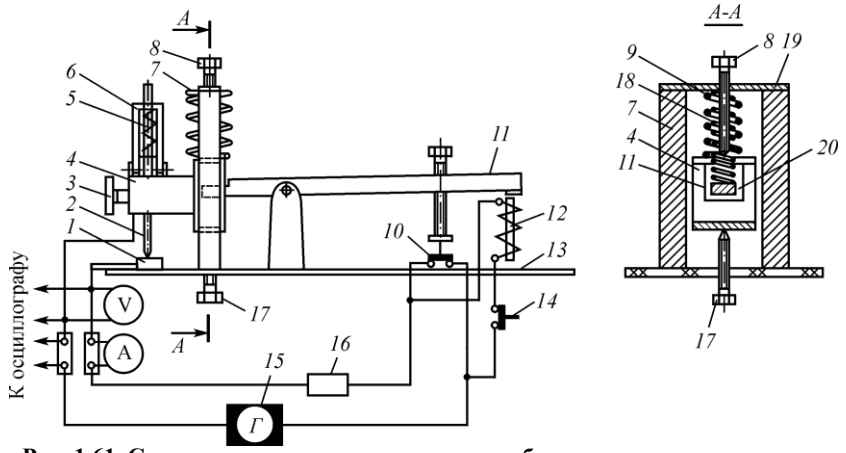


Рис. 1.61. Схема установки для получения стабильного ожога электродом

вертикали. На рычаге устанавливается включатель *10* для замыкания сварочной цепи. В исходное положение электрододержатель и рычаг возвращаются пружинами *9* и *18*. Пружина *9* служит для перемещения электрода к образцу *1*. Нижнее положение устанавливается винтом *17*. Усилие, с которым электрод прижимается к образцу, регулируется пружиной *5*, вставленной в накидной хомутик *6*. Винтом *3* закреплен электрод. Плавкая вставка *16* обеспечивает размыкание сварочной цепи. Она включается в сварочную цепь последовательно с источником питания *15* и электродом. Плавкой вставкой может быть различная по сечению и химическому составу проволока, обеспечивающая за время горения дуги 0,04 с получение на образце ожога диаметром 4 + 0,2 мм. Рекомендуется применять плавкую вставку из медной проволоки диаметром 0,4 мм.

Установка должна обеспечивать стабильность процесса нанесения ожога и достаточную его воспроизводимость; возможность регулирования времени существования сварочной дуги, возникшей в момент нанесения ожога на образец.

Установка может быть выполнена в виде приставки к существующим источникам сварочного тока или в виде отдельного агрегата с встречным источником питания. Она должна иметь амперметр для контроля величины тока короткого замыкания и вольтметр для контроля напряжения холостого хода.

Поверхность образца, предназначенная для нанесения ожога, должна быть шлифованной. На ней не допускается наличия следов коррозии и охлаждающих жидкостей после механической обработки.

Нанесение ожогов на образец производится электродом (без обмазки) диаметром 3 мм, изготовленным из сварочной проволоки марки Св-0,8А по ГОСТу 2246–70. Проволока должна быть обезжирена и не должна иметь следов коррозии.

При определении чувствительности сталей к ожогу электродом для конкретных условий сварки допускается наносить ожоги на образец электродами, изготовленными из сварочной проволоки других марок, которая применяется для сварки конкретных конструкций.

При смене электродов конец нового электрода затачивают на конус с углом в вершине 60–90° и перед нанесением ожогов на образцы оплавляют путем нанесения 4–5 пробных ожогов. Для нанесения ожогов на образец используется постоянный ток обратной полярности при токе короткого замыкания 250 А. Диаметр линзы ожога должен быть 4 + 0,2 мм. Испытания образцов с ожогом проводят по ГОСТу 9454–78. При испытании удар маятника наносится со стороны, противоположной линзе ожога.

Испытания проводятся при температурах, указанных в нормативно-технической документации на металлопродукцию или сварные конструкции. Если таких указаний нет, то испытания проводятся при нормальной температуре и при температурах –20, –40, –70 °С.

Допускается проводить испытания только при одной температуре для определения соответствия ранее установленным нормам.

Работу (A), затраченную на разрушение образцов, и ударную вязкость образцов с ожогом (a) определяют по ГОСТу 9454–78, площадь поперечного сечения образца определяют в средней части без учета рельефа ожога до испытания.

За критерий оценки критической температуры хрупкости ($T_{кр}$) принимается такой, который указан в нормативно-технической документации на металлопродукцию или сварные конструкции. При отсутствии такого критерия за критическую температуру хрупкости следует принимать ту, при которой ударная вязкость хотя бы одного образца равна или меньше 30 МДж/м^2 (3 кгс·м/см^2) для образцов типа I и соответственно 40 МДж/м^2 (4 кгс·м/см^2) для образцов типа II.

1.4.5. ИСПЫТАНИЯ НА РЕЛАКСАЦИЮ НАПРЯЖЕНИЙ (В СООТВЕТСТВИИ С ГОСТОМ 26007–83)

Напряжения, возникающие в сварных конструкциях при сварке, могут приводить как к деформации конструкций, так и к зарождению и распространению трещин и, как следствие, к преждевременному разрушению изделий. Поэтому важно определять, как происходит релаксация напряжений в свариваемых металлах.

Настоящий стандарт устанавливает методы испытаний на релаксацию напряжений при температурах до 1200 °С при одноосном растяжении, изгибе и кручении черных и цветных металлов и сплавов.

Релаксация напряжений – процесс самопроизвольного уменьшения напряжений в упругонапряженном твердом теле в условиях сохранения неизменными линейных размеров тела.

Суть метода: в испытуемых образцах определяется изменение напряжения во времени в условиях постоянства суммарной деформации расчетной части образца, равной заданной начальной деформации.

Методы оценки релаксации напряжений делятся на три категории по точности определения изменения напряжений во времени. К первой категории относятся методы, обеспечивающие погрешность не выше 5 % от измеряемой величины, ко второй – не выше 15 %, к третьей – не выше 25 %.

По требованиям к испытаниям методы разделяются на две группы:

первая – без разгрузки в режиме автоматического поддержания постоянства суммарной деформации образца в процессе испытания;

вторая –при периодической разгрузке образца.

Первая группа применяется для методов оценки релаксации напряжений всех категорий точности, вторая – для методов второй и третьей категорий точности.

Допускается расчетная оценка релаксации напряжений материалов по результатам прямых испытаний на ползучесть при одноосном растяжении в соответствии с требованиями ГОСТа 3248–81.

Испытания на релаксацию напряжений проводятся на испытательных машинах и устройствах, удовлетворяющих требованиям, указанным в ГОСТе 26007–83.

Испытываются образцы:

цилиндрические диаметром 10 мм с рабочей длиной 100 и 150 мм;

плоские шириной 10 мм с рабочей длиной 100 мм и толщиной, определяемой толщиной листа, из которого изготавливается образец, но не менее 3 мм.

Величины упругих напряжений в образцах определяются при испытаниях без нагрузки:

на растяжение – делением нагрузки на площадь поперечного сечения расчетной части образца, измеренную до начала испытаний;

на изгиб и кручение – делением величины изгибающего момента на момент сопротивления расчетной части образца, измеренного до начала испытания.

При испытаниях с периодической разгрузкой образца упругие напряжения определяются по формулам, приведенным в ГОСТе 26007–83. Методика испытаний, обработка результатов проводятся также в соответствии с ГОСТом 26007–83.

1.4.6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОРРОЗИОННЫХ ПОРАЖЕНИЙ МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИМ МЕТОДОМ (В СООТВЕТСТВИИ С ГОСТОМ 9.908–85)

Важным технологическим испытанием при оценке пригодности материалов, изделий или конструкций для конкретных применений в условиях эксплуатации является определение коррозионных поражений.

Суть метода, определение типа, формы и распределения коррозионного поражения в металлах, сплавах и защитных металлических покрытиях, правила отбора образцов, подготовки металлографических шлифов, проведения испытаний, установления глубины коррозионного поражения основного металла и покрытия изложены в разделе 1.3.8.

1.4.7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ДИФФУЗИОННОГО ВОДОРОДА В НАПЛАВЛЕННОМ МЕТАЛЛЕ И МЕТАЛЛЕ ШВА ПРИ СВАРКЕ (В СООТВЕТСТВИИ С ГОСТОМ 23338–91)

Стандарт 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 ±7 % и вакуумным методом с относительной погрешностью ± 5 %.

ПЕРЕЧЕНЬ ГОСТов, 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. Шарики. 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 коррозионностойкие. 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 вихретоковый. 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 коррозионностойкие. Методы ускоренных испытаний на стойкость к питтинговой коррозии
9.913–90	Алюминий, магний и их сплавы. Методы ускоренных коррозионных испытаний
9.914–91	Стали коррозионностойкие 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

Глава 2
КОНТРОЛЬ СВОЙСТВ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

2.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Паяное соединение образовано из материалов с разными физическими и химическими свойствами. Оно состоит из паяемого материала и припоя. На контактных поверхностях образцов при пайке протекают диффузионные процессы с образованием новых сплавов в соединении. В процессе пайки на границе раздела паяемых материалов при нагреве происходят физико-химические процессы, которые могут приводить как к образованию дефектов в паяных соединениях, так и к разупрочнению паяемых материалов.

Паяемость металлов прежде всего определяется прочностью связей между припоем и паяемым материалом, которая зависит от смачивания соединяемых поверхностей припоем. На смачиваемость влияют механические свойства (прочность, пластичность и т.д.), металлургические характеристики (тип структуры, величина зерна, морфология частиц фаз, включений и т.д.), технологические факторы (состояние поверхности паяемых изделий, шероховатость).

Прочность паяного соединения отличается от прочности паяемых материалов, припоев и зависит от различных факторов. Испытания на определение прочности паяных соединений необходимо проводить, принимая во внимание:

химический состав и прочность паяемого материала;

форму образца;

геометрию и состав поверхности соединений;

флюс;

технологию низкотемпературной (мягкой) и высокотемпературной (твердой) пайки (источник нагрева, температура пайки, скорость нагрева и т.д.);

время выдержки при температуре пайки;

зазор между паяемыми деталями;

количество образцов для испытаний;

методы представления результатов;

характер и размер дефектов на поверхности излома.

В процессе подготовки деталей под пайку конструкций выборочному контролю подвергаются:

величина зерна – она должна соответствовать требованиям ГОСТов (требуемая величина зерна и стабильность структуры достигаются посредством термической обработки на стадии, предшествующей пайке; испытания образцов проводятся из металла или паяной конструкции);

толщина покрытия;

шероховатость поверхности и т.д.

Традиционно детали перед пайкой (в заготовках или после черновой механической обработки) подвергают термической обработке для обеспечения требуемых механических свойств. Обычно это относится к материалам, малочувстви-

тельным к последующему нагреву, или к случаям, когда температура пайки не превышает критических значений, при которых могут быть объемные изменения. Такая термообработка нередко включает в себя закалку с охлаждением на воздухе. Вместе с тем в современном машиностроении широко применяются жаропрочные дисперсионно-твердеющие сплавы и высокопрочные высоколегированные материалы, чувствительные к последующему нагреву.

В процессе изготовления деталей из указанных материалов заготовки обычно также подвергают термообработке. Причем последняя может быть неоднократной, а иногда частично совмещенной с пайкой. Режим термической обработки назначают в соответствии с критическими точками и диаграммами изотермического превращения. Он позволяет обеспечить однородную структуру и заданные прочностные характеристики в соответствии с технической документацией. Для упрочняющихся закалкой сплавов режим термообработки состоит из закалки, охлаждения на воздухе или закалки с последующим высокотемпературным старением либо низким отпуском.

Закалка позволяет обеспечить однородный твердый раствор и некоторое упрочнение материала, старение – стабилизировать структуру сплавов за счет коагуляции упрочняющих фаз. Получение гетерогенной структуры с определенной степенью дисперсности фаз кроме упрочнения позволяет повысить жаропрочность сплавов и их длительную прочность, необходимые в процессе работы паяных конструкций в составе изделия. Обработка холодом сталей, кроме аустенитных, позволяет повысить их прочность за счет уменьшения содержания остаточного аустенита, а отпуск снимает внутренние напряжения.

Жесткий температурный регламент термообработки вынуждает совмещать температуру закалки с температурой пайки. Поэтому пайку конструкций, например из сталей, проводят, как правило, в интервале температур, не превышающих 1000–1100 °С.

После окончания выдержки при температуре пайки конструкцию быстро охлаждают (со скоростью ~50 °С/мин) до полной кристаллизации припоя. Такой режим охлаждения позволяет сохранить плотный контакт между паяемыми поверхностями и обеспечить однородную структуру металла, а также исключить появление в паяном шве пор и рыхлот. Быстрое охлаждение конструкции за счет разницы температур (наружная деталь скорее охлаждается, чем внутренняя) позволяет сохранить плотный контакт, сформированный между паяемыми деталями, и обеспечить высококачественную пайку.

Вместе с тем ускоренное охлаждение с температуры пайки существенно снижает прочностные свойства, например, дисперсионно-твердеющих сплавов. Происходит это вследствие неполного выделения упрочняющих фаз из твердого раствора. Для компенсации указанной потери прочности рекомендуется увеличить продолжительность старения сплавов.

С целью предотвращения отрыва внутренней детали от наружной в процессе старения или отпуска следует создавать избыточное давление, препятствующее их разъединению и таким образом сохраняющее паяный шов, сформированный в процессе пайки конструкции.

Качество подготовки паяемых деталей (трещины, поверхностные повреждения и др. дефекты) выявляют с помощью лупы и микроскопов различных типов.

Качество очистки поверхности определяется визуально и люминесцентным контролем. Учитываются толщина покрытий, нанесенных на паяемые материа-

лы, их равномерность, прочность сцепления покрытий с подложкой, состояние поверхности покрытий, пористость покрытий, наличие вмятин, рисок, других дефектов. Плохое сцепление покрытий может быть из-за непропаев, возникающих вследствие окисления на границе раздела покрытие – подложка. Неудовлетворительное состояние поверхности покрытия (шелушение, вздутия, растрескивание) может приводить к различного вида дефектам как в паяном шве, так и на границе раздела металл – покрытие.

Пористость также может вызвать несплошность в паяном шве и привести к негерметичности изделия.

2.2. МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ (В СООТВЕТСТВИИ С ГОСТОМ 24715–81)

Настоящий стандарт распространяется на основные типы паяных соединений, выполненных по ГОСТу 19249–73 всеми способами. Стандарт устанавливает методы контроля качества паяных соединений с целью обнаружения поверхностных, внутренних и сквозных дефектов, указанных ниже:

Поверхностные дефекты	Внутренние дефекты	Сквозные дефекты
Поверхностное окисление, поверхностные поры, подрез и выходящие на поверхность непропай, неспай, общая и локальная эрозия	Непропай, неспай, трещина, внутренняя пора, усадочная раковина, шлаковое включение, флюсовое включение, металлическое и неметаллическое включение, общая и локальная эрозия, паяльные остаточные напряжения, дефекты структуры паяного соединения	Непропай, неспай, общая и локальная эрозия, сочетание внутренних и наружных дефектов, приводящее к течи

Технология контроля паяных соединений должна быть установлена технической документацией, разработанной в соответствии с ГОСТами 3.1102–74 и 3.1502-74.

Для обнаружения и контроля дефектов в паяных соединениях применяются следующие виды неразрушающего контроля: оптический, проникающими веществами (капиллярные), вихретоковый, радиационный, акустический, тепловой, электрический и разрушающий контроль.

Методы неразрушающего контроля для обнаружения поверхностных дефектов в паяных соединениях, их особенности и чувствительность приведены в табл. 10, для обнаружения внутренних дефектов – в табл. 11, для обнаружения сквозных дефектов – в табл. 12.

Новый, быстро развивающийся *рентгенотелевизионный метод* описан в ГОСТе 27947–88. Он применяется для контроля как паяных, так и сварных конструкций. Метод рассмотрен в разделе 1.1.2.

В ГОСТе 21549–76 приведен металлографический метод определения эрозии при пайке и лужении по глубине металла. Контроль глубины эрозии проводят при выборе припоя и материала изделия, разработке технологического процесса пайки и лужения и измерения их параметров.

Шлифы для определения эрозии при пайке и лужении изготавливают из паяных внахлестку или луженых образцов. Приводятся формы и размеры образцов, описана подготовка к испытанию и проведение испытаний. Глубина химической эрозии определяется на шлифах, поверхность которых подвергается травлению для выявления структуры и исследуется под металлографическим микроскопом при увеличениях 50 – 500 крат.

Таблица 10. **Методы неразрушающего контроля для обнаружения поверхностных дефектов в паяных соединениях (с учетом ГОСТа 24715-81)**

Номер п/п	Вид контроля (ВК)	Метод контроля (МК)	Чувствительность метода (ЧМ)	Стандарт на метод контроля и область применения метода (СОП)
1	Оптический	Визуальный, визуально-оптический	Выявляет дефекты величиной < 0,1 мм при использовании оптических приборов с увеличением до 30 крат	Соединения, имеющие доступные для осмотра поверхности (в соответствии с ГОСТом 23479–79)
2	Капиллярный – проникающими веществами	Цветной, люминесцентный, люминесцентно-цветной	Достоверность метода зависит от шероховатости контролируемой поверхности паяного соединения	Соединения, имеющие поверхности, доступные для нанесения пенетрантов и осмотра (в соответствии с ГОСТом 18442–80)
3	Вихретоковый	Трансформаторный, параметрический	Параметр шероховатости поверхности контролируемых соединений $R_z = 40$ мкм	Соединения, имеющие поверхности, доступные для преобразователей дефектоскопов; дефекты с раскрытием 0,0005–0,001 мм и глубиной 0,2 мм. Одновременно с поверхностными дефектами выявляют дефекты, расположенные на глубине до 0,2 мм от поверхности

Примечание. Размеры фактически выявляемых дефектов зависят от технических характеристик применяемых средств контроля, конструктивных особенностей изделий и технологии изготовления.

Таблица 11. **Методы неразрушающего контроля для обнаружения внутренних дефектов в паяных изделиях (с учетом ГОСТа 24715–81)**

Номер п/п	ВК	МК	ЧМ	СОП
1	Радиационный	Радиографический	2–5 % от суммарной просвечиваемой толщины материала; зависит от толщины и марок соединяемых материалов	ГОСТ 20426–75
2	»	Радиоскопический	3–8 % от суммарной просвечиваемой толщины материала; зависит от толщины и марок соединяемых материалов	В соответствии с ГОСТом 20426–75
3	Акустический	Отраженного излучения (эхо-метод), прошедшего излучения, резонансный, свободных колебаний, акустико-эмиссионный	Определяют условные размеры дефекта, эквивалентную площадь, конфигурацию и число дефектов, дефекты площадью 1–15 мм^2 при толщине материала 2,5–150 мм соответственно. Метод не гарантирует выявление одиночных пор, шлаковых и инородных включений диаметром 1–2 мм. Не выявляются дефекты, расположенные по глубине в мертвой зоне дефектоскопа, а также дефекты, расположенные от отражающей поверхности на расстоянии меньшем, чем разрешающая способность дефектоскопа	Выявление дефектов типа «непропаев». Область применения не ограничена (кроме соединений, не имеющих доступа для ввода и приема ультразвуковых колебаний, и соединений, обладающих повышенным затуханием ультразвуковых колебаний)
4	Тепловой	Теплометрический, термометрический	Необходимо создание теплового потока в направлении, перпендикулярном поверхности соединения	Выявление дефектов типа «непропаев» в соединениях, у которых толщина слоя, обращенного к приемнику излучения, не превышает 3 мм. Возможен контроль паяных соединений электронных схем и электрических систем (в соответствии с ГОСТом 23483–79)
5	Электрический	Электрический	Качество оценивают по величине электрического сопротивления или электропроводности контролируемого участка. Вид и характер дефекта не определяются. Чувствительность зависит от чувствительности аппаратуры	Соединения, имеющие доступ для измерительных наконечников

Примечания. 1. При радиографическом и радиоскопическом контроле не обеспечивается выявление дефектов: любых дефектов, если их протяженность в направлении излучения меньше удвоенной чувствительности контроля, определенной по эталонам чувствительности, или если изображения дефектов совпадают с другими изображениями, затрудняющими расшифровку (изображения посторонних деталей, острых углов изделия, резких перепадов толщин паяемых элементов и т.п.); трещин с раскрытием менее 0,1 мм; трещин, плоскость раскрытия которых не совпадает с направлением излучения; непропаев в случае, если разница между коэффициентами ослабления излучения припоем и паяемым материалом и толщина паяного шва не обеспечивают достаточного радиационного контраста.

Радиографический и радиоскопический контроль следует применять при наличии двустороннего доступа к контролируемому паяному соединению, обеспечивающего возможность установки источника и детектора излучения в соответствии со схемами контроля. 2. Размеры фактически выявляемых дефектов зависят от технических характеристик применяемых средств контроля, конструктивных особенностей изделия и технологии изготовления.

Таблица 12. **Методы неразрушающего контроля для обнаружения сквозных дефектов в паяных соединениях (с учетом ГОСТа 24715–81)**

Номер п/п	ВК	МК	ЧМ	СОП
1	Проникающими веществами – течеискание	Радиоактивный	Порог чувствительности испытаний зависит от технических характеристик применяемых средств контроля, конструктивных особенностей контролируемых изделий и технологии контроля	Определение герметичности изделий и/или их элементов, а также выявление отдельных течей (в соответствии с ГОСТом 24054–80)
2	То же	Манометрический	Способы: компрессионный, вакуумный, камерный. Порог чувствительности испытаний зависит от технических характеристик применяемых средств контроля, конструктивных особенностей контролируемых изделий и технологии контроля	То же
3	» »	Масс-спектрометрический	Способы: вакуумной камеры, накопления при атмосферном давлении, опрессовки в камере, опрессовки замкнутых оболочек, обдува	Определение герметичности изделий и/или их элементов, а также выявление отдельных течей (в соответствии с ГОСТом 24054–80)
4	Течеискание газовое	Галогенный, пузырьковый, ультразвуковой, катарометрический, химический, инфракрасный	Порог чувствительности испытаний зависит от технических характеристик применяемых средств контроля, конструктивных особенностей изделия	Определение герметичности изделий (в соответствии с ГОСТом 24054–80)
5	Течеискание жидкостное	Люминесцентный (цветной), электрический	Порог чувствительности зависит от технических характеристик применяемых средств контроля, конструктивных особенностей контролируемых изделий	Определение герметичности изделий, их элементов, а также выявление отдельных течей

В ГОСТе 20426–81 дан перечень дефектов, выявляемых радиационными методами дефектоскопии. Это трещины, непропаи, раковины, поры, неметаллические и металлические включения. В разделе 1.1.2 рассмотрены особенности и чувствительность этих методов.

Дополнением к ГОСТу 24715–81 является ГОСТ 26126–84, который устанавливает ультразвуковые методы контроля качества паяных соединений и применяется для выявления внутренних дефектов. Ультразвуковой контроль следует проводить после исправления дефектов, обнаруженных при внешнем осмотре. При контроле паяных соединений следует применять эхо-метод, зеркальный эхометод, теневой или зеркально-теневой методы.

При контроле нахлесточных и тавровых паяных соединений применяются раздельно-совмещенные и прямые преобразователи, при контроле стыковых паяных соединений – наклонные преобразователи.

При обнаружении дефектов устанавливают чувствительность оценки и определяют следующие их характеристики:

эквивалентную площадь дефектов;

число дефектов на длине соединения, установленной в технической документации на контроль;

расстояние между дефектами;

координаты дефектов для стыковых соединений;

условные размеры дефектов;

протяженность и высоту (для стыковых соединений);

протяженность (для нахлесточных соединений).

Способы определения характеристик дефектов должны соответствовать ГОСТу 14782–76.

Качество паяных соединений оценивается по двухбалльной системе:

балл 1 – неудовлетворительное качество: в соединении выявлены недопустимые дефекты или число допустимых дефектов превышает норму, установленную в технической документации на контроль;

балл 2 – удовлетворительное качество: в соединении выявлены только допустимые дефекты и число их ниже нормы, установленной в технической документации на контроль, или дефекты не обнаружены.

2.3. МЕТОДЫ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

2.3.1. ИСПЫТАНИЯ НА РАСТЯЖЕНИЕ И ДЛИТЕЛЬНУЮ ПРОЧНОСТЬ (В СООТВЕТСТВИИ С ГОСТОМ 28830–90 С УЧЕТОМ ИСО 5187–85)

Настоящий стандарт распространяется на паяные соединения металлов и сплавов и устанавливает методы статических испытаний на растяжение и длительную прочность при нормальной, высоких и низких температурах от –269 °С до 1200 °С. В нем изложены основы и методика испытаний при высокотемпературной и низкотемпературной пайке, метод обработки полученных результатов, требования при статических кратковременных и длительных испытаниях паяных изделий, изготавливаемых из паяемых металлов, припоев и флюсов для черных и цветных металлов и сплавов.

Настоящий стандарт устанавливает следующие характеристики паяных конструкций.

А – при высокотемпературной пайке:

временное сопротивление при растяжении при низкой, высокой и комнатной температурах;

предел прочности на срез при низкой, высокой и комнатной температурах;

предел длительной прочности при повышенной температуре.

Б – при низкотемпературной пайке:

временное сопротивление при растяжении при низкой, высокой и комнатной температурах;

предел прочности на срез при низкой, высокой и комнатной температурах;

предел длительной прочности при низкой, высокой и комнатной температурах.

Низкими температурами считают температуры от –269 до 15 °С, комнатной температурой – температуру 20±5 °С, высокими – температуры от 20±5 °С до 1200±50 °С.

Для получения воспроизводимых и сравнимых результатов испытаний на растяжение и срез стандарт предусматривает методику испытаний и образцы определенного типа.

Стандартная прочность на срез

Для определения стандартной прочности на срез используют телескопический образец с заданным зазором, а паяное соединение подвергают напряжению среза, если к образцу прикладывают растягивающее усилие. Образцы типов I и II приведены на рис. 2.1 и 2.2.

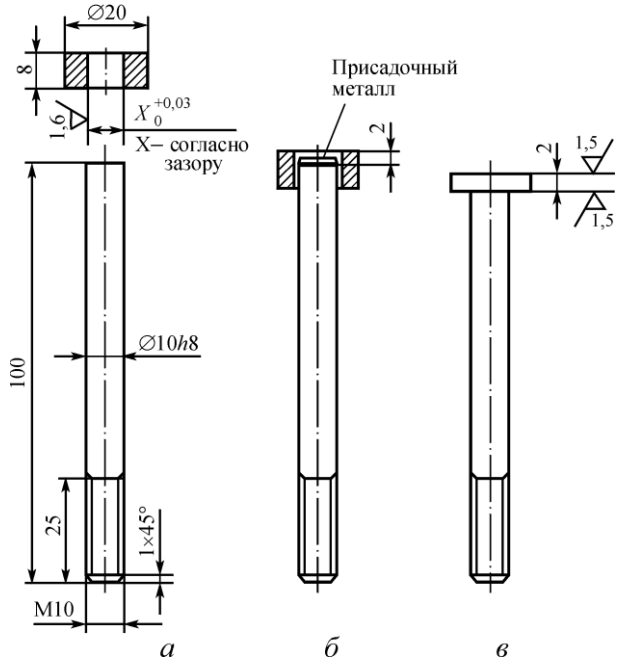


Рис. 2.1. Образцы типа I для испытания на срез:
а – детали образца; *б* – образец до пайки; *в* – образец после механической обработки

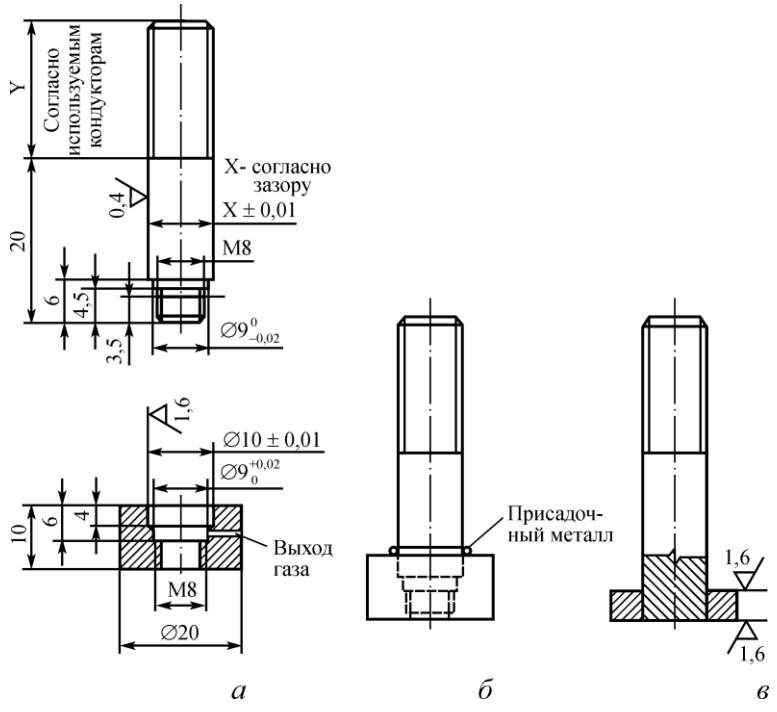


Рис. 2.2. Заготовки типа I для испытаний на срез. Позиции *а–в* см. на рис. 2.1

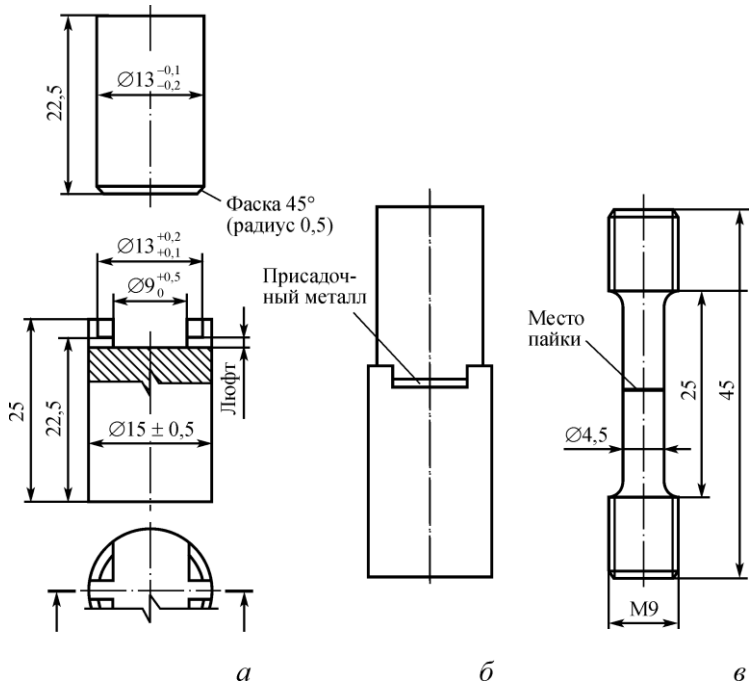


Рис. 2.3. Образцы типа II для испытаний на растяжение. Позиции *а–в* см. на рис. 2.1

Стандартное временное сопротивление при растяжении

Для определения стандартного предела прочности используют торцевые соединения двух цилиндрических образцов с заранее заданным зазором в пределах допуска. Размеры образца для испытания на растяжение приведены на рис. 1.3.

Образцы, установленные ИСО 5187–85, являются основными, однако они не охватывают всех видов паяных соединений и типов нагружений. В целях более полного определения свойств паяных соединений допускается применение дополнительных типов и размеров плоских и цилиндрических образцов, указанных в ГОСТе 28830–90.

Форма и размеры головок, а также размеры переходных частей от головки образца к его рабочей части не являются обязательными и определяются способом крепления в захватах испытательной машины.

При испытании образцов толщиной менее 3 мм допускается применение усиливающих накладок в захватных частях образцов.

Образцы, подлежащие испытанию в термически обработанном состоянии, следует подвергать термической обработке после пайки до окончательной обработки образцов.

Требования к заготовкам. Образцы для испытаний изготовляют из спаянных для этой цели заготовок. Заготовки для образцов вырезают механическим способом. Допускается применение других способов резки, при этом должен быть предусмотрен припуск, обеспечивающий удаление зоны термического влияния или наклепа.

При пайке заготовок марка паяемого материала, подготовка поверхности, припой, среда или флюс, зазор между паяемыми заготовками, способ и режим пайки должны быть такими, как в технологическом процессе.

Ширину нахлестки b подбирают так, чтобы разрушение при испытаниях образцов проходило по паяному шву.

Ширину зазора при пайке рекомендуется обеспечивать с помощью соответствующих приспособлений и прокладок. Прокладки рекомендуется изготавливать из паяемого материала. Участок паяемого шва с прокладками должен быть удален в процессе изготовления образцов.

Выбор паяемого материала и зазора. При проведении испытаний предел прочности паяемого соединения должен быть ниже (или равен) предела текучести паяемого материала. Материал образцов и зазор в паяемом соединении должны соответствовать реальным условиям эксплуатации.

Подготовка поверхности. Поверхность перед пайкой должна быть очищена от оксидов, смазок, краски и т.д. Поверхность образцов под пайку должна иметь параметры шероховатости R_a 1,6–3,2 мкм из меди и ее сплавов и R_a 1,6–6,3 мкм для стали.

Образцы следует изготавливать способами, максимально приближенными к конкретным технологическим процессам изготовления паяных конструкций. В случае проведения исследовательских испытаний способы изготовления паяных образцов должны быть согласованы с заказчиком.

Обработка образцов, их количество и требования к испытаниям должны соответствовать требованиям ГОСТа 28830–90.

Прочность паяного соединения, выраженная в мегапаскалях (МПа), определяется путем деления усилия разрушения, выраженного в ньютонах (Н), на площадь поверхности паяного шва, выраженной в миллиметрах квадратных ($мм^2$).

2.3.2. ИСПЫТАНИЯ НА УДАР (В СООТВЕТСТВИИ С ГОСТОМ 23046–78)

Данный стандарт распространяется на паяные соединения из металлов и сплавов, которые подвергаются ударным нагрузкам, и устанавливает метод испытаний для определения относительной работы разрушения.

Испытания проводят при определении качества паяных соединений, пригодности способов, режимов и материалов, применяемых при пайке.

Для испытаний на ударный изгиб (ГОСТ 23046–78) применяются образцы типов I–III, на ударный срез – типа IV (рис. 2.4–2.7).

Образцы для испытаний следует изготовлять из спаянных для этих целей заготовок или из контролируемого соединения. Рекомендуется брать длину заготовки, обеспечивающую вырезку не менее пяти образцов типа I–III.

Вырезку заготовок для образцов необходимо производить механическим способом. Допускается применять другие способы резки, при этом должен быть предусмотрен припуск, обеспечивающий удаление зоны термического влияния или наклепа.

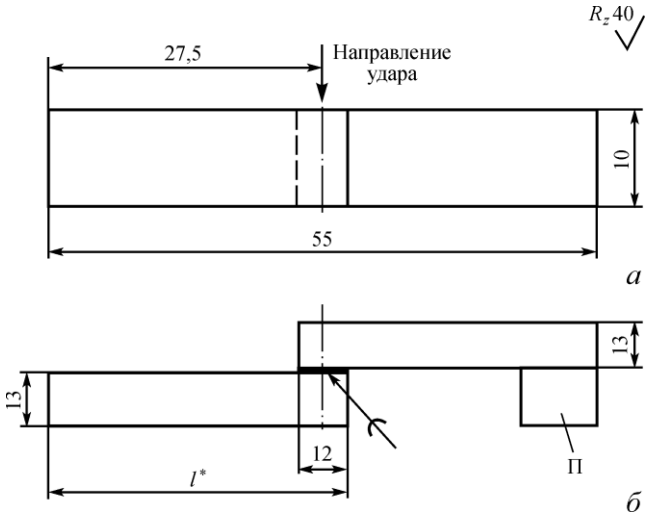


Рис. 2.4. Образец типа I для испытания на ударный изгиб:
а – вид сверху; *б* – вид сбоку; П – прокладка; *s* – толщина паяемого материала 3–6 мм

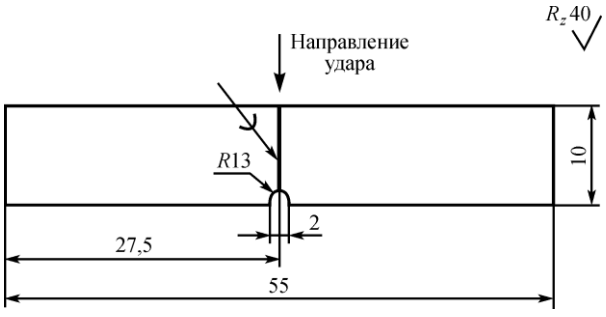


Рис. 2.5. Образец типа II для испытаний на ударный изгиб

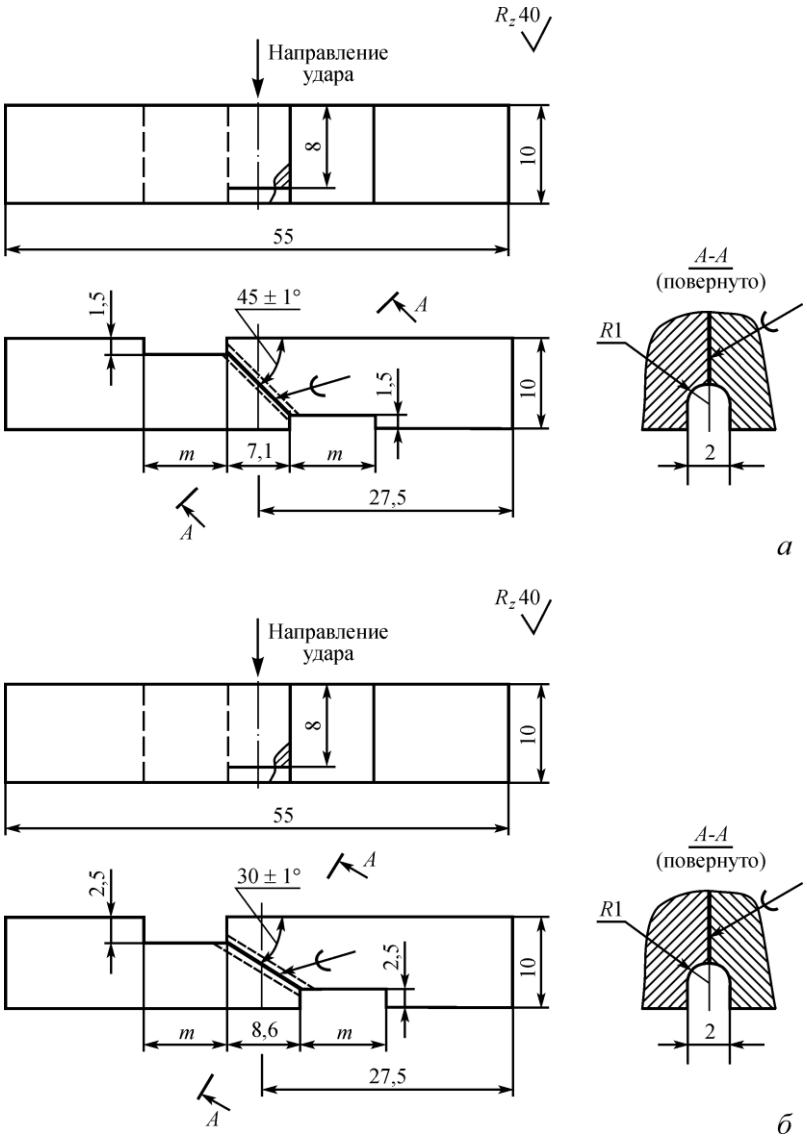


Рис. 2.6. Образец типа III для испытаний на ударный изгиб

При пайке заготовок марка паяемого материала, подготовка поверхности, припой, среда или флюс, зазор между паяемыми заготовками, способ и режим пайки должны быть такими, как в технологическом процессе.

Величину зазора при пайке рекомендуется обеспечивать с помощью соответствующих приспособлений. Допускается обеспечивать зазор с помощью прокладок, которые рекомендуется изготовлять из паяемого материала. Участок паяного шва с прокладками должен быть удален в процессе изготовления образцов.

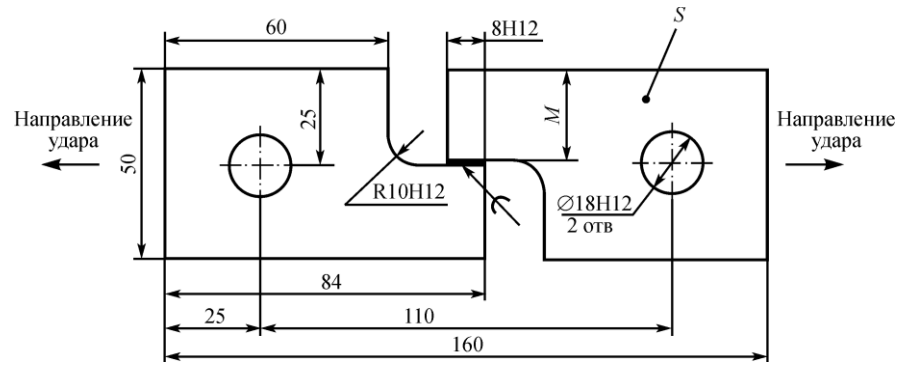


Рис. 2.7. Образец типа IV для испытаний на ударный срез; *s* – толщина образца 8–10 мм

Правка и рихтовка паяных заготовок не допускаются.

Надрез на паяных образцах должен быть выполнен в соответствии с требованиями ГОСТа 9454–78.

Образцы из паяных заготовок или контролируемого соединения должны изготовляться на металлорежущих станках или с помощью анодно-механичской резки. Заусенцы на гранях образцов должны быть удалены легкой запиловкой с радиусом закругления не более 1 мм.

При изготовлении образцов внахлестку (см. рис. 2.4; 2.7) обеспечивают с помощью инструмента величину галтели не более 0,3 мм.

Перед испытаниями следует измерить с точностью до 0,1 мм длину и ширину шва образцов, паянных внахлестку и встык, а также длину шва образцов, паянных вскос. Ширину шва образцов, паянных вскос, вычисляют по результатам измерения линейных размеров образцов, округляя значения до 0,1 мм.

По полученным результатам вычисляют площадь паяного шва, округляя значения до 0,5 мм^2.

Испытания паяных образцов следует проводить на маятниковых копрах в соответствии с ГОСТом 10708–76.

Для испытания паяных образцов типа IV на ударный срез нож маятника следует заменить ударным грузом, в котором крепят образец, а на станине копра установить специальные упоры. Запас энергии маятника с ударным грузом должен соответствовать шкале копра при любом значении угла подъема маятника. Место крепления паяного образца в ударном грузе должно быть определено с таким расчетом, чтобы ударный импульс был направлен по касательной к окружности, которую описывает центр удара маятника.

Расстояние от оси подвески маятника до центра удара L, мм, рассчитывают по формуле

$$L = l_0/(ml),$$

где l_0 – момент инерции маятника относительно оси подвески, кгс·мм^2; m – масса маятника, кг.

Испытания паяных образцов на ударный срез проводят на образцах типа IV при температурах от –100 до 20 °С в соответствии с техническими условиями на изделия и с требованиями ГОСТа 9454–78.

Величину относительной работы разрушения паяного образца A, Дж/мм^2, вычисляют по формуле $A = A_0/F$, где A_0 – работа удара, затраченная на разрушение паяного образца, Дж; F – площадь паяного шва до испытаний, мм^2.

Проверку достоверности полученных результатов рекомендуется проводить в соответствии с приложением 1 к ГОСТу 28830–90 и ИСО 5187–85.

Испытания проводят на прессах или универсальных испытательных машинах, отвечающих требованиям ГОСТа 7855–74. Установки для испытаний должны обеспечивать запись в виде диаграммы в координатах усилие – деформация.

Испытаниям подвергают не менее трех образцов. Образец изгибают сосредоточенной нагрузкой. При установке на опоры продольная ось образца должна быть перпендикулярна оси изгиба. Испытания на изгиб следует проводить при плавном увеличении нагрузки.

При испытаниях до появления первой трещины скорость испытания не должна превышать 15 мм/мин. Испытания проводят с записью диаграммы при увеличении по оси деформации не менее 50 крат. Момент появления трещины в паяном шве фиксируют по появлению первого скачка, изгиба или перелома на диаграмме записи или визуально. Если трещина не образуется, испытания проводят до нормируемого угла или до параллельности сторон (угол изгиба 180°). Испытания до параллельности сторон проводят согласно требованиям раздела 4 ГОСТа 14019–80.

Величину нагрузки при появлении первой трещины определяют по диаграмме записи или по шкале силоизмерителя испытательной машины.

Угол изгиба α измеряют без снятия нагрузки. Допускается измерение угла после снятия нагрузки при условии соответствия величины измеренного угла требованиям стандартов или технических условий на испытуемое соединение. Угол изгиба измеряют посредством инструментальных микроскопов, угломеров или транспортиров, обеспечивающих погрешность измерения не более 2°. За угол изгиба паяного соединения принимают угол, полученный как среднее арифметическое результатов испытаний не менее трех образцов.

При определении предельной пластической деформации паяного соединения, характеризуемой нагрузкой и углом изгиба в момент появления первой трещины, рекомендуется рассчитывать предел прочности при изгибе $\sigma_{изг}$, МПа (кгс/мм^2), по формуле

$$\sigma_{изг} = 3Pl/(2ba^2),$$

где P – нагрузка в момент появления первой трещины, Н (кгс); l – расстояние между опорами, мм; b – ширина образца, мм; a – толщина образца, мм.

2.3.3. ИСПЫТАНИЯ НА ИЗГИБ (В СООТВЕТСТВИИ С ГОСТом 24167–80)

Настоящий стандарт распространяется на паяные соединения из металлов и сплавов и устанавливает метод их статических испытаний на изгиб. Испытания проводят для определения способности паяного соединения выдерживать заданную пластическую деформацию, характеризуемую углом изгиба, или предельную пластическую деформацию, характеризуемую углом изгиба и величиной нагрузки в момент появления первой трещины в паяном шве.

Для испытания на изгиб применяются прямоугольные образцы толщиной a = 3…5 мм, шириной h = 15 + 2,5a и длиной l = 2 (a + 15) + 100…150 мм (рис. 2.8).

Образцы для испытаний следует изготавливать из паяных заготовок или вырезать из контролируемого соединения. Ширина заготовок должна обеспечивать вырезку не менее трех образцов для испытаний. При вырезке заготовок и изготовлении образцов необходимо соблюдать требования, изложенные в разделе 2 ГОСТа 23047–80. Толщину паяного шва измеряют с погрешностью 0,01 мм.

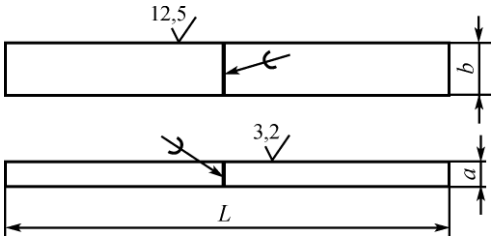


Рис. 2.8. Образец для испытаний на изгиб; *a* – толщина образца (3–5 мм); *L* – длина образца, мм; *b* – ширина образца, мм

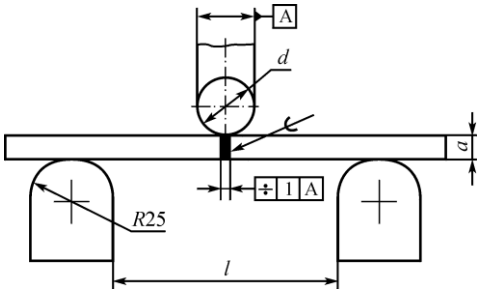


Рис. 2.9. Схема испытания образца на изгиб; *a* – толщина образца (3–5 мм); *d* – диаметр оправки, мм

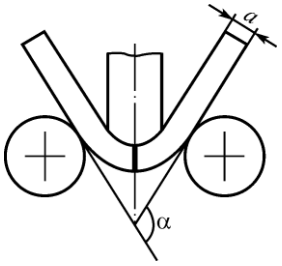


Рис. 2.10. Определение угла изгиба при испытании на изгиб; *a* – толщина образца, мм, α – угол изгиба, град

Испытания проводят на прессах или универсальных испытательных машинах, отвечающих требованиям ГОСТа 7855–74. Установки для испытаний должны обеспечивать запись в виде диаграммы в координатах усилие – деформация. При испытаниях образец подвергают изгибу сосредоточенной нагрузкой, согласно схеме, приведенной на рис. 2.9. Момент появления первой трещины фиксируют по появлению скачка, изгиба или перелома на диаграмме записи. Если трещина не образуется, испытания проводят до нормируемого угла или до параллельности сторон (угол изгиба 180°), согласно требованиям раздела 4 ГОСТа 14019–80. Угол изгиба α измеряют без снятия нагрузки (рис. 2.10) с погрешностью не более 2°.

Признаком, устанавливающим способность паяного соединения выдерживать заданную пластическую деформацию, является отсутствие после испытаний до нормируемого угла или угла 180° изломов, расслоений и трещин в паяном шве.

2.3.4. ИСПЫТАНИЯ НА УСТАЛОСТЬ ПАЯНЫХ ОБРАЗЦОВ ИЗ МЕТАЛЛОВ В МНОГО- И МАЛОЦИКЛОВОЙ УПРУГОЙ И УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ ОБЛАСТЯХ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ–СЖАТИИ, ИЗГИБЕ И КРУЧЕНИИ, ПРИ СИММЕТРИЧНЫХ И АСИММЕТРИЧНЫХ ЦИКЛАХ НАПРЯЖЕНИЙ (В СООТВЕТСТВИИ С ГОСТОМ 26.446–85)

Испытания проводят для определения предела выносливости σ_{-1}, МПа (кгс/мм^2), для выбора оптимального технологического процесса и контроля его стабильности при изготовлении паяных конструкций и для сравнения усталостных характеристик паяных соединений из различных металлов.

Данный стандарт устанавливает методы испытаний на усталость образцов паяных соединений в много- и малоцикловой упругой и упругопластической об-

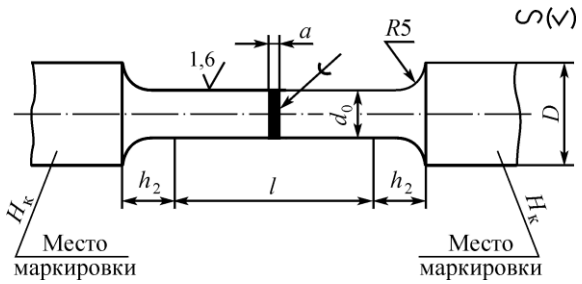


Рис. 2.11. Цилиндрический образец типа I для испытаний на усталость; *l* – длина рабочей части образца, мм; *a* – толщина паяемого шва, мм

ластях при растяжении–сжатии, изгибе и кручении, при симметричных и асимметричных циклах напряжений или деформаций.

Испытания проводят на образцах трех типов:

тип I – цилиндрический образец с диаметром рабочей части от 4 до 10 мм с расположением паяного шва в поперечном направлении в центральной части образца (рис. 2.11);

тип II – плоский образец в виде нахлесточного паяного соединения (рис. 2.12);

тип III – цилиндрический образец с напаянной втулкой (рис. 2.13).

Кроме того, на усталость испытываются различные виды тавровых паяных соединений в соответствии с указанным стандартом.

В стандарте 26.446–85 использованы определения и обозначения из ГОСТов 23207–78 и 17325–79. В нем приведены условия и параметры образцов для испытаний на усталость тавровых паяных соединений, схемы нагружения и формулы расчета номинальных напряжений для различных видов образцов.

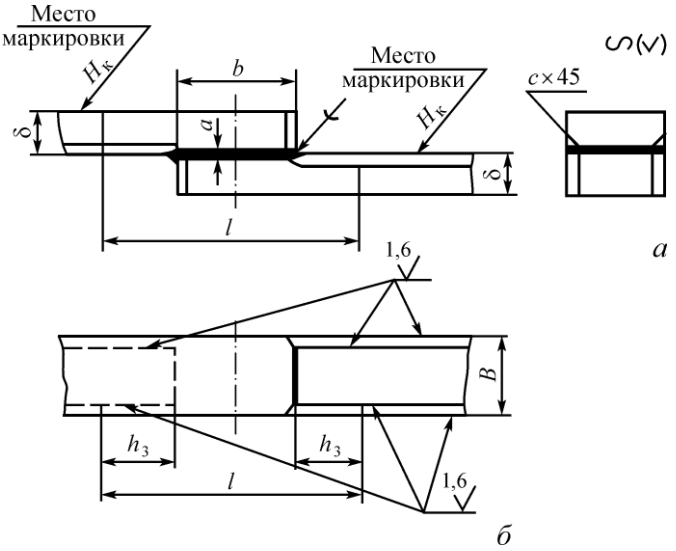


Рис. 2.12. Плоский образец типа II для испытаний на усталость:
а – вид сбоку; *б* – вид сверху; *b* – ширина нахлестки, мм; *l* – длина рабочей части образца, мм; δ – толщина паяемой детали, мм; *B* – толщина паяемого шва, мм; *a* – толщина паяемых деталей, мм

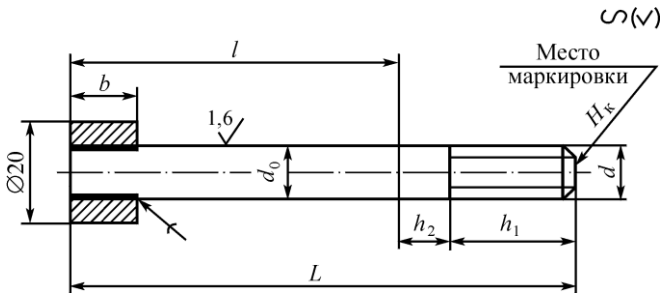


Рис. 2.13. Цилиндрический образец типа III с напаянной втулкой для испытаний на усталость; *L* – длина образца, мм; *l* – длина рабочей части образца, мм; d_0 – диаметр образца, мм

Образцы, подлежащие испытаниям в термически обработанном состоянии, подвергают термической обработке во время или после пайки до вырезки образцов.

Требования к оборудованию и аппаратуре, порядок проведения испытаний на усталость и обработка результатов испытаний изложены в ГОСТе 25.502–79.

2.4. МЕТОДЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Испытания для оценки влияния жидкого припоя на механические свойства паяемого материала (в соответствии с ГОСТом 20487–75)

Стандарт устанавливает метод статических испытаний на растяжение при температуре пайки для оценки влияния паяемого припоя на механические свойства паяемого материала по измерению временного сопротивления разрыву и относительного удлинения после разрыва.

Устанавливаются следующие определения понятий и обозначений:

рабочая длина образца l, мм – часть образца с постоянной площадью поперечного сечения между участками для захватов;

начальная расчетная длина образца до разрыва l_0, мм – участок образца, на котором определяется удлинение;

конечная расчетная длина образца после разрыва $l_к$, мм;

начальная площадь поперечного сечения рабочей части образца F_0, мм^2;

временное сопротивление разрыву $\sigma_в^т$, кгс/мм^2 – напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке P_{max} при температуре пайки, предшествующей разрушению образца;

относительное удлинение после разрыва при температуре пайки δ, % – относительное приращение расчетной длины образца ($l_к - l_0$) к его начальной длине;

показатель влияния припоя на прочностные свойства материала K_σ, % – отношение величины изменения временного сопротивления материала в контакте с жидким припоем к величине временного сопротивления материала без припоя на поверхности;

показатель влияния припоя на пластические свойства материала K_δ, % – отношение величины измеренного относительного удлинения материала в контакте с жидким припоем к величине относительного удлинения без припоя на поверхности.

Для испытаний применяют плоские образцы с расчетной длиной $l_0 = 25$ см.

Параметр шероховатости должен быть не ниже R_z = 20 мкм по ГОСТу 2789–73. Подготовка поверхности образца перед испытанием должна быть аналогичной подготовке поверхности перед пайкой.

Испытательные машины – разрывные или универсальные – должны соответствовать ГОСТу 7855–74.

Испытания проводят следующим образом. Припой размещают на расчетной длине образца и крепят любым способом, исключающим его смещение до момента расплавления. Количество припоя, наносимого на образец, должно быть 30 + 5 мм^3.

Испытания проводят с использованием флюса или в среде, применяемой в соответствующем технологическом процессе пайки.

Методика проведения испытаний подробно описана в ГОСТе 20487–75.

Показатель влияния припоя на прочностные свойства материала K_σ, %, вычисляется по формуле

$$K_\sigma = \frac{\sigma_в^т(\text{без припоя}) - \sigma_в^т(\text{с припоем})}{\sigma_в^т(\text{без припоя})} \cdot 100 .$$

Показатель влияния припоя на пластические свойства материала K_δ, %, вычисляется по формуле

$$K_\delta = \frac{\delta^т(\text{без припоя}) - \delta^т(\text{с припоем})}{\delta^т(\text{без припоя})} \cdot 100 .$$

Определение заполнения зазора припоем (в соответствии с ГОСТом 20485–75)

Стандарт устанавливает метод определения заполнения зазора припоем: горизонтального – по коэффициенту заполнения и коэффициенту пористости, вертикального – по высоте подъема.

Метод определения заполнения припоем горизонтального зазора состоит в следующем.

Для испытаний применяются изготовленные из паяемого материала две пластины размером 40×40 и 20×15 мм толщиной от 1,0 до 2,0 мм.

Испытания проводят с флюсом или в среде, применяемой в соответствующем технологическом процессе пайки. Подготовка поверхности пластин и припоя должна соответствовать технологическому процессу подготовки поверхности перед пайкой. При испытании используют припой, дозированный по объему в количестве 150 % от объема зазора.

Припой укладывают вплотную у зазора равномерно вдоль меньшей стороны пластины размером 20×15 мм, нагревают образцы до температуры пайки и сохраняют ее при испытании. Образцы должны быть расположены горизонтально.

Коэффициент заполнения $K_з$, %, вычисляют по формуле

$$K_з = (S_з/S_0)\cdot 100,$$

где $S_з$ – площадь заполнения зазора припоем, мм^2; S_0 – площадь верхней пластины образца без площади прокладок, мм^2.

Коэффициент пористости $K_п$, %, вычисляют по формуле

$$K_п = (S_п/S_з)\cdot 100,$$

где $S_п$ – площадь пор, мм^2 (суммарная площадь газовых пор и участков несмачивания).

Для определения заполнения припоем вертикального зазора образцы подготавливают, как в предыдущем случае. При испытании должен использоваться припой объемом 2400 мм^3, размещенный в ванне. Порядок установки образцов перед испытанием указан в стандарте.

Установка для испытаний должна обеспечивать нагрев образца и припоя до температуры пайки и сохранение ее при испытании.

Высоту подъема припоя в зависимости от величины зазора измеряют на снимке, полученном после рентгеновского просвечивания образца.

Определение эрозии паяемого материала (в соответствии с ГОСТом 21549–76)

Стандарт устанавливает металлографический метод определения эрозии при пайке и лужении по глубине.

Контроль глубины эрозии проводят при выборе припоя и материала изделия, разработке технологического процесса пайки и лужения и измерении их параметров.

Шлифы для определения эрозии при пайке и лужении изготавливают из паяных внахлестку или луженых образцов. Формы и размеры образцов указаны в стандарте.

Глубина химической эрозии определяется на шлифах, поверхность которых подвергается травлению для выявления структуры и исследуется под металлографическим микроскопом при увеличениях 50–500 крат.

Определение растекания припоя (в соответствии с ГОСТом 20486–75)

Стандарт устанавливает метод определения растекания припоя на паяемом материале по площади растекания. Для испытания применяются пластины размером 40×40 мм или диаметром 40 мм.

Подготовка поверхности пластин и припоя должна соответствовать технологическому процессу подготовки поверхности перед пайкой.

Для испытания используют навески припоя объемом 64 мм^3. Образец с помещенной на нем в центре навеской должен располагаться горизонтально. Установка для испытания должна обеспечивать нагрев образца до температуры пайки и сохранять ее при испытании.

Испытания проводят с флюсом или в среде, применяемой в соответствии с технологией процесса пайки.

Площадь растекания измеряют соответствующими приборами.

Определение температуры распайки (в соответствии с ГОСТом 21547–76)

Стандарт устанавливает метод определения температуры распайки при равномерном нагреве. Образец находится под постоянной статической нагрузкой. В ГОСТе указаны образцы различной формы. Образцы для определения температуры распайки следует паять в газовой среде, вакууме или с флюсом по режимам, применяемым в соответствующих технологических процессах.

Зазор при пайке должен соответствовать ТУ на изделия (но не более 0,15 мм).

Образец с закрепленной удлиненной штангой и площадкой с разновесами помещают в нагревательное устройство. Температура распайки соединения фиксируется.

Выявление и определение толщины прослойки химического соединения (в соответствии с ГОСТом 21548–76)

Стандарт распространяется на паяные изделия и устанавливает металлографический метод выявления и определения толщины прослойки химического соединения на границе паяемый материал – паяный шов.

Шлифы для определения и выявления толщины прослойки изготавливают из паяных внахлестку образцов.

Плоскость шлифа должна быть перпендикулярна паяным поверхностям образца.

Структура выявляется любыми методами и реактивами. Толщину прослойки измеряют под металлографическим микроскопом при увеличении от 300 до 1000 крат.

В стандарте указаны методики:

Определение периода активации в зависимости от температуры пайки;

Определение скорости роста прослойки химического соединения.

Определение совместимости металлических материалов с припоями

Методика основана на использовании испытаний на статическое растяжение. Разработана Научно-исследовательским институтом испытательных машин, приборов и средств измерения (НИКИМП, Москва).

Испытания образцов проводят без припоя и в контакте с ним, в интервале температур 20 °С – температура пайки конструкции. Припой на цилиндрический образец с диаметром рабочей части 5 мм и длиной 120 мм наносят любым способом. Наиболее эффективен послойно-гальванический способ нанесения припоя, который позволяет получать жидкую фазу под верхним слоем покрытия, являющегося составной частью припоя и представляющего собой при температуре испытания твердую оболочку, препятствующую растеканию припоя. Испытания образцов проводят в рабочей камере либо в вакууме, либо в инертной атмосфере. Испытания могут проводиться как на кратковременную, так и на длительную прочность по ГОСТам 1497–84 и 10145–81 соответственно.

По результатам испытаний сравнивают потерю прочности и пластичности испытуемых металлических материалов под воздействием жидкого припоя в зависимости от температуры и длительности испытаний, что позволяет судить о совместимости металлических материалов с припоями.

Определение снижения прочности металлических материалов с трещинами под действием припоя

Методика позволяет оценивать влияние мелких поверхностных трещин в паяемых металлических материалах, заполненных закристаллизовавшимся припоем, на прочностные характеристики при испытании на кратковременную прочность.

Суть метода: испытания проводят на плоских образцах с V-образным надрезом, который имитирует реальную поверхностную трещину. Размеры образца выбирают по ГОСТу 20487–75. На образец гальваническим способом наносят послойно припой, причем верхний слой припоя должен быть более тугоплавким, чтобы сохранять твердую оболочку, обеспечивающую равномерное растекание припоя на поверхности образца. Для зарождения трещины в образце к нему в месте надреза прикладывают растягивающую нагрузку и выдерживают опреде-

ленное время при температуре пайки. Величину растягивающей нагрузки подбирают таким образом, чтобы можно было определить минимальную нагрузку, при которой происходит зарождение и развитие трещины в зависимости от времени выдержки в контакте с жидким припоем. После снятия нагрузки образец охлаждают до комнатной температуры и затем разрушают.

По площади излома, облуженной расплавом припоя, определяют размер трещины, возникшей от надреза, а по снижению разрушающей нагрузки по сравнению с разрушающей нагрузкой образца без припоя – влияние длины трещины на прочность паяемых металлических материалов.

ПЕРЕЧЕНЬ ГОСТов, РЕГЛАМЕНТИРУЮЩИХ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

1497–84	Металлы. Методы испытания на растяжение
7855–74	Машины разрывные и универсальные для статических испытаний металлов
9454–78	Металлы. Метод испытаний на ударный изгиб при пониженной, комнатной и повышенных температурах
10145–81	Металлы. Метод испытаний на длительную прочность
10708–76	Копры маятниковые. Технические условия
14019–80	Металлы. Методы технологических испытаний на изгиб
14782–76	Швы сварных и паяных соединений. Методы ультразвуковой дефектоскопии
17325–79	Пайка. Термины и определения
17349–71	Пайка. Классификация способов
18442–80	Качество продукции. Разрушающий контроль. Капиллярные методы
19249–73	Соединения паяные. Основные типы и параметры
19250–73	Флюсы паяльные. Классификация
20426–82	Контроль неразрушающий. Методы дефектоскопии радиационные. Области применения
20485–75	Пайка. Методы определения затекания припоя в зазор
20486–75	Пайка. Метод определения растекания припоя
20487–75	Пайка. Метод испытаний для оценки влияния жидкого припоя на механические свойства
21547–76	Пайка. Метод определения температуры распайки
21548–76	Пайка. Метод выявления и определения толщины прослойки, химического соединения
21549–76	Пайка. Метод определения эрозии паяемого материала
23046–78	Соединения паяные. Метод испытаний на удар
23047–78	Соединения паяные. Метод испытания на растяжение
23207–78	Сопротивление усталости. Основные требования. Определения и обозначения
23479–79	Контроль неразрушающий. Методы оптического вида. Общие требования
23483–79	Контроль неразрушающий. Методы теневого вида
23904–79	Пайка. Метод определения смачивания материалов припоями
24054–80	Изделия машиностроения и приборостроения. Методы испытания на герметичность. Общие требования
24167–80	Соединения паяные. Метод испытаний на изгиб
24715–81	Соединения паяные. Методы контроля качества

26126–84	Контроль неразрушающий. Соединения паяные. Ультразвуковые методы контроля качества
26446–85	Соединения паяные. Методы испытаний на усталость
27947–88	Контроль неразрушающий. Рентгенотелевизионный метод. Общие требования
28830–90	Соединения паяные. Метод испытаний на растяжение и длительную прочность
29297–92	Сварка, высокотемпературная и низкотемпературная пайка. Условные обозначения
2.309–73	Единая система конструкторской документации. Обозначения шероховатости поверхности
3.1417–74	ЕСКД. Правила оформления документов на технологию пайки
3.1427–77	ЕСКД. Правила оформления документов на процессы пайки
3.1502–74	ЕСКД. Формы и правила оформления документов на технический контроль
26.446–85	Единая система конструкторской документации на шероховатость поверхности

Глава 3
ДЕФЕКТЫ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ

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.

3.1. КЛАССИФИКАЦИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ

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.) прежде всего 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).

Первые два вида дефектов освещены в специальной литературе и в данном справочнике изложены кратко. Третий вид дефектов подробно рассмотрен в данной главе на примере, главным образом, конструкционных сталей, алюминиевых и никелевых сплавов. Обсуждены:

характерные виды дефектов (наружные и внутренние);

причины их образования;

способы предупреждения;

способы устранения;

влияние на свойства сварного соединения.

Приведенные иллюстрации (схемы и фотографии) дефектов позволяют быстро и надежно визуально идентифицировать вид дефекта, установить причины появления и оперативно принять меры по его устранению.

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

ГОСТе 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 (табл. 13):

трещины;
поры;
твердые включения;
несплавления и непровары;
нарушения формы шва;
прочие дефекты.

Таблица 13. **Виды дефектов (в соответствии с ГОСТом 30242–97)**

Наименование дефекта	Определение и/или пояснение дефекта
	Группа 1. Трещины
Трещины	Несплошность, вызванная местным разрывом шва, который может возникнуть в результате охлаждения или действия нагрузок
Микротрещина	Трещина, имеющая микроскопические размеры, которую обнаруживают физическими методами не менее чем при 50-кратном увеличении
Продольная трещина	Трещина, ориентированная параллельно оси сварного шва. Она может располагаться в металле сварного шва, на границе сплавления, в зоне термического влияния, в основном металле
Поперечная трещина	Трещина, ориентированная поперек оси сварного шва. Она может располагаться в металле сварного шва, в зоне термического влияния, в основном металле
Радиальные трещины	Трещины, радиально расходящиеся из одной точки. Они могут быть в металле сварного шва, в зоне термического влияния, в основном металле
Трещина в кратере	Трещина в кратере сварного шва, которая может быть продольной, поперечной, звездообразной
Раздельные трещины	Группа трещин, которые могут располагаться в металле сварного шва, в зоне термического влияния, в основном металле
Разветвленные трещины	Группа трещин, возникших из одной трещины. Они могут располагаться в металле сварного шва, в зоне термического влияния, в основном металле
	Группа 2. Поры
Газовая полость	Полость произвольной формы, образованная газами, задержанными в расплавленном металле, которая не имеет углов
Газовая пора	Газовая полость обычно сферической формы
Равномерно распределенная пористость	Группа газовых пор, распределенных равномерно в металле сварного шва. Следует отличать от цепочки пор
Скопление пор	Группа газовых полостей (более двух), расположенных кучно с расстоянием между ними менее трех максимальных размеров большей из полостей
Цепочка пор	Ряд газовых пор, расположенных в линию, обычно параллельно оси сварного шва, с расстоянием между ними менее трех максимальных размеров большей из пор
Продолговатая полость	Несплошность, вытянутая вдоль оси сварного шва. Длина несплошности не менее чем в два раза превышает ее высоту
Свищ	Трубчатая полость в металле сварного шва, вызванная выделением газа. Форма и положение свища определяются режимом затвердевания и источником газа. Обычно свищи группируются в скопления и распределяются елочкой

Продолжение табл. 13

Наименование дефекта	Определение и/или пояснение дефекта
Поверхностная пора	Газовая пора, которая нарушает сплошность поверхности сварного шва
Усадочная раковина	Полость, образующаяся вследствие усадки во время затвердевания
Кратер	Усадочная раковина в конце валика сварного шва, не заваренная до или во время выполнения последующих проходов
	Группа 3. Твердые включения
Твердое включение	Твердые инородные вещества металлического или неметаллического происхождения в металле сварного шва
Шлаковое включение	Шлак, попавший в металл сварного шва. В зависимости от условий образования такие включения могут быть линейными, разобщенными, прочими
Флюсовое включение	Флюс, попавший в металл сварного шва. В зависимости от условий образования такие включения могут быть линейными, разобщенными, прочими
Оксидное включение	Оксид металла, попавший в металл сварного шва во время затвердевания
Металлическое включение	Частица инородного металла, попавшая в металл сварного шва. Различают частицы из вольфрама, меди, другого металла
	Группа 4. Несплавления и непровары
Несплавление	Отсутствие соединения между металлом сварного шва и основным металлом или между отдельными валиками сварного шва
Непровар (неполный провар)	Несплавление основного металла по всей длине шва или на участке, возникающее вследствие неспособности расплавленного металла проникнуть в корень соединения
	Группа 5. Нарушение формы шва
Нарушение формы	Отклонение формы наружных поверхностей сварного шва или геометрии соединения от установленного значения
Подрез непрерывный	Продольное углубление на наружной поверхности валика сварного шва, образовавшееся при сварке
Усадочная канавка	Подрез со стороны корня одностороннего сварного шва, вызванный усадкой по границе сплавления
Превышение выпуклости стыкового шва	Избыток наплавленного металла на лицевой стороне стыкового шва сверх установленного значения
Превышение выпуклости углового шва	Избыток наплавленного металла на лицевой стороне углового шва (на всей длине или на участке) сверх установленного значения
Превышение проплава	Избыток наплавленного металла на обратной стороне стыкового шва сверх установленного значения
Местное превышение	Местный избыточный проплав сверх установленного значения
Неправильный профиль сварного шва	Угол (α) между поверхностью основного металла и плоскостью, касательной к поверхности сварного шва, менее установленного значения
Наплыв	Избыток наплавленного металла сварного шва, натекший на поверхность основного металла, но не сплавленный с ним
Линейное смещение	Смещение между двумя свариваемыми элементами, при котором их поверхности располагаются параллельно, но не на требуемом уровне
Угловое смещение	Смещение между двумя свариваемыми элементами, при котором их поверхности располагаются под углом, отличающимся от требуемого
Натек	Металл сварного шва, осевший вследствие действия силы тяжести и не имеющий сплавления с соединяемой поверхностью
Прожог	Вытекание металла сварочной ванны, в результате которого образуется сквозное отверстие в сварном шве

Продолжение табл. 13

Наименование дефекта	Определение и/или пояснение дефекта
Неполностью заполненная разделка кромок	Продольная непрерывная или прерывистая канавка на поверхности сварного шва из-за недостаточности присадочного материала при сварке
Чрезмерная асимметрия углового шва	Чрезмерное превышение размера одного катета над другим
Неравномерная ширина шва	Отклонение ширины от установленного значения вдоль сварного шва
Неровная поверхность	Грубая неравномерность формы поверхности усиления шва по длине
Вогнутость корня шва	Неглубокая канавка со стороны корня одностороннего сварного шва, образовавшаяся вследствие усадки
Пористость в корне сварного шва	Наличие пор в корне сварного шва вследствие возникновения пузырьков во время затвердевания металла
Возобновление	Местная неровность поверхности в месте возобновления сварки
Группа 6. Прочие дефекты	
Прочие дефекты	Все дефекты, которые не могут быть включены в группы 1–5
Случайная дуга	Местное повреждение поверхности основного металла, примыкающего к сварному шву, возникшее в результате случайного горения дуги
Брызги металла	Капли наплавленного или присадочного металла, образовавшиеся во время сварки и прилипшие к поверхности затвердевшего металла
Поверхностные задиры	Повреждение поверхности, вызванное удалением временно приваренного приспособления
Утонение металла	Уменьшение толщины металла до значения менее допустимого при механической обработке

Дополнительно к ГОСТу в данной главе более подробно описаны типичные, наиболее опасные дефекты: трещины, поры, усадочные раковины, кратер, неметаллические включения, металлические включения, флокены, непровар, подрез, наплыв, прожог, несплавление, слипание, перегрев.

3.2. ТРЕЩИНЫ

Виды трещин

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 в соответствии с ГОСТом 30242–97 подразделяются по ориентации к шву на:

продольные, ориентированные параллельно оси сварного шва и располагающиеся в металле сварного шва, на границе сплавления, в зоне термического влияния, в основном металле (рис. 3.1 и 3.2);

поперечные, ориентированные поперек оси сварного шва и располагающиеся в металле сварного шва, в зоне термического влияния, в основном металле;

радиальные – радиально расходящиеся из одной точки и располагающиеся в металле сварного шва, в зоне термического влияния, в основном металле;

по температуре образования на:

горячие, возникающие в интервале температур кристаллизации металла;

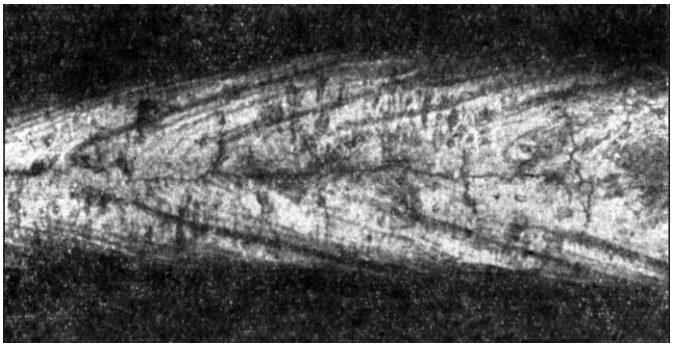


Рис. 3.1. Продольные и поперечные трещины в металле шва

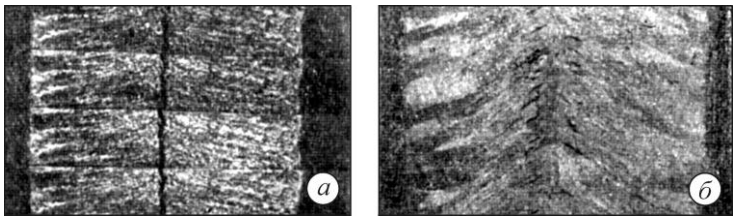


Рис. 3.2. Расположение трещин по сечению шва при электрошлаковой сварке:
а – по оси шва; *б* – между ветвями столбчатых кристаллов

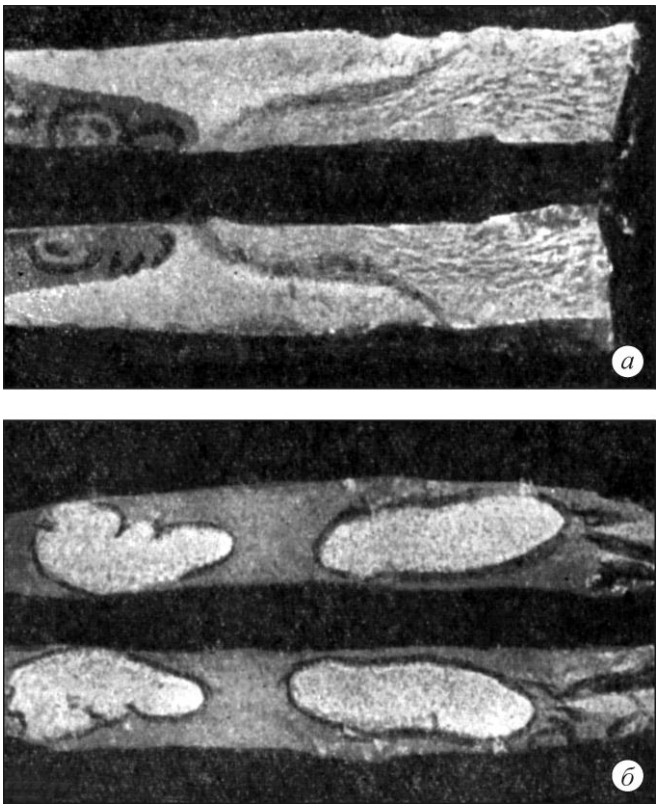


Рис. 3.3. Трещины в изломе шва:
а – трещины, выходящие на поверхность шва; *б* – трещины, не выходящие на поверхность шва

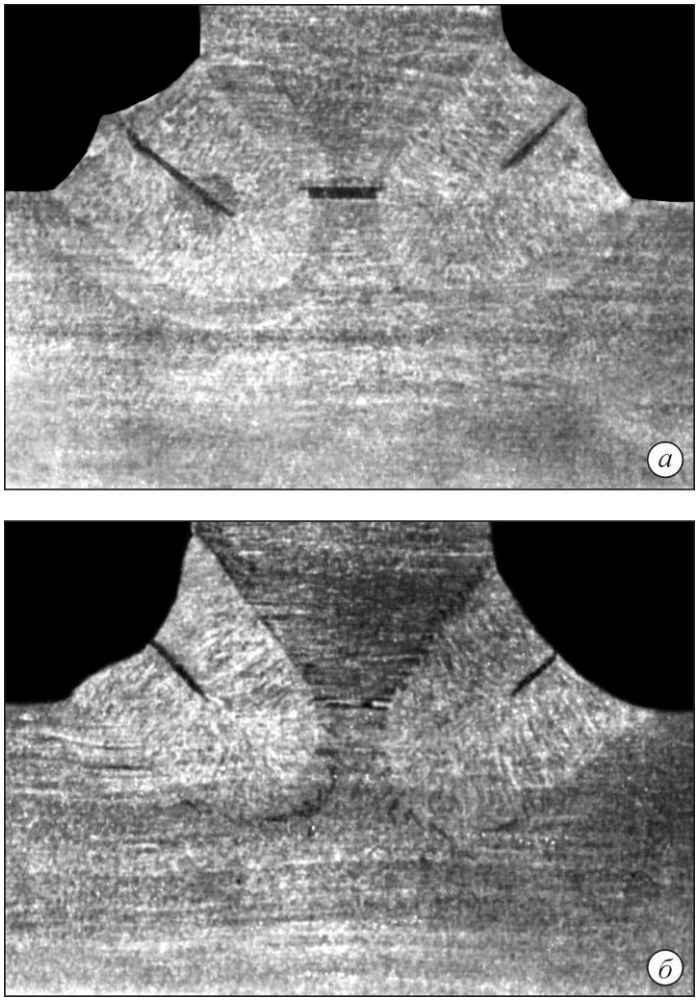


Рис. 3.4. Расположение трещин по сечению шва (дуговая сварка):
а – трещины, не выходящие на поверхность шва; *б* – трещины, выходящие на поверхность шва

холодные, возникающие при температурах ниже интервала кристаллизации металла;

трещины повторного нагрева;

по месту нахождения на:

наружные (рис. 3.3, *а* и 3.4, *б*);

внутренние (рис. 3.3, *б* и 3.4, *а*);

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 в сварном соединении

Описание

Термины, описывающие горячие трещины в сварном соединении, даны в соответствии с ГОСТом 26389–84.

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 $T_{в.г}$ и нижней $T_{н.г}$ границами температурного интервала образования горячих трещин: $ТИХ = T_{в.г} – T_{н.г}$.

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 (*С*) – 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 (применение накладок и т.п.), 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.

Кроме того, образованию горячих трещин в различных металлах способствуют приведенные ниже факторы:

при сварке *сталей*:

сварка легированных сталей в жестко закрепленных конструкциях;

высокая скорость охлаждения при сварке высокоуглеродистых сталей, склонных к закалке на воздухе;

применение высокоуглеродистой электродной проволоки при автоматической сварке конструкционной легированной стали;

примеси серы, фосфора, водорода, вызывающие в металле шва кристаллизационные трещины (сера и фосфор попадают в металл шва из основного металла, из флюсов и покрытия электродов, из присадочного материала, а водород – из основного и присадочного металлов, из защитного газа и из материалов, входящих в состав покрытий или флюсов, и из атмосферы дуги);

при сварке *алюминиевых сплавов*:

скопления эвтектических составляющих на границах крупных кристаллитов металла шва;

недостаточная скорость охлаждения металла шва;

увеличение содержания цинка относительно содержания магния, повышающее склонность к образованию горячих трещин;

при сварке *титановых сплавов*:

активное поглощение при высоких температурах кислорода, водорода, азота (это вызывает резкое снижение пластичности и конструкционной прочности);

низкая теплопроводность титановых сплавов, приводящая к увеличению времени пребывания сварного шва при высоких температурах и, как следствие, к интенсивному росту зерна;

при сварке *медных сплавов*:

легкая окисляемость меди и ее сплавов в расплавленном состоянии, вызывающая образование закиси меди, которая при кристаллизации выделяется по границам зерен металла шва, охрупчивая их;

наличие в медных сплавах вредных примесей (висмута, свинца), вызывающих образование легкоплавких эвтектик, а также примесей серы и углерода, адсорбирующихся на границах кристаллитов, и легкоплавких эвтектик;

наличие кислорода, снижающего стойкость швов против образования горячих трещин;

при сварке *магниевых сплавов*:

применение присадочного металла, по химическому составу отличающегося от состава основного металла, способствующего образованию пленочных выделений на границах кристаллитов, скоплению легкоплавких эвтектик и увеличивающего интервал кристаллизации, снижая температуру солидуса.

Большую склонность к образованию горячих трещин проявляют и другие тугоплавкие металлы и сплавы, в том числе никель и никелевые сплавы. Это связано с крупнокристаллической дендритной структурой металла шва и выделением на границах кристаллитов примесей внедрения в виде различных соединений.

Способы предупреждения

Для предупреждения горячих трещин при сварке рекомендуется:

применение дополнительно 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, обусловливающего 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.

Кроме того, предотвращению горячих трещин в различных металлах способствуют приведенные ниже факторы:

при сварке *сталей*:

изменение химического состава металла шва в направлении уменьшения содержания в нем вредных примесей (сера, фосфор, углерод, кремний) и увеличения полезных элементов (марганец, хром, никель и др.) путем применения дополнительного присадочного металла, содержащего пониженное количество вредных и повышенное количество полезных элементов;

введение в сварочную ванну модификаторов – инокуляторов таких, как алюминий, титан, ванадий, церий;

при сварке *алюминиевых сплавов*:

использование модифицирующих добавок (цирконий, титан), особенно в виде солей, вводимых в присадочные материалы;

применение присадочных материалов, обеспечивающих более высокую пластичность сварного шва;

применение схемы кристаллизации, обеспечивающей наивыгоднейшее расположение дендритов путем регулирования направления теплоотвода при кристаллизации;

при сварке *титановых сплавов*:

сокращение времени пребывания металла при высоких температурах с целью предотвращения роста зерна и поглощения газов – кислорода, водорода, азота;

соблюдение технологии сварки с целью предотвращения попадания влаги и загрязнений в зону сварки, надежная защита соединения;

проведение сварки альфа и псевдо альфа сплавов титана на жестких режимах, а альфа + бета сплавов – на относительно мягких (скорость охлаждения 10–20 °С/с);

при сварке *медных сплавов*:

защита сварочной ванны от взаимодействия с кислородом (в свариваемом металле содержание кислорода не должно превышать 0,03 %);

ограничение содержания вредных примесей (висмута, свинца), образующих легкоплавкие эвтектики, и примесей серы и углерода, адсорбируемых на границах кристаллитов и на границах легкоплавких эвтектик;

раскисление сварных швов алюминием, марганцем и титаном, использование церия и циркония в качестве модификаторов;

проведение перед сваркой подогрева конструкций до 300 °С;

регулирование направления теплоотвода при кристаллизации шва с целью наивыгоднейшего расположения дендритов;

при сварке *магниевых сплавов*:

выбор технологии сварки, обеспечивающей оптимальную погонную энергию и охлаждение шва;

последовательное выполнение швов, обеспечивающее минимально возможное развитие усадочных и тепловых линейных деформаций;

применение предварительного и сопутствующего подогревов, изменяющих характер распределения напряжений в сварных соединениях;

конструирование сварного соединения с обеспечением достаточной податливости конструкции развивающимся в процессе сварки деформациям.

К основным технологическим мерам предупреждения горячих трещин при сварке других тугоплавких металлов и сплавов, в том числе никеля и никелевых сплавов, необходимо:

применение присадочных материалов, обеспечивающих более высокую пластичность металла шва;

применение схемы кристаллизации, создающеей наивыгоднейшее направление осей дендритов путем регулирования направления теплоотвода при кристаллизации;

применение мер, ограничивающих остаточные напряжения в металле шва.

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 (рис. 3.5–3.7)

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.

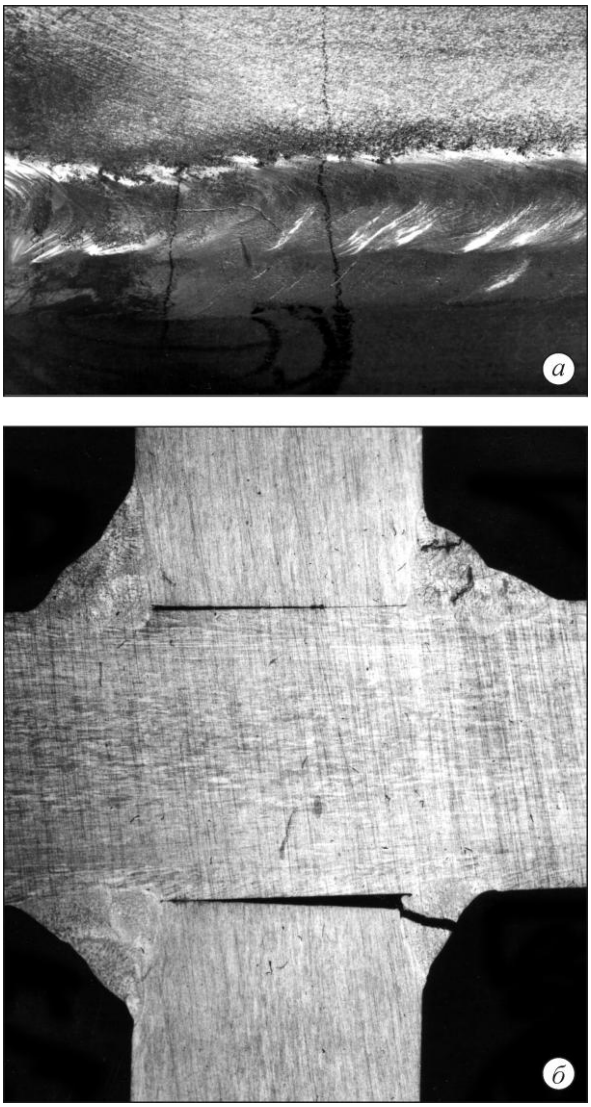


Рис. 3.5. Вид крестовой пробы, предназначенной для оценки склонности сварных швов к образованию горячих трещин:
а – внешний вид сварного шва с поперечными трещинами; *б* – макроструктура поперечного сечения крестовой пробы (алюминиевый сплав)

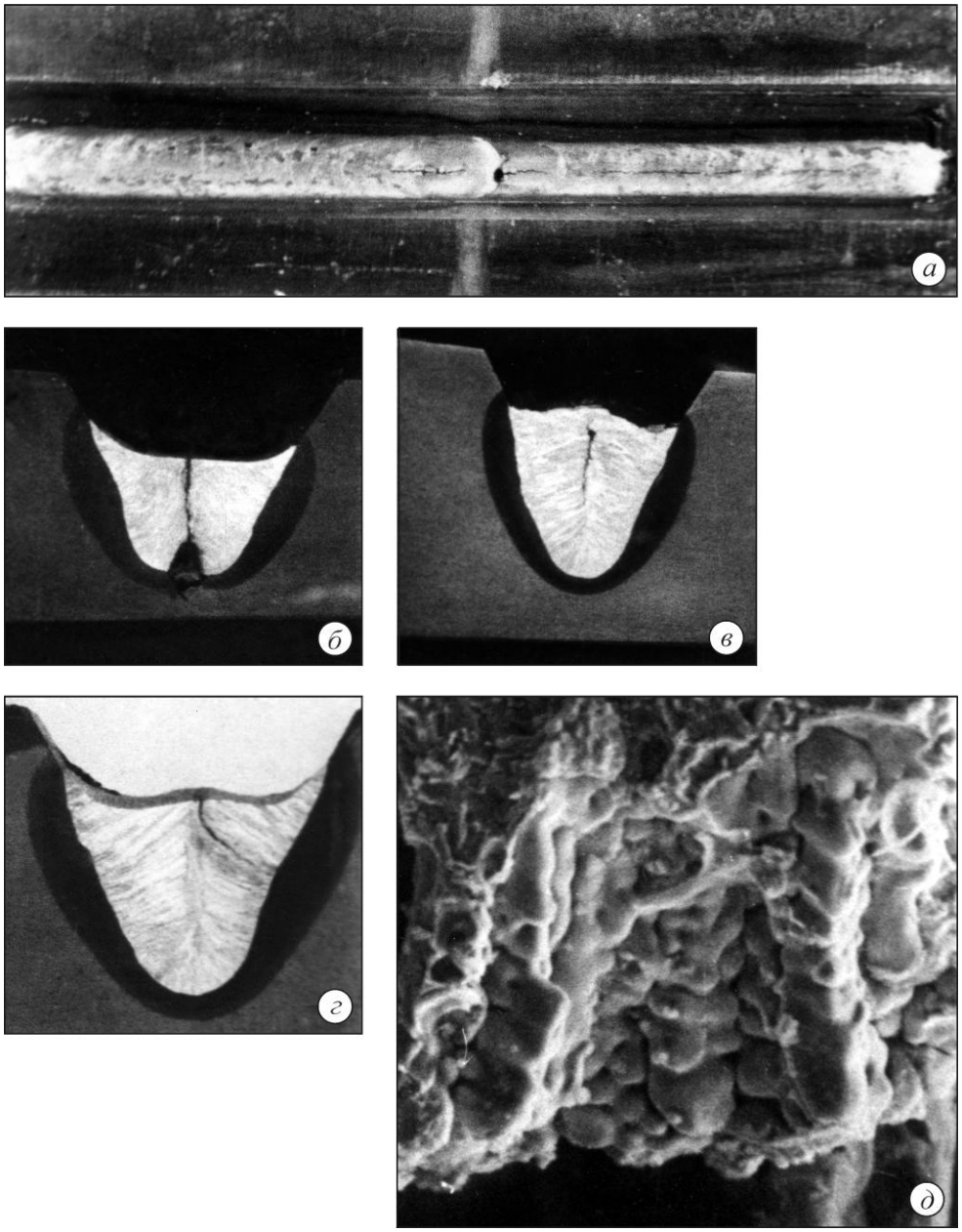


Рис. 3.6. Горячие трещины в металле швов:
а –внешний вид трещины по оси шва, выходящей наружу; *б* – макроструктура трещины по оси шва, выходящей наружу; *в* – макроструктура трещины по оси шва, не выходящей наружу; *г* – макроструктура трещины в межосных плоскостях, выходящей наружу; *д* – микрорельеф разрушения горячих (кристаллизационных) трещин.
Разрушение по жидким прослойкам, РЭМ. ×1000

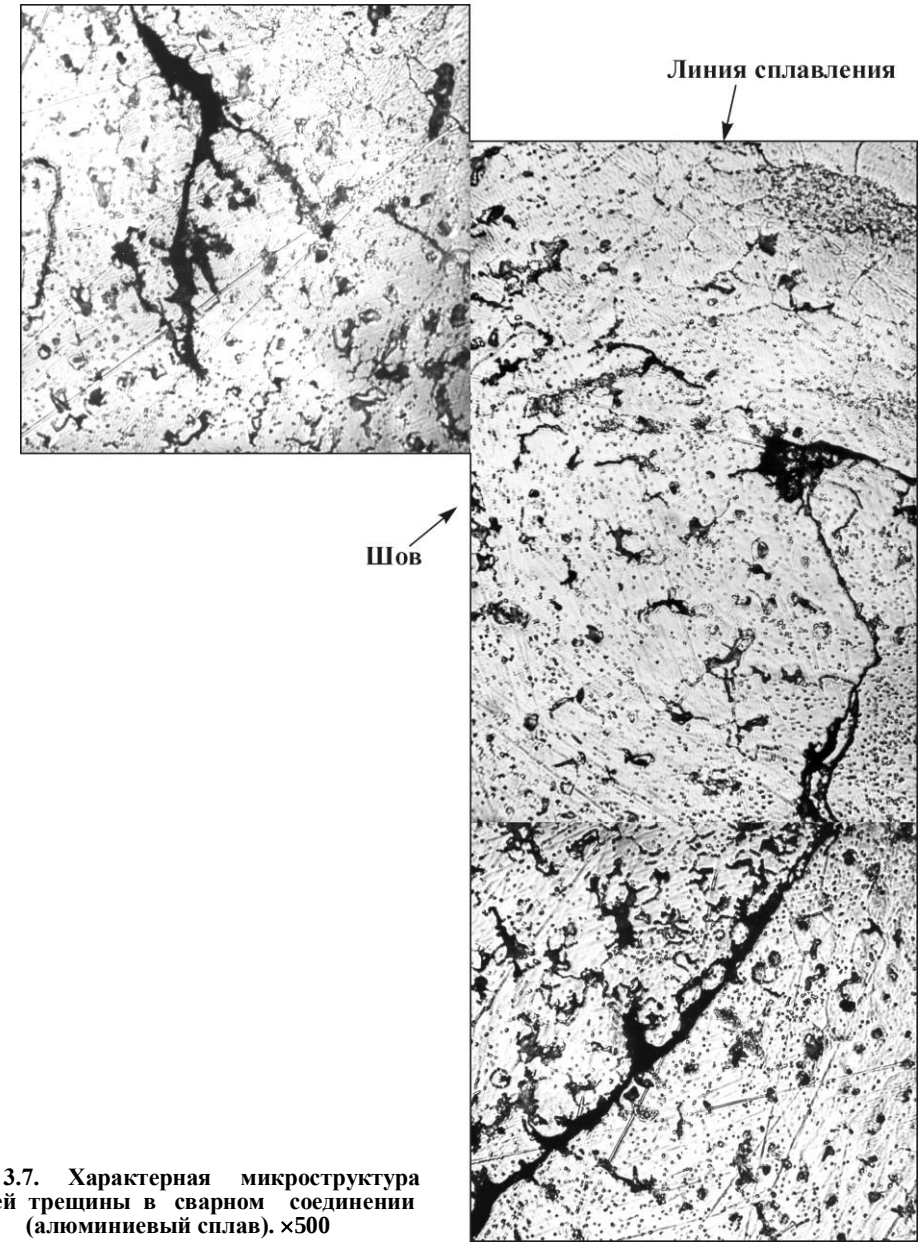


Рис. 3.7. Характерная микроструктура горячей трещины в сварном соединении (алюминиевый сплав). ×500

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 кри-

сталлитами 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 упруго-пластической деформации.

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

Горячие трещины в зоне термического влияния (рис. 3.8–3.10)

Описание

Горячие трещины в зоне термического влияния 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 соли-дуса.

Горячие трещины в околошовной зоне выявляются двумя группами методов:

неразрушающими – радиографическим, ультразвуковым, магнитным контролем;

разрушающими – металлографическими и фрактографическими на шлифах и изломах.

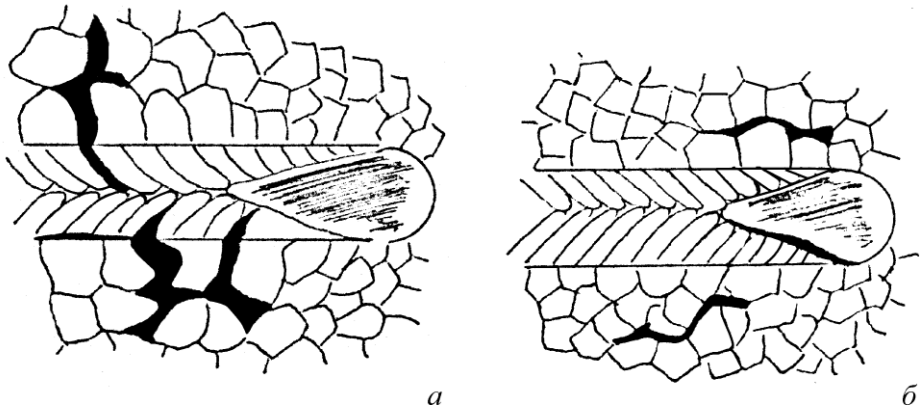


Рис. 3.8. Схематическое изображение горячих трещин в зоне термического влияния:
а – поперечные; *б* – продольные

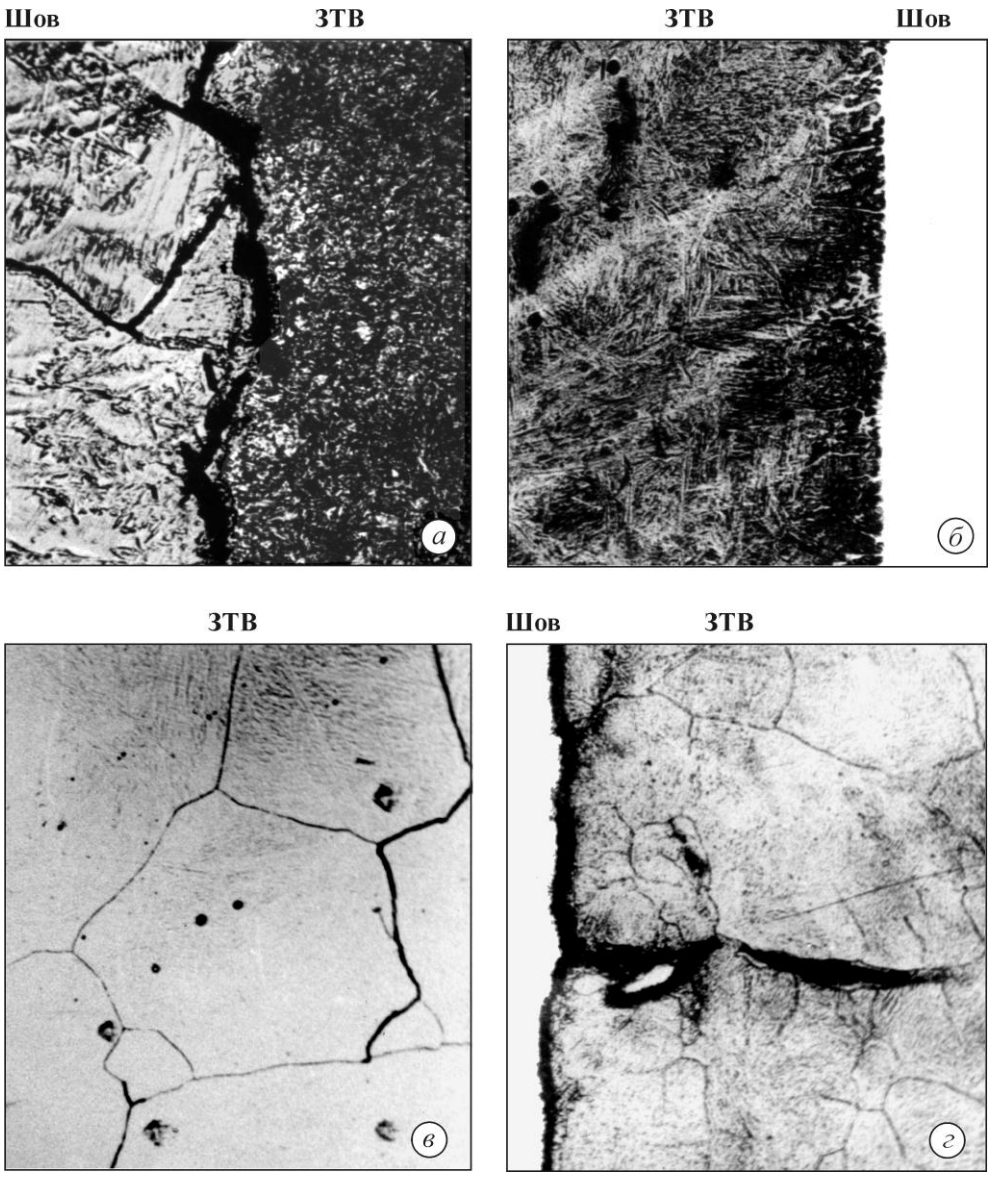


Рис. 3.9. Микроструктура горячих (кристаллизационных) трещин в зоне термического влияния:
а, б – по зоне сплавления, ×200; *в* – сетка трещин в зоне термического влияния, ×500; *г* – перпендикулярно зоне термического влияния, ×200

Причины образования

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

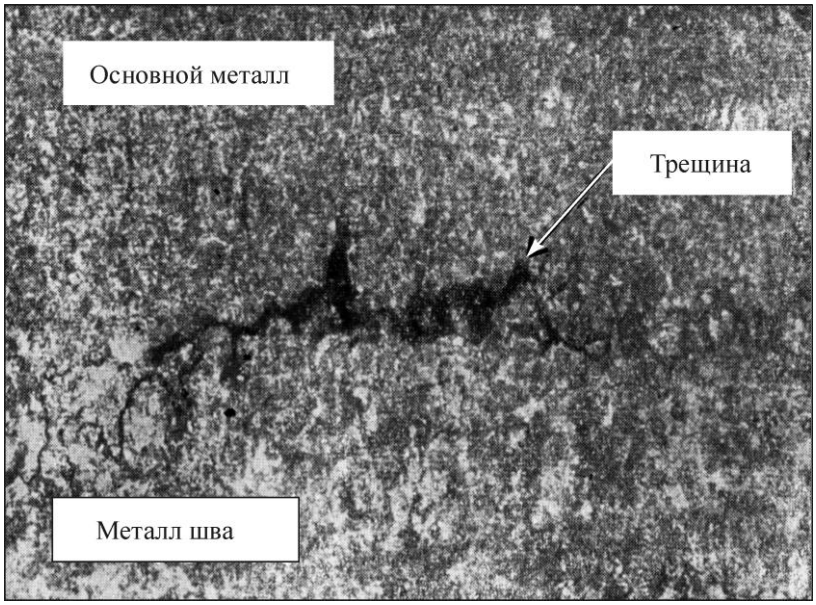


Рис. 3.10. Околошовная горячая (кристаллизационная) трещина в зоне термического влияния, ×200

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.

Способы исправления

Способы исправления аналогичны описанным выше для сварного соединения.

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 (рис. 3.11–3.18)

Описание

Холодные трещины образуются после окончания сварки в процессе охлаждения ниже температур 150–100 °С или в течение последующих суток.

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 подвалковые.

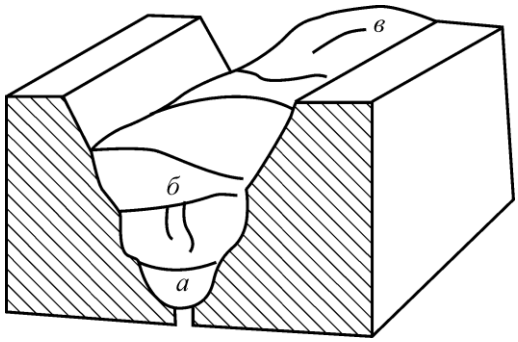


Рис. 3.11. Разновидность продольных холодных трещин в шве (схема):
а – корневые; *б* – внутренние; *в* – поверхностные

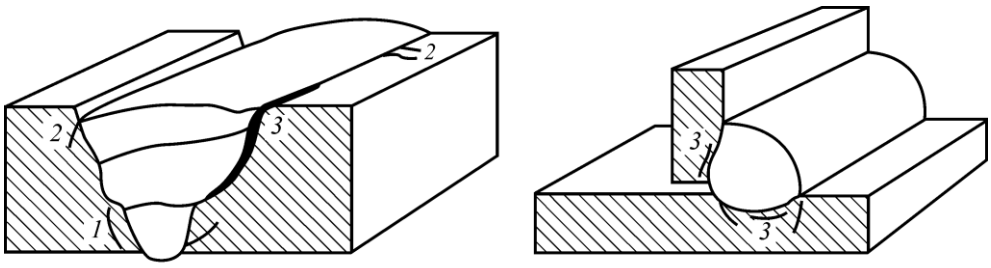


Рис. 3.12. Разновидность холодных трещин в зоне термического влияния:
I – стыковое соединение; *II* – угловое соединение; *1* – продольные трещины; *2* – поперечные трещины (частокол); *3* – отрыв

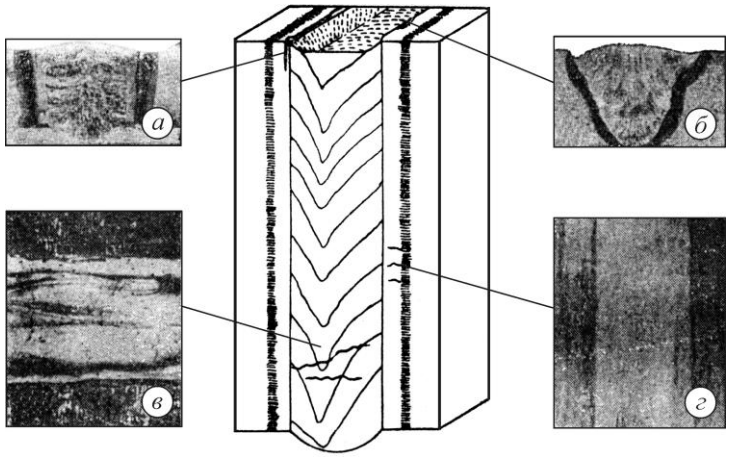


Рис. 3.13. Виды холодных трещин:
а – продольные околошовные трещины – отколы; *б* – продольные трещины в зоне сплавления – отрывы; *в* – поперечные трещины в металле шва; *г* – поперечные околошовные трещины

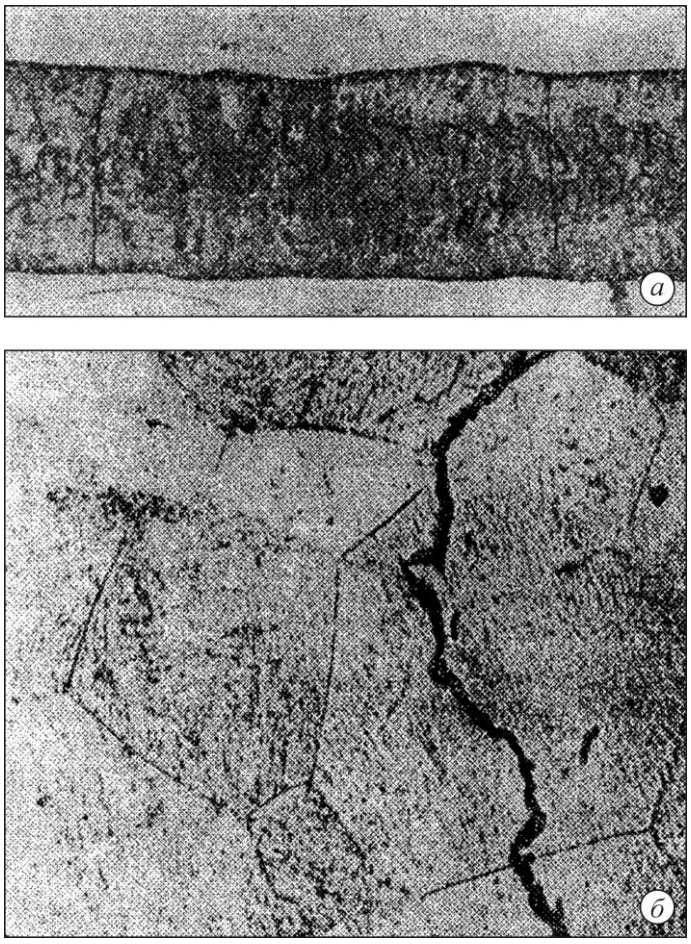


Рис. 3.14. Холодные трещины в сварном шве (титановый сплав):
а – поперечные трещины (внешний вид); *б* – микротрещина. ×500

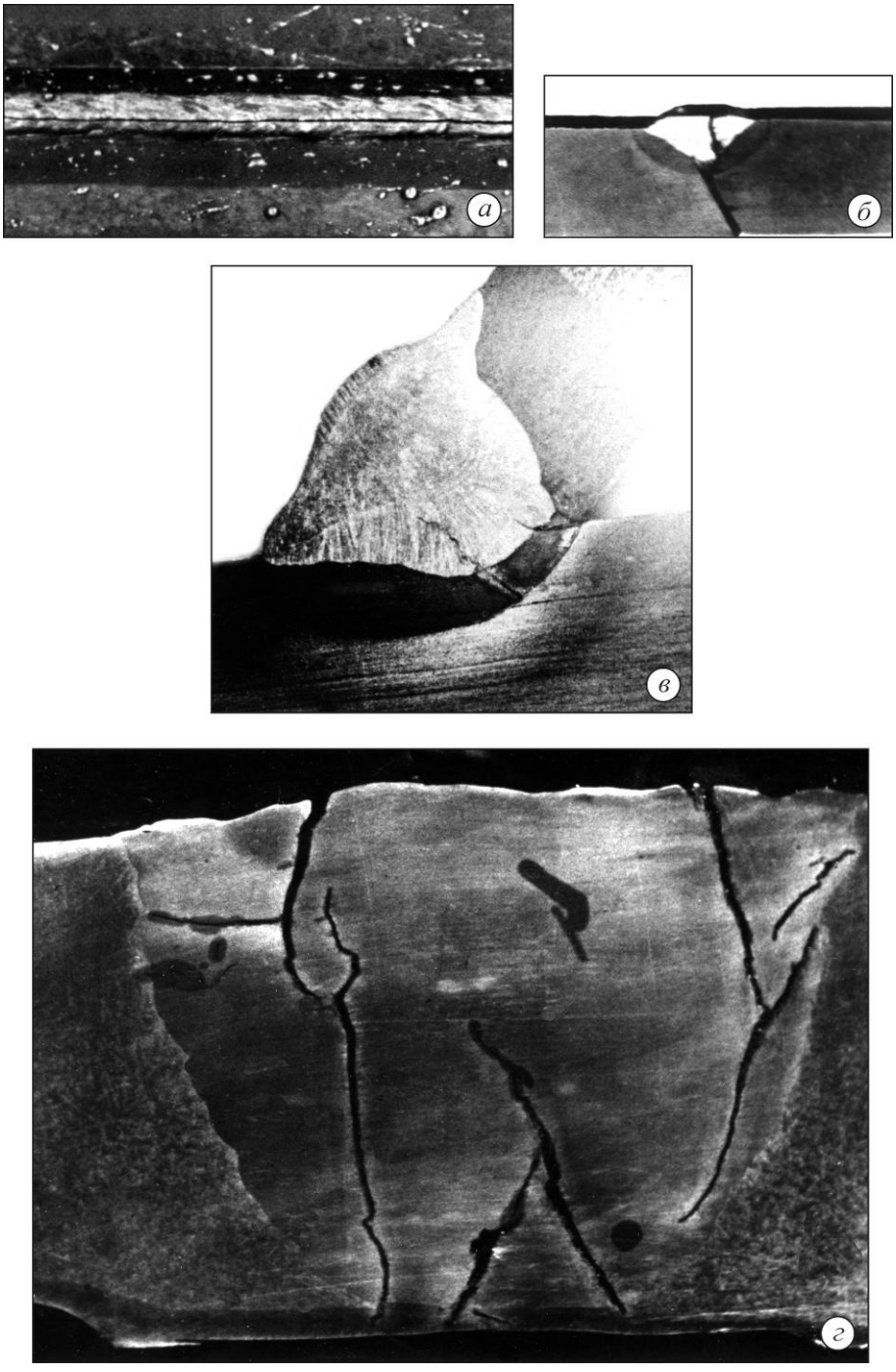


Рис. 3.15. Холодные трещины в металле шва:
а – продольная, выходящая наружу, внешний вид; *б* – продольная, выходящая наружу, макроструктура; *в* – отрыв и продольная внутренняя, макроструктура; *г* – продольные и поперечные, внутренние и выходящие наружу, темплет

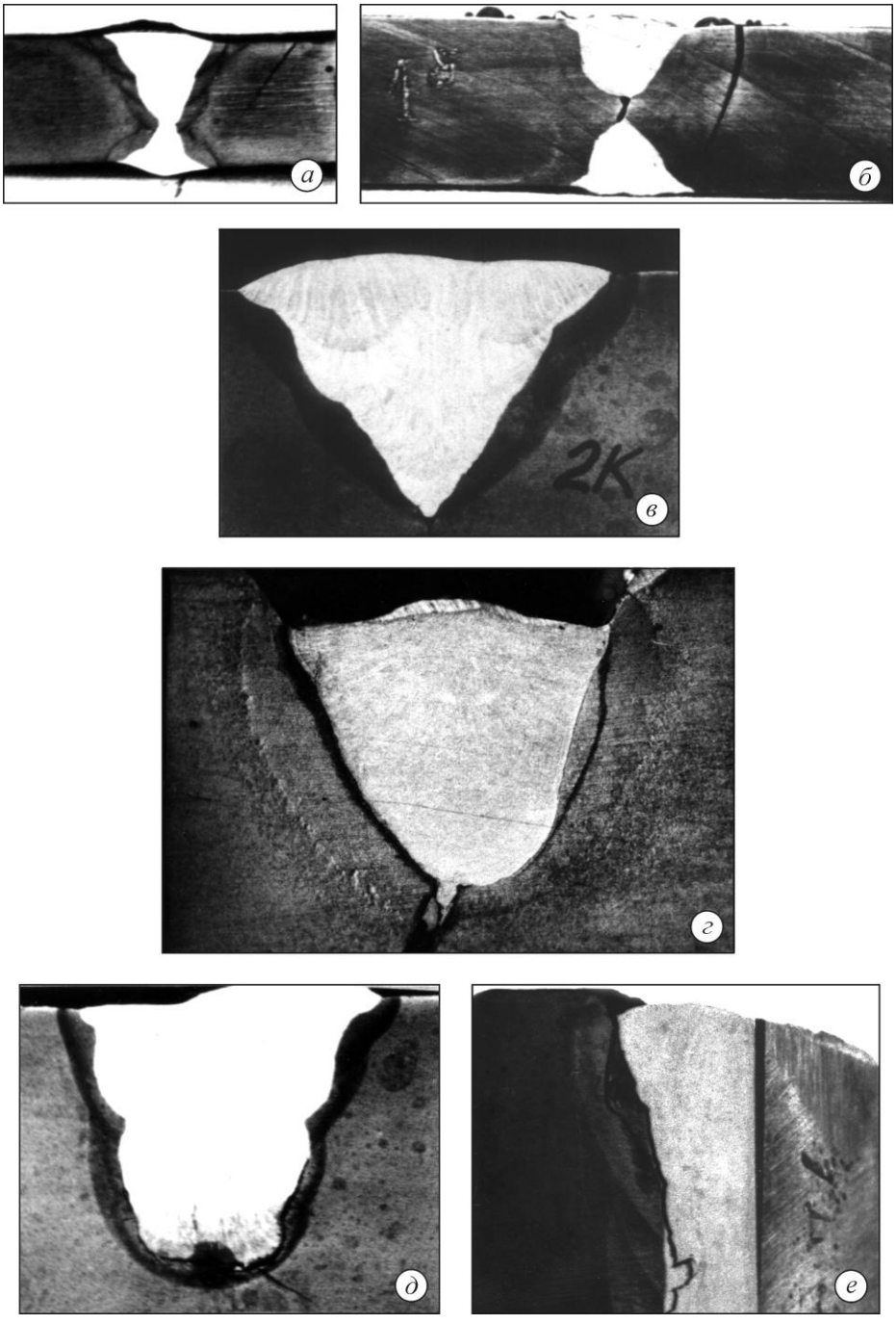


Рис. 3.16. Холодные трещины в зоне термического влияния (макроструктуры):
а, б – продольные, поверхностные, параллельные зоне сплавления, отколы; *в* – продольные, поверхностные и внутренние, идущие от зоны сплавления – отколы; *г* – продольные, внутренние корневые – отколы; *д* – продольные, внутренние подваликовые – отрывы; *е* – продольные, поверхностные и внутренние – отрывы

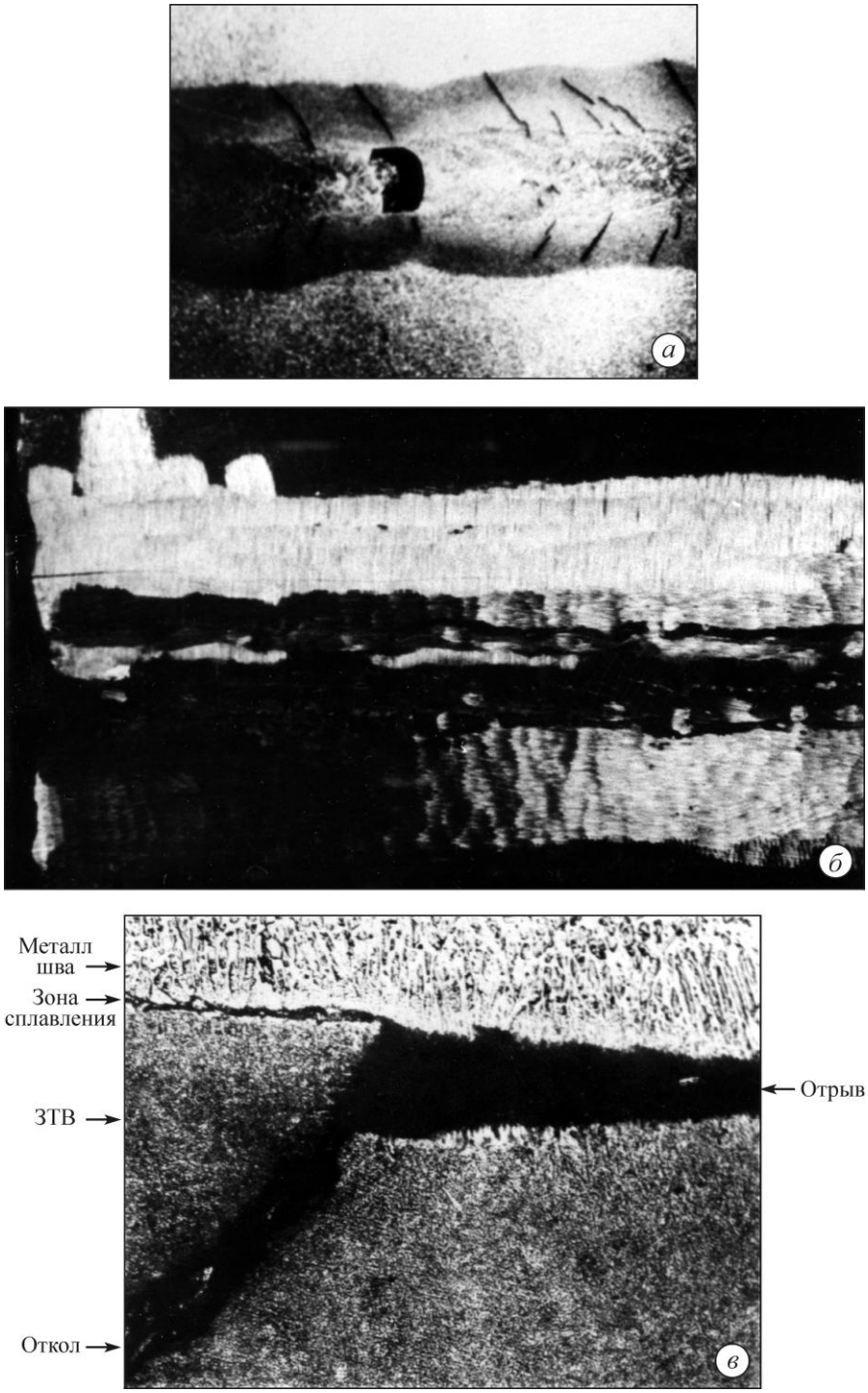


Рис. 3.17. Холодные трещины (макроструктуры):
а, б – в металле шва, внешний вид; *в* – откол, отрыв

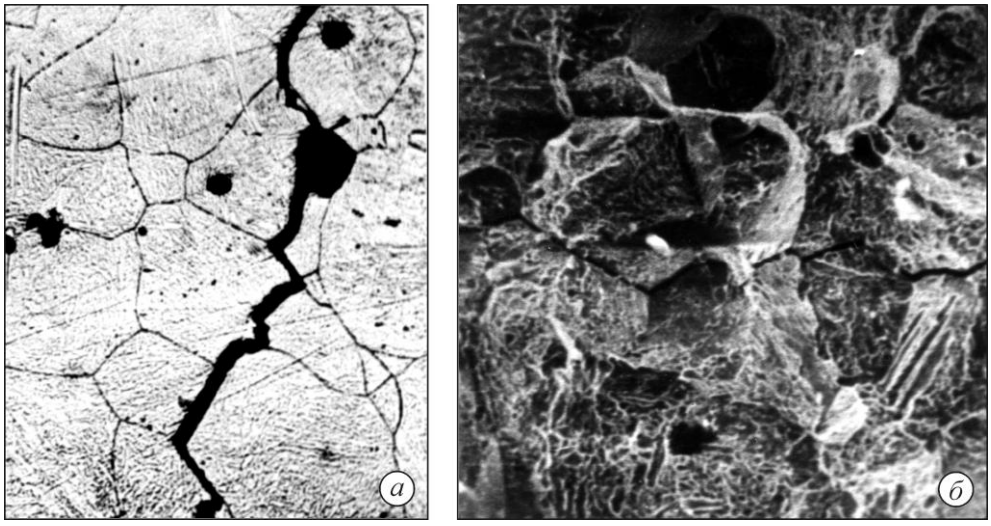


Рис. 3.18. Холодные микротрещины в металле шва:
а – сталь (микроструктура), ×200; *б* – поверхность излома (сталь), РЭМ, ×1000

По природе возникновения холодные трещины делятся на отколы, отрывы и слоистое (ламелярное) 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 зависят 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, обусловливающие образование холодных трещин, следующие:

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 1 рода;

для низко- и среднелегированных сталей – отколы или подвалковые 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 феррито-перлитных сталей – слоистое растрескивание (ламелярные холодные трещины), представляющее собой скопление неметаллических включений в областях полосчатой микроструктуры;

для легированных бейнитных сталей – 1) продольные холодные трещины (отколы) в однослойных и в 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-стареющих 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;

при сварке *титановых сплавов*:

склонность к замедленному разрушению вследствие повышенного содержания водорода в сочетании с растягивающими напряжениями 1 рода (гидридное превращение и десорбционный эффект снижения прочности);

увеличенное содержание кислорода и азота, снижающих пластичность металла;

высокий уровень остаточных сварочных напряжений и напряжений от внешней нагрузки;

при сварке *медных и никелевых сплавов*:

увеличенное содержание примесей – газов (водорода, азота, кислорода);

высокий уровень растягивающих сварочных напряжений и напряжений от внешней нагрузки.

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 и др.

Кроме того, в случае необходимости осуществляют:

при сварке *сталей*:

дополнительное легирование сварных швов в сталях карбидообразующими элементами: титаном, церием, ниобием, ванадием для торможения процессов рекристаллизации;

сварку трудносвариваемых сталей аустенитными сварочными материалами;

сварку с предварительной наплавкой кромок аустенитным или ферритным материалом, не закаливающимся при сварке шва;

выбор марки стали для сварных конструкций, обладающей требуемыми свойствами при возможно более низком содержании углерода и легирующих элементов, повышающих восприимчивость стали к закалке (соответственно ограничивают содержание этих элементов в металле шва);

при сварке *титановых сплавов*:

сварку альфа и псевдоальфа сплавов на жестких режимах, а альфа + бета сплавов – на относительно мягких режимах (скорость охлаждения 10–20 °С/с);

меры, предотвращающие наводороживание сварных соединений титановых сплавов при эксплуатации, в связи с их склонностью к замедленному разрушению;

при сварке *медных и никелевых сплавов*:

предварительный и сопутствующий подогрев при сварке;

отжиг сварных конструкций с целью снятия напряжений в строго регламентированное время.

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 (рис. 3.19) 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, люминесцентым 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:

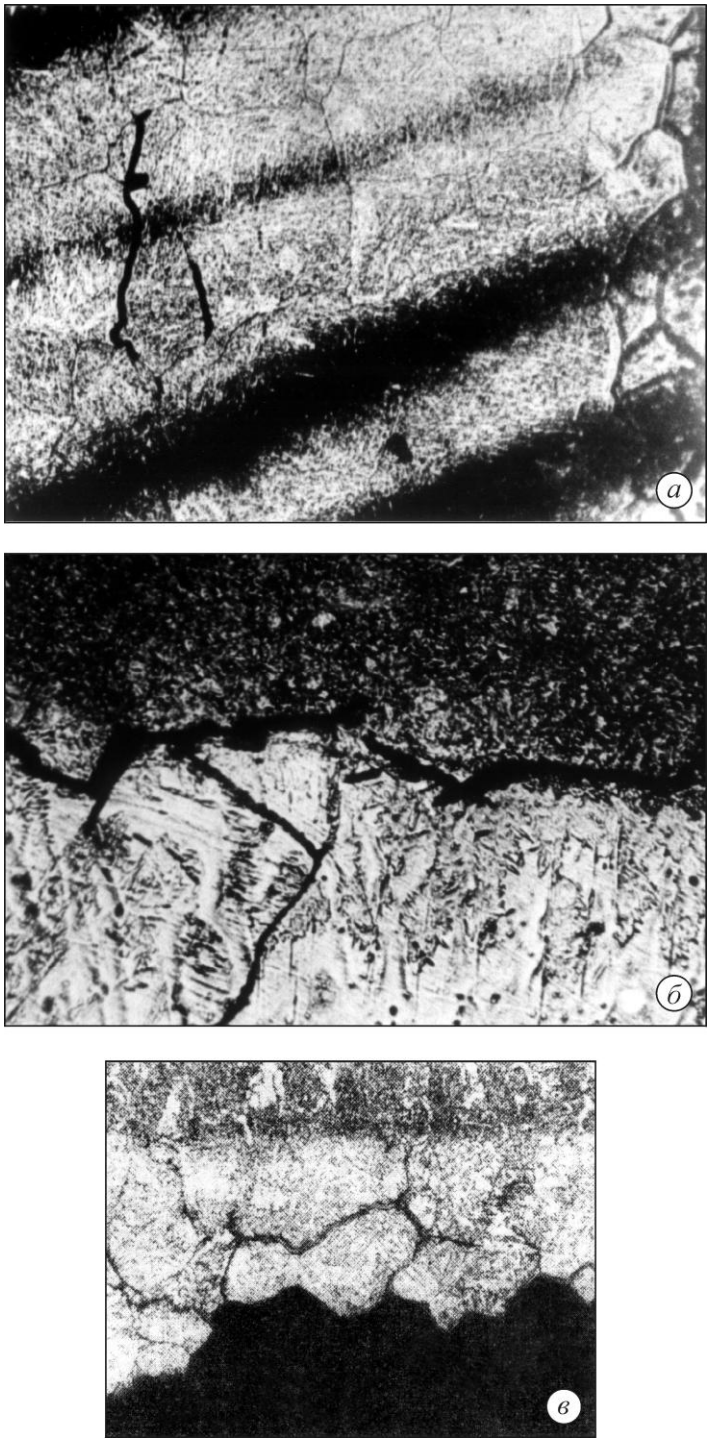


Рис. 3.19. Трещины повторного нагрева (микроструктуры):
а – в зоне термического влияния; *б* – в зоне сплавления; *в* – в околошовной зоне. ×100

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

Описание

Поры – несплошности в металле или в зоне взаимной кристаллизации (зоне сплавления) в сварном шве, заполненные газом и имеющие округлую, продолговатую или более сложные формы (рис. 3.20–3.25).

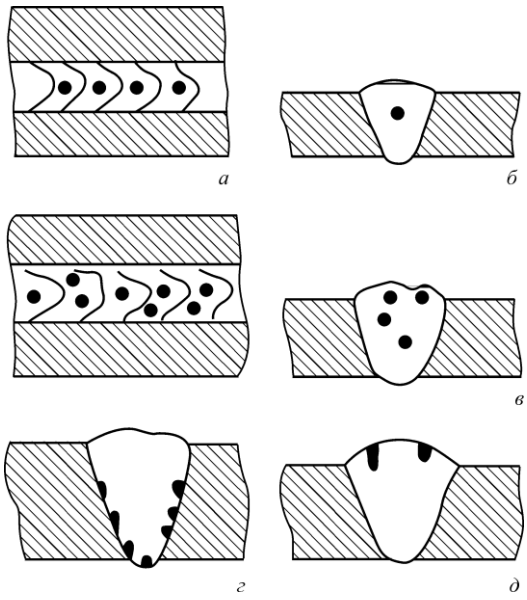


Рис. 3.20. Поры в сварном шве (схемы):
а – цепочка; *б* – единичные; *в*, *г* – скопления; *д* – свищи

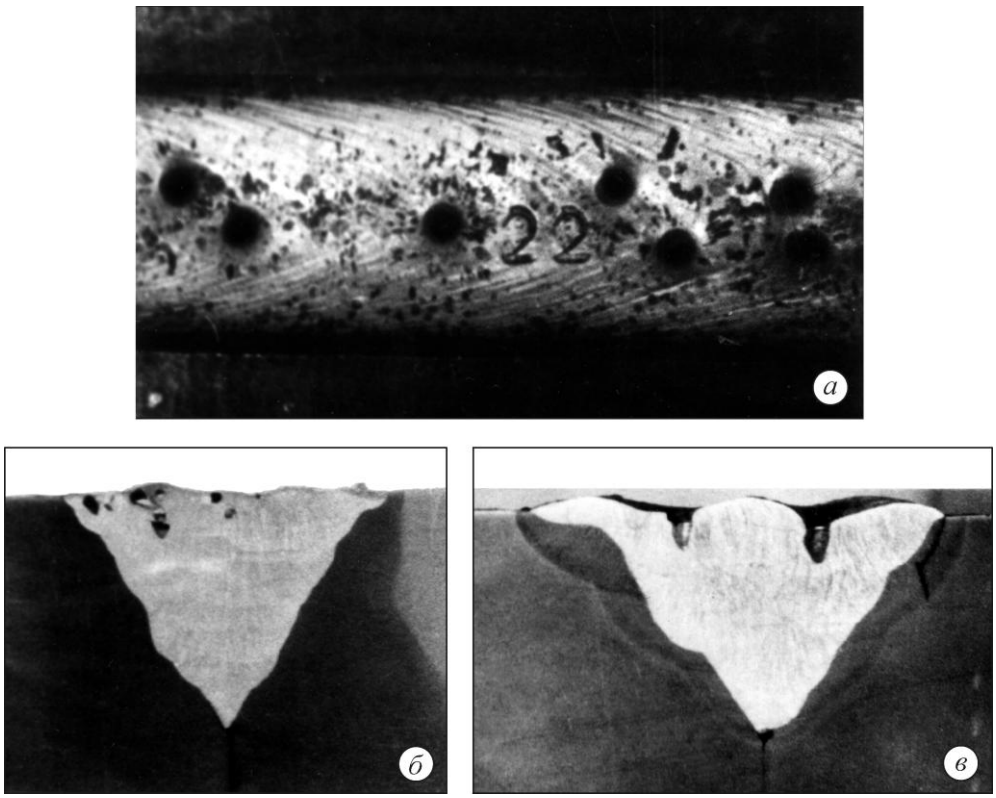


Рис. 3.21. Поры в сварном шве:
а – выходящие на поверхность (внешний вид); *б* – не выходящие на поверхность (макроструктура); *в* – свищи (макроструктура)

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 микроструктуры.

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);

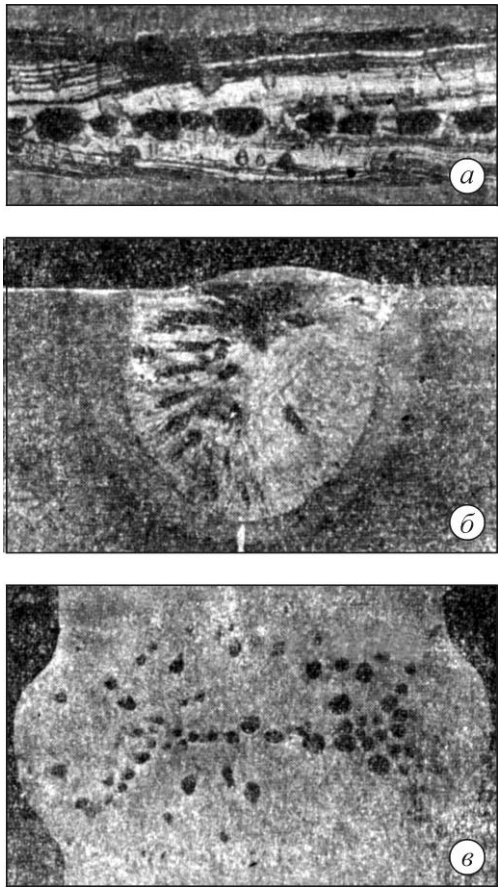


Рис. 3.22. Поры в металле шва (макроструктуры):
а – поры, выходящие на поверхность шва, внешний вид; *б* – поры, не выходящие на поверхность шва, макроструктура; *в* – групповое расположение пор при электрошлаковой сварке

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;

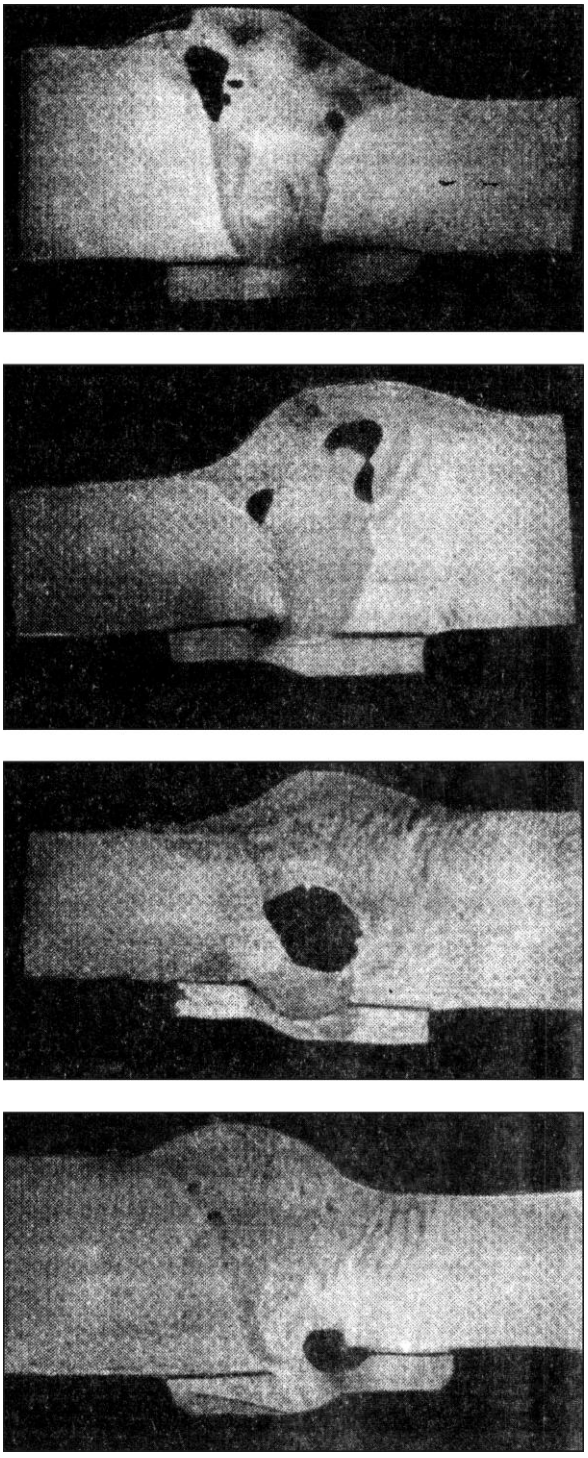


Рис. 3.23. Единичные поры в металле шва, макроструктура. ×100
(данные Ф.А. Хромченко)

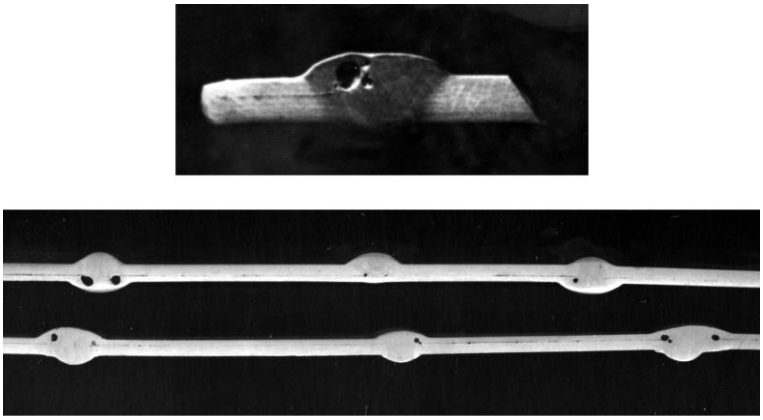


Рис. 3.24. Поры в металле шва, вызванные расслоениями в свариваемом металле (алюминиевый сплав, макроструктура)

зачистка кромок свариваемого металла и проволоки от частиц оксидной пленки для предотвращения ее попадания в зону сварки;

осушка защитных газов;

связывание водорода в газовой фазе в соединения, нерастворимые в жидком металле (HF, H_2O, –OH);

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.

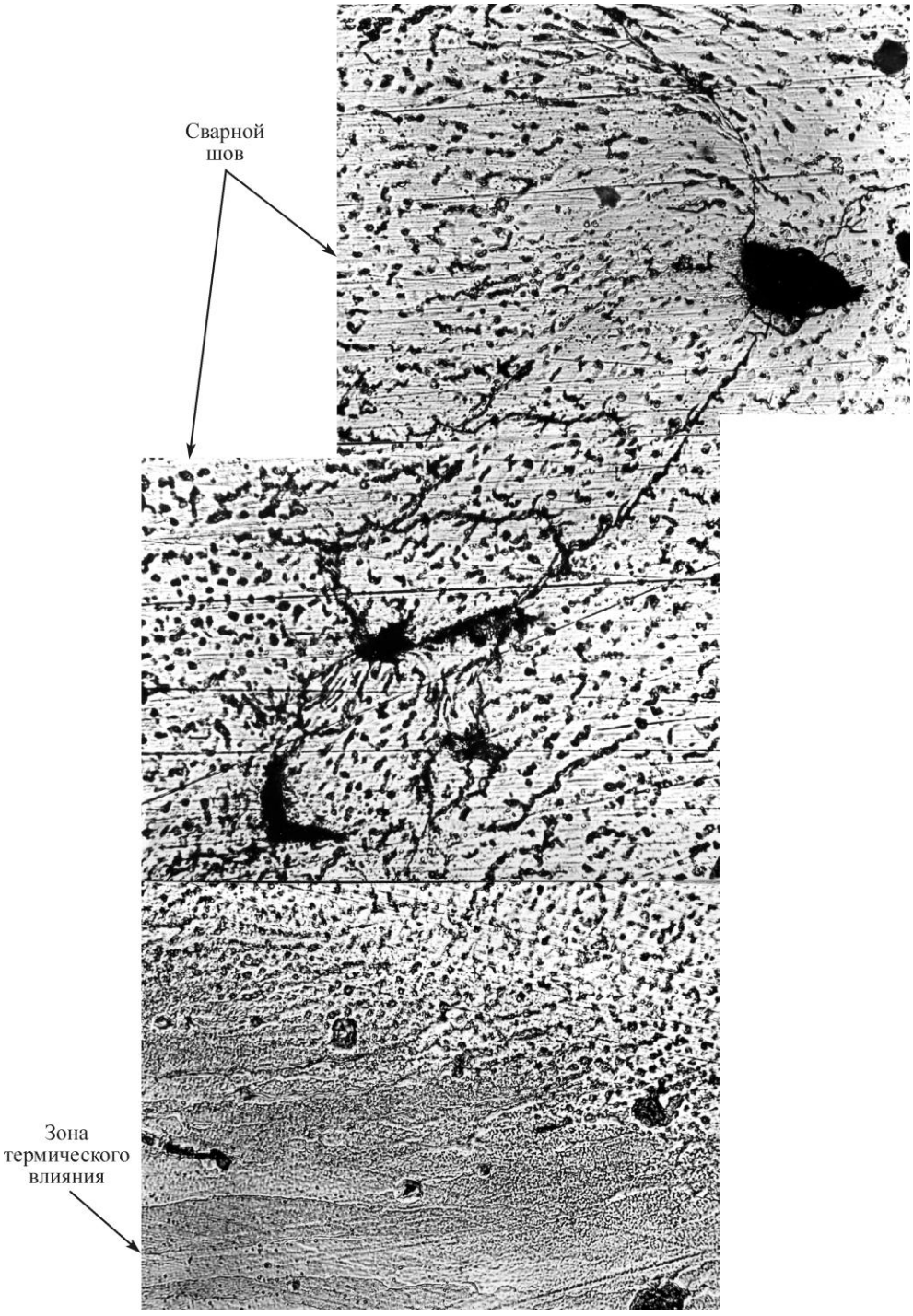


Рис. 3.25. Трещины в металле шва, инициированные порами (алюминиевый сплав, микроструктура). ×500

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. 3.26; 3.27).

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.

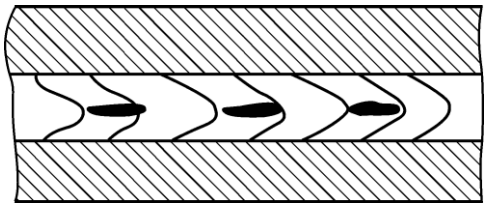


Рис. 3.26. Схематическое изображение усадочных раковин



Рис. 3.27. Усадочные раковины (сталь, внешний вид)

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.

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 ТУ, 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. 3.28–3.30). 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.

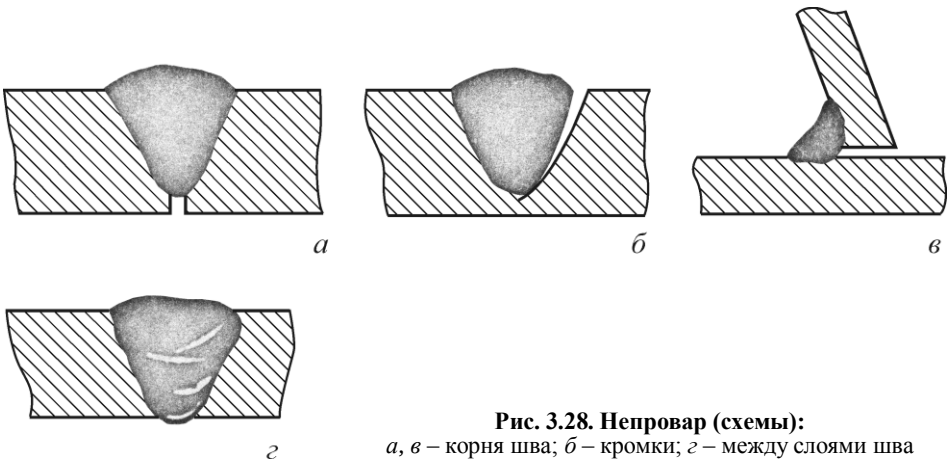


Рис. 3.28. Непровар (схемы):
а, в – корня шва; *б* – кромки; *г* – между слоями шва

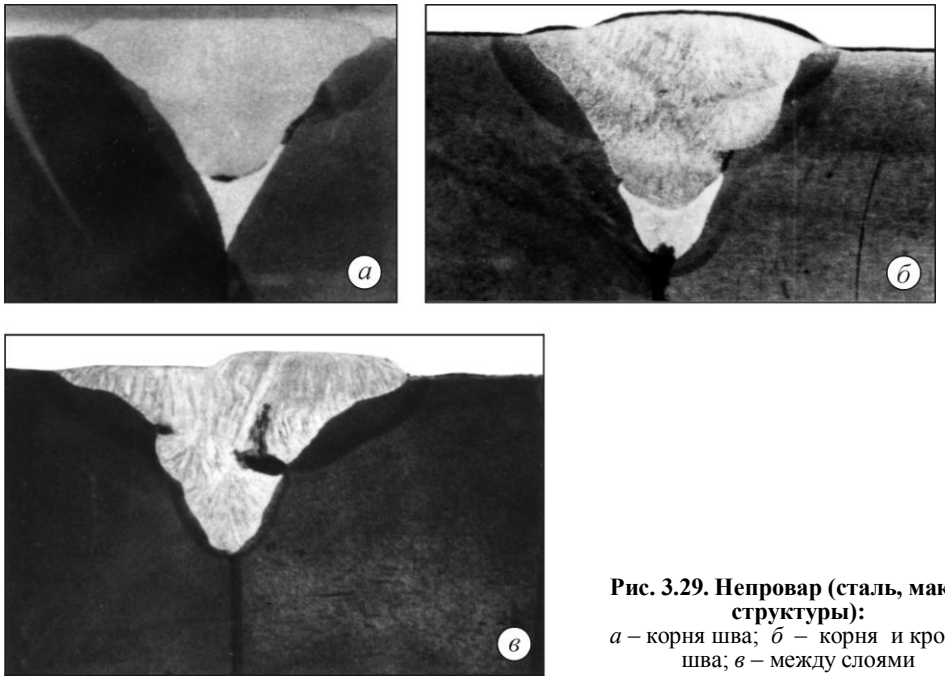


Рис. 3.29. Непровар (сталь, макроструктуры):
а – корня шва; *б* – корня и кромки шва; *в* – между слоями

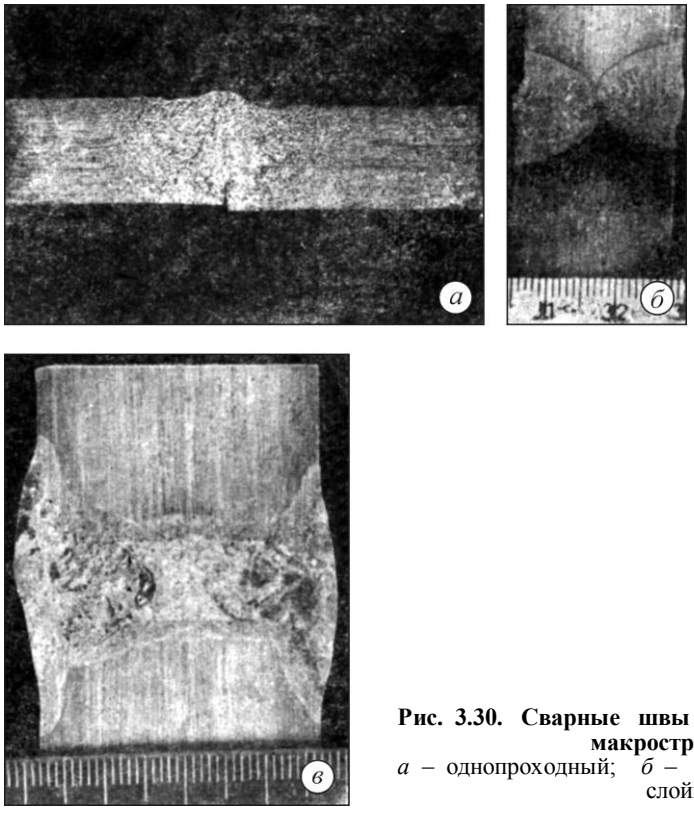


Рис. 3.30. Сварные швы с непроварами (сталь, макроструктуры):
а – однопроходный; *б* – двусторонний; *в* – многослойный

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.

Кроме того, непровары образуются:

вследствие неполного расплавления кромок или поверхности ранее выполненных валиков сварного шва;

по толщине основного металла вследствие неправильного выбора режима сварки или его нарушения, а также недостаточно точного направления конца электрода по отношению к месту сопряжения кромок;

из-за малого сварочного тока;

в начале и конце шва вследствие неустановившегося теплового процесса;

по длине шва вследствие неправильного возобновления процесса сварки после его перерыва (наличие зазора между окончанием предыдущего и началом последующего шва);

в корне шва вследствие нарушения режима сварки, обусловливающего изменения положения шва в разделке, наклона изделия, формы шва из-за уменьшения скорости сварки, недостаточно точного направления электрода, а также неправильной последовательности наложения валиков шва при многослойной сварке.

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 поперек разделки кромок.

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

Для правильного возобнавления 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 и др.), 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 ТУ.

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 (рис. 3.31).

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).

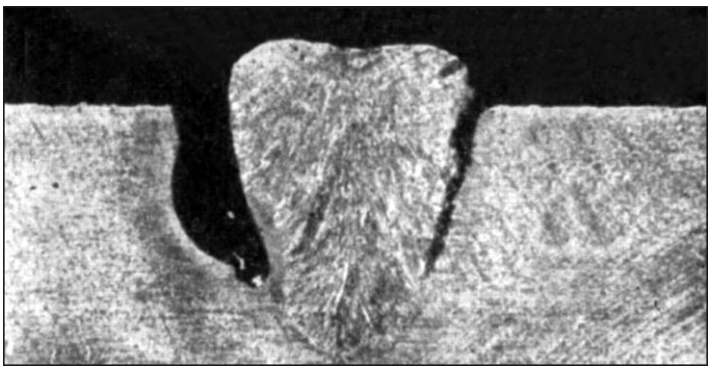


Рис. 3.31. Несплавление

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 сварке, 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. СЛИПАНИЕ

Слипание – основной дефект контактной стыковой сварки сопротивлением или оплавлением, трением, давлением, диффузионной и сварки взрывом.

Описание

Слипание – это вид контакта двух металлических поверхностей, при котором между свариваемыми элементами имеется механический контакт, но отсутствует переходной слой металла между соединяемыми поверхностями, имеющий кристаллическое строение.

Уверенно обнаружить слипание физическими методами неразрушающего контроля достаточно сложно. Необходимо применять методы разрушающего контроля – металлографические и фрактографические.

Причины возникновения

Слипание вызывается следующими причинами:

грубыми отклонениями от режимов сварки (недостаточная температура сварки и другие отклонения в технологическом процессе);

наличием загрязнений, оксидных пленок на свариваемых поверхностях.

Способы предупреждения

Для предупреждения образования слипания применяют так называемые параметрические методы контроля, при которых определяющие параметры процесса сварки, такие как ток, напряжение, давление, длительность, скорость осадки и др., поддерживаются в определенных, заранее установленных границах.

Дефект не исправляется!

Влияние на свойства

Слипание резко снижает прочностные и пластические свойства сварного соединения.

3.8. НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ВКЛЮЧЕНИЯ

Описание

Неметаллические включения – это частицы шлаковых, оксидных, нитридных, карбидных и других включений, находящихся в металле сварного шва (рис. 3.32–3.34).

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, называются 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;

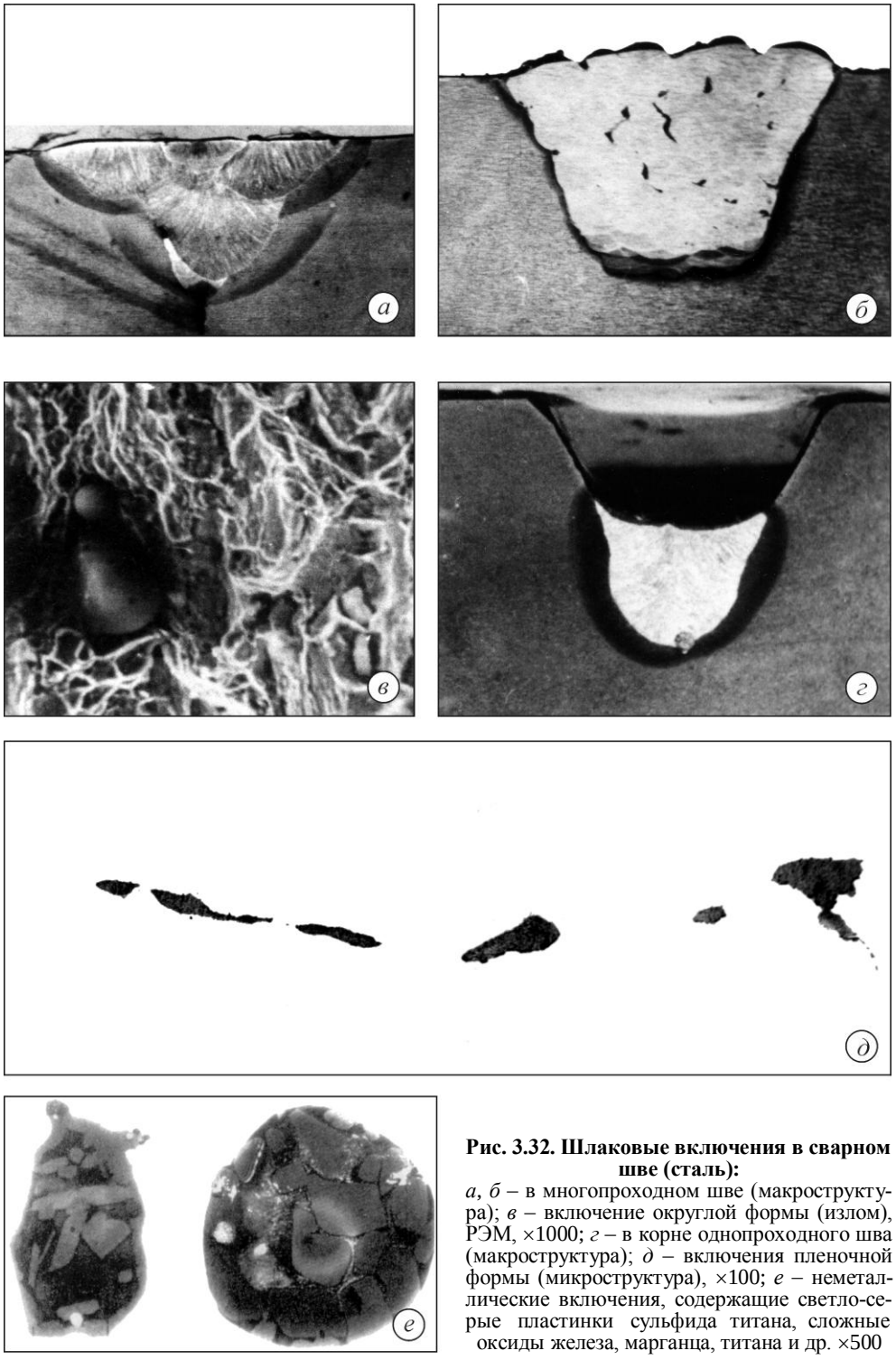


Рис. 3.32. Шлаковые включения в сварном шве (сталь):
а, б – в многопроходном шве (макроструктура); *в* – включение округлой формы (излом), РЭМ, ×1000; *г* – в корне однопроходного шва (макроструктура); *д* – включения пленочной формы (микроструктура), ×100; *е* – неметаллические включения, содержащие светло-серые пластинки сульфида титана, сложные оксиды железа, марганца, титана и др. ×500

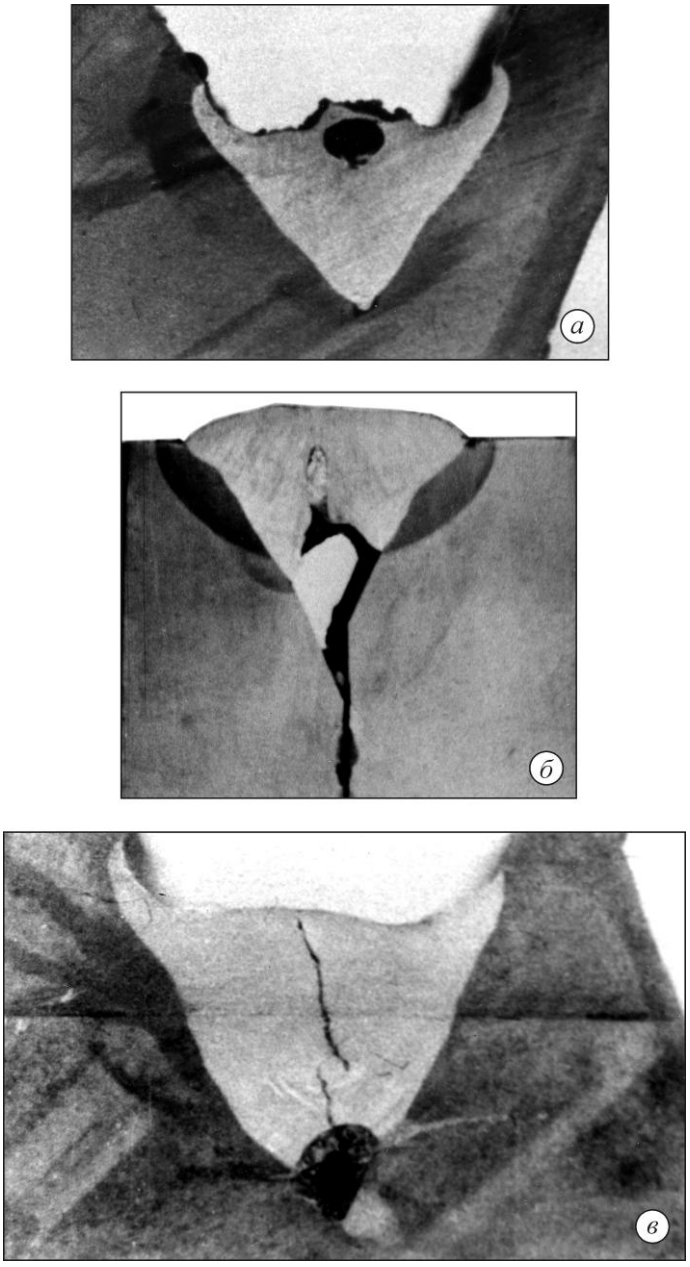


Рис. 3.33. Шлаковые каналы (макроструктуры):
а – в корне шва; *б* – вдоль поверхности шва; *в* – перпендикулярно поверхности шва

случайные (экзогенные) включения, возникшие в результате механического попадания частичек покрытия электродов, флюса или других материалов, соприкасающихся с жидким металлом шва, которые не успели всплыть на поверхность ванны.

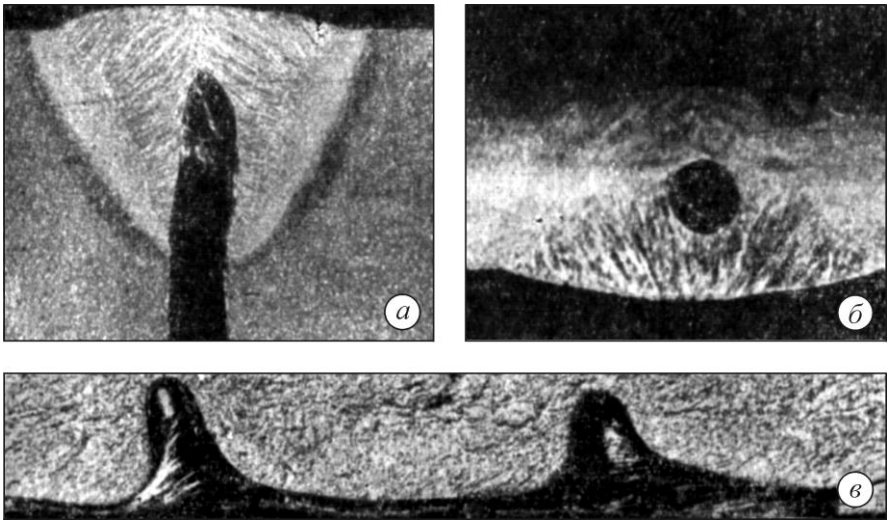


Рис. 3.34. Шлаковые каналы (сталь, макроструктуры):
а – после сварки с одной стороны (разрез поперек шва); *б* – после сварки со второй стороны (разрез поперек шва); *в* – после сварки с одной стороны (разрез вдоль шва)

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.

3.9. МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ВКЛЮЧЕНИЯ

Описание

Металлические включения – это частицы инородного металла, попавшие в металл сварного шва (рис. 3.35).

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

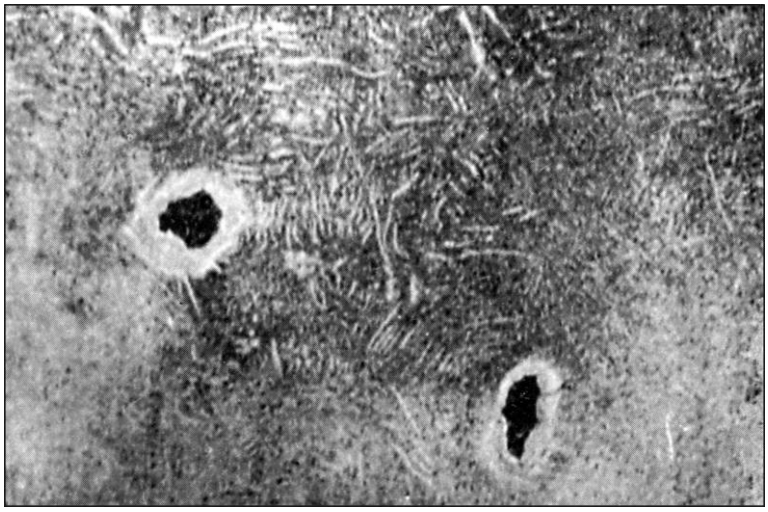


Рис. 3.35. Металлические включения: куски электрода в сварном шве (макроструктура)

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.

3.10. ФЛОКЕНЫ

Описание

Флокены – внутренние междендритные локальные участки в сварном шве с повышенным содержанием водорода, обусловливающие повышенную хрупкость разрушения в этих участках (рис. 3.36; 3.37).

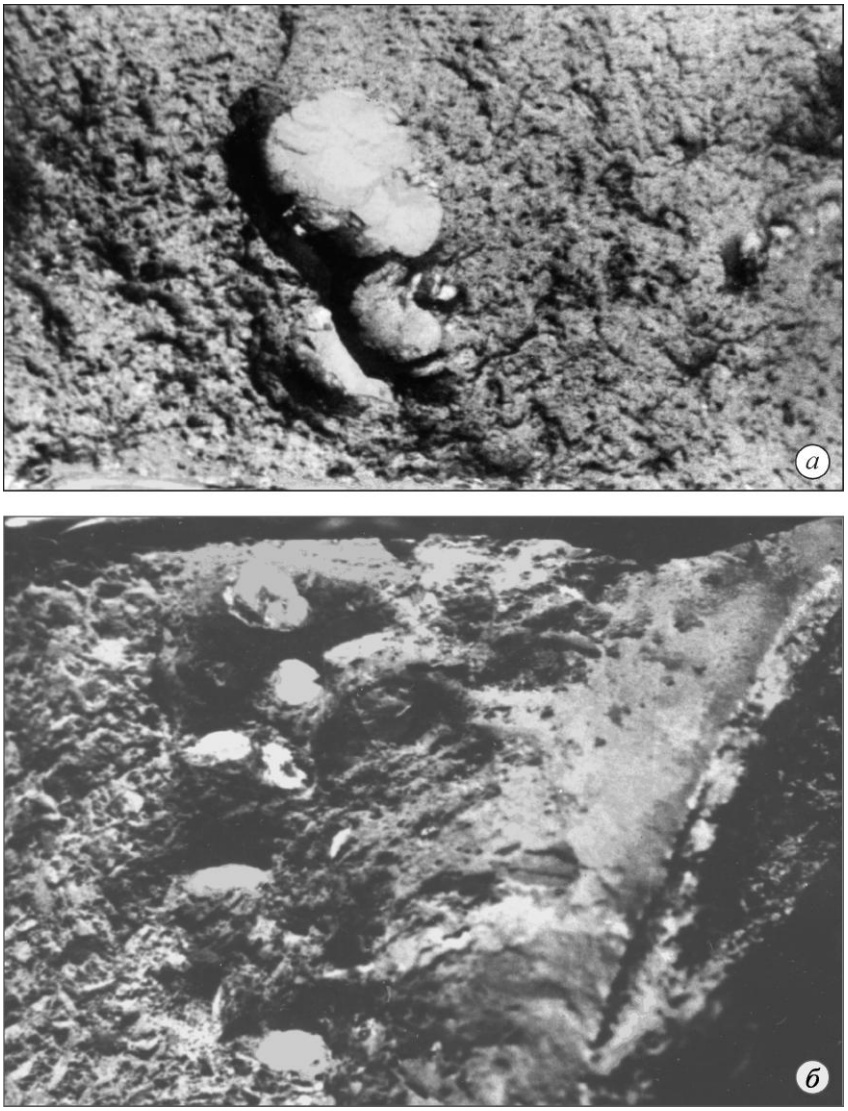


Рис. 3.36. Флокены (сталь):
а – единичный; *б* – скопление (изломы)

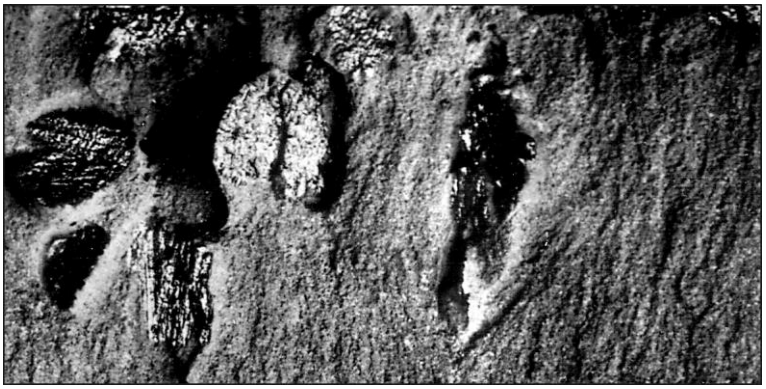


Рис. 3.37. Флокены с отпечатками дендритов в литой стали (излом)

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. Такой флокен называется «рыбий глаз».

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 типа «рыбий глаз».

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.

3.11. ПОДРЕЗ

Описание

Подрез – углубление по линии сплавления сварного шва с основным металлом (рис. 3.38; 3.39).

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.

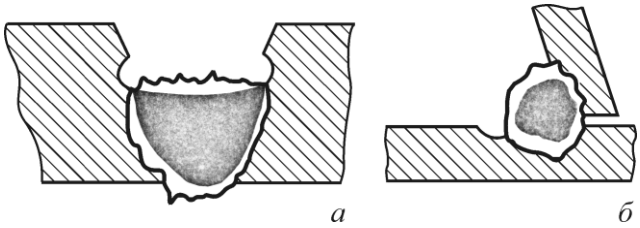


Рис. 3.38. Подрез зоны сплавления (схема):
а – стыковое соединение; *б* – угловое соединение

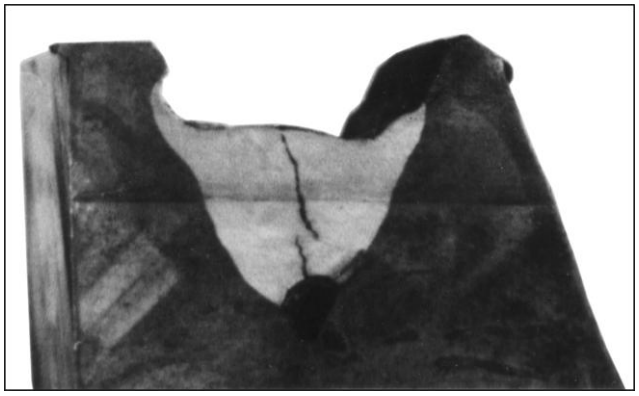


Рис. 3.39. Поперечное сечение шва с подрезом и продольной трещиной (сталь, макроструктура)

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 (для сталей) 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 документаций, 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 разделать 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.

3.12. НАПЛЫВ

Описание

Наплыв – металл шва, натекший на поверхность основного металла или ранее выполненного валика без сплавления с ним (рис. 3.40; 3.41).

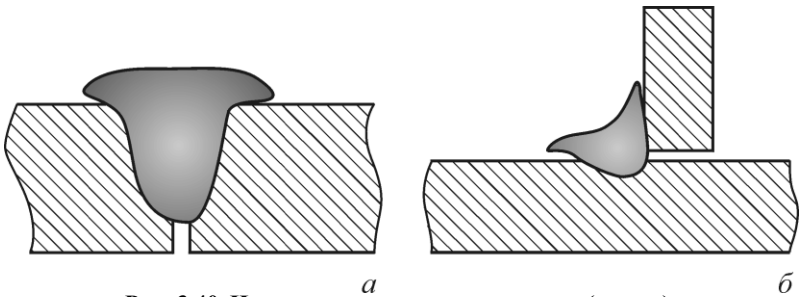


Рис. 3.40. Наплыв на сварном соединении (схемы):
а – стыковом; *б* – угловом

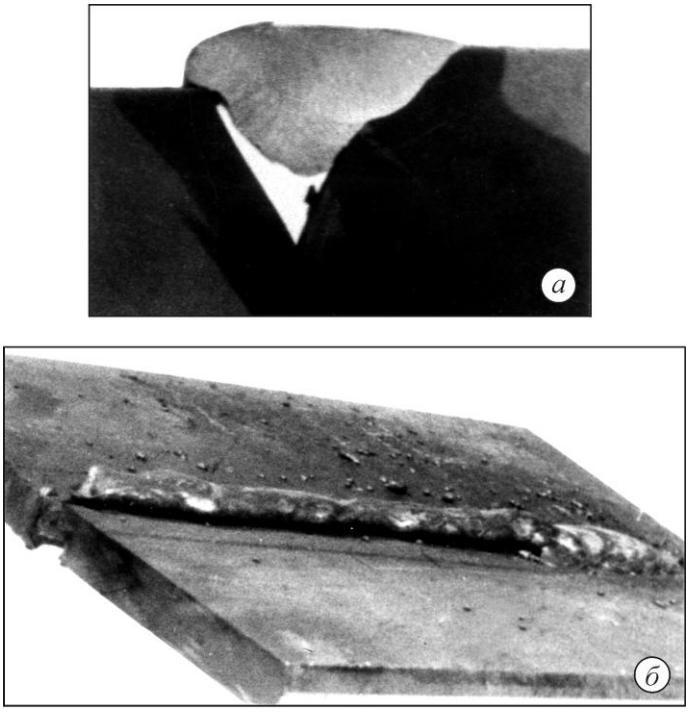


Рис. 3.41. Наплыв на сварном соединении:
а – при сварке угловых швов (макроструктура); *б* – при наплавке (внешний вид)

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.

3.13. ПРОЖОГ

Описание

Прожог – сквозное отверстие в сварном шве, образовавшееся в результате вытекания части металла сварочной ванны (рис. 3.42).

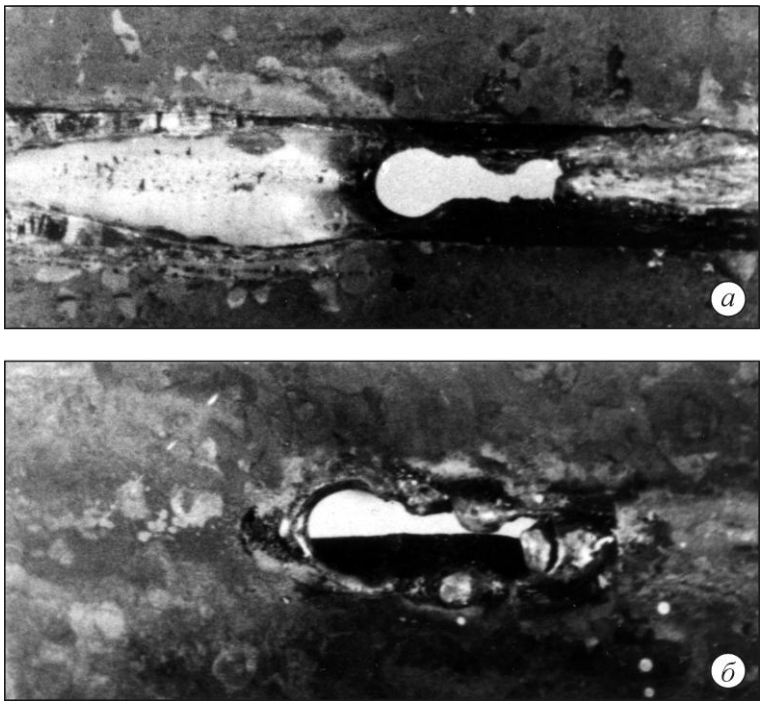


Рис. 3.42. Прожог сварного шва (сталь, внешний вид):
а – лицевая сторона; *б* – тыльная сторона

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.

3.14. КРАТЕР

Описание

Кратер – углубление в конце сварного шва, образующееся после обрыва дуги (рис. 3.43; 3.44). Углубление имеет неправильную воронкообразную форму и вытянуто вдоль оси шва. Стенки кратера имеют оплавленную поверхность.



Рис. 3.43. Схематическое изображение кратера

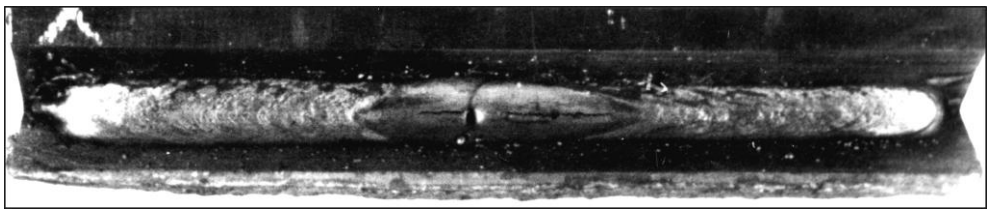


Рис. 3.44. Кратерная трещина в сварном шве (внешний вид)

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.

3.15. ПЕРЕГРЕВ МЕТАЛЛА

Описание

Перегрев металла – зоны повышенной хрупкости в металле шва или в зоне термического влияния, подвергшиеся перегреву в процессе сварки (рис. 3.45–3.47).

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, образовавшихся 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

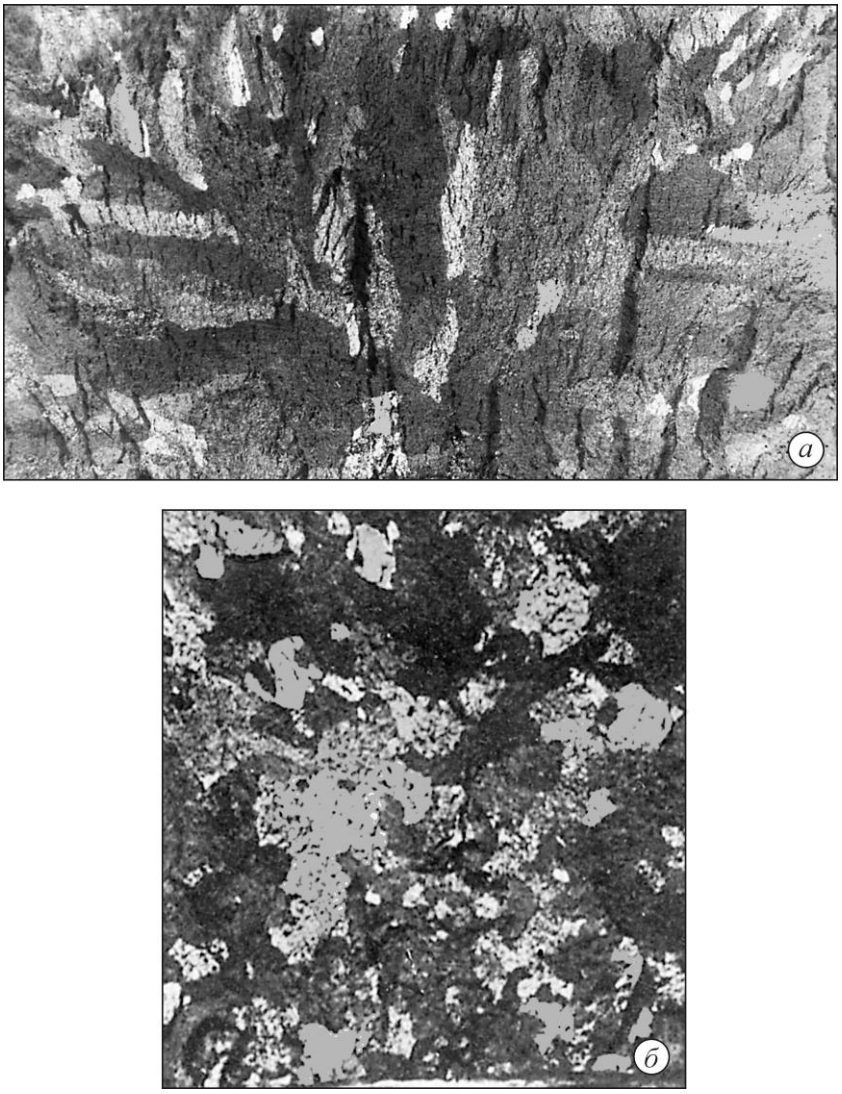


Рис. 3.45. Нафталинистый излом:
а – литая сталь, по всему сечению отливки; *б* – катаная сталь, грубые равноосные кристаллы

по мелким зернам α-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 γ-фазе нитридов, сульфидов, фосфидов, карбидов, а также некоторых легирующих элементов.

Причины образования нафталинистого и камневидного изломов более подробно описаны в главе 4.



Рис. 3.46. Камневидный излом по всему сечению отливки (сталь)

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.

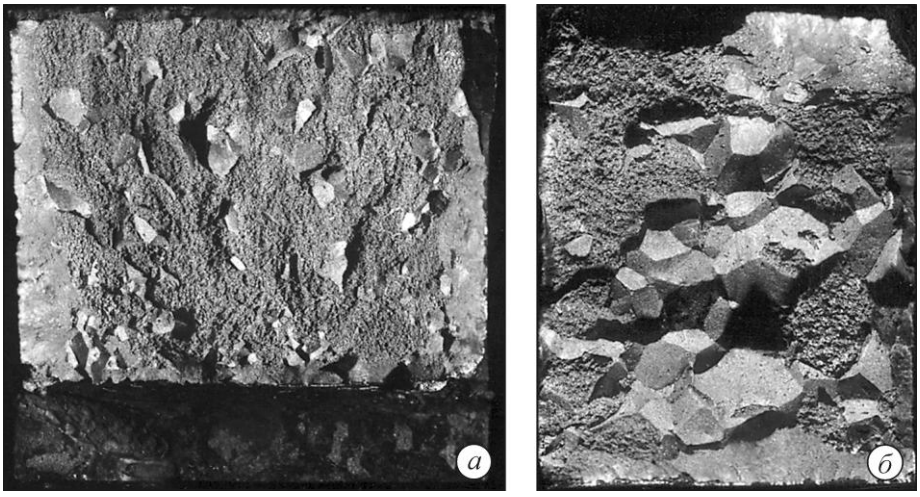


Рис. 3.47. Камневидный излом: по всему сечению проката мелкие камневидные зерна (*а*) и крупные камневидные зерна (*б*)

Глава 4
ОСНОВНЫЕ ДЕФЕКТЫ В СВАРИВАЕМОМ МЕТАЛЛЕ, ВЛИЯЮЩИЕ НА КАЧЕСТВО СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

4.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Одним из факторов, определяющих работоспособность сварного соединения, является высокое качество свариваемого металла и отсутствие в нем дефектов, способных привести сварное соединение к преждевременному разрушению при напряжениях ниже расчетных.

Дефекты, ухудшающие свойства свариваемого металла, могут образовываться в нем в процессе металлургического производства (выплавка, горячая и холодная деформация, термическая обработка) либо при термическом воздействии, обусловленном нагревом металла в процессе сварки.

При выяснении причин преждевременного разрушения сварных конструкций важно установить причины выхода их из строя, в том числе природу разрушения металла.

В данной главе рассмотрены основные характерные дефекты, встречающиеся в литых и деформированных конструкционных материалах, влияющие на качество сварных соединений, прежде всего, в конструкционных сталях, алюминиевых и никелевых сплавах. К таким дефектам относятся: газовая раковина, газовая пористость, газовые пузыри, усадочная раковина, усадочная рыхлость, неметаллические включения, точечная неоднородность, интерметаллические включения, инородные металлические включения, трещины (горячие, холодные), волосовины, скворечники, надрывы, расслоения, закаты, флокены, плены, наслоения, крупнокристаллическая (разнозернистая) структура, перегрев, пережог.

Обсуждены виды дефектов, причины их образования, способы предупреждения и устранения, влияние на свойства.

Приведенные иллюстрации дефектов и их характеристики позволяют быстро и надежно визуально идентифицировать вид дефекта, устанавливать причины появления брака и оперативно принимать меры по его устранению.

4.2. ГАЗОВАЯ РАКОВИНА

Описание

Газовая раковина – полость, имеющая округлую или вытянутую форму со сглаженной поверхностью, расположенная в теле слитка или отливки (закрытая раковина) или выходящая на поверхность (открытая раковина) (рис. 4.1). Открытая газовая раковина имеет темную окисленную поверхность, закрытая – может иметь как темную окисленную, так и светлую неокисленную поверхность. Газы,

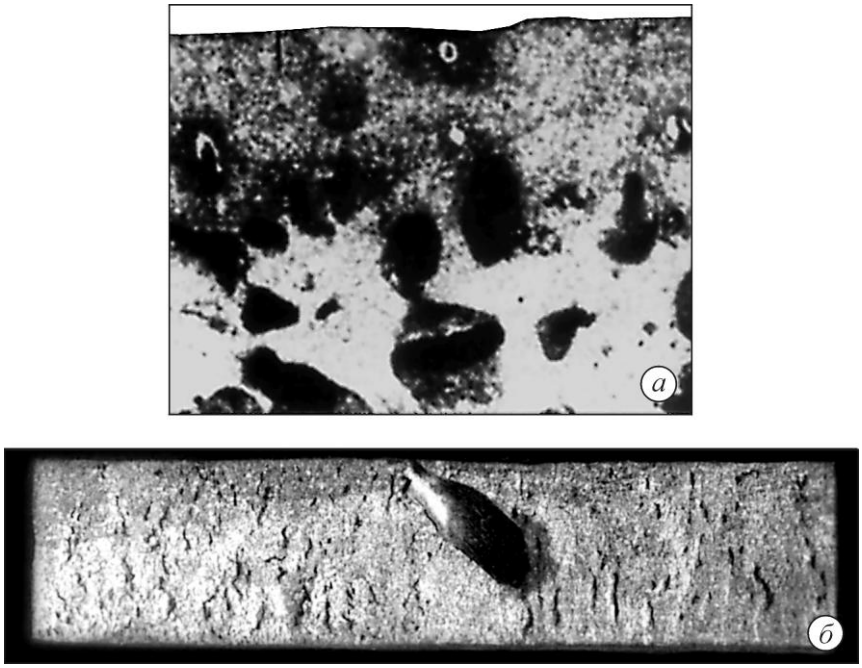


Рис. 4.1. Газовые раковины:
а – литая сталь, темплет; *б* – литой алюминиевый сплав, излом

выделяющиеся из металла при его затвердевании, образуют открытую или закрытую газовые раковины. Газы, внедрившиеся в металл извне, – открытую газовую раковину. В отливках газовая раковина преимущественно образуется в массивных частях.

Дефект выявляется визуально на изломах или макротемплетах и методами просвечивания.

Причины образования

Газовые раковины образуются вследствие:
повышенного содержания газов в металле за счет:
влажных шихтовых материалов;
повышенной влажности дутья и топлива;
нарушения режимов кипения и рафинирования расплава;
недостаточного раскисления стали;
отсутствия защиты металла при выпуске и разливке;
в слитках и отливках – реакций газообразования при затвердевании металла.

Способы предупреждения

Предупреждению образования газовых раковин в слитках и отливках способствуют следующие меры, уменьшающие газонасыщенность жидкого металла:

просушка и прокаливание шихтовых материалов, модификаторов, раскислителей, изложницы, формы, ковша;

применение сухого дутья и обезвоженного топлива;

раскисление и модифицирование металла в зависимости от способа выплавки и химического состава;

соблюдение температурно-временных параметров выплавки и разливки расплава, зависящих от химического состава металла, методов выплавки и разливки;

рациональный выбор параметров и конструкции прибылей и литниково-питательных систем, в том числе:

подбор геометрических и теплофизических параметров прибыли;

подбор геометрических параметров литниковых систем при сифонной разливке слитков;

выбор режима наполнения металлом тела прибыли слитка (отливки) в заданном гидравлическом режиме, характеризующемся временем заполнения различных частей слитка (отливки) и температурой жидкого металла;

тщательная подготовка и сушка форм, изложниц, прибылей и литниковых систем (обмазка, просушка, чистка и т. д.)

Способы устранения

Закрытые газовые раковины с неокисленной поверхностью стенок могут завариваться при горячей деформации слитка. Закрытые газовые раковины в отливках (слитках) не устраняются. Открытые газовые раковины, а также газовые раковины, вскрытые в результате обрезки прибылей или зачистки поверхности слитка, устраняются заваркой.

Влияние на свойства

В слитках закрытые газовые раковины с окисленной поверхностью стенок могут быть причиной образования расслоений в деформированном металле и снижать механические свойства. Закрытые газовые раковины в отливках могут приводить к образованию трещин различного типа и к снижению эксплуатационных свойств изделий.

4.3. ГАЗОВАЯ ПОРИСТОСТЬ

Зональная и общая пористость

Описание

Газовая пористость – несплошности округлой (размером от десятых долей миллиметра до нескольких миллиметров) или неправильной формы, располагающиеся в отдельных участках (зональная пористость) или по всему объему (общая пористость) слитка или отливки (рис. 4.2).

Дефект выявляется на макрошлифах в виде участков с повышенной травимостью и идентифицируется на микрошлифах по расположению его в структуре металла.

Причины образования

Газовая пористость образуется вследствие:

недостаточной защиты струи расплава от насыщения газами при заливке в изложницу или форму;

повышенного содержания газов в расплаве (газовая пористость), приводящего к выделению их в закристаллизовавшемся металле в виде пор;



Рис. 4.2. Газовая пористость, сечение отливки; алюминиевый сплав, микроструктура. × 100

некачественной смазки изложницы или формы;
некачественных противопригарных покрытий;
пониженной газопроницаемости формовочной смеси и стержней.

Способы предотвращения

К мерам предупреждения газовой пористости относятся:
высушивание (контроль влажности) шихтовых материалов;
тщательное рафинирование и модифицирование расплава;
соблюдение температурно-временных параметров заполнения расплавом изложницы или формы, снижение температуры металла в печи до возможного минимума;
вакуумная обработка расплава;
обеспечение оптимальных условий кристаллизации металла и теплового режима прибылей;
повышение газопроницаемости форм и стержней;
снижение содержания водорода в расплаве за счет продувки расплава нейтральным газом при переливе (для алюминиевых сплавов).

Способы устранения

Дефект не устраняется.

Повышенная пористость слитка может вызывать появление несплошности в металле на дальнейших переделах. При высоких степенях деформации металла (прокатка, прессование) пористость может частично или полностью завариваться. В штамповках и поковках пористость чаще всего сохраняется, образуя расслоения; в этом случае в зонах металла с указанными дефектами наблюдается снижение механических свойств.

Влияние на свойства

Газовая пористость снижает прочностные и пластические свойства металла. Допустимость газовой пористости в отливках определяется техническими условиями в зависимости от назначения отливок.

Осевая пористость

Описание

Осевая пористость – скопление мелких газовых пузырей (полостей) и ликватов в осевой части слитка (рис. 4.3). Дефект характерен для литых сталей, может

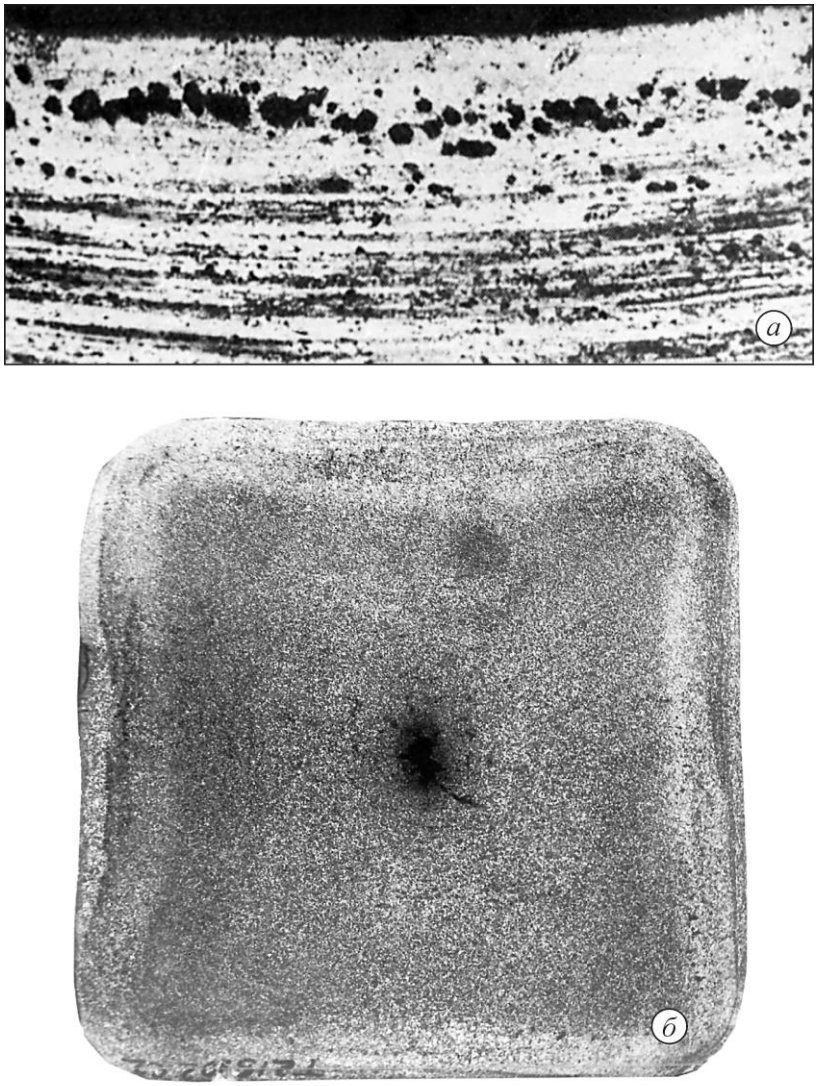


Рис. 4.3. Пористость:
а – подкорковая, профиль; алюминиевый сплав, микроструктура, × 100; *б* – внутренняя, в центральной зоне стальной отливки, темплет

сопровождаться осевой ликвацией и осевыми трещинами. Внутренняя осевая пористость может быть сплошной или прерывистой вдоль осевой части слитка. Дефект выявляется на макрошлифах и методами просвечивания.

Причины образования

Осевая пористость образуется вследствие:
отклонения технологии выплавки и разливки стали от заданной;
нарушения режимов охлаждения и вторичного охлаждения;
отсутствия защиты струи и зеркала металла при разливке жидкой стали.

Способы предупреждения

Для предупреждения возникновения осевой пористости необходимы:
уточнение технологии рафинирования, раскисления и модифицирования жидкой стали;
проверка всего процесса подготовки, смазки и сборки кристаллизатора, промежуточной емкости и тянущей клети;
обеспечение защиты струи и зеркала металла при разливке жидкой стали;
уточнение температурно-временных параметров разливки стали, а также режимов охлаждения кристаллизатора и вторичного охлаждения слитка при вытягивании из кристаллизатора;
уточнение скорости качания кристаллизатора и скорости вытягивания слитка из кристаллизатора.

Дефект не исправляется!

Влияние на свойства

Слиток бракуется и используется в виде повторной шихты.

4.4. ГАЗОВЫЕ ПУЗЫРИ (ПУЗЫРЬКИ)

Внутренние газовые пузыри в литом металле

Описание

Внутренние газовые пузыри в литом металле – не связанные с поверхностью газовые полости округлой или вытянутой «канальчатой» формы, располагающиеся в виде отдельных образований, строчек, скоплений отдельных пузырей, соединенных между собой каналами во внутренних объемах слитка или отливки (рис. 4.4, *а*). Внутренние пузыри, расположенные в виде скоплений, называют обычно сотовыми пузырями. Пузыри имеют гладкую поверхность (в отличие от усадочной рыхлости, на поверхности которой наблюдается дендритная структура). Иногда вокруг крупных пузырей располагаются мелкие. Размер пузырей колеблется от долей до нескольких миллиметров.

Газовые пузыри выявляются на макрошлифах и в изломах. Крупные скопления выявляются методами просвечивания.

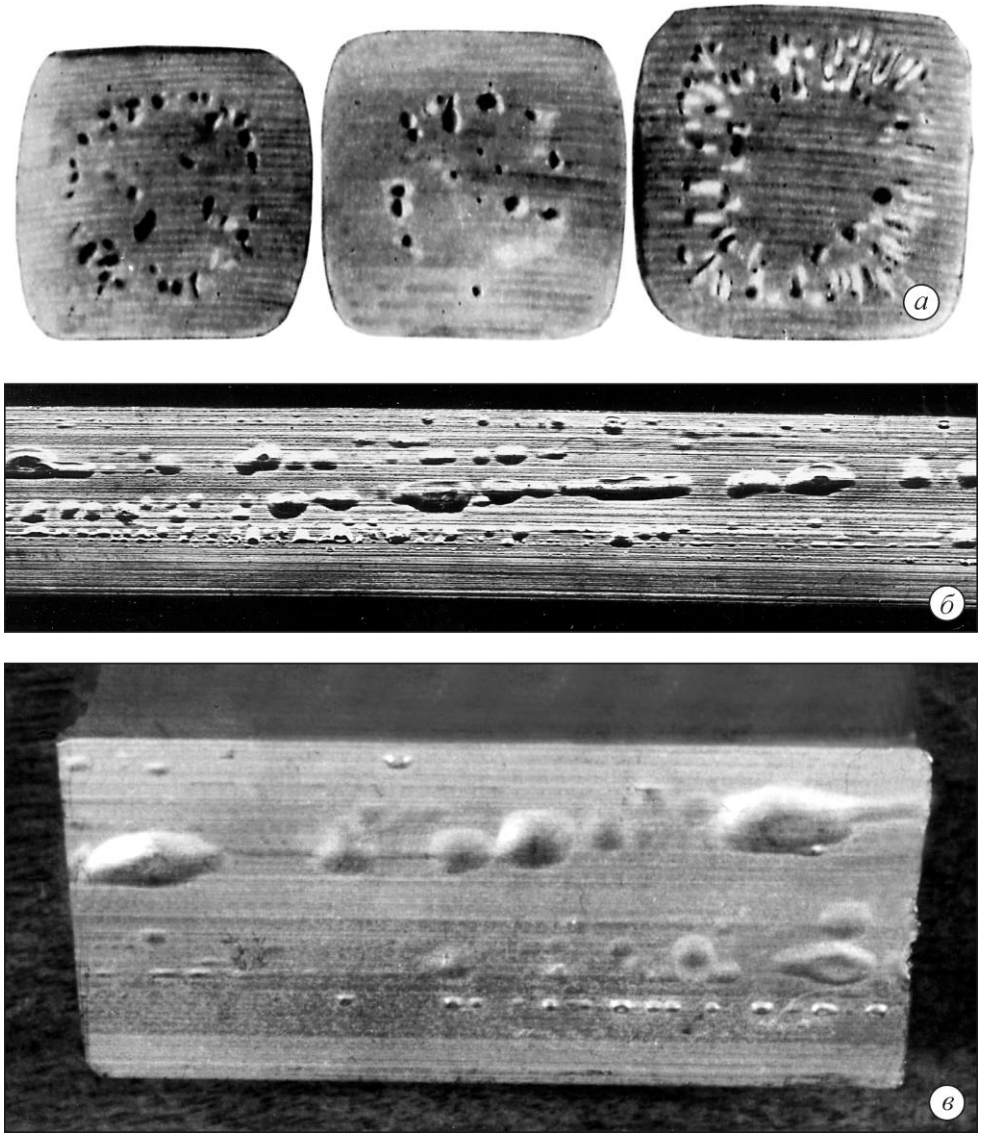


Рис. 4.4. Газовые пузыри:
а – внутренние, поперечное сечение отливки, сталь, темплет; *б*, *в* – подкорковые, прессованный профиль, алюминиевый сплав, внешний вид; *г* – подкорковый, прессованный профиль, макроструктура; *д* – подкорковые, поверхность листа, алюминиевый сплав, внешний вид; *е* – свищ в сварном шве, алюминиевый сплав, внешний вид

Причины образования

В образовании внутренних пузырей основную роль играет высокая концентрация растворенных в жидком металле газов. Причинами высокой газонасыщенности расплава служат высокая температура металла при выплавке и недостаточная степень его раскисления и рафинирования.

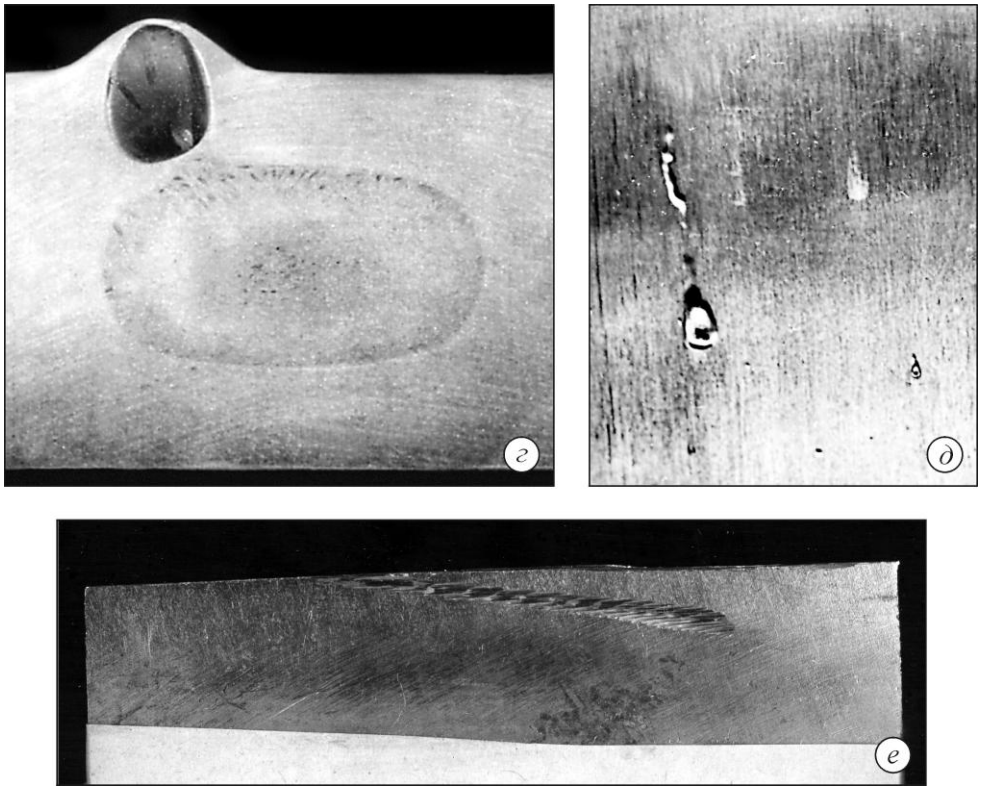


Рис. 4.4. Продолжение

Повышенное содержание газов связано в основном с влажностью шихты, шлакообразующих материалов и лигатур. Для сталей источником водорода может быть ржавая шихта, адсорбировавшая влагу.

Способы предупреждения

Для предупреждения возникновения внутренних пузырей используются:

сушка (прокалка) и подогрев шихты, ферросплавов и шлакообразующих материалов;

оптимальное рафинирование и раскисление жидкого металла;

защита от вторичного окисления при выпуске и разливке жидкого металла (защита аргоном, разливка под слоем шлака и т.д.);

подготовка и применение просушенных изложниц, прибыльных надставок, сифонного припаса;

подогрев и нанесение тонким слоем противопригарных покрытий на стенки изложниц;

соблюдение оптимальных температурно-временных параметров наполнения слитка (отливки);

обеспечение эффективного функционирования прибыли за счет засыпки поверхности металла тепло-термоизоляционной смесью.

Способы устранения

Если расположение пузырей локализовано, для устранения дефекта можно обрезать донную или прибыльную часть слитка в необходимых пропорциях.

Влияние на свойства

Дефект при дальнейшем деформировании металла может стать причиной возникновения расслоений.

Поверхностные (подкорковые) газовые пузыри в литом металле

Описание

Сообщающиеся с поверхностью отливки или слитка газовые полости округлой или вытянутой формы (рис. 4.4, *б, в*). Пузыри в виде тонких каналов, ориентированных перпендикулярно к поверхности металла, образуют так называемые сотовые пузыри (сотовая пористость). Диаметр пузырей может достигать нескольких миллиметров, протяженность каналов – свыше 10 мм. Дефекты располагаются, как правило, группами в поверхностном слое отливки. Вокруг подкорковых газовых пузырей часто располагаются ликваты.

Газовые пузыри выявляются на макрошлифах и в изломах.

Причины образования

Образование подкорковых газовых пузырей в основном обусловлено:

толстым и влажным слоем смазки на стенках изложницы (при этом продукты окисления не успевают всплыть и застревают в застывшем подкорковом слое);

использованием изложниц или форм с изношенными поврежденными стенками или моделей с поврежденной поверхностью (источником образования газов являются скопления влаги и смазки в дефектных местах поверхности, которые служат центрами (концентраторами) зарождения пузырей на поверхности формы);

повышенной влажностью изложниц и прибыльных надставок;

недостаточной газопроницаемостью формы и некачественным противопригарным покрытием.

Способы предупреждения

Для предупреждения образования поверхностных пузырей необходимо:

соблюдение технологии выплавки, рафинирования, раскисления и разливки металла; тщательная подготовка форм, изложниц, прибыльных надставок и сифонной (литниковой) системы (применение высококачественных сухих сифонных припасов, чистых, согретых и правильно смазанных изложниц, просушенных и тщательно нанесенных на поверхность форм противопригарных покрытий).

Применение шихты, лигатур и шлакообразующих добавок с влажностью, не превышающей допустимую.

Способы устранения

Если подкорковые газовые пузыри локализованы и их размеры не выходят за допуски по техническим условиям, они удаляются зачисткой и, если возможно, заваркой.

Влияние на свойства

Подкорковые газовые пузыри, окислившиеся в процессе нагрева, при горячей деформации не завариваются и выходят на поверхность металла в виде мелких прерывистых трещин с окисленной поверхностью, вытянутых в направлении деформации и располагающихся обычно группами. При дальнейшем деформировании металла они могут стать причиной возникновения расслоений.

Поверхностные газовые пузыри в деформированном металле

Описание

Вздутия округлой или овальной формы, вытянутые вдоль направления деформации (могут сопровождаться отшелушиванием поверхностного слоя металла). Пузыри могут быть единичными или в виде скоплений, вытянутыми в строчку или располагающимися группами произвольно на поверхности деформированных полуфабрикатов. Размеры пузырей, как правило, не превышают 100 мм^2. Пузыри выявляются визуально после горячей деформации и идентифицируются на макрошлифах.

Причины образования

На образование поверхностных пузырей оказывают влияние:

повышенное содержание газов в металле, обусловленное нарушением режима плавки или нагрева металла перед деформацией; в этом случае возникают мелкие, так называемые бисерные пузыри, беспорядочно располагающиеся на поверхности;

наличие микропор в поверхностных слоях слитка, адсорбировавших влагу из атмосферы; в этом случае возникают крупные пузыри, единичные или располагающиеся группами;

при прокатке – наличие микронадрывов на поверхности проката, возникших при фрезеровке слитков или на первых проходах прокатки, адсорбировавших влагу из атмосферы; в этом случае возникают строчки пузырей;

при прессовании – наводороживание металла при нагреве его перед прессованием из-за нарушения технологического процесса;

при прессовании – проникновение в подповерхностные несплошности в металле под большим давлением газовой фазы, возникшей от неполного сгорания технологической смазки (расширение газовой фазы сопровождается вспучиванием поверхностного слоя металла при выходе полуфабриката из канала матрицы);

при штамповке – наличие наслоений в исходной прессовой заготовке.

Способы предупреждения

Для предупреждения образования поверхностных пузырей необходимы:

снижение содержания газов в слитках;

повышение качества металла исходной заготовки;

контроль за содержанием водяных паров в печной атмосфере при нагреве металла для деформирования;

повышение качества фрезерования слитков;

тщательная очистка поверхности слитков перед горячей деформацией.

Способы устранения

Дефект устраняется зачисткой или строжкой, если его размеры не выходят за пределы допуска, оговоренного техническими условиями.

Влияние на свойства

Крупные пузыри являются браковочным признаком. Мелкие пузыри не оказывают заметного влияния на механические свойства проката, но ухудшают декоративный вид изделия. Решение о допуске дефектов принимается в соответствии с требованиями технических условий на металлопродукцию.

4.5. УСАДОЧНАЯ РАКОВИНА

Описание

Усадочная раковина – несплошности в металле, проявляющиеся в изломе в виде полостей, имеющих поверхность, характерную для свободной кристаллизации металла (рис. 4.5). В отличие от газовых раковин, имеющих гладкую поверх-

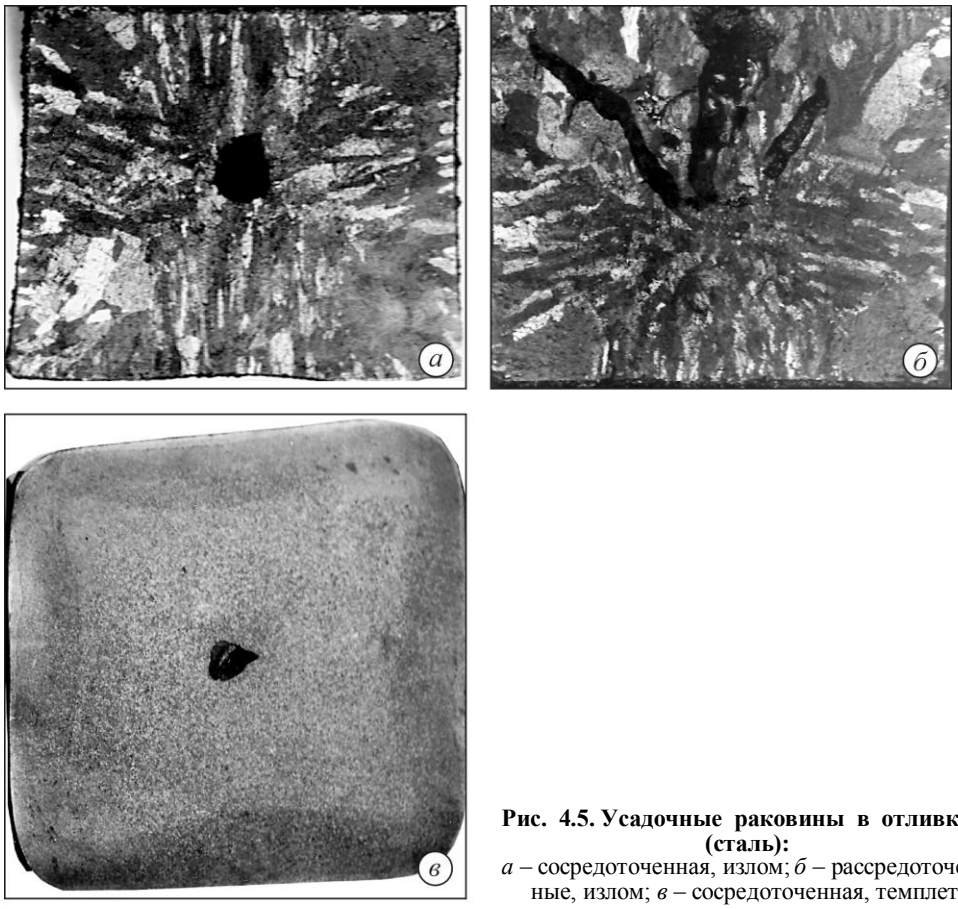


Рис. 4.5. Усадочные раковины в отливках (сталь):
а – сосредоточенная, излом; *б* – рассредоточенные, излом; *в* – сосредоточенная, темплет

ность, на поверхности усадочных раковин часто встречаются скопления неметаллических включений, всплывших из жидкого металла.

Дефект наблюдается в литом металле. В отливках располагается преимущественно в местах более «толстых» сечений.

Различают открытую усадочную раковину – полость неправильной формы, сообщающуюся с атмосферой, и закрытую усадочную раковину – полость, лежащую внутри отливки. Поверхность открытой усадочной раковины неровная окисленная, на ней обнаруживаются дендритные кристаллы. Закрытая усадочная раковина имеет светлую неокисленную поверхность с кристаллическим строением. Характерное отличие излома сталей с закрытой усадочной раковиной от кристаллических участков на фоне волокнистого излома состоит в том, что кристалличность строения поверхности усадочной раковины не изменяется при термической обработке любого вида.

Усадочная раковина может быть нитевидной формы и проникать глубоко внутрь отливки.

Усадочные раковины подразделяются на:

головную усадочную раковину (образуется в прибыльной части слитка или отливки);

осевую усадочную раковину (раковина нитевидной или сеткообразной формы, глубоко распространяющаяся в теле слитка или отливки);

вторичную усадочную раковину (неокисленная закрытая усадочная раковина), расположенную ниже головной и отделенную от нее обычно слоем плотного металла, называемого «мостом».

Закрытые усадочные раковины выявляются методами просвечивания.

Условия и причины образования

Усадочная раковина возникает вследствие недостаточного количества жидкого металла к концу затвердевания слитка или отливки из-за усадки металла.

На величину объемной усадки и, следовательно, на величину усадочной раковины влияют следующие факторы:

температурно-временные режимы выплавки и разливки жидкого металла: большой перегрев металла способствует увеличению объема усадочной раковины и дает более развитую усадочную раковину; снижение температуры перегрева расплава уменьшает объем концентрированной усадочной раковины и приводит к развитию усадочной рыхлости, пленам, корочкам;

неправильно подобранные технологические режимы модифицирования и кристаллизации слитков или отливок;

неправильный выбор и расчет литниково-питающей системы для слитков и отливок, в том числе формы и размеров прибылей;

повышенное содержание газов в жидком металле;

неблагоприятная геометрическая форма отливки или слитка;

широкий температурный интервал кристаллизации металла;

неудовлетворительная работа прибылей;

нарушение режима кристаллизации металла.

Способы предупреждения

Для предупреждения возникновения усадочной раковины необходимы:

соблюдение технологии подготовки и выплавки жидкого металла, разработанной в зависимости от его химического состава и назначения;

соблюдение технологии разливки металла в изложницы или формы с обеспечением заданных требований по качеству металла;

соблюдение технологии подготовки формы и разливки металла;

соблюдение температурно-временных параметров заливки изложницы и отливок жидким металлом;

обеспечение заданного теплового режима работы прибылей;

использование технологии, позволяющей выводить усадочную раковину в верхнюю часть слитка.

Способы устранения

В связи с тем, что усадочная раковина образуется при переходе металла из жидкого состояния в твердое, основная задача заключается в выведении ее из тела слитка (отливки), уменьшении ее объема и концентрации в головной части прибыли с целью уменьшения количества металла, удаляемого в обрезь. Усадочную раковину удаляют вместе с прибыльной частью слитка (отливки), при этом плоскость реза должна располагаться ниже границы усадочной раковины.

Вторичная усадочная раковина в тех случаях, когда ее поверхность не загрязнена труднорастворимыми оксидами и большим количеством неметаллических включений, может завариваться при последующей горячей деформации, если выбраны соответствующие для данного металла температура и режим деформации, как и для других аналогичных завариваемых дефектов (например, расслоений).

Открытая осевая усадочная раковина не устраняется, так как из-за взаимодействия с атмосферой ее поверхность окислена, загрязнена шлаковыми включениями, и при горячей деформации открытая осевая усадочная раковина не заваривается.

Влияние на механические свойства

Усадочная раковина, распространяющаяся в тело отливки, снижает механические свойства пропорционально площади поверхности разрушения, занятой этим дефектом. При деформировании металла усадочная раковина вызывает образование расслоений. Заварившаяся при горячей деформации неокисленная внутренняя усадочная раковина влияния на механические свойства не оказывает.

4.6. УСАДОЧНАЯ РЫХЛОСТЬ

Описание

Усадочная рыхлость – скопление несплошностей неправильной формы, проявляющихся в виде отдельных участков с пористым ноздреватым строением без явных признаков пластической деформации (частный случай усадочной раковины) (рис. 4.6).

Дефект наблюдается в литом и деформированном металле.

Поверхность усадочной рыхлости может быть окисленной или блестящей (неокисленной). В отливках дефект располагается преимущественно в тепловых узлах или в центральных сечениях, в деформированных заготовках – вытянут по

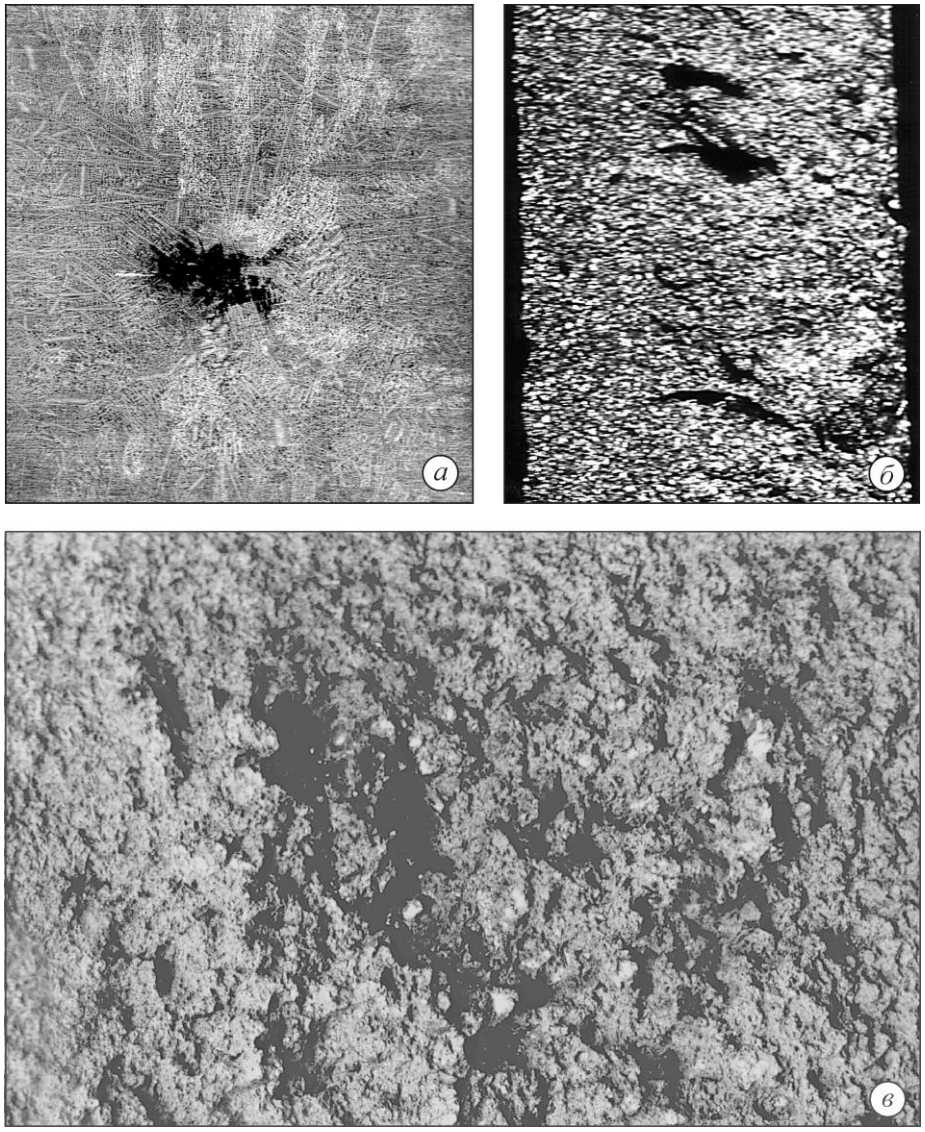


Рис. 4.6. Усадочная рыхлость:
а – сосредоточенная, поперечное сечение отливки, макроструктура; *б, в* – рассредоточенная, излом, литая сталь

направлению деформации вдоль центральной зоны. Идентифицируется на травленых микрошлифах в виде областей повышенной травимости.

При прокатке, штамповке и ковке усадочная рыхлость может приводить к образованию расслоений.

Усадочная рыхлость обнаруживается при механической обработке отливок визуально. Идентифицируется на макрошлифах и изломах, выявляется методами просвечивания.

Условия и причины образования

Дефект возникает из-за уменьшения объема жидкого металла при его затвердевании и недостаточного количества расплавленного металла в конце затвердевания отливки, способного заполнить образующиеся пустоты. Образованию дефекта способствуют:

несоблюдение технологических режимов модифицирования и кристаллизации слитка (отливки), препятствующих направленному формированию усадочной раковины;

малоэффективная работа сифонной и литниково-питающей систем, а также отклонения в режиме наполнения изложницы сверху;

неправильный выбор типа изложницы и несоблюдение теплофизических параметров работы прибылей;

отклонения температурно-временных параметров заполнения изложницы и формы;

наличие широкого интервала кристаллизации металла.

Образованию усадочной рыхлости способствуют также все остальные факторы, вызывающие усадочную раковину.

Способы предупреждения

К мерам предупреждения возникновения усадочной рыхлости относятся:

соблюдение технологии выплавки и разливки жидкого металла;

создание оптимального режима кристаллизации металла путем выбора правильного соотношения геометрических размеров отливок, а также размеров и объема питающих прибылей;

рациональное размещение холодильников и тепловых узлов;

снижение содержания вредных примесей (неметаллических включений, легкоплавких примесей, водорода, азота).

Способы устранения

Дефект исправлению не поддается. При изготовлении полуфабрикатов из слитков дефект можно частично устранить путем подбора температурно-деформационных режимов получения заготовок под заданные требования.

Влияние на механические свойства

В литом металле при наличии усадочной рыхлости снижаются механические свойства пропорционально площади, занимаемой дефектом; в деформированном металле, проявляясь в виде расслоений, дефект резко снижает прочностные и пластические свойства по толщине проката. Заварившаяся при горячей деформации усадочная рыхлость влияния на механические свойства не оказывает.

4.7. НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ВКЛЮЧЕНИЯ

Описание

Неметаллические включения – дефект в виде неметаллических частиц, попавших в металл механическим путем (экзогенная природа образования) или образовавшихся вследствие химического взаимодействия компонентов расплава

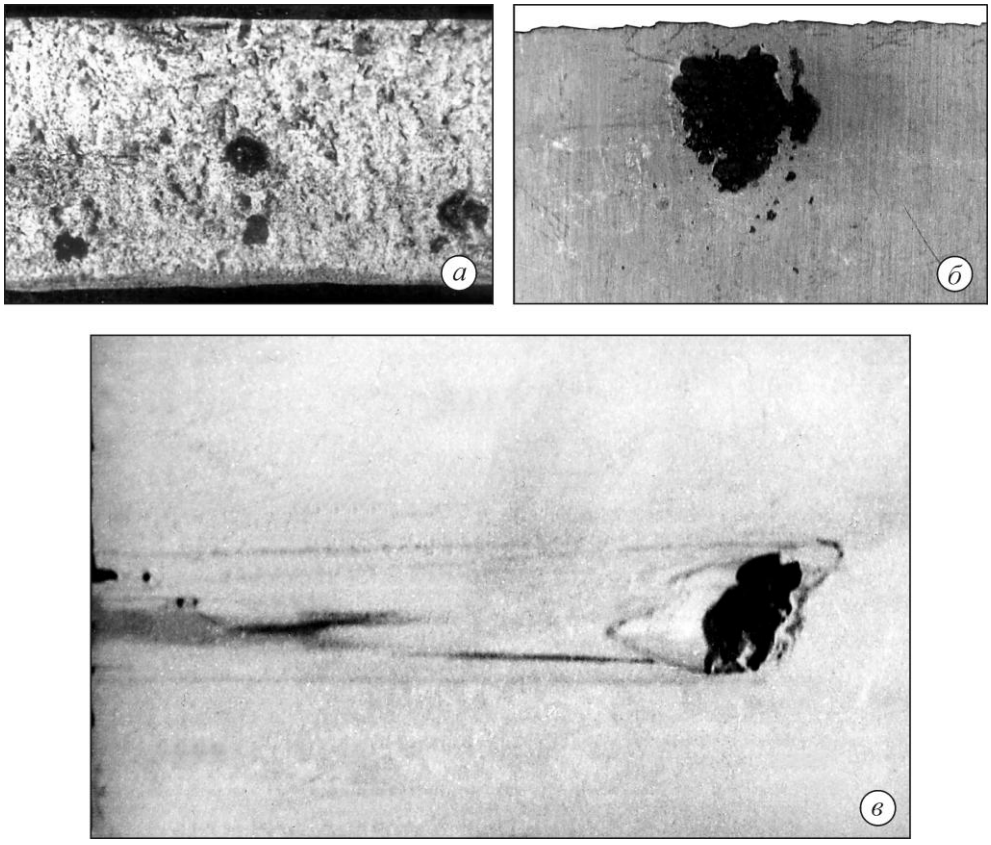


Рис. 4.7. Неметаллические (шлаковые) включения:
а – шлаковые включения в прокате, излом; *б*– крупное шлаковое включение в прессованном прутке, темплет; *в* – крупное шлаковое включение в прессованном профиле, темплет

при расплавлении и заливке металла (эндогенная природа образования) (рис. 4.7–4.9). Наблюдаются в виде отдельных частиц произвольной формы, их скоплений, строчек, плен. Они могут располагаться в литом металле под усадочной раковиной, как правило, в верхней части отливки. Возможна зональная сегрегация неметаллических включений. Скопления включений могут наблюдаться в районе пористости отливки.

В деформированном металле указанные включения – единичные либо скопления, вытянутые вдоль направления деформации. Неметаллические включения могут проявляться в виде темных и светлых корочек, в виде темных компактных включений, в изломах – в виде единичных вкраплений, раздробленных частиц или их скоплений темного цвета. Оксидные плены выявляются на микрошлифах в виде нитевидных включений.

Химический и фазовый составы неметаллических включений определяются химическими и физическими методами.

Крупные неметаллические включения и их скопления выявляются методами просвечивания.

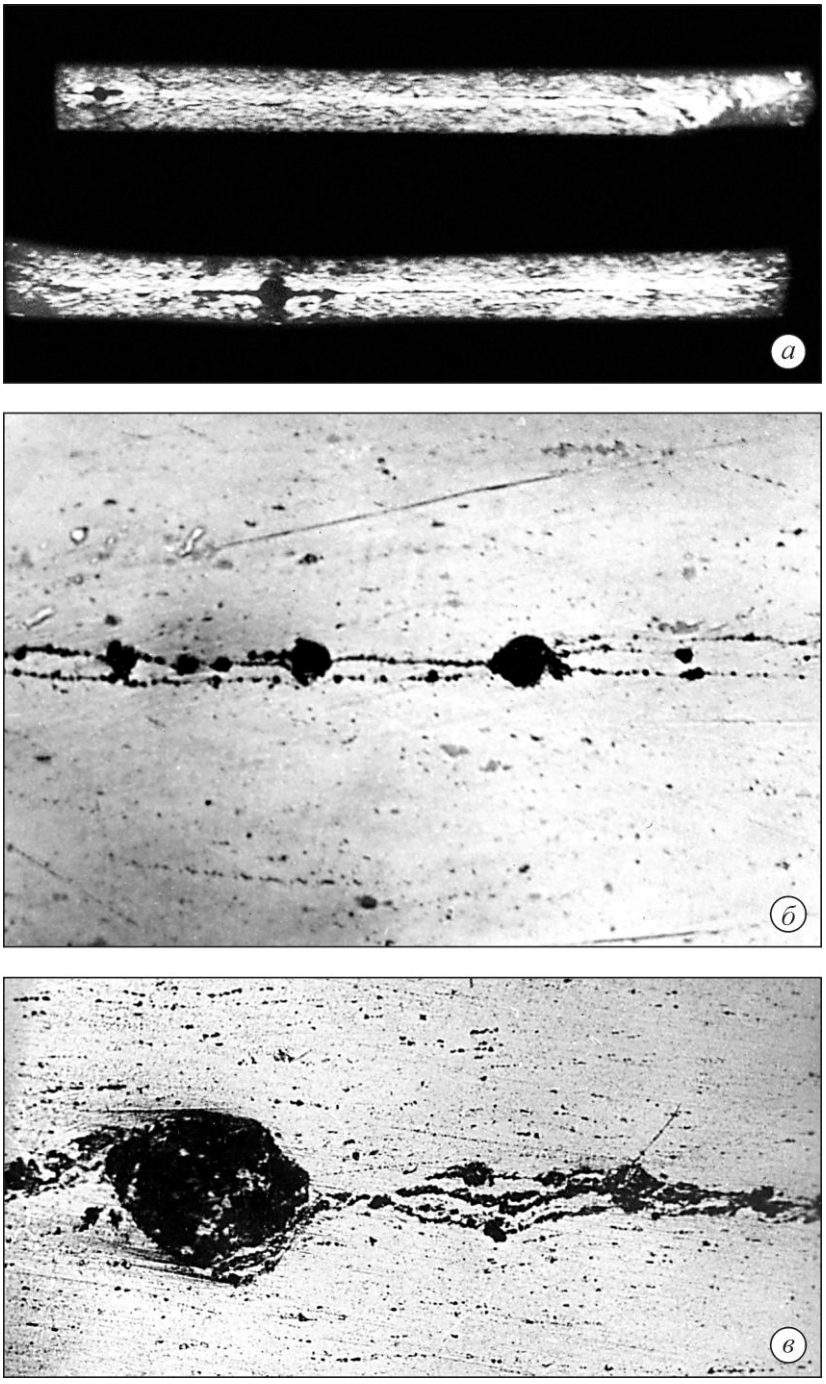


Рис. 4.8. Раскатанные шлаковые включения в прокате, алюминиевый сплав:
а – поперек направления прокатки, излом; *б* – мелкие включения вдоль направления деформации, микроструктура, × 100; *в* – крупное включение, вдоль направления деформации, микроструктура, × 100

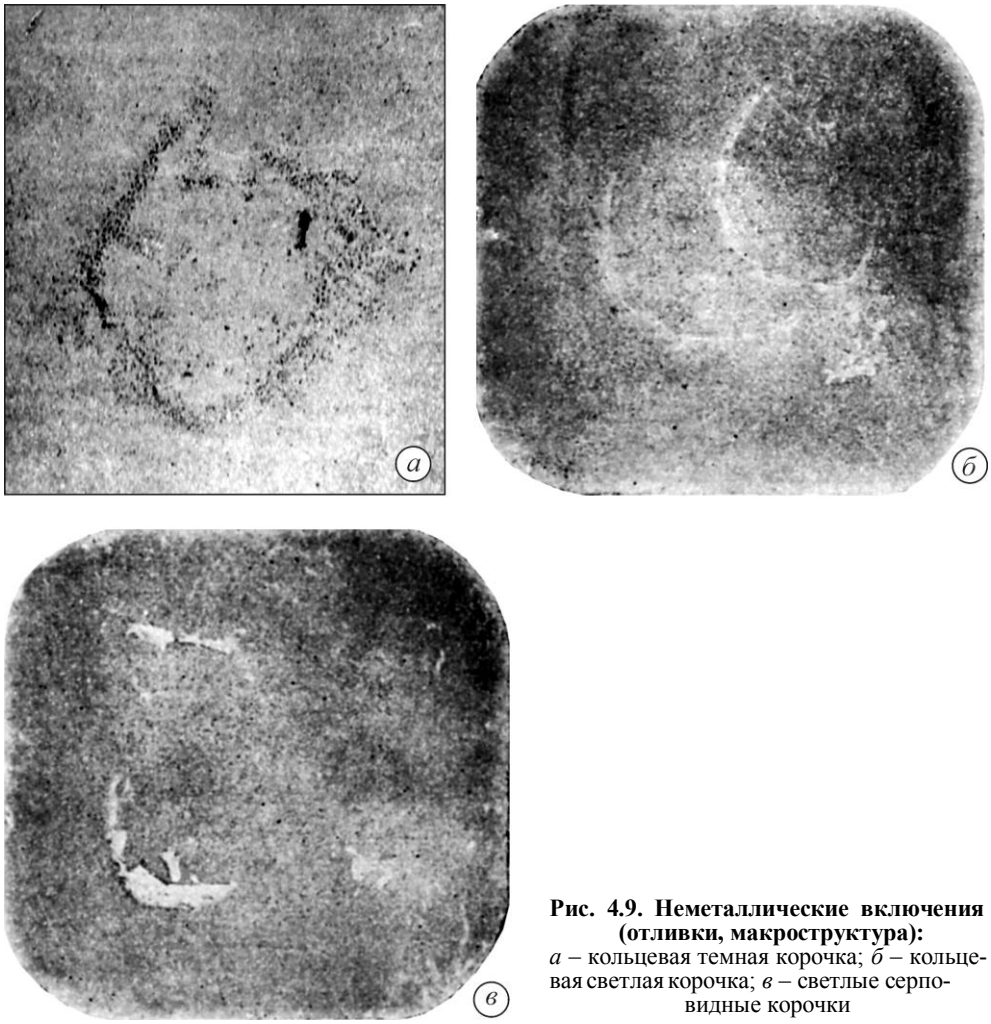


Рис. 4.9. Неметаллические включения (отливки, макроструктура):
а – кольцевая темная корочка; *б* – кольцевая светлая корочка; *в* – светлые серповидные корочки

Причины образования

Источником неметаллических включений служат кусочки футеровки, шлак, продукты раскисления, не полностью удаленные из жидкого металла. Появлению неметаллических включений способствует следующее:

нарушение технологии подготовки изложниц и форм, нарушение технологии выплавки;

повышенная загрязненность шихты;

неудовлетворительная защита жидкого металла при выпуске и разливке;

несоблюдение температурно-временных параметров заполнения изложниц и форм.

Способы предупреждения

Для предупреждения попадания неметаллических включений в металл необходимы:

обеспечение чистоты шихтовых материалов;
соблюдение технологии рафинирования и раскисления расплава;
обеспечение защиты струи и зеркала металла при разливке;
продувка расплава нейтральными газами;
вакуумирование расплава;
для стали – при необходимости – наведение в ковше активного рафинирующего шлака;
для алюминиевых сплавов – фильтрация расплава через стеклоткань или кусковые фильтры.

Способы устранения

Локальные скопления неметаллических включений, выходящие на поверхность, могут быть удалены вырезкой (зачисткой) дефектной части отливки с последующей заваркой дефектных участков. Неметаллические включения, расположенные внутри тела слитка, могут быть измельчены при дальнейшей деформации.

Влияние на свойства

Скопления неметаллических включений снижают механические и служебные свойства изделий, особенно пластичность и ударную вязкость. Крупные скопления неметаллических включений могут вызвать разрушение металла в процессе его дальнейшей деформации.

Неметаллические включения могут обусловить появление в прокате трещин, волосовин, расслоений.

4.8. ТОЧЕЧНАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ

Описание

Точечная неоднородность – дефект литого металла в местах скопления неметаллических включений в поре (рис. 4.10). Выявляется на поперечных темплетах слитков в виде точек повышенной травимости. На продольных темплетах отливок дефект имеет вид внеосевых шнуров (усов). Дефект располагается в районе перехода между зонами мелкокристаллических и столбчатых кристаллов. Дефект выявляется на макрошлифах.

Причины образования

Точечная неоднородность возникает вследствие:
отклонения технологии выплавки и разливки металла от заданной;
повышенной загрязненности металла и нарушения теплового режима кристаллизации при разливке.

Способы предупреждения

Необходимо соблюдать технологию рафинирования, раскисления и модифицирования металла.

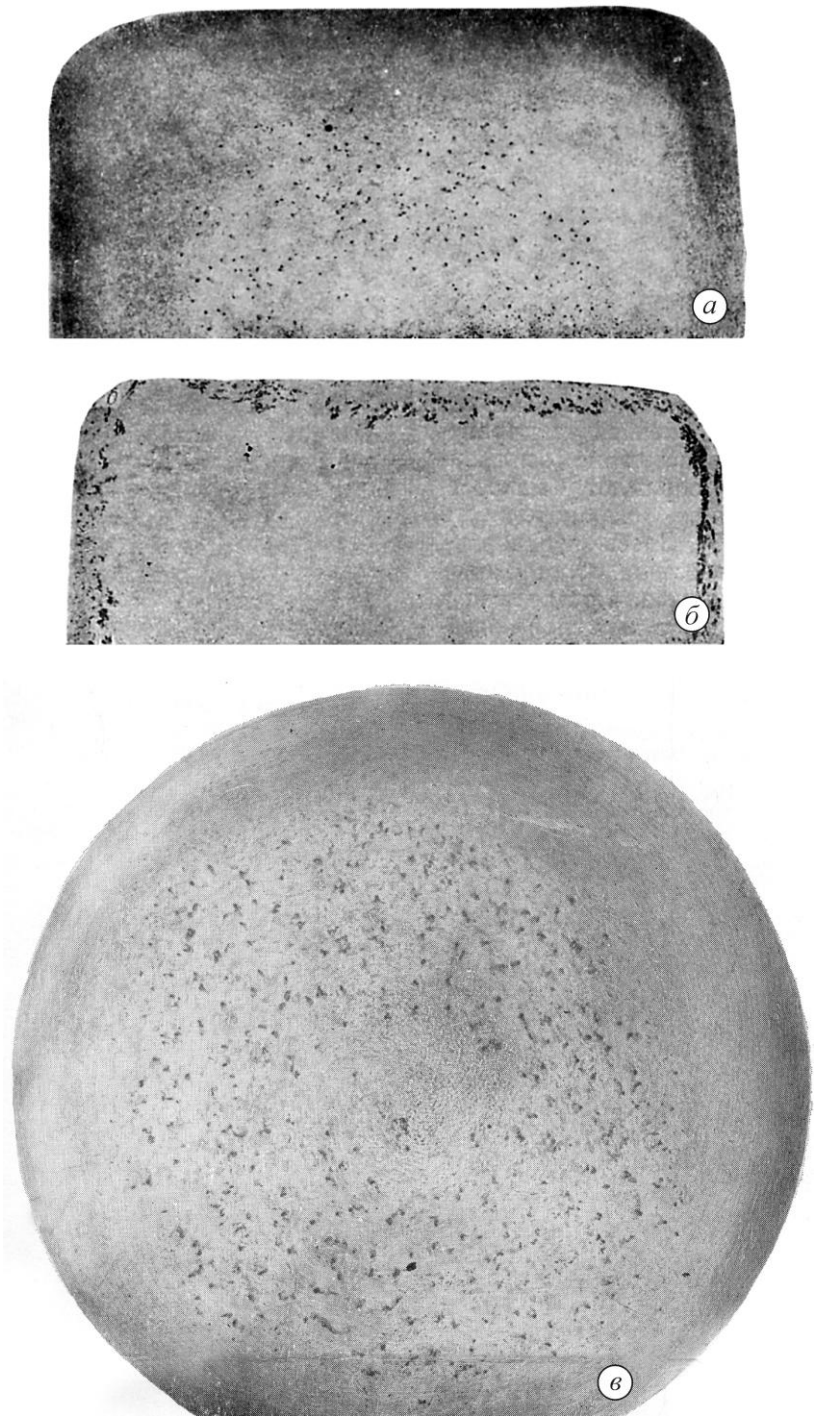


Рис. 4.10. Точечная неоднородность слитков (макроструктуры):
а – равномерная (сталь); *б* – краевая (сталь); *в* – равномерная (никелевый сплав)

Способы исправления

Дефект может быть частично или полностью исправлен при температурно-деформационной обработке металла.

Влияние на свойства

Дефект вызывает снижение механических свойств металла.

4.9. ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫЕ (ИНТЕРМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ) ВКЛЮЧЕНИЯ

Описание

Интерметаллидные включения – дефект в металле в виде кристаллов игольчатой, пластинчатой или многогранной формы (рис. 4.11).

В изломах дефект выявляется в виде скоплений светлых, блестящих кристаллов, на микрошлифах – в виде скоплений темных кристаллов игольчатой, пластинчатой или многогранной формы. В основном дефект характерен для алюминиевых и магниевых сплавов.

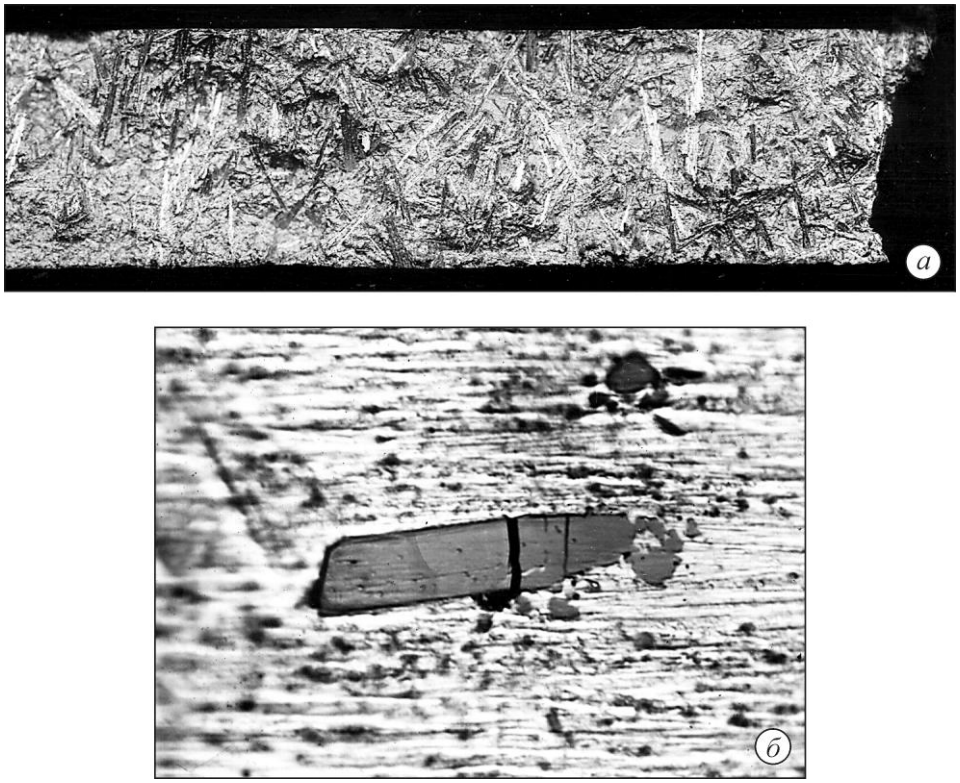


Рис. 4.11. Интерметаллические включения:
а – излом; *б* – микроструктура (алюминиевый сплав). ×70

Причины образования

Интерметаллидные включения представляют собой эндогенные химические соединения тугоплавких металлов, возникающие из-за:

повышенного содержания в сплаве тугоплавких элементов;

применения лигатур с высоким содержанием переходных металлов.

Росту интерметаллидных включений способствует пониженная температура металла при литье. Особенно крупные скопления интерметаллидных включений образуются при литье алюминиевых слитков (заготовки для дальнейшего деформирования) на поверхности распределительной воронки (настыль).

Способы предотвращения

Образование интерметаллидных включений можно предотвратить путем:

введения тугоплавких легирующих элементов в виде солей;

измельчения кристаллов интерметаллидных соединений в лигатуре за счет резкого увеличения скорости ее затвердевания или (реже) проковывания;

повышения температуры расплава;

прогрева распределительной воронки и желоба до температуры литья;

снижения содержания тугоплавких легирующих элементов в сплаве до нижнего предела легирования.

Фильтрация расплава (для алюминиевых сплавов) – через стеклоткань или кусковой фильтр.

Способы устранения

Дефект не устраняется. При последующем деформировании металла крупные интерметаллидные включения могут вызывать образование расслоений, трещин и т.д.

Крупные интерметаллидные включения или их скопления снижают механические и служебные свойства изделий, особенно пластичность и ударную вязкость, вызывая разрушение металла в процессе его дальнейшей деформации и эксплуатации.

4.10. ИНОРОДНЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ВКЛЮЧЕНИЯ (КОРОЛЬКИ)

Описание

Инородные металлические включения – единичные, случайно попавшие в металл кусочки окисленного металла, сосульки, кусочки проволоки и т.д. (рис. 4.12; 4.13). Они имеют различные с основным металлом травимость, химический состав, микроструктуру и твердость. Металлические включения обнаруживаются на макрошлифах и изломах. Границы частиц могут быть нечеткими и окруженными неметаллическими включениями.

Причины образования

Образование дефекта обусловлено:

несоблюдением технологии выплавки и разливки жидкого металла;

попаданием металлической стеллы (сосульки) от разливочного стакана ковша;

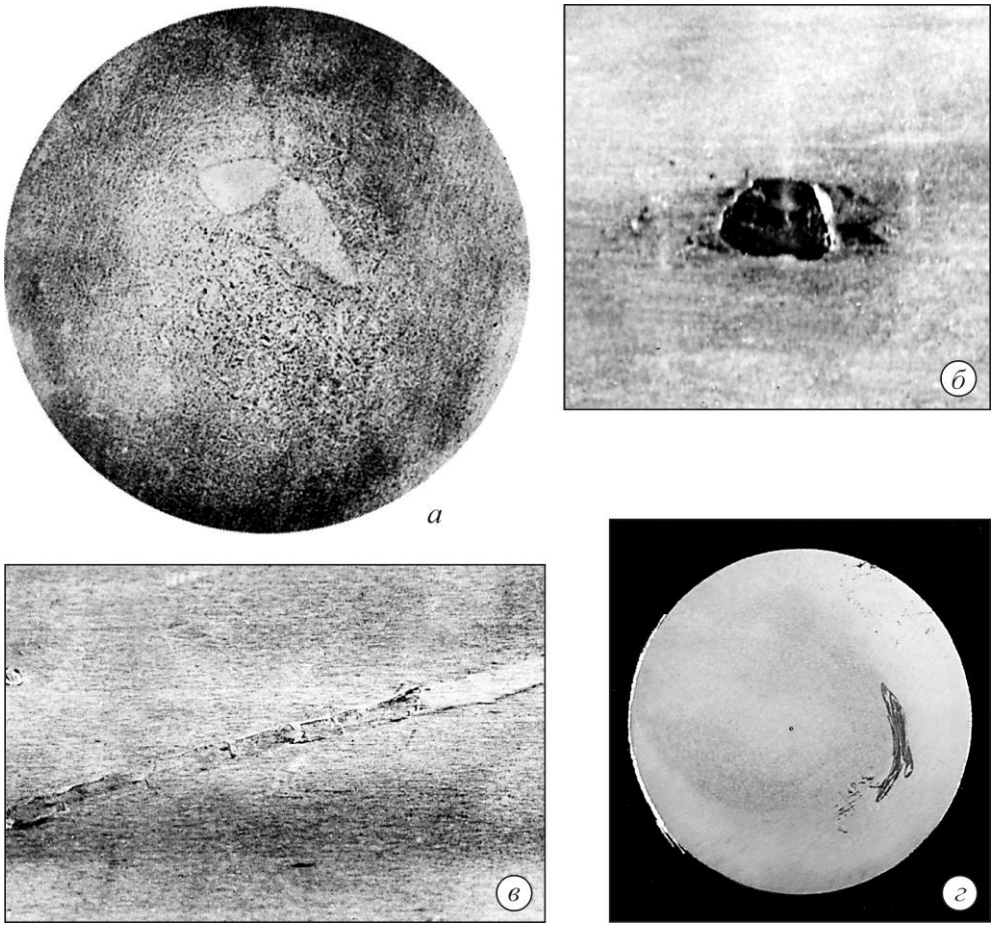


Рис. 4.12. Инородные металлические включения:
а – кусочек нерастворившейся лигатуры (макроструктура); *б* – вкатанный в поверхность листа кусочек стали (внешний вид); *в* – вкатанная в поверхность листа алюминиевая проволока (внешний вид); *г* – запрессованное включение второго сплава (пруток, алюминиевый сплав, макроструктура)

разливкой холодного металла, при которой инородные металлические включения не успевают раствориться в расплаве.

Способы предупреждения

Для предупреждения возникновения дефекта необходимы:

соблюдение технологии выплавки и разливки металла;

повышение культуры производства, исключающей попадание инородных металлических предметов в расплав;

своевременное снятие свисающих металлических стелл с торца разливочного стакана ковша.

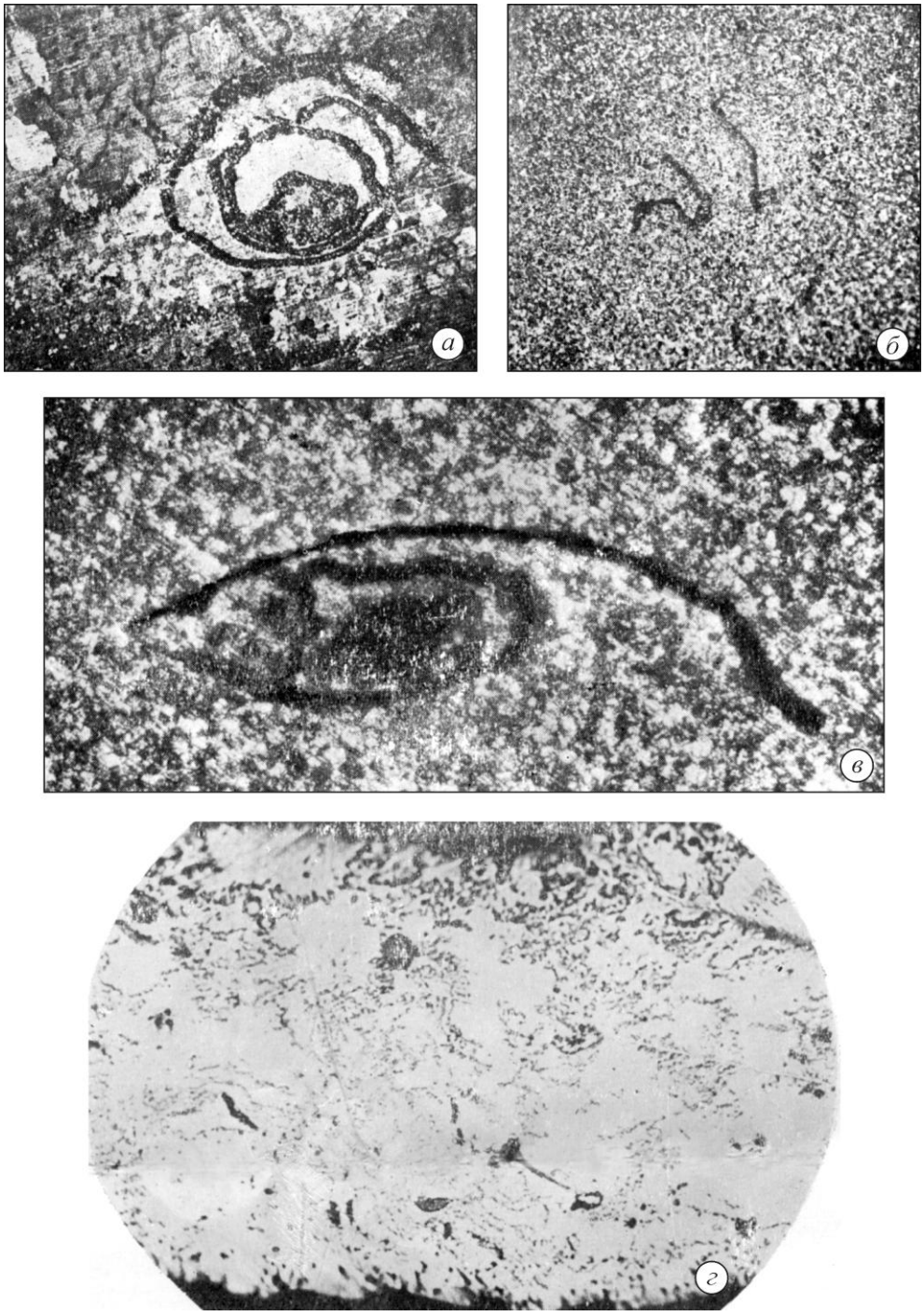


Рис. 4.13. Частицы короны (никелевый сплав) в форме:
а – улитки, × 50; *б* – запятой, × 20; *в* – спирали, × 50; *г* – одиночных участков, литое состояние, × 300. Макро- и микроструктуры

Способы устранения

Дефект не устраняется, если находится в теле слитка или отливки. Дефекты, выходящие на поверхность, устраняются строжкой или зачисткой с последующей заваркой.

Влияние на свойства

Дефект служит концентратором напряжений и может приводить к возникновению трещин и преждевременному разрушению изделий.

4.11. ТРЕЩИНЫ

Виды трещин

Описание

Трещины – несплошности в металле, произвольно ориентированные по отношению к поверхности разрушения (термические трещины) или вытянутые вдоль направления деформации (деформационные трещины) (рис. 4.14–4.17). Трещины могут быть поверхностные и внутренние, горячие и холодные. Трещины классифицируют по месту расположения (продольные, поперечные, паукообразные и др.). Дефекты встречаются в литом и катаном металле.

Термические трещины – это разрывы в металле, вызываемые структурными и термическими напряжениями. Они характеризуются светлой кристаллической поверхностью, если образуются при невысоких или комнатных температурах, или окисленной поверхностью, если образуются при высоких температурах и к их поверхности имеется доступ воздуха. В основном трещины распространяются от поверхности в глубь металла. На микрошлифах дефект имеет вид ломаных извилистых волосовидных линий, которые проходят по телу или границам зерен в зависимости от структурного состояния или температуры разрушения металла.

Деформационные трещины – это разрывы в металле, возникающие при неблагоприятных условиях деформации. Они распространяются вдоль направления деформации. В поперечных изломах трещины могут быть крестообразной или паукообразной формы, в продольных изломах имеют вид слоистых или ступенчатых полос.

Горячие (кристаллизационные) трещины усадочного происхождения, образующиеся в период кристаллизации слитка, в основном распространяются по границам зерен дендритов. Холодные трещины, образующиеся вследствие внутренних напряжений, в основном распространяются по телу зерен.

Трещины выявляются: наружные – визуально или люминесцентными методами, внутренние – методами ультразвукового контроля.

Условия и причины образования

Термические трещины образуются при неодновременном протекании фазовых превращений в поверхностных и центральных слоях изделия и большого градиента температур по сечению изделия при термической обработке, вызывающих повышенный уровень структурных и термических напряжений.

Деформационные трещины образуются:

при повышенных степенях обжатия;

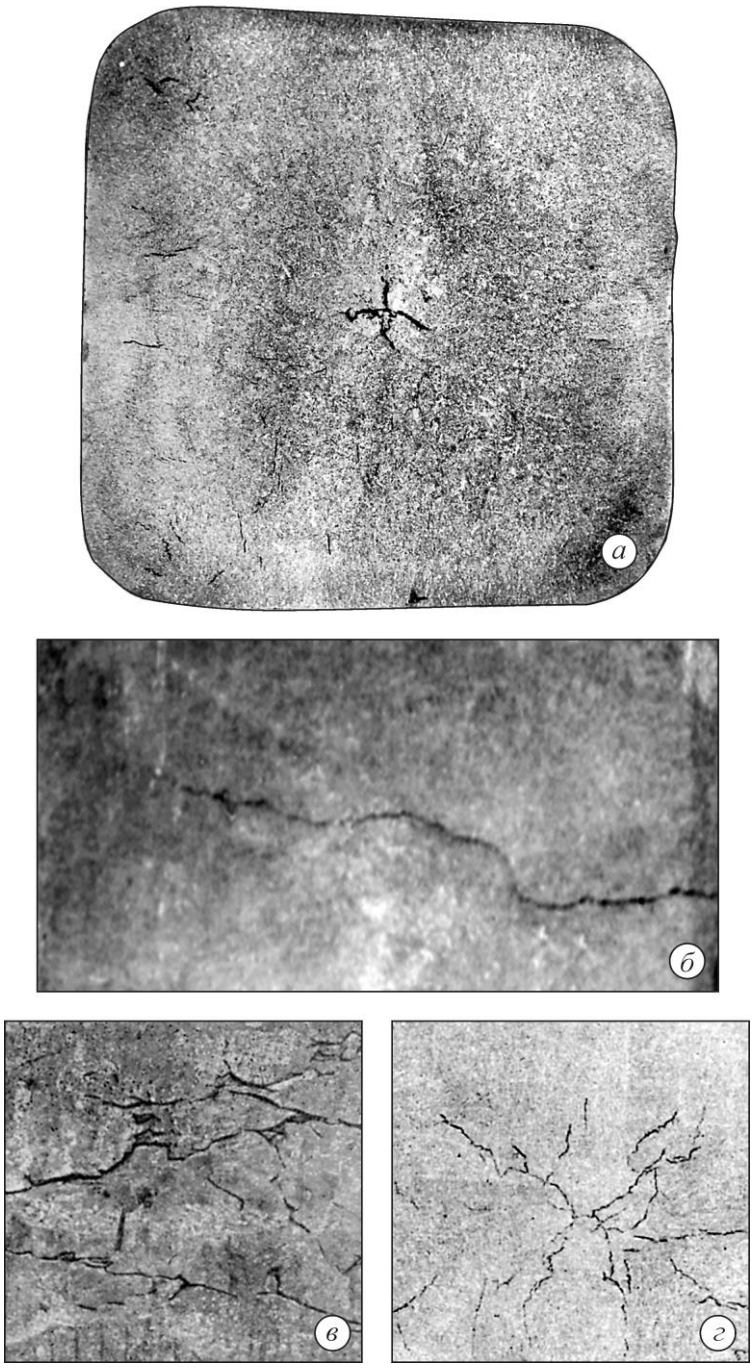


Рис. 4.14. Горячие трещины в отливках (сталь):
а – внутренняя, осевая; *б, в* – поверхностные; *г* – поверхностные паукообразные (звездообразные). Макроструктуры

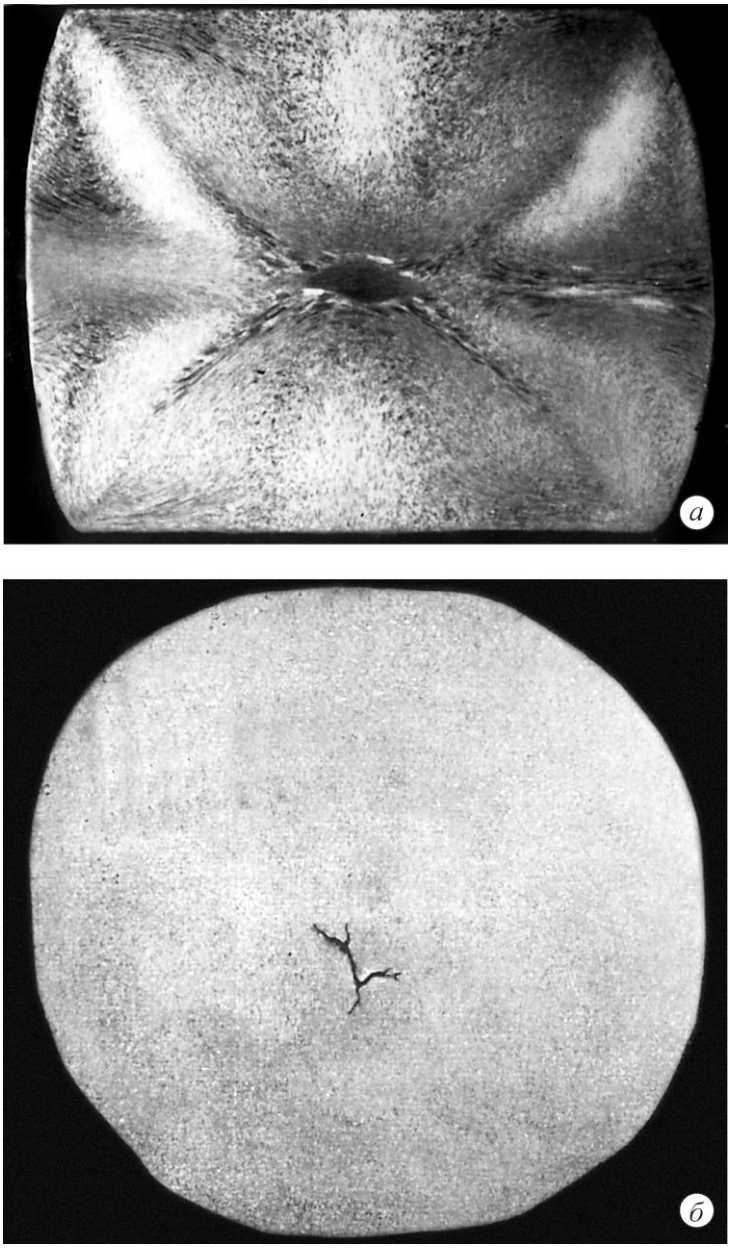


Рис. 4.15. Внутренние горячие трещины в деформированном металле:
а – сечение поковки, алюминиевый сплав; *б* – сечение кованого прутка, сталь. Макроструктуры

при отклонении температур деформации от оптимальных;

при наличии внутренних концентраторов напряжений в виде шлаковых включений, рыхлот, плен, оксидов и т.д.

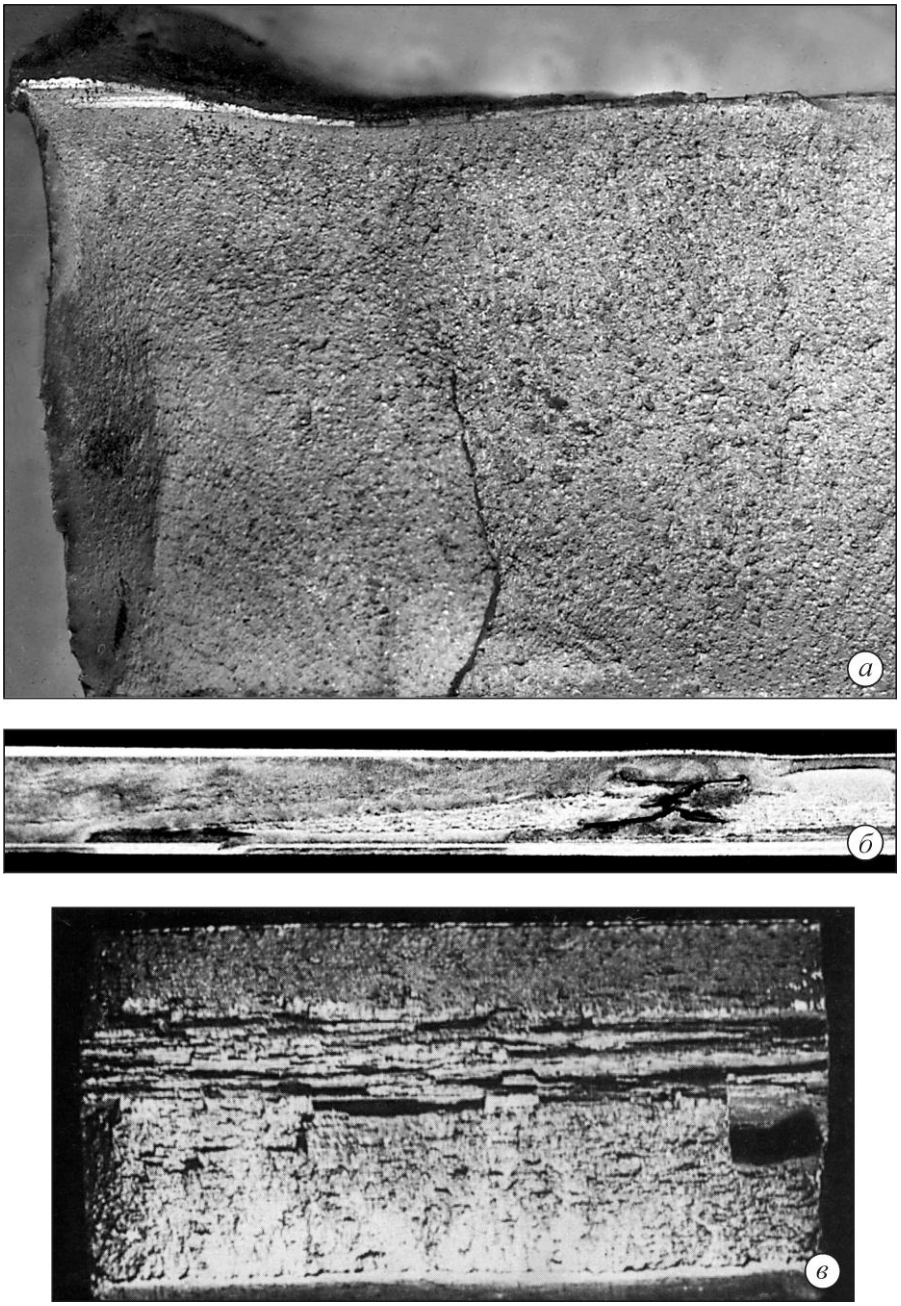


Рис. 4.16. Холодные трещины:
а – в отливке (сталь), излом; *б* – в прокате (алюминиевый сплав) – поперек направления деформации, излом; *в* – в прокате (алюминиевый сплав) – вдоль направления деформации, излом × 5; *г* – закалочная трещина в прокате (сталь), макроструктура

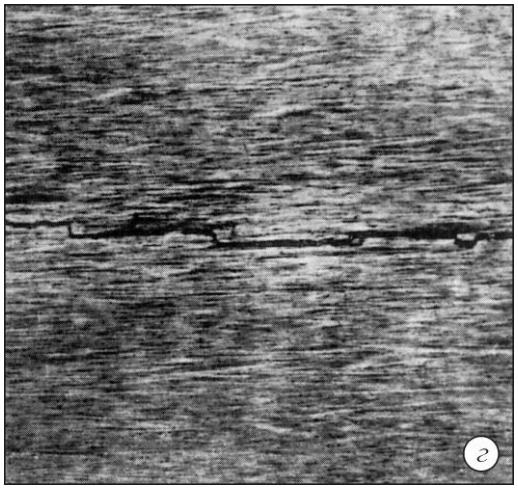


Рис. 4.16. Продолжение

Образованию деформационных трещин способствует пониженная пластичность металла.

По условиям образования различают горячие и холодные трещины.

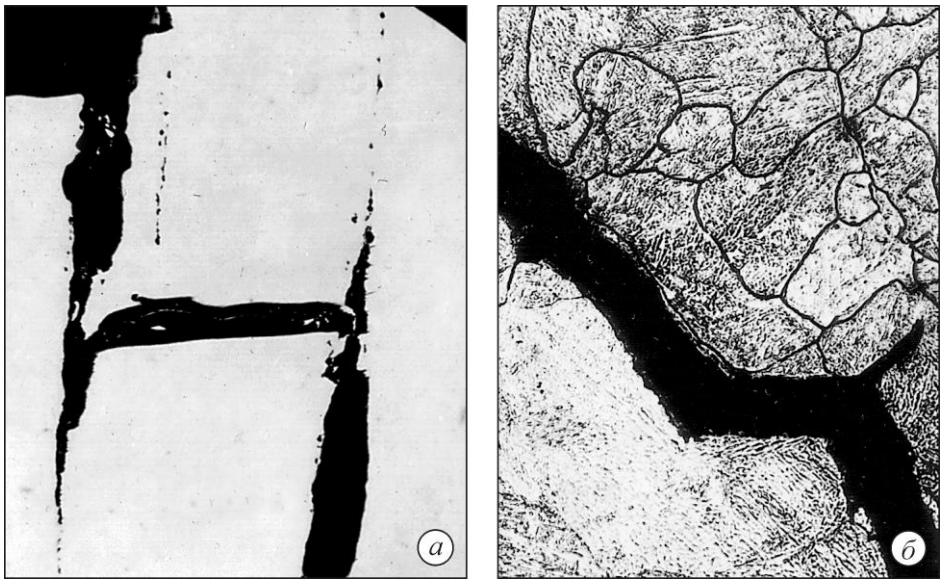


Рис. 4.17. Холодные трещины; микроструктура катаной стали:
а – × 100; *б* – × 400

Горячие трещины

Описание

Горячие трещины могут быть продольными и поперечными. Продольные трещины начинаются от головной или донной части слитка и распространяются на поверхности слитка параллельно его оси. Поперечные трещины распространяются поперек оси слитка.

Горячие трещины часто имеют клиновидно-извилистую форму (более широкую у поверхности и сужающуюся в глубь слитка, с окисленной поверхностью). Ширина раскрытия трещин у поверхности может достигать нескольких миллиметров, глубина – нескольких десятков миллиметров.

Поперечные трещины чаще всего располагаются в подприбыльной или донной частях слитка. Продольные трещины располагаются произвольно по высоте слитка, иногда могут быть прерывистыми. Продольные трещины обычно выявляются на поверхности слитка лишь после обдирки поверхности.

Поверхность излома горячих трещин сильно окислена и имеет, как правило, дендритное строение. На поперечных макрошлифах трещины имеют прерывистый ступенчатый вид и располагаются в междендритных участках. Они состоят обычно из нескольких прерывистых, ступенчато расположенных разрывов по высоте слитка, разделенных металлическими перемычками. При травлении на концах ступенек и по траектории трещин наблюдается ликвация легкоплавких компонентов. В сталях вокруг трещин наблюдается узкая обезуглероженная зона, обогащенная легкоплавкими компонентами.

Причины образования

К образованию горячих (кристаллизационных) трещин приводят растягивающие напряжения, возникающие вследствие перепада температур между наружными и внутренними слоями металла при охлаждении расплава. При этом большое значение имеют физико-химические и теплофизические свойства металла.

Возникновению горячих трещин способствуют:

повышенная газонасыщенность и загрязненность металла неметаллическими включениями;

повышенная скорость разливки металла (увеличивается возможность образования тонкой и неравномерной по толщине корки слитка);

пониженная теплопроводность металла (чем ниже теплопроводность, тем больше возрастают перепады температур и разница в напряжениях между наружным и внутренним слоями слитка);

склонность к большой линейной усадке (чем она больше, тем более высокие напряжения возникают в наружных слоях слитка);

небольшая толщина или разнотолщинность подкоркового слоя, образующегося на поверхности слитка (чем меньше толщина и больше разнотолщинность, тем меньше прочность наружных слоев слитка);

для сталей – повышенные содержания серы (свыше 0,035 %) и фосфора, увеличивающих ликвацию при кристаллизации.

Способы предупреждения

Для предупреждения образования горячих трещин необходимы:

соблюдение температурно-временных параметров заливки изложницы или формы;

соблюдение технологии выплавки и разливки металла, в том числе:
снижение загрязненности металла неметаллическими и интерметаллидными включениями;
повышение температуры расплава;
снижение скорости разливки металла;
разливка металла под слоем жидкого шлака (для сталей);
подогрев холодных изложниц;
эффективная работа прибылей.

Холодные трещины

Описание

Холодные трещины – разрывы в металле, идущие, как правило, от головной или донной частей слитка в глубь металла, часто перпендикулярно к поверхности с незначительным разветвлением. Поверхности трещин не окислены, гладкие, блестящие.

Дефект выявляется на макрошлифах и изломах.

Причины образования

Неравномерное охлаждение слитка, приводящее к росту внутренних напряжений и к разрушению металла в твердом состоянии.

Холодные (деформационные) трещины образуются:

при повышенных степенях обжатия;

при отклонении температур деформации от оптимальных;

при наличии внутренних концентраторов напряжений в виде неметаллических включений, рыхлот, плен, оксидов и т.д.;

неравномерный прогрев заготовки из-за быстрой скорости нагрева, вызывающей внутренние напряжения между горячими и холодными зонами металла;

неполный прогрев заготовки по сечению, вызывающий в процессе деформации возникновение «холодных» участков металла во внутренних зонах, имеющих пониженную пластичность;

концентрация напряжений на границах раздела между зонами с крупно- и мелкокристаллической структурой.

Образованию холодных (деформационных) трещин способствует пониженная пластичность металла при температурах деформации.

Способы предупреждения

Для недопущения образования холодных трещин необходимы:
повышение пластичности металла путем повышения чистоты литого металла;
повышение структурной однородности металла;
снижение уровня остаточных напряжений;
проведение гомогенизирующего отжига;
выбор оптимальных температурно-временных параметров деформации.

Способы исправления горячих и холодных трещин

В готовой металлопродукции дефект не исправляется. Закрытые холодные трещины в промежуточных заготовках, обнаруженные неразрушающими методами контроля, могут быть частично или полностью заварены в процессе даль-

нейшей деформации при оптимальных термодеформационных режимах. Закрытые горячие трещины не устраняются.

Открытые неглубокие трещины устраняются шлифовкой, строжкой или огневой зачисткой и, при необходимости, завариваются.

Влияние на механические свойства

Дефект резко снижает все механические свойства в направлении, перпендикулярном плоскости трещины. В отдельных случаях он вызывает полное разрушение детали или заготовки.

4.12. ВОЛОСОВИНЫ

Описание

Волосовины – дефекты в виде волосовидных нитевидных несплошностей в металле, расположенных вдоль направления деформации и наблюдаемых в форме прерывистых или сплошных нитевидных поверхностных трещин (рис. 4.18). Внутренние волосовины выявляются методами неразрушающего контроля или

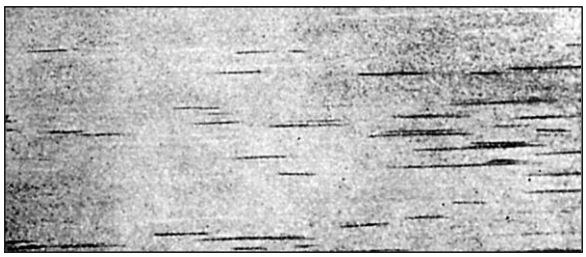


Рис. 4.18. Волосовины на поверхности листа, выявленные травлением, сталь; внешний вид

на макрошлифах. Контроль на наличие внутренних волосовин может осуществляться с применением ступенчатой строжки, после которой они наблюдаются визуально. Контроль поверхностных волосовин проводится люминесцентным методом и методом красок.

Причины образования

Волосовины в деформированном металле являются следствием нарушений технологии выплавки и разливки металла (разливка металла с повышенной загрязненностью и газонасыщенностью) и технологии температурно-деформационной обработки слитка.

Способы предупреждения

К способом предупреждения образования волосовин относятся:
строгое соблюдение технологии раскисления и модифицирования;
соблюдение технологии охлаждения слитка;
защита струи и зеркала металла от насыщения газом при разливке;

Соблюдение технологии нагрева и температурно-деформационных параметров прокатки и охлаждения деформированного металла.

Способы устранения

Поверхностные волосовины могут быть устранены механической строжкой (фрезерованием) и зашлифовкой. Внутренние волосовины не устраняются, и металл бракуется.

Влияние на механические свойства

Дефект снижает механические свойства металла.

4.13. СКВОРЕЧНИК

Описание

Скворечник – дефект в виде ромбического разрыва металла с широким раскрытием (рис. 4.19). Имеет сглаженные и окисленные стенки, выходящие на боковую поверхность проката и прессованных полуфабрикатов. На макрошлифах и в изломах скворечник имеет вид несплошности (свища) в металле. В месте дефекта наблюдается повышенное окисление, а в сталях – обезуглероживание поверхностного слоя металла.

Дефект выявляется визуально.

Причины образования

Дефект возникает вследствие раскрытия внутренних трещин (надрывов) в металле при его горячей деформации. Появлению скворечников способствует недостаточный нагрев слитков, снижающий пластичность центральных слоев металла при горячей деформации. Наиболее склонны к образованию скворечников высоколегированные стали и сплавы.

Способы предупреждения

Для предупреждения образования дефекта необходимы:

соблюдение технологии раскисления и модифицирования, технологии разливки и кристаллизации металла;

обеспечение равномерного и достаточного прогрева слитков перед горячей деформацией;

повышение качества металла слитков с целью предотвращения возникновения внутренних надрывов:

создание однородной структуры слитков;

повышение чистоты металла по неметаллическим и интерметаллидным включениям, которые могут служить очагами зарождения разрушения.

Способы устранения

Дефект не исправляется. Единичные скворечники вырезаются при раскрое проката.

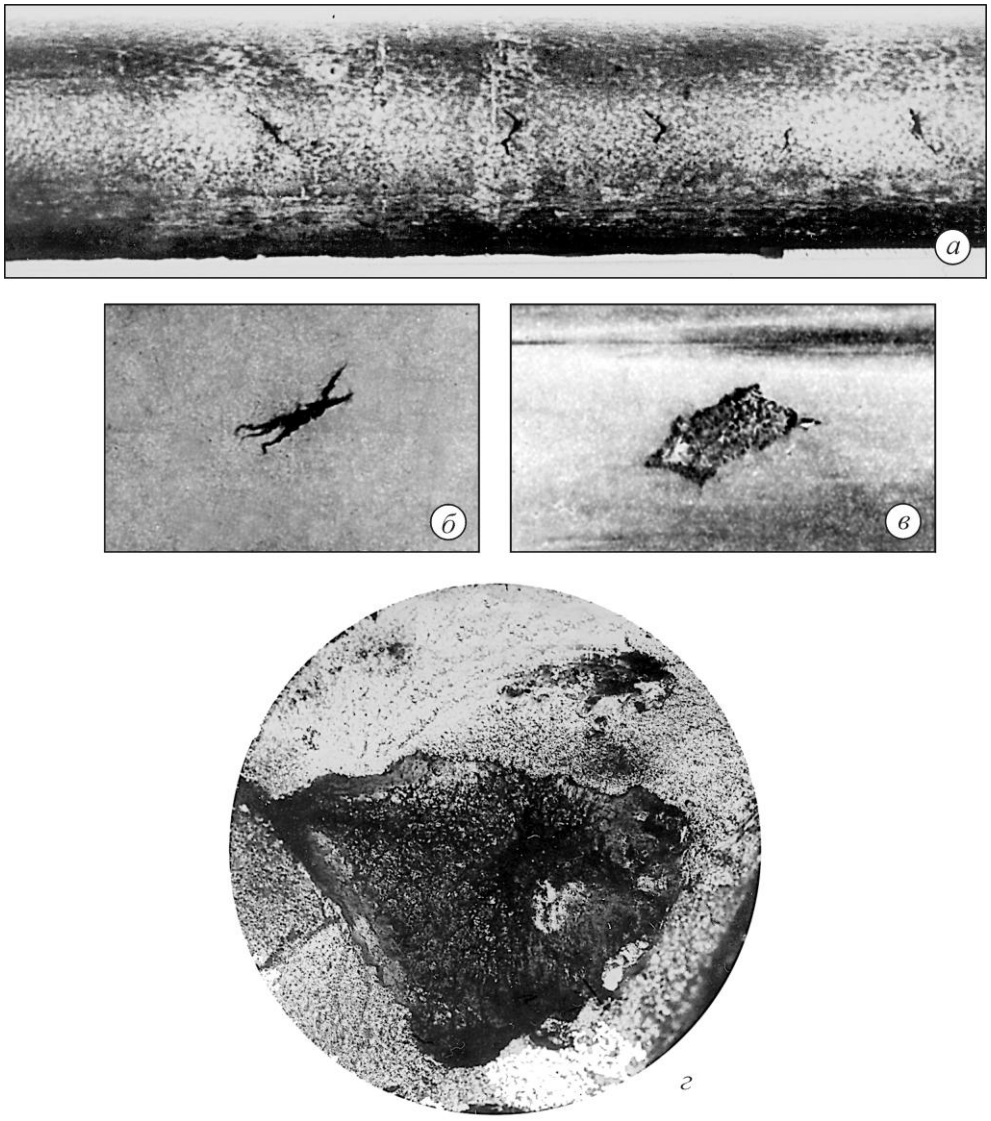


Рис. 4.19. Скворечники:
а – на поверхности прутка, алюминиевый сплав, внешний вид; *б, в* – в продольном сечении проката, сталь, темплет; *г* – в виде треугольной воронки, прокат, сталь, излом

Влияние на свойства

Дефект резко снижает все механические свойства металла в направлении, перпендикулярном оси дефекта.

4.14. НАДРЫВЫ

Описание

Надрывы – многочисленные, периодически повторяющиеся внутренние разрывы с широким раскрытием в металле, расположенные поперек направления деформирования (рис. 4.20). (Выход надрывов на поверхность металла называют «скворечники».)

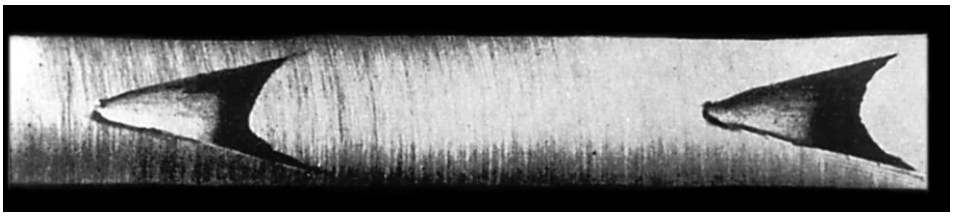


Рис. 4.20. Надрывы в продольном сечении прутка, алюминиевый сплав, темплет

Дефект выявляется методами просвечивания и идентифицируется на макрошлифах.

Причины образования

Образование надрывов обусловлено пониженной пластичностью центральных слоев металла из-за недостаточного прогрева слитков (часто встречается при индукционном нагреве прессуемых заготовок).

Способы предотвращения

Для предотвращения возникновения надрывов необходимы:
соблюдение температурно-скоростных режимов прессования;
обеспечение равномерного прогрева заготовок.

Способы устранения

Дефект не устраняется. Единичные надрывы вырезаются.

4.15. РАССЛОЕНИЯ

Описание

Расслоения – представляют собой несплошности (раскатанные или расплющенные пустоты литого металла), ориентированные строго вдоль направления деформации и проявляющиеся в изломе в виде трещин (рис. 4.21–4.23).

Дефект наблюдается в деформированном металле.

Дефект проявляется в виде трещин в изломах металла, перпендикулярных направлению деформации, и на макрошлифах, также перпендикулярных к направлению деформации. В изломах, параллельных направлению деформации, имеют вид плоских вытянутых участков с гладкой поверхностью светло-серого блестящего или матового цвета.

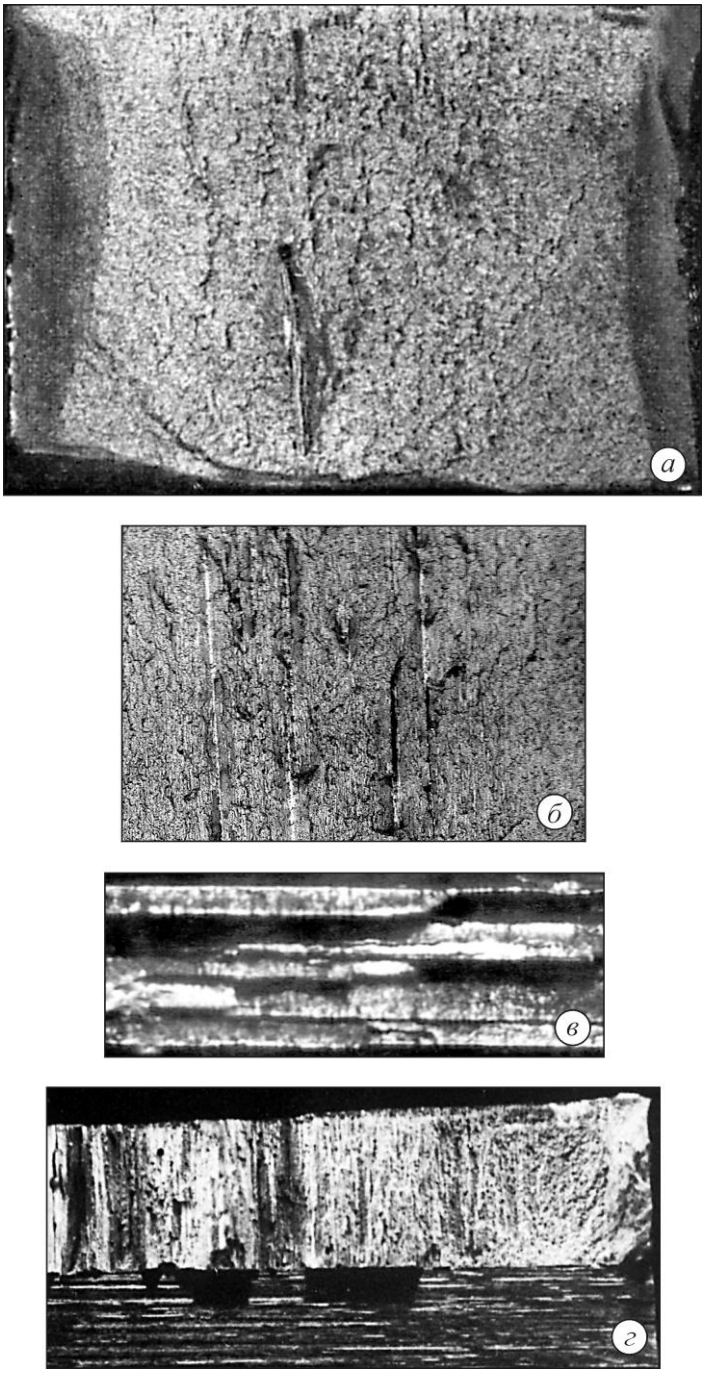


Рис. 4.21. Расслоения (в изломе):
а, б – поперек направления деформации (*а* – единичные расслоения; *б* – множественные); *в* – вдоль направления деформации; *г* – по толщине проката; *д* – в штамповке; *а, б* – сталь; *в–д* – алюминиевый сплав

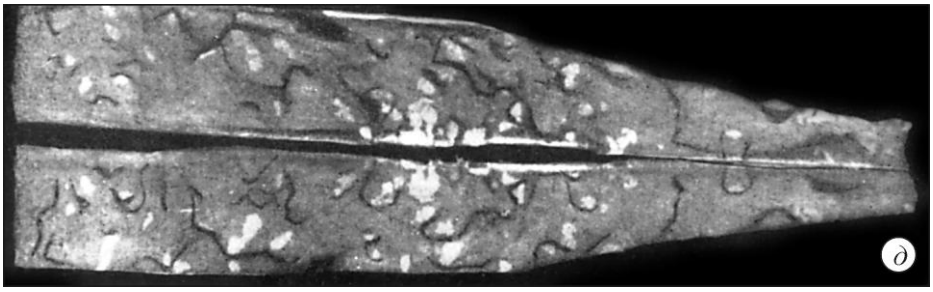


Рис. 4.21. Продолжение

Крупные расслоения в прокате, поковках и штамповках могут быть выявлены ультразвуковым методом контроля.

Причины образования

Расслоения образуются вследствие раскатки при деформации усадочных раковин, рыхлости, газовых пузырей, неметаллических и металлических включений, имевшихся в слитке, которые служат очагами зарождения несплошностей в прокате. Дефект преимущественно располагается в центральной части заготовок, обладающей пониженной пластичностью. Возможность образования расслоений увеличивается при наличии факторов, препятствующих их завариванию при горячей деформации:

повышенном газосодержании и содержании вредных примесей и неметаллических включений, снижающих пластические характеристики металла в центральных зонах заготовок под деформацию;

отклонении режимов деформации металла от оптимальных.

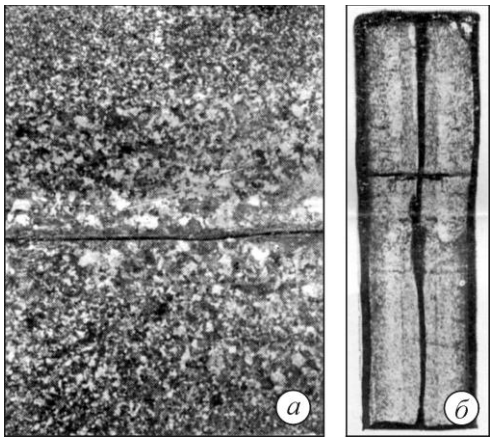


Рис. 4.22. Расслоения в прокате (никелевый сплав):
а – макроструктура; *б* – излом

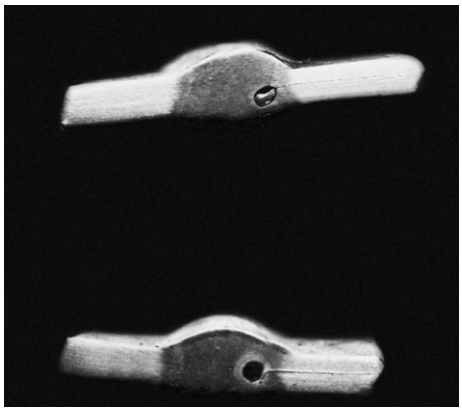


Рис. 4.23. Поры, вызванные расслоениями в свариваемых листах (алюминиевый сплав), макроструктуры

Способы предупреждения

Для предупреждения образования несплошностей в литом металле, следствием которых являются расслоения, рекомендуется:

применение оптимальной формы изложниц с обеспечением минимальной усадочной раковины;

соблюдение температурно-временных параметров разливки и кристаллизации металла;

снижение газонасыщенности металла;

повышение чистоты металла по неметаллическим и интерметаллическим включениям;

уменьшение скорости и неравномерности деформации при прокатке, ковке и штамповке.

При деформировании сталей длительное пребывание слитков при высоких температурах (ниже критической температуры образования камневидного излома) способствует завариванию пор и устранению несплошностей.

Способы исправления

В готовых изделиях дефект не исправляется. Допустимость расслоений в металле определяется требованиями технических условий.

При увеличении степени деформации металла наблюдаются раскатывание несплошностей и их частичное либо полное заваривание.

Влияние на механические свойства

Дефект не оказывает заметного влияния на механические свойства деформированных полуфабрикатов в продольном и поперечном направлениях; по толщине деформированных полуфабрикатов все механические свойства снижаются, причем степень снижения зависит от размера площади, занятой дефектом в сечении образца. При наличии расслоений резко снижается сопротивление разрушению металла в конструкциях в высотном направлении.

Выходя на кромку свариваемого металла и попадая в зону сварного шва, расслоения вследствие содержащихся в их полости газов могут вызывать поры и свищи в сварном шве.

4.16. ЗАКАТЫ

Описание

Закаты – наплыв металла, представляющий собой прикатанный налип или выступ металла на поверхности проката (рис. 4.24).

Дефект выявляется визуально. Идентифицируется на макрошлифах в плоскости, параллельной направлению прокатки, в виде несплошностей с плотно сжатыми стенками, расположенных под острым углом к поверхности проката.

Причины образования

Закаты образуются вследствие:

неровностей на поверхности слитка;

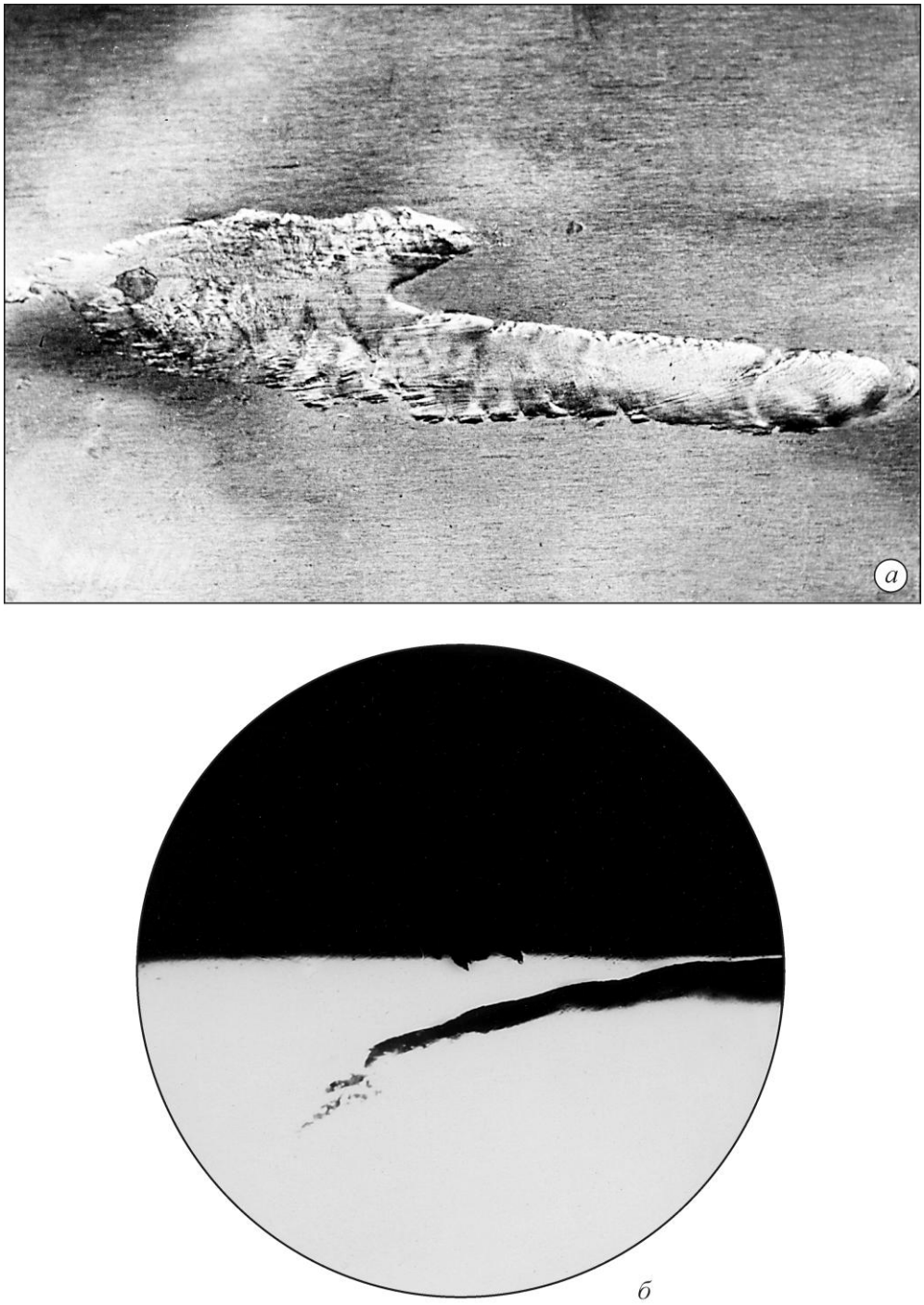


Рис. 4.24. Закаты:
а – выкрошившийся закат, алюминиевый сплав, поверхность листа; *б* – продольное сечение плиты, алюминиевый сплав, макроструктура

закатывания в полосы налипов, образовавшихся на поверхности валков;

закатывания в полосу кусочков металла, отколовшихся от проката при растрескивании кромок.

Способы предупреждения

Для предупреждения образования закатов необходимы:
очистка поверхности валков от налипов металла;
обеспечение тщательной фрезеровки слитков;
повышение культуры производства.

Способы устранения

Дефект устраняется зачисткой, если глубина заката не превышает допуска на толщину проката в соответствии с требованиями технических условий.

4.17. ФЛОКЕНЫ

Описание

Флокены – дефекты в литых и деформированных сталях в виде внутренних разрывов (трещин) в металлопродукции (прокат, поковки), образующиеся в результате водородного охрупчивания металла (рис. 4.25). Размер и строение поверхности флокенов зависят от марок стали, их газонасыщенности и загрязненности.

При совпадении поверхности разрушения с плоскостью трещины флокены имеют вид четко очерченных участков круглой или овальной формы серебристого матового или блестящего цвета. Цвет флокенов зависит от состава стали и режима термической обработки. Строение поверхности флокенов зависит от размеров первичного аустенитного зерна и может быть грубо- или мелкокристаллическим. На поверхности разрушения (в изломе), перпендикулярной плоскости флокенов, флокены имеют вид очень тонких волосовидных трещин. На макрошлифах в этой же плоскости флокены имеют вид коротких зигзагообразных тонких трещин. На поверхности разрушения, параллельной плоскости флокена, они имеют вид четко очерченных «светлых пятен».

Флокены образуются чаще всего в массивной зоне металлоизделия.

В прокате плоскость флокенов обычно ориентирована параллельно плоскости прокатки. В кованом металле их расположение меньше связано с направлением деформации. Флокены наблюдаются и свойственны в основном легированным маркам стали. Они имеют размеры от долей миллиметра до 30 мм.

Флокены выявляются методами ультразвукового контроля.

Причины образования

На процесс образования флокенов влияют главным образом следующие факторы:

грубые нарушения заданных технологических параметров выплавки и разливки жидкой стали, а также повышенная загрязненность и газонасыщенность металла;

недостаточная защита струи металла при разливке;

нарушения технологии температурно-деформационной обработки слитка;

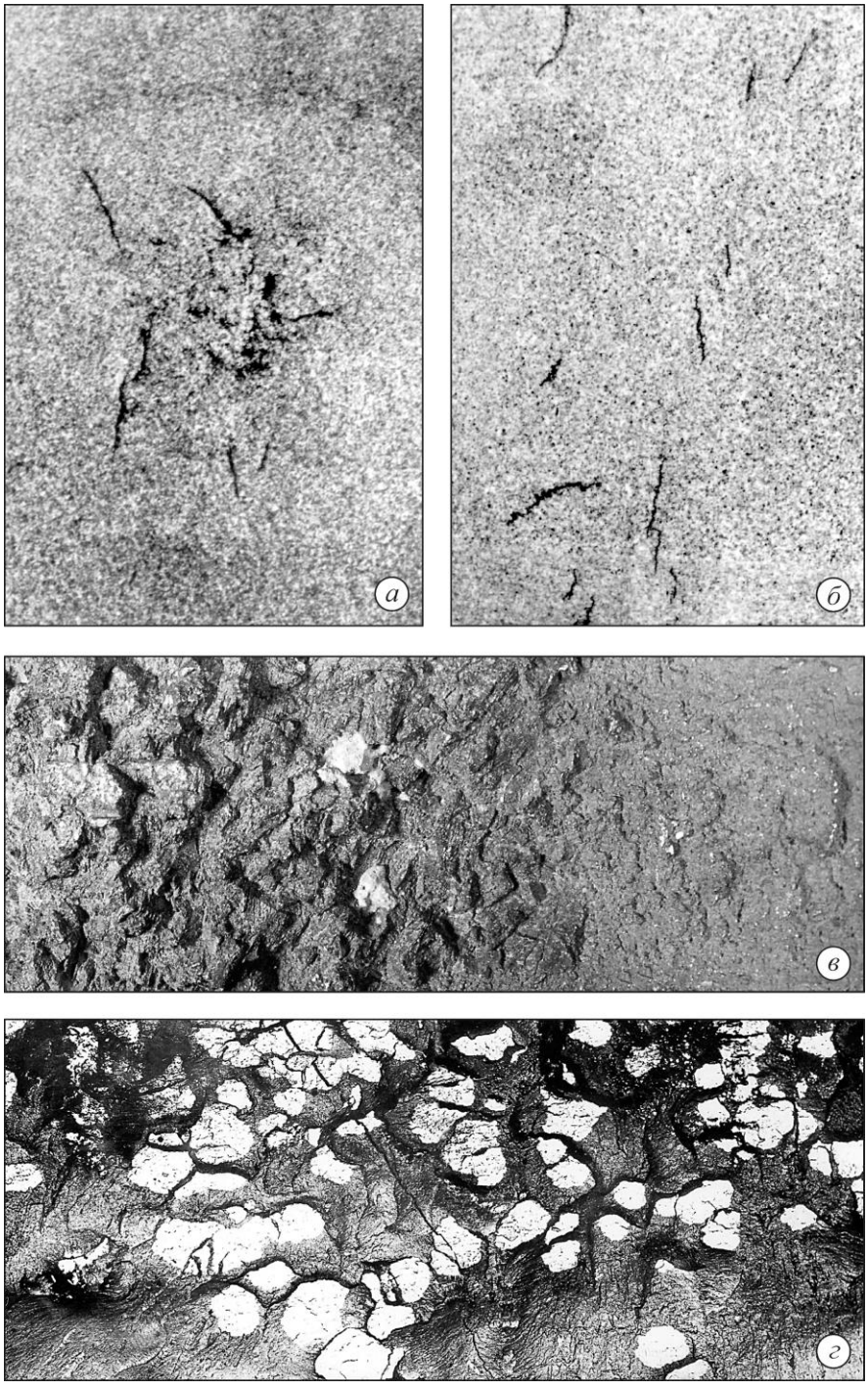


Рис. 4.25. Флокены (сталь):
а, б – флокены в прокате, макроструктуры; *в* – единичные флокены в поковке, излом; *г* – скопления флокенов в прокате, излом

повышенное содержание водорода (чем больше степень газонасыщенности, тем выше флокеночувствительность стали);

повышенное содержание элементов, увеличивающих растворимость водорода в жидкой стали и не образующих с водородом соединений или образующих нестойкие соединения (молибден, никель, вольфрам, марганец, кобальт);

повышенное содержание неметаллических включений, особенно вытянутых или пленочных сульфидов и оксисульфидов;

границы раздела металл – неметаллические включения, являющиеся своеобразными линзами-барьерами на пути диффузии атомарного водорода и накопителями молекулярного водорода, давление в которых достигает 200–400 МПа; в этих участках создаются условия для водородного охрупчивания металла, которые при наличии внутренних напряжений завершаются образованием флокенов;

повышенное содержание легирующих элементов, понижающих температуру превращения аустенита при охлаждении (углерод, молибден, никель, кремний, вольфрам, бор, хром, марганец), так как увеличение гистерезиса A_{c3}–A_{r3}, как и при быстром охлаждении, приводит к образованию низкотемпературных продуктов превращения аустенита (мартенсит, нижний бейнит), в которых скорость диффузии водорода очень мала;

различные виды деформации, оказывающие влияние на ход диффузионных и окклюзионных процессов (увеличение внутренних напряжений повышает окклюзионную способность микрообъемов металла; так, при напряжениях, равных 0,3–0,6 $\sigma_{0,2}$, резко сокращается время образования флокенов при повышенном содержании в металле водорода).

Способы предупреждения

Для предупреждения образования флокенов необходимы:

соблюдение технологии рафинирования, раскисления и модифицирования жидкой стали (для отдельных марок стали применяют внепечную вакуум-шлаковую обработку металла), обеспечивающей минимальное содержание водорода (< 2 см^3 в 100 г металла) и низкое содержание серы, фосфора и растворенного кислорода;

контроль за всем процессом подготовки, смазки и сборки промежуточной емкости и кристаллизатора;

уточнение режимов охлаждения и скорости качания кристаллизатора, а также режима вторичного охлаждения и скорости вытягивания слитка из кристаллизатора;

организация защиты струи и зеркала металла при разливке стали, а также достаточной просушки промежуточной емкости перед началом разливки;

соблюдение температурно-временных параметров разливки и кристаллизации стали;

уточнение температурно-временных режимов охлаждения, выдержки и нагрева слитка под температурно-деформационную обработку;

соблюдение технологии прокатки, штамповки, ковки и охлаждения металлопродукции после деформационной обработки слитка.

Способы устранения

В деформированных полуфабрикатах дефект не исправляется, и продукция бракуется. В литых изделиях флокены могут быть зачищены и заварены, если это допускается техническими условиями.

Влияние на свойства

Присутствие флокенов снижает механические свойства металла пропорционально площади дефектов. Особенно резкое снижение свойств при наличии флокенов в металле наблюдается в сварных соединениях, способствуя появлению трещин в околошовной зоне.

4.18. ПЛЕНЫ

Описание

Плены – дефекты поверхности, представляющие собой сравнительно тонкие плоские металлические отслоения языкообразной или округлой формы. В литом металле плены могут располагаться в любой части поверхности отливки (рис. 4.26). Плены, образующиеся по периметру отливки, называют *заворотами корки, рубцами, наплывами*. В деформированном металле (прокат, поковка) плены могут частично привариваться к основному металлу. В этом случае их размеры могут быть различными: от еле заметных чешуек до 100 мм и более по длине и по ширине (особенно на толстых листах). В некоторых случаях в зоне приварки плены наблюдается обезуглероженный слой металла с повышенным содержанием неметаллических включений.

Дефект характерен для литых и деформированных сталей. Выявляется визуально или на макро- и микрошлифах.

Причины образования

Плены образуются вследствие:

отклонения технологии выплавки и разливки стали от заданной;

разливки холодного металла прерывистой струей;

неудовлетворительной зачистки и зашлифовки поверхности металла перед нагревом слитка под прокатку;

затекания жидкого металла под отслоившийся формовочный материал при производстве отливок.

Среди основных факторов, влияющих на образование плен при прокатке, можно выделить следующие:

плены на поверхности слитка;

скопления сотовых пузырей в подкорковой зоне слитка и последующее их вскрытие в процессе горячей деформации;

неудовлетворительная калибровка валков и дефектная форма кромок слитка (подката);

наличие рванин и трещин на поверхности слитка.

Способы предупреждения

Для предупреждения образования плен необходимы:

соблюдение технологии рафинирования, раскисления и модифицирования жидкой стали, а также технологии разливки и защиты струи и зеркала металла при разливке стали;

соблюдение технологии подготовки изложницы или литейной формы;

соблюдение требований по чистоте поверхности слитка (поковки) перед нагревом и деформационной обработкой.

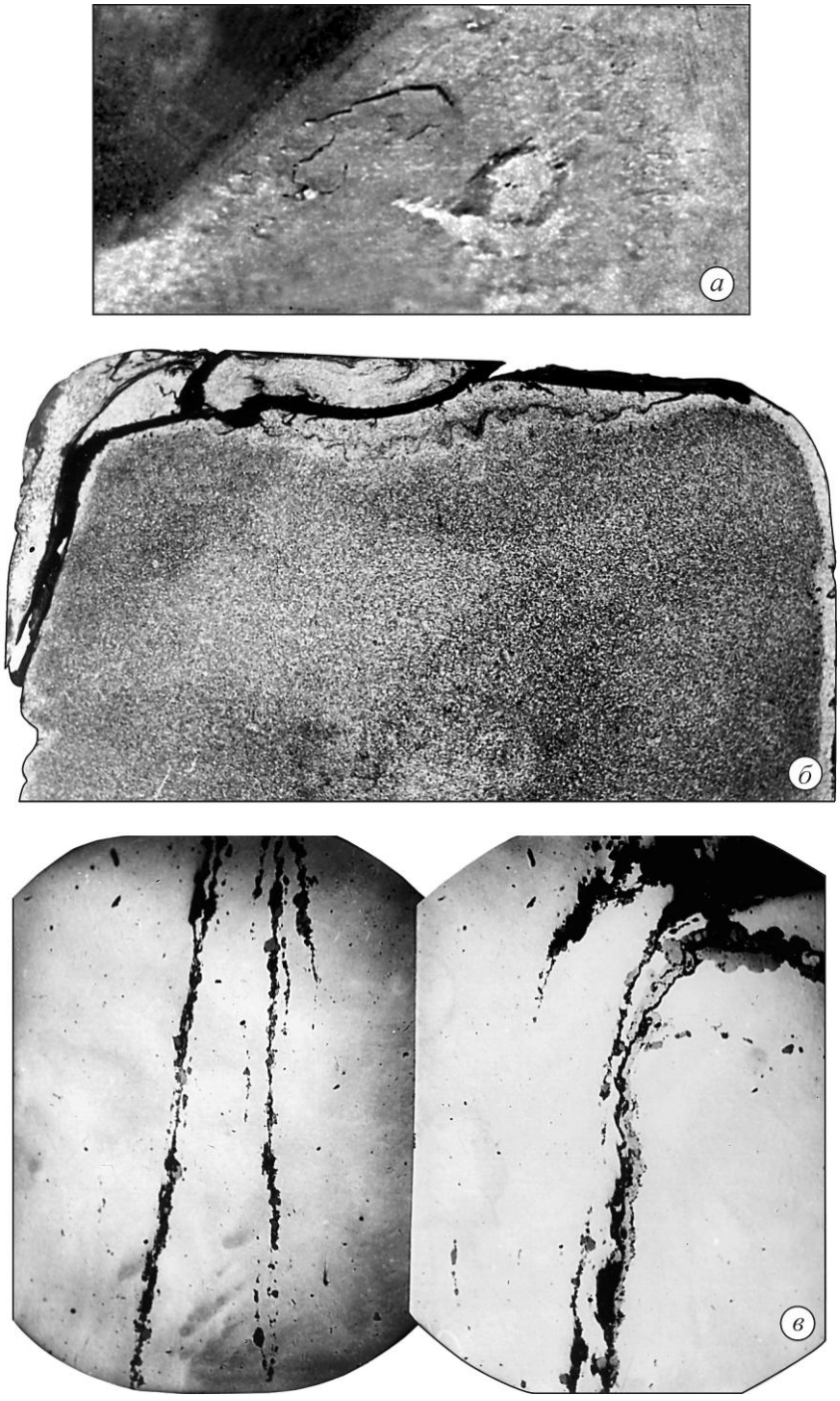


Рис. 4.26. Плены (сталь):
а – плена на поверхности отливки, внешний вид; *б* – плены на поверхности отливки, темплет; *в* – микроструктура металла по месту плены, × 100

Способы устранения

Дефект не исправляется. Плены могут быть удалены с поверхности отливки или деформированного металла путем строжки или зашлифовкой поверхности при плюсовых допусках по толщине; при минусовых допусках по толщине металла производятся вырубка плен, зачистка и заварка ремонтных мест.

Влияние на свойства

Плены могут вызывать отслоения металла при температурно-деформационной обработке слитка, проката, поковки.

Дефект снижает механические и служебные свойства металлопродукции.

4.19. НАСЛОЕНИЯ

Описание

Наслоения – загрязнения в подповерхностных зонах прессованного металла, вытянутые вдоль направления прессования и располагающиеся по всему пери-

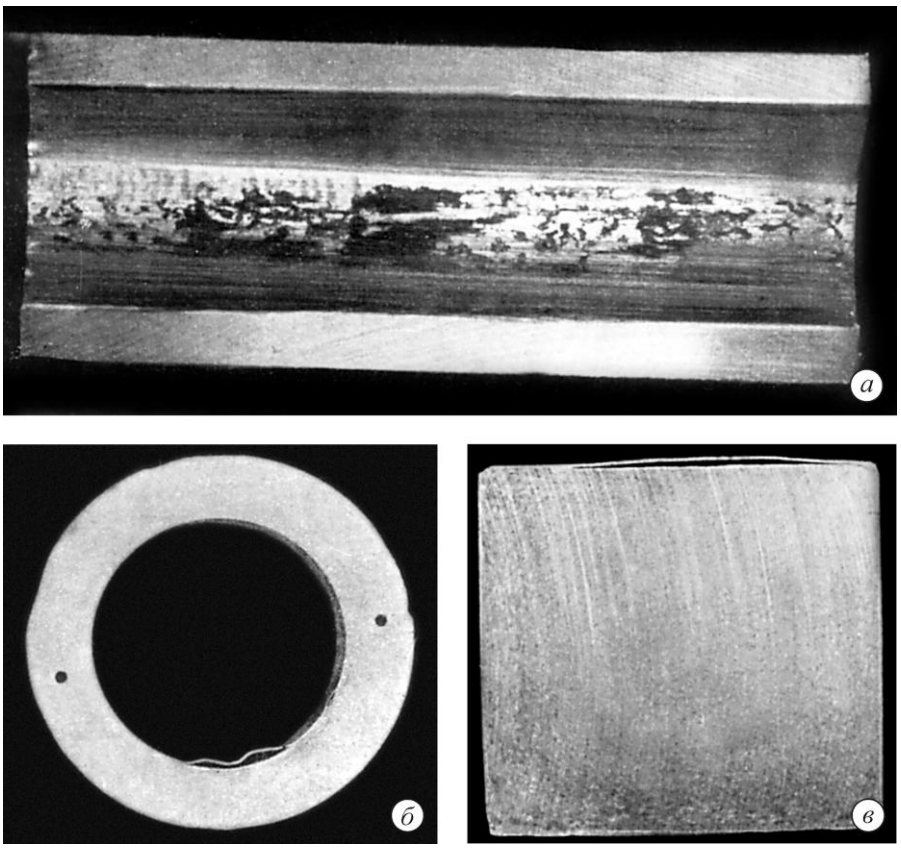


Рис. 4.27. Наслоения (алюминиевые сплавы):
а – наслоения графита, внутренняя поверхность трубы, внешний вид; *б* – наслоение, вызванное попаданием смазки, поперечное сечение трубы, макроструктура; *в* – наслоение, вызванное запрессовкой загрязнения, поперечное сечение профиля, макроструктура

метру или занимающие значительные участки поверхности прессованного полуфабриката (рис. 4.27). В большинстве случаев наслоения сопровождаются отшелушиванием верхнего тонкого слоя металла.

Дефект характерен для алюминиевых сплавов.

Дефект выявляется визуально или на макрошлифах в виде темных полос загрязненного металла, окантовывающих частично или полностью периметр прессованного полуфабриката.

Причины образования

Наслоения образуются вследствие:

вовлечения в подповерхностные слои прессуемого полуфабриката загрязненных смазкой и графитом поверхностных слоев слитка;

выпрессовывания металла из «мертвой зоны» контейнера;

попадания смазки во втулку контейнера;

избытка твердой составляющей в технологической смазке.

Способы предотвращения

Для предотвращения образования дефекта необходимы:

контроль размеров втулки контейнера, исключающий ее местные разработки;

тщательная центровка прессового инструмента;

повышение культуры производства (тщательная очистка поверхности слитка перед прессованием, очистка втулки контейнера).

Способы устранения

Дефект не устраняется.

Влияние на свойства

Дефект снижает механические свойства металла. При попадании наслоений в зону сварного шва может вызывать свищи и поры.

4.20. КРУПНОКРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА (РАЗНОЗЕРНИСТОСТЬ)

Описание

Крупнокристаллическая структура – зоны металла с крупным зерном (рис. 4.28; 4.29). Может наблюдаться как по всему сечению, так и в виде отдельных участков или по периферии полуфабриката (крупнокристаллический ободок). Наблюдается в прессованных, штампованных и кованых полуфабрикатах.

Дефект выявляется на макрошлифах и контролируется по эталонным макроструктурам. Крупнокристаллическая структура в периферийных зонах выявляется после травления в виде местного растрава поверхности. Дефект характерен для алюминиевых и никелевых сплавов.

Причины образования

Образованию крупнокристаллической структуры способствуют:

неоднородность деформации металла, приводящая к образованию зон с критической степенью деформации, в которых происходит резкий рост зерен при рекристаллизации;

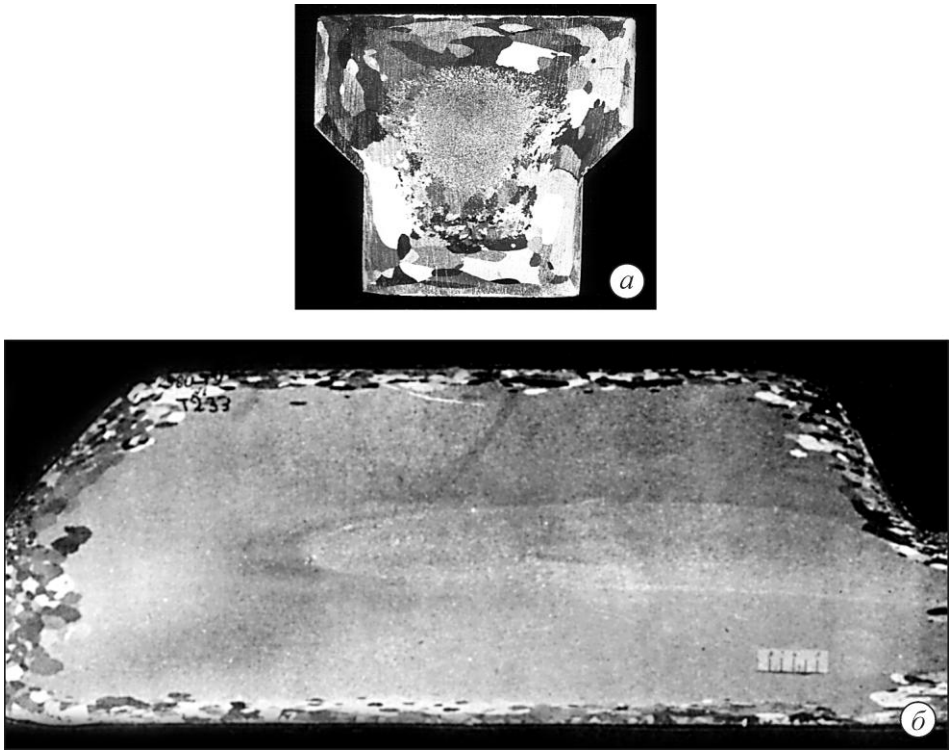


Рис. 4.28. Крупнокристаллическая (разнозернистая) макроструктура (алюминиевый сплав):
а – на большей части сечения профиля; *б* – по периферии сечения профиля

наличие крупнокристаллического ободка в прессованной заготовке под штамповку;

недостаточная степень укова поковок (ниже 3–4);

наличие веерной структуры в литой заготовке под штамповку.

Способы предотвращения

Образование дефекта можно предотвратить путем:

использования заготовок с однородной структурой;

перевода заготовок в полностью рекристаллизованное состояние за счет деформации при пониженной температуре и последующего отжига;

нагрева под закалку штамповок и поковок в нижней области допустимого при нагреве под закалку интервала температур и сокращения продолжительности выдержки при нагреве;

выбора оптимальной формы и величины заготовки, обеспечивающих равномерное перемещение металла при деформировании;

повышения температуры конца штамповки.

Способы устранения

Дефект не устраняется. Допустимость дефекта определяется по результатам контроля механических свойств.

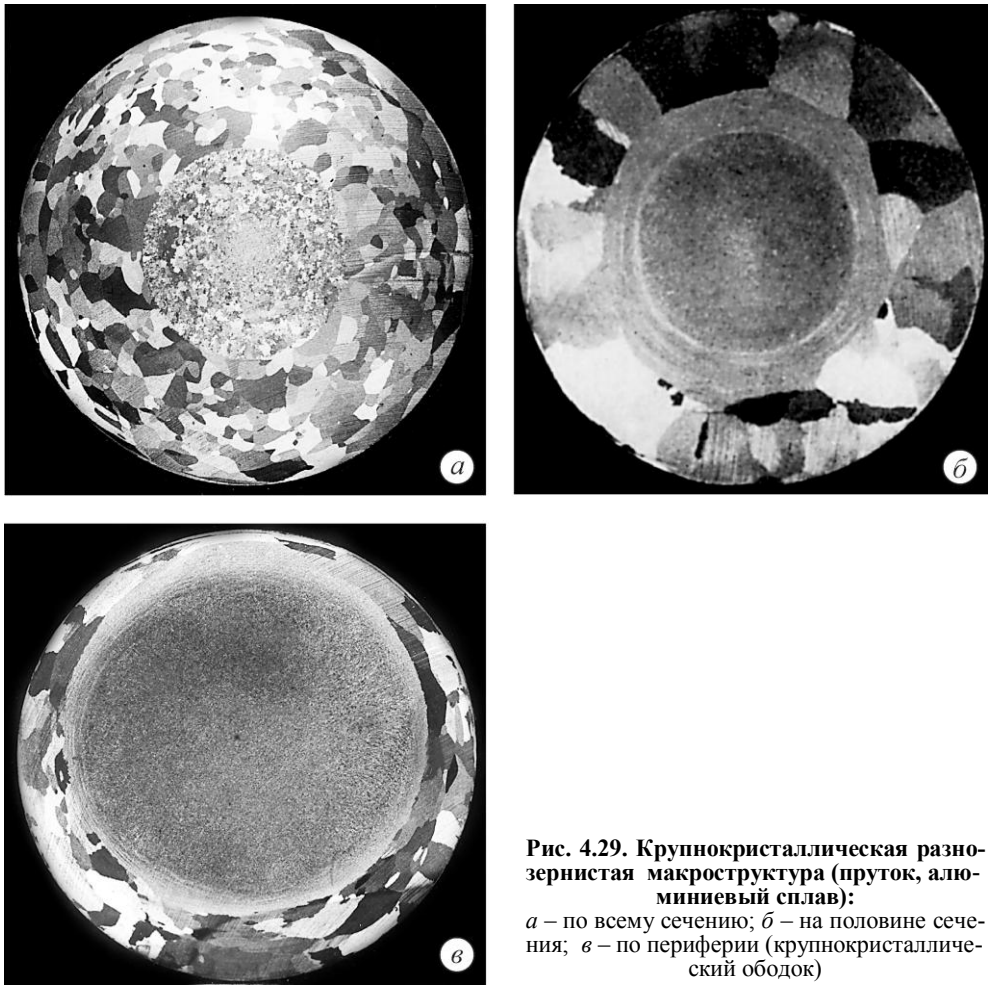


Рис. 4.29. Крупнокристаллическая разнозернистая макроструктура (пруток, алюминиевый сплав):
а – по всему сечению; *б* – на половине сечения; *в* – по периферии (крупнокристаллический ободок)

Влияние на свойства

В зонах металла с крупным зерном могут снижаться механические свойства, в том числе предел выносливости.

4.21. ПЕРЕГРЕВ

При воздействии на металл высоких температур в нем происходят структурные изменения, оказывающие влияние на качество металла, которое выявляется по виду излома. Результатом сильного перегрева металла является образование нафталинистого или камневидного изломов. Перегрев может возникать как в процессе изготовления полуфабрикатов, так и при сварке вследствие перегрева свариваемого металла вблизи зоны сплавления.

Нафталинистый излом

Описание

Нафталинистый излом – однородная поверхность разрушения, характеризующаяся наличием крупных гладких плоских участков (фасеток) с характерным блеском, напоминающим блеск нафталина (рис. 4.30; 4.31). Проходит по кристаллографическим плоскостям крупных зерен, образовавшихся при высокой температуре, и не имеет явных признаков макропластической деформации.

Наблюдается в литых и деформированных конструкционных сталях.

Крупные плоские участки в изломе имеют характерный оттенок и селективный блеск, напоминающий кристаллы нафталина, изменяющийся при изменении угла падения света.

В литой стали рисунок излома совпадает с очертаниями зерен при травлении микрошлифа реактивом Кешиена. В изломе с селективным блеском, как и в микроструктуре, проявляется грануляционная структура литой стали.

В деформированых сталях нафталинистый излом встречается реже, причем обнаруживается на промежуточных стадиях передела, после нагрева перед горячей деформацией и быстрого охлаждения.

Условия и причины образования

Нафталинистый излом обусловлен наследованием продуктами распада текстуры крупных зерен аустенита после превращения $\gamma \rightarrow \alpha$. Наиболее устойчива текстура крупного зерна аустенита в мартенсите и бейните, менее устойчива – в феррите и еще менее устойчива – в перлите. В нафталинистом изломе разрушение происходит по мелким зернам α-фазы, объединенным в отдельные текстурированные группы в пределах объемов, отвечающих крупному зерну исходной структуры аустенита.

Различают первичный нафталинистый излом, наблюдающийся в литой стали, не прошедшей термической обработки, и вторичный нафталинистый излом, наблюдающийся в литой и деформированной сталях после перегрева при термической обработке.

Вторичный нафталинистый излом отличается от первичного равноосной формой фасеток, не связанной с характером кристаллизации стали.

Определяющим условием образования вторичного нафталинистого излома является перегрев, температура которого зависит от состава стали и особенностей плавки. При изменении соотношения свойств между границей и телом перегретых зерен аустенита в зависимости от термообработки (длительности пребывания при высоких температурах, скорости охлаждения, режимов отпуска и температуры испытания) образуются нафталинистые или камневидные (см. ниже) изломы.

Способы предупреждения

Наличие в литой термически необработанной стали первичного нафталинистого излома (как на отдельных участках, так и на всей поверхности) является нормальным явлением. Такой излом встречается в стали любого способа выплавки, и меры к его предупреждению не принимаются. Появление вторичного нафталинистого излома в литой и деформированной сталях связано с перегревом и его можно предупредить, только исключив перегрев металла при термической обработке.

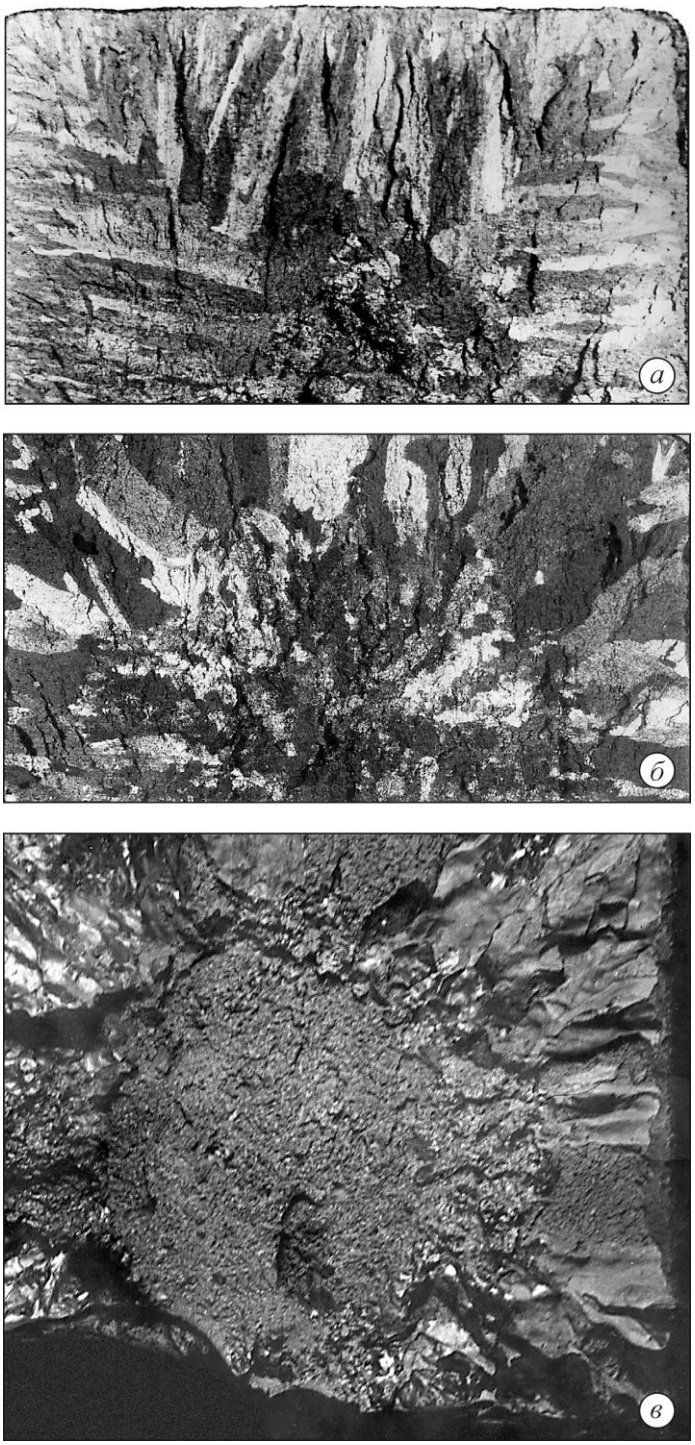


Рис. 4.30. Нафталинистый излом (литая сталь 30ХН3М, без термической обработки):
а – образование участка равноосных кристаллов в центральной зоне отливки при наличии узких столбчатых кристаллов в поверхностных зонах; *б* – образование грубых широких кристаллов в поверхностных зонах отливки, сохранивших столбчатую ориентацию; *в* – смешанный излом (нафталинистое строение по периферии и кристаллическое – в центре)

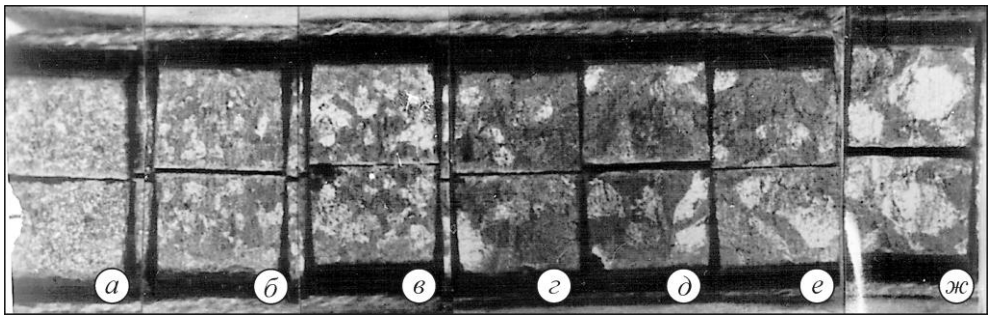


Рис. 4.31. Изменение размеров кристаллов в нафталинистых изломах (литая сталь 40ХНМ) при повышении температуры нагрева, °С:
а – 1200; *б* – 1220; *в* – 1240; *г* – 1260; *д* – 1280; *е* – 1300; *ж* – 1320

Способы исправления

Для исправления вторичного нафталинистого излома стали подвергают высокотемпературной нормализации или закалке (нагрев на 150–200 °С выше A_{c3}) с последующим высоким отпуском. В процессе нагрева происходит рекристаллизация аустенита, обусловленная его внутренним наклепом вследствие объемного изменения при фазовом превращении. Для устранения нафталинистого излома применяется также промежуточный отжиг.

Влияние на свойства

У сталей, имеющих нафталинистый излом, пластические характеристики и ударная вязкость понижены.

Камневидный излом

Описание

Камневидный излом – однородная поверхность разрушения, проходящая по границам грубых зерен, образованных при высоких температурах и обогащенных различными ограниченно растворимыми в аустените фазами в виде мелких частиц или пленок (рис. 4.32).

Наблюдается в литой и катаной стали.

Поверхность камневидного излома стали, охлажденной с высоких температур, гладкая, светло-серого цвета, чаще всего с металлическим блеском. Боковая утяжка в изломе либо отсутствует, либо очень мала. Огранка камневидных зерен наиболее четко проявляется после закалки и отпуска в широком диапазоне температур.

В литой стали зерна могут иметь более или менее правильную равноосную полиэдрическую форму (гречневидный излом) или вытянутую столбчатую форму (шестоватый излом). Однако в отдельных случаях (крупные отливки) встречаются грубозернистые изломы с неправильной, так называемой раковистой формой зерен.

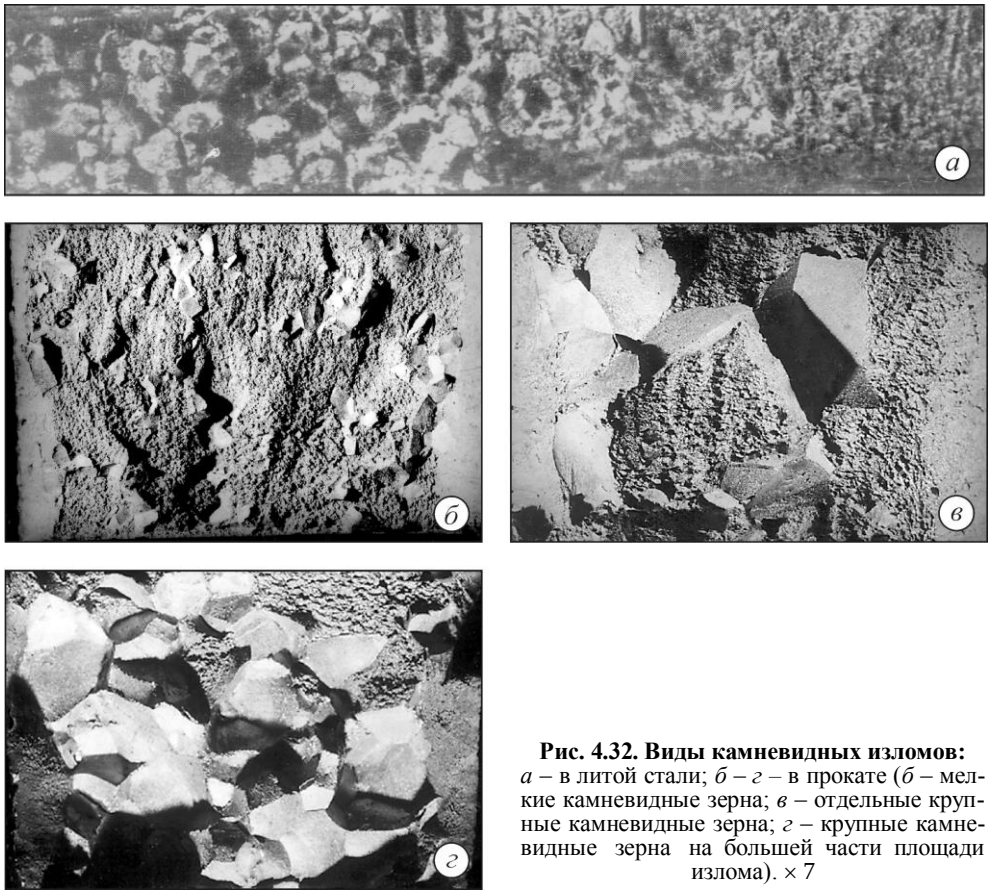


Рис. 4.32. Виды камневидных изломов:
а – в литой стали; *б* – *г* – в прокате (*б* – мелкие камневидные зерна; *в* – отдельные крупные камневидные зерна; *г* – крупные камневидные зерна на большей части площади излома). × 7

Камневидным изломам с блестящей поверхностью, например после закалки и охрупчивающего отпуска (500 °С), соответствует хрупкое межзеренное разрушение.

Условия и причины образования

Камневидный излом в литой стали может быть двух видов: первичный и вторичный. Первичный излом наблюдается до термической обработки и связан с образованием так называемой грануляционной структуры аустенита, формирующейся после кристаллизации при замедленном охлаждении в области высоких температур. На границах зерен выделяются избыточные, ограниченно растворимые в α-фазе нитриды, сульфиды, фосфиды, карбиды и некоторые легирующие элементы.

Возникновение вторичного излома связано с перегревом металла перед горячей деформацией (ковкой, штамповкой, прокаткой) и значительно реже с перегревом при термической обработке. При перегреве выше определенной критической температуры, как и при образовании первичного излома, происходит обо-

гащение вновь образованных зернограничных объемов различными выделениями. Пограничные выделения во вторичном изломе по природе и составу близки к наблюдаемым в первичном изломе, за исключением соединений, температура плавления которых выше температуры перегрева. Частицы выделений во вторичном изломе значительно мельче, чем в первичном. Вновь образованные зерна вторичного излома не связаны ориентационно с границами первоначально образованных зерен.

Критическая температура перегрева, при которой начинается образование вторичного камневидного излома, зависит от химического состава стали, способа выплавки, метода раскисления и, следовательно, степени чистоты стали, природы неметаллических включений и величины зерна.

Различают устойчивый камневидный излом, или камневидный излом первого рода, требующий для исправления нагрева до температуры несколько ниже критической, что редко осуществимо в практике термической обработки конструкционных сталей, и неустойчивый камневидный излом, или камневидный излом второго рода, который сравнительно легко исправляется последующей гомогенизацией либо высокотемпературной нормализацией. Устойчивость камневидного излома при последующей термической обработке тем выше, чем недостаточнее скорость охлаждения в процессе кристаллизации и непосредственно после нее, чем выше температура и больше продолжительность перегрева, чем больше в стали тугоплавких соединений, обогащающих зернограничные объемы.

Способы предупреждения

Для предупреждения образования первичного камневидного излома в литой стали необходимы:

снижение содержания никеля и, как правило, повышение содержания марганца;

раскисление стали редкоземельными элементами, связывающими серу в тугоплавкие соединения;

модифицирование стали и обработка жидкой стали синтетическим шлаком;

ускоренное охлаждение литой стали при затвердевании и после него до температур 1000–1200 °С.

Способы предупреждения образования вторичного камневидного излома сводятся главным образом к:

ограничению температуры нагрева (до критической температуры перегрева) стали перед горячей деформацией и при термической обработке;

проведению высокого отпуска – выше интервала температур обратимой отпускной хрупкости.

Способы исправления

Сталь, имеющая камневидный излом, может быть улучшена двумя путями: высокотемпературной гомогенизацией при 1100–1200 °С или горячей деформацией. Режим гомогенизации определяется степенью устойчивости камневидного излома: чем он более устойчив, тем более высокой должна быть температура нагрева и тем длительнее выдержка при этой температуре. При

этом в процессе гомогенизации постепенно растворяются зернограничные выделения, и после термического улучшения на фоне волокнистого излома наблюдаются в виде фасеток либо отдельные грани исходных зерен, либо участки этих граней.

При горячей деформации перегретой стали по мере увеличения степени деформации и понижения температуры ее окончания в изломах после термического улучшения наблюдается постепенное уменьшение камневидности (происходит постепенное разрушение границ перегретых зерен аустенита): сначала остаются отдельные грани, затем с повышением степени деформации – частички этих граней в виде матовых фасеток и, наконец, при достаточно интенсивной деформации и соответствующей температуре ее окончания следы камневидного излома полностью исчезают.

Сталь с камневидным изломом, образование которого связано с охрупчиванием при отпуске, исправляется нормализацией и последующим улучшением с высокотемпературным отпуском и ускоренным охлаждением.

На начальной стадии образования камневидного излома и на конечной стадии его устранения в изломе могут наблюдаться фасетки как элементы поверхности камневидного излома. Непосредственно после высокотемпературной обработки могут наблюдаться фасетки со светлой или блестящей поверхностью, указывающие на хрупкий характер разрушения. После улучшения с достаточно высокой температурой отпуска и ускоренным охлаждением наблюдаются матовые фасетки на фоне волокнистого излома; поверхность этих фасеток при большом увеличении имеет вязкий характер разрушения.

Влияние на механические свойства

При наличии в изломе участков с камневидным строением, имеющих блестящую или светло-серую поверхность, существенно снижаются ударная вязкость и пластичность стали. При матово-серой поверхности камневидных зерен снижение ударной вязкости и пластичности менее существенно. Чаще всего наблюдается закономерность: чем большая площадь поверхности занята межзеренным разрушением, тем ниже пластичность и ударная вязкость стали.

4.22. ПЕРЕЖОГ (ЗЕРНОГРАНИЧНО-ОКИСЛЕННЫЙ ИЗЛОМ)

Описание

Пережог – представляет собой поверхность разрушения перегретого металла, проходящую по границам окисленных или оплавленных зерен (рис. 4.33; 4.34).

Наблюдается в литом и деформированном металле.

Поверхность разрушения темно-серого (близко к черному) цвета, характеризуется присутствием окисленных и, часто, оплавленных зерен с ослабленной связью между собой.

Начальная степень пережога идентифицируется металлографическими методами на микрошлифах и проявляется в виде утолщения границ зерен.

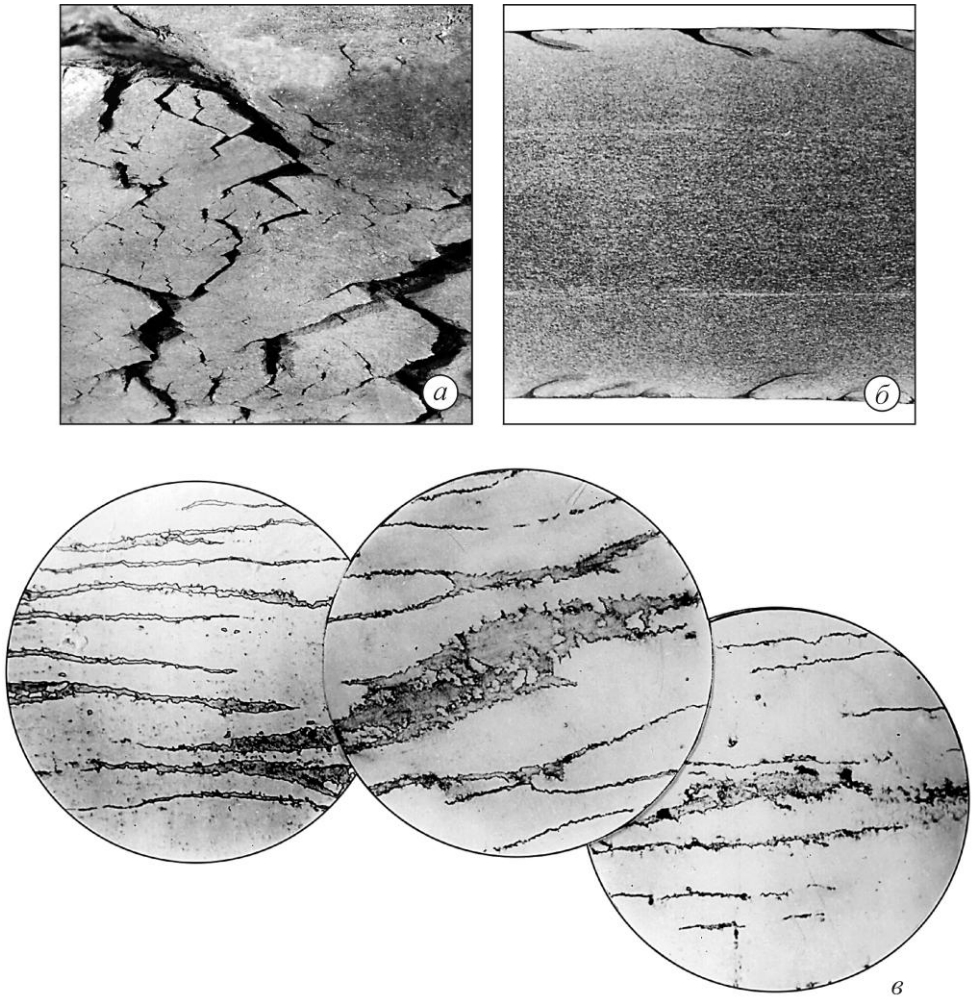


Рис. 4.33. Пережог (сталь):
а – грубые рванины пережога на поверхности проката, внешний вид; *б* – продольное сечение проката, макроструктура; *в* – микроструктура проката в зоне пережога, × 300

Условия и причины образования

К образованию пережога приводит перегрев металла до температур, близких к температуре солидуса, в окислительной атмосфере; в процессе перегрева происходит окисление границ зерен часто с оплавлением легкоплавких выделений по границам.

Способы предупреждения

При соблюдении режима нагрева металла перед горячей деформацией и режима термической обработки зерногранично-окисленный излом не образуется.

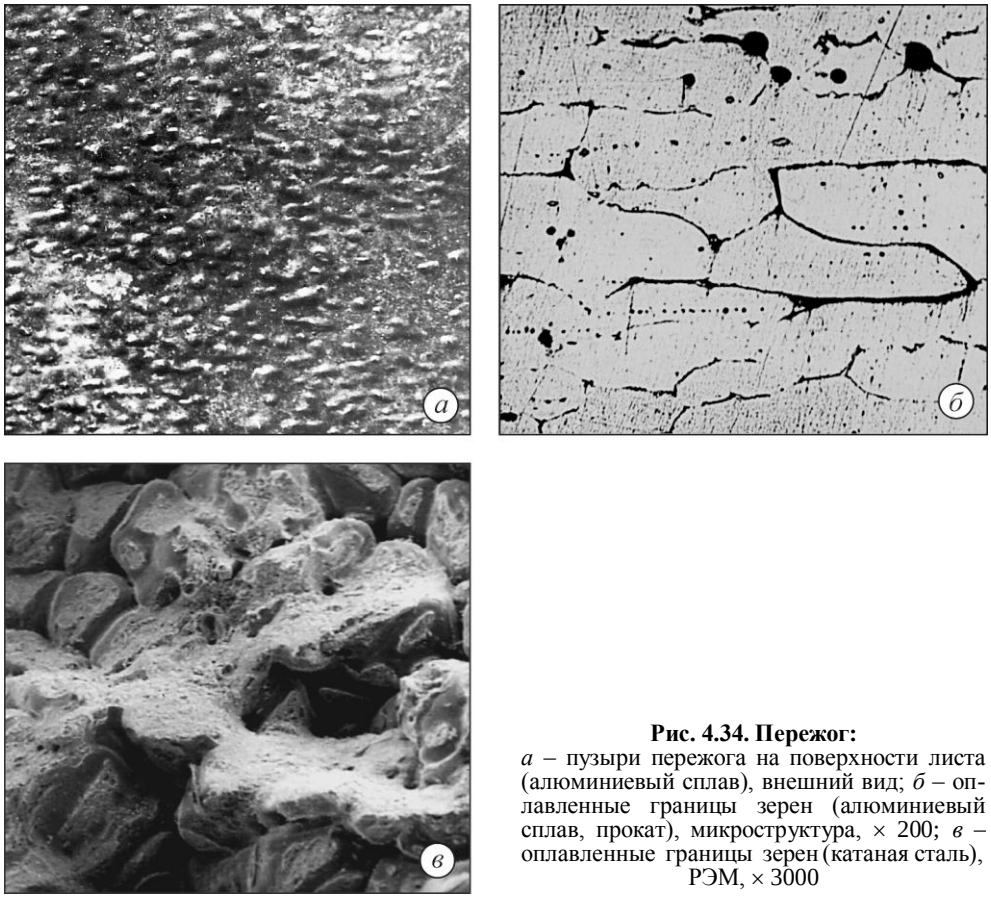


Рис. 4.34. Пережог:
а – пузыри пережога на поверхности листа (алюминиевый сплав), внешний вид; *б* – оплавленные границы зерен (алюминиевый сплав, прокат), микроструктура, × 200; *в* – оплавленные границы зерен (катаная сталь), РЭМ, × 3000

Такой металл исправлению не поддается!

Влияние на свойства

С увеличением степени пережога резко снижаются все механические свойства металла. В первую очередь наблюдается снижение пластических характеристик, ударной вязкости и коррозионной стойкости.

Глава 5
ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ (СТРОЕНИЯ) И ИЗЛОМОВ (ПОВЕРХНОСТЕЙ РАЗРУШЕНИЯ) СВАРНЫХ И ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И СОЕДИНЯЕМЫХ МЕТАЛЛОВ

5.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В данной главе рассмотрены способы изучения дефектов в строении соединяемых металлов, вызывающих их преждевременное разрушение. Свойства сварных и паяных соединений в значительной степени определяются не только технологией сварки и пайки, 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 – точечно-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. Такая информация 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 и паяемого 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.

Исследование тонкой структуры

Для исследования элементов структуры, которые не разрешаются методами световой микроскопии и которые целесообразно сопоставлять с тонким строением изломов при разрушении сварных и паяных соединений, используются методы электронной микроскопии.

Методы просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) подразделяются на:

косвенный – с помощью реплик, получаемых с поверхности образца;

полупрямой – с помощью реплик, содержащих извлеченные из металла частицы;

прямой – с помощью тонких фольг.

При этом обычно изучают морфологию и размеры тонких деталей микроструктуры; проводят микродифракционный анализ, идентифицирующий дисперсные фазы в металлической матрице.

Метод растровой электронной микроскопии (РЭМ) позволяет изучать на шлифах и изломах морфологию и количество эндогенных и экзогенных включений в металле.

Преимущества и недостатки использования методов электронной микроскопии, применяемых также в сочетании с другими физическими методами, рассмотрены в разделе 5.3.4.

5.2. МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ СВАРНЫХ И ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

5.2.1. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ШЛИФОВ

Шлифы из сварных и паяных соединений изготавливаются аналогично шлифам из свариваемых и паяемых 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 (желательно не менее четвертого номера);

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 (искаженного) 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-струбцины либо запрессовка или заливка их в различные пластмассы и легкоплавкие сплавы (например, сплавом Вуда).

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 ГОСТу 3647–71. Для изготовления микрошлифов механическим способом применяется шлифовальная бумага (табл. 14).

Наряду со станками для шлифования при обработке мягких металлов могут использоваться приборы для срезания поверхностных слоев – макро- и микротомы. Отшлифованный нож, перемещаемый с помощью микрометрических передач, срезает слой с поверхности образца толщиной в несколько микрометров, и в

Таблица 14. **Характеристика шлифовальной бумаги для изготовления шлифов**

Группа абразивного материала	Номер зернистости по ГОСТу 3647–71	Размер основной фракции, мм	Шлифовальная бумага
Шлифзерно	40 32 25 20 16	500–400 400–315 315–250 250–200 200–160	На тканевой основе (ГОСТ 5009–75)
Шлифпорошки	12 10 8 6 5 4 3	160–215 125–100 100–80 80–63 63–50 50–40 40–20	На бумажной основе (ГОСТ 6456–75)
Микропорошки	М40 М28 М20 М14	40–28 28–20 20–14 14–10	На меланированной двухкатной основе (ГОСТ 10054–75)

ряде случаев поверхность такого реза можно подвергать травлению для выявления структуры без дополнительной полировки.

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 зернами 15; 7; 2; 1 и 0,25 мкм. Обычно полируют на войлоке (ГОСТ 6989) или на бархате (ГОСТ 7081–93) (табл. 15).

Таблица 15. **Реактивы для химического полирования**

Полируемый материал	Состав реактива	Условия полирования
Алюминий и его сплавы	Серная кислота (d = 1,75) – 75 мл; ортофосфорная кислота (d = 1,84) – 70 мл; азотная кислота (d = 1,4) – 5 мл	Температура 85 °С, длительность 0,5–2 мин
Медь	Ортофосфорная кислота (d = 1,84) – 33 мл; ледяная уксусная кислота (d = 1,065) – 33 мл	Температура 60–70 °С, длительность 1–2 мин
Сплавы меди	Азотная кислота (d = 1,4) – 30 мл; соляная кислота (d = 1,75) – 10 мл; ортофосфорная кислота (d = 1,84) – 10 мл; ледяная уксусная кислота (d = 1,065) – 50 мл	Температура 70–80 °С, длительность 1–2 мин
Сталь и железо	Дистиллированная вода 80 мл; щавелевая кислота (100 г/л) – 28 мл; перекись водорода (30 %) – 4 мл	Температура 35 °С, длительность 15 мин
Никель	Азотная кислота (d = 1,4) – 30 мл; серная кислота (d = 1,84) – 10 мл; ортофосфорная кислота (d = 1,84) – 10 мл; ледяная уксусная кислота (d = 1,065) – 50 мл	Температура 85–95 °С, длительность 0,5–1 мин

Таблица 16. **Реактивы для электрополирования конструкционных материалов (сталь, Al, Ti, Ni, Cu и другие сплавы)**

Состав	Количество, мл	Режим полирования*			τ, мин
		i, А/см^2	U, В	t, °С	
1. Хлорная кислота	100	0,2–0,5	60–70	30	0,5–1**
2. Уксусный ангидрид,	400	До 1,0	40–60	50	3–5
хлорная кислота,	300				
уксусная кислота (ледяная)	5				
3. Плавиковая кислота,	120–150	0,7–2,0	10–30	25–35	0,5–1
серная кислота,	350–400				
глицерин	60–120				
4. Плавиковая кислота,	40	0,5–1,0	10–30	20–40	1–5
фосфорная кислота,	150–200				
уксусный ангидрид	40				
5. Плавиковая кислота,	80	0,2–0,5	3–7	10–20	3–5
хромовая кислота,	250				
вода	170				

*Катод – титан или нержавеющая сталь.
**Периодами.

Электрохимическое полирование наиболее успешно применяется при работе с однофазными материалами (аустенитные и ферритные стали, медь, алюминий, титан, никель и т.п.), но этот метод малопригоден при работе с перлитными сталями, чугунами, многофазными сплавами. Составы некоторых наиболее часто используемых электролитов и режимы электролитического полирования приведены в табл. 16.

Приготовление микрошлифов на крупных деталях без вырезки образцов

При механическом приготовлении микрошлифа непосредственно на изделии (конструкции) предназначенное для исследования место шабрят, 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.

5.2.2. ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗГОТОВЛЕНИЮ ШЛИФОВ ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Материалы на основе железа

Низколегированные стали

Резка образцов сечением до 8 мм^2 абразивным корундовым кругом осуществляется без охлаждения при скорости резания 60–80 м/с, более толстых образцов – с охлаждением эмульсией при скорости резания 20–40 м/с. Скорость подачи – максимально высокая, ручную подачу осуществляют плавно и непрерывно.

Шлифование проводится с охлаждением на перфорированной или пропитанной электролитом водостойкой абразивной бумаге, при этом рабочий круг служит катодом. Состав электролита: раствор 100 г персульфата аммония на 1000 мл воды. Режим: плотность тока 30–50 мА/см^2, скорость вращения 120–180 мин$^{-1}$, продолжительность 30 с.

Механическое полирование. Вариант 1 – на вращающемся круге при ручном полировании скорость вращения 200–500 мин$^{-1}$, для структур с высоким содержанием феррита рекомендуется многократное промежуточное травление в 3%-ном спиртовом растворе азотной кислоты; вариант 2 – одноступенчатое виброполирование на водной суспензии оксидов металлов, разбавленной в соотношении 1:1,5, продолжительность полирования 60–80 с.

Химическое полирование. Состав раствора: 70 мл H_2O_2 (3%-ный), 5 мл HF (40%-ный), 40 мл H_2O. При температуре 20–30 °С продолжительность полирования 30–90 с. После полирования поверхность депассивируется в 30%-ном H_2O_2 или механически дополировывается.

Электролитическое полирование. Рекомендуемый состав электролита: 200 мл $HClO_4$, 700 мл C_2H_5OH, 100 мл $C_6H_{14}OH$. Режим полирования: напряжение 30 В, плотность тока 400–800 мА/см^2, продолжительность 30 с.

Электролитическо-механическое полирование. Рекомендуемый состав электролита: суспензия, содержащая 20 г сульфата аммония, 100 мл глиноземного концентрата, 900 мл воды. Полирование производят на вращающемся круге: скорость вращения – 100–120 мин$^{-1}$, плотность тока – 10–15 мА/см^2, продолжительность – 4–6 мин.

Применение целесообразно при обработке серии шлифов. Часто одновременно с полированием выявляется структура.

Высоколегированные стали

Последовательность операций при изготовлении шлифов такая же, как и для низколегированных сталей. Для однородных структур предпочтительнее электрохимические методы обработки, для гетерогенных структур с карбидами – механические из-за более высокого сопротивления резанию и истиранию.

Чугуны

Шлифование ведется всухую на карборундовой шкурке, число оборотов 500 мин$^{-1}$. На заключительной стадии шлифования применяется промежуточное травление в 4–10%-ном спиртовом растворе азотной кислоты.

Механическое полирование. Абразив – алмазная паста. Режим: число оборотов 250–300 мин$^{-1}$; продолжительность 6–10 мин. При полировании на алмазной пасте графит кажется черным, на глиноземе – серым.

Электролитическо-механическое полирование. Электролит – суспензия, содержащая 25 г сульфата аммония, 80 мл глиноземного концентрата, 100 мл воды. Режим: плотность тока 10–15 мА/см^2, число оборотов 120–180 мин$^{-1}$. Кислотность электролита: pH 6–7 для чугуна с пластинчатым графитом, pH 8 для белого чугуна, продолжительность 3–4 мин.

Глинозем можно помещать на носитель в виде пасты, полировать с уменьшением плотности тока, образцы вынимать из электролита при включенном токе. Во избежание выпадения осадка в суспензию добавляют несколько капель нашатырного спирта. Нагрев шлифа при сушке не допускается.

Цветные металлы и сплавы

Сплавы меди

Приготовление шлифов из медных сплавов затрудняется из-за их низкой твердости и прочности, в них легко внедряются частицы несвязанного абразива, образуется глубокий искаженный слой. Некоторые фазы корродируют под воздействием водопроводной воды.

Вырезка образцов осуществляется с помощью ручной ножовки с мелким зубом при малом усилии резания.

Шлифование надо проводить на смачиваемой водой (дистиллированной) или спирто-глицериновой смесью (1:3) абразивной карборундовой (SiC) бумаге с постепенно уменьшающейся зернистостью.

Микротомирование, или тонкое фрезерование, проводится с помощью твердосплавных или алмазных резцов.

Механическое полирование выполняется на алмазной пасте, окончательное – на суспензии следующего состава: 1 г MgO, 1 г тартрата аммония, 120 мл H_2O (при 80 °C).

Электролитическое полирование проводится в электролите 250 мл H_3PO_4, 500 мл H_2O, 250 мл C_2H_3OH, 50 мл C_3H_7OH, 5 г $Mn(NO_3)_2$ при напряжении 8 В и плотности тока 1 мА/см^2 за два погружения по 30 с. В этих же электролитах можно проводить травление для выявления структуры.

Электролитическо-механическое полирование на вращающемся круге проводится в электролите 36 г тиосульфата натрия, 6 г аллилтиомочевины, 100 мл H_2O. Режим полирования: плотность тока 36 мА/см^2, число оборотов 120 мин$^{-1}$, продолжительность 4 мин.

Алюминиевые сплавы

Шлифование и выравнивание плоскости шлифов гетерогенных алюминиевых сплавов осуществляется на абразивной бумаге, обильно смачиваемой водой или смазочно-охлаждающей эмульсией: керосином или мыльной водой (0,5–1%-ный раствор), циркулирующими по замкнутому кругу. На последних двух этапах шлифования свежую абразивную бумагу рекомендуется «притупить» с помощью твердого парафина или воска. Шлифование ведется относительно долго, давление на шлиф следует постепенно уменьшать.

Механическое полирование производится с помощью суспензии MgO (30 г MgO на 1000 мл воды) на рабочем круге из пластмассы (металлический круг вы-

зывает коррозию образцов). Рекомендуется на первых стадиях процесса пользоваться относительно жестко действующим носителем полирующего средства, но по мере уменьшения размера абразивного зерна надо применять более мягкий носитель. На завершающей стадии полирования носитель целесообразно натереть твердым мылом и добавить в суспензию несколько капель жидкого мыла или 1 % тартрата аммония. Оксид MgO надо суспензировать в горячей воде.

Химическое полирование. Используют следующие реактивы: 1) полирующий раствор состава 50 мл H_3PO_4, 25 мл H_2SO_4, 6 мл CH_3COOH, 7 мл HNO_3, 12 мл H_2O, температура 70–90 °С, продолжительность полирования 120–240 с; 2) 50 мл 40%-ной плавиковой кислоты, 5 мл соляной кислоты плотностью 1,19 г/см^3, 200 мл метилового спирта; полирование в этом реактиве ведется при 20 °С в течение 45 с, после чего рекомендуется кратковременное механическое полирование; 3) 70 мл H_3PO_4 плотностью 1,71 г/см^3, 25 мл H_2SO_4 плотностью 1,84 г/см^3, 5 мл HNO_3 плотностью 1,4 г/см^3; полировать в течение 1–2 мин.

Электролитическое полирование осуществляют в электролитах состава: 1) 200 мл $HClO_4$, 700 мл C_2H_5OH, 100 мл $C_6H_{14}OH$; 2) 60 мл $HClO_4$, 590 мл CH_3OH, 350 мл $C_6H_{14}OH$; 3) 765 мл ангидрида уксусной кислоты, 185 мл перхлоридной кислоты, 50 мл воды. Режим полирования: напряжение 30–80 В, плотность тока 20–30 мА/см^2, продолжительность 10–20 мин.

Электролитическо-механическое полирование в суспензии 950 мл воды, 50 мл серной кислоты плотностью 1,84 г/см^3, 5 г фтористого натрия, 100 мл глиноземного концентрата. Режим полирования: плотность тока 0,2 – 2 мА/см^2, продолжительность 3–6 мин. При полировании рекомендуется изменять полярность электродов с частотой 2–3 Гц.

Магниевые сплавы

Резка, шлифование, механическое полирование ведутся так же, как для шлифов из медных сплавов.

Электролитическое полирование проводится в электролитах состава: 1) 375 мл H_3PO_4 плотностью 1,71 г/см^3, 625 мл 96%-ного этилового спирта при напряжении 1,5 В, плотность тока 5 мА/см^2; 2) 20 г тиоцианата натрия, 100 мл 96%-ного этилового спирта, 10 мл бутоксиэтанола, 10 мл воды, 10 г двунатриевой соли этилендиаминотетрауксусной кислоты при напряжении 23 В и температуре 20 °С (для гетерогенных сплавов магния).

Химико-механическое полирование в суспензии 20 мл 2%-ного водного раствора бихромата калия, 150 мл насыщенной серной кислоты, 15 капель азотной кислоты плотностью 1,4 г/см^3, 50 мл глиноземного концентрата.

Титановые сплавы

Макрошлифы изготавливают на станках с применением твердосплавных резцов типа ВК. Окончательную обработку поверхности осуществляют на шлифовальных кругах или вручную с применением абразивной шкурки №№ 8–10 (зернистость 125–100 мкм).

Для изготовления микрошлифов из титановых сплавов применяют шлифовальную бумагу (см. табл. 14) с периодическим промежуточным травлением в растворах состава: 1) 16 мл плавиковой кислоты, 16 мл азотной кислоты, 68 мл глицерина; 2) 190 мл щавелевой кислоты, 4 мл плавиковой кислоты; 3) 60 мл перекиси водорода, 10 мл плавиковой кислоты, 30 мл воды.

Виброполирование проводится в два этапа на глиноземных суспензиях, промежуточное травление – через 4 ч после полирования. Вместо промежуточного

травления можно добавлять к суспензиям 2 капли на 1 л травящего раствора состава 1 или 3.

Химическое полирование проводится в растворе состава: 100 мл плавиковой кислоты, 100 мл азотной кислоты, продолжительность полирования 10 с. Реакция протекает бурно, останавливается при промывке в холодной проточной воде; шлиф сушат холодным воздухом.

Электролитическое полирование проводится в электролитах состава: 1) 10 мл H_2SO_4, 200 мл метилового спирта, 5 г $ZnCl_2$, 15 г $AlCl_3$; плотность тока 300–600 мА/см^2 в течение 2 мин; катод – платина, титан, титановые сплавы; 2) 590 мл молочной кислоты, 246 мл серной кислоты, 111 мл плавиковой кислоты, 36 г диметилсульфоксида, 17 мл глицерина, напряжение 24–35 В, плотность тока 95 мА/см^2, продолжительность 45 мин; катод – графит, титан; 3) 550 г серной кислоты, 90 г азотной кислоты, 240 г плавиковой кислоты, 100 мл воды, 20 г сульфоуреида; напряжение 15 В, плотность тока 1000 мА/см^2.

Металлические композиционные материалы

Такие материалы состоят из двух или нескольких прочно соединенных между собой разнородных компонентов, матрицей которых является металл или сплав. Вырезка образцов производится абразивными отрезными кругами минимальной толщины. При вырезке образцов с хрупкими слоями их необходимо заливать в смолу или бакелит. При резке усилие сдвига должно быть направлено от покрытия к подложке. Усилие зажима образца должно быть минимальным, скорость резания – низкая.

Шлифование поверхности осуществляется таким образом, чтобы движение инструмента было направлено от твердого слоя к мягкому. Образцы, содержащие хрупкую составляющую, обрабатываются алмазными шлифовальными кругами.

Доводку выполняют инструментом – носителем притирочных средств, алмазной суспензии, спиртосодержащих вспомогательных средств для улучшения скольжения.

Механическое полирование: носитель – тканый материал, полирующее средство – алмазная паста или суспензия. Заключительное полирование в зависимости от компонентов материала проводят на глиноземе или оксиде алюминия.

5.2.3. ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗГОТОВЛЕНИЮ СПЕЦИАЛЬНЫХ ШЛИФОВ

Рассмотрены способы изготовления шлифов из металлов с наплавками, шлифов малых геометрических размеров, тонких листов и фольг, пористых образцов, шлифов на стационарных объектах.

Образцы с наплавками

На шлифе, сделанном поперек наплавки, при рациональном способе приготовления можно исследовать качество наплавки, ее толщину, равномерность толщины по длине, дефекты наплавки всех видов, структуру основного металла под слоем и переходных диффузионных зон, а также измерить их микротвердость.

При толщине слоя менее 2 мкм метод поперечного шлифа дает слишком большую погрешность измерения и рекомендуется применять метод косого среза, позволяющий расширить возможности металлографических измерений. Наблюдаемая толщина слоя (S) оказывается увеличенной до (S').

Рекомендуются три метода косого среза:

изготовление шлифа в специальной оправке;

наклонно закрепленный образец сошлифовывается вращающимся абразивным кругом;

используется местное шлифование шарообразным абразивным инструментом, с помощью которого на поверхности шлифа вышлифовывается углубление сферической формы.

Наиболее распространен первый метод получения косых срезов. Наклонное положение образца в оправке можно зафиксировать с помощью прокладки известной толщины или с помощью клиновидной шайбы с известным углом наклона.

Иногда используется следующий способ: делаются два сечения – второе перпендикулярно первому так, чтобы можно было измерить размеры *a* и *b*.

Обязательным требованием при исследовании поверхностей с тонкими покрытиями на поперечных или косых шлифах является сохранение острой кромки образцов. Наиболее эффективно защищают кромки металлические покрытия, представляющие собой слои, осаждаемые на кромки химическим или гальваническим способом. Материал защитного слоя должен соответствовать материалу покрытия по поведению при абразивной обработке, отличаться по цветовому контрасту и выявлению структуры при травлении. Возможные комбинации материала указаны ниже:

Образец	Сталь	Cu	Ti	Al	Zn	Cd
Защитное покрытие	Cu	Ni*, Cu/Ni*	Cu	Cu, Ni	Cd, Cu	Zn, Cu

*Возможно химическое осаждение.

Неметаллические слои (окалина, коррозионный или пассивированный слой, керамическое покрытие) после активации и химического осаждения металлического слоя можно также защищать с помощью гальванического покрытия. Хрупкие слои, например оксидные, имеют обычно множество трещин и пор. Для устранения нежелательного трещинообразования в слое при изготовлении шлифов образцы укладывают между двумя защитными пластинами из коррозионностойкой стали и затем пропитывают в вакууме смолой. Затем образец заливают смолой и изготавливают микрошлиф.

Образцы малых размеров

Мелкие детали всех видов неправильной геометрической формы целесообразно заливать или запрессовывать в оправки для получения образцов удобной формы. При этом необходимо предусматривать защиту кромок, как было показано выше. К этой группе образцов относятся мелкие детали, тонкая проволока, трубки, тонкие листы и фольга. Связующий материал по отношению к абразиву должен быть сопоставим по свойствам с материалом образца.

Образцы из фольги и тонких листов, используемые для паяных соединений, заливают аналогично описанным выше. Для запрессовки удобно несколько тонколистовых образцов собирать в пакет.

Крупногабаритные детали

Металлографические исследования на крупногабаритных объектах вне лаборатории необходимы тогда, когда невозможно произвести отбор образцов и повреждение поверхности недопустимо, но дополнительный съем тонкого поверх-

ностного слоя не влияет на эксплуатационные качества детали. В этом случае шлиф изготавливают непосредственно на исследуемой поверхности. При этом используется переносной шлифовально-полировальный прибор. Тонкое шлифование на нем выполняют сухим способом с помощью кругов из шлифовальной бумаги, наклеенных на резиновый диск. Полирование и выявление структуры производят вручную с помощью соответствующих электролитов и травителей.

Для оптической микроскопии изготавливают также негативные отпечатки в виде тонкой прозрачной пленки (реплики). Их изготавливают либо нанесением (заливкой, распылением) нитроцеллюлозного лака, который после затвердевания осторожно снимают с исследуемой поверхности, либо прижатием к протравленной поверхности предварительно размягченной в ацетоне ацетобуратной или подобной ей пленки толщиной от 20 до 200 мкм, которую затем осторожно удаляют. Для повышения контраста и улучшения качества изображения на реплику можно напылить металл или углерод по технологии, используемой для оттенения реплик в электронной микроскопии.

5.2.4. ВЫЯВЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ СВАРНЫХ И ПАЯНЫХ 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.

При *пайке* исследуются паяные швы деталей из однородных и разнородных материалов, соединенных с помощью припоя, температура плавления которого ниже температуры плавления любого из соединяемых компонентов и который образует с ними сплав путем однонаправленной или взаимной диффузии.

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, разрушение припоя, структурные образования (первичная структура припоя, столбчатая, глобулярная, дендритная, диффузионные зоны).

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 (см. выше).

Выявление макроструктуры

Макроскопические исследования сварных и паяных соединений обычно проводят для изучения структурных изменений, происходящих в результате сварки или пайки.

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 увеличениях до 30–40 крат.

В табл. 17 приведены наиболее употребляемые реактивы, рекомендуемые для выявления макроструктуры основных конструкционных металлов и сплавов.

Таблица 17. **Наиболее распространенные травители и режимы травления для выявления структуры основных свариваемых металлов и сплавов**

Состав травителя	Способ употребления	Область применения
Для выявления макроструктуры		
Стали		
Серная к-та (d = 1,84)* – 60 мл, хромпик 25 г, вода 500 мл	Травление химическое при 20 °С, продолжительность 1–30 мин; промывка холодной водой	Для выявления дендритного строения сварных швов
Серная к-та (d = 1,84)–70 мл, соляная к-та (1,19) – 500 мл, вода 180 мл	Травление химическое в кипящем реактиве; продолжительность – от 15 мин до 2 ч; промывка горячей водой	Для выявления пористости, ликвации, усадочной рыхлости, дендритного строения сварных швов
$CuCl_2$ 1 г, Cl_2Sn 0,5 г, $FeCl_3$ 30 г, соляная к-та (d = 1,19) – 50 мл, вода 500 мл, этиловый спирт 500 мл (раствор Обергоффера)	Травление химическое при 20 °С, продолжительность – от 10 с до 2 мин; после травления осадок меди снимают 5%-ным раствором аммиака	Для выявления дендритного строения литого металла, в том числе сварного шва
10–15%-ный водный раствор персульфата аммония	Травление химическое при 20 °С или в кипящем растворе; во время травления, не вынимая шлиф из раствора, ватой снимают черный налет; после травления – промывка под струей воды или спирта; сушка фильтровальной бумагой и струей воздуха	Для выявления волокнистой структуры металла
Азотная к-та (d = 1,4) – 100–250 мл, вода 900–750 мл	Травление химическое на холоду с помощью тампона или погружением в течение 3–30 мин	Для выявления неоднородности (трещины, поры, рыхлоты), волокнистой структуры, зон термического влияния в сварных соединениях
Соляная к-та (d = 1,19) – 500 мл, вода 500 мл	Травление химическое в нагретом до 60–80 °С растворе в течение 15–60 мин; после травления шлиф нейтрализуют в теплом растворе соды	Для выявления дендритного строения, ликвации и различных нарушений сплошности в металле шва
Персульфат аммония 150 г, вода 1000 мл	Травление химическое в горячем (70–90 °С) растворе через каждые 3–5 мин. Протирка под струей воды ватным тампоном (для снятия темного налета). После окончательной промывки и сушки для увеличения контрастности можно протравить другими растворами	Для выявления дендритной структуры сварных швов
Серная к-та (d = 1,84) – 20 мл, вода 100 мл	Травление химическое в нагретом до 60 °С растворе в течение 30 мин – 2 ч	Для выявления кристаллизационных слоев в сварных швах

Продолжение табл. 17

Состав травителя	Способ употребления	Область применения
Реактив Совера: соляная к-та (d = 1,19) – 100 мл, серная к-та (d = 1,84) – 200 мл, вода 300 мл	Травление химическое в нагретом до 95–100 °С растворе в течение 30 мин – 2 ч	Для выявления несплошностей и дендритной структуры в сварных швах
Реактив Кешиена: соляная к-та 500 мл, серная к-та 70 мл, вода 180 мл	Травление химическое в нагретом до 95–100 °С растворе в течение 30 мин – 2 ч	Для выявления несплошностей, ликвации и дендритной структуры в сварных швах
Реактив Фри: соляная к-та 40 мл, вода 30 мл, спирт этиловый 25 мл, хлорная медь 5–30 г	Травление химическое в холодном или нагретом до 60 °С растворе, продолжительность – до 2 ч. Шлиф периодически протирают ватным тампоном	Для выявления ликвационных неоднородностей в сварном шве
Азотная к-та 0,5 – 1 мл, вода 100 мл	Травление химическое в течение 30–60 с	Для выявления структуры сварных швов
Серная к-та 20 мл, вода 100 мл	Травление химическое при 70 °С	Для выявления структуры и несплошностей в сварных швах
Надсернокислый аммоний 10 г, вода 90 мл	Травление химическое. Шлиф протирают хлопчатобумажной тканью, пропитанной раствором	Для выявления структуры зерен при чрезмерном их росте, рекристаллизации в сварных швах
Азотная к-та 25 мл, вода 75 мл	Травление химическое холодным раствором	Для выявления структуры металла при травлении больших поверхностей
Серный отпечаток (проба по Бауману): серная к-та 5 мл, вода 95 мл, фиксаж для обработки фотоотпечатков	Фотобумагу, содержащую соли серебра, пропитывают 5%-ным водным раствором серной к-ты в течение 5–8 мин; обработанную бумагу слегка подсушивают и плотно прижимают к поверхности шлифа, непрерывно протирая рукой или прокатывая валиком для удаления пузырьков воздуха и газов. Выдержка 3 мин. Снятый отпечаток промывают в проточной воде и фиксируют в обычном фиксаже. Затем окончательно промывают и сушат	Для выявления расположения сульфидных включений в сталях, в том числе в сварном шве. В местах соприкосновения с включениями сульфидов бумага приобретает коричневый цвет
Отпечаток для определения наличия оксидов железа: А – фиксирующий раствор: гипосульфит 150 г, метабисульфат калия 20 г, вода 100 мл; Б – соляная к-та 50 мл, хлористый натрий 150 г, вода – до 1000 мл; В – проявляющий раствор: красная кровяная соль 20 г, вода 1000 мл	Отпечаток снимают на предварительно отфиксированной (А) хлоробромсеребряной фотобумаге и вымоченной затем в кислом растворе хлористого натрия (Б). Подготовленную бумагу прижимают к шлифу на 1–2 мин и проявляют в течение 5–10 мин в составе (В)	Для выявления железосодержащих включений. Бумага, соприкасающаяся с включениями, содержащими оксиды железа, приобретает синюю окраску
Царская водка: соляная к-та 30 мл, азотная к-та 100 мл	Травление химическое путем протирания тампонами. Реактив перед употреблением выдерживается сутки	Для выявления структуры аустенитных сталей и сварных швов из них
Реактив Круппа: соляная к-та 500 мл, азотная к-та 50 мл, хромпик 125 г, вода 500 мл	Травление химическое погружением в растворе при 40–70 °С	Для выявления структуры аустенитных сталей

Продолжение табл. 17

Состав травителя	Способ употребления	Область применения
Соляная к-та 500 мл, серная к-та 25 мл, медный купорос 100 г, вода 200 мл	Травление химическое погружением. Перед травлением шлиф полируют	Для выявления структуры аустенитных сталей
10%-ный раствор иода 10 мл, спирт 100 мл	Травление химическое	Для выявления распределения кремния в сталях
	Алюминиевые сплавы	
Реактив Келлера: азотная к-та 10–50 мл, соляная к-та 20–30 мл, плавиковая к-та 10–50 мл, вода 90–95 мл	Травление химическое. После травления шлиф нейтрализуют раствором соды	Для выявления структуры алюминиевых сплавов и их сварных швов
Едкий натр 150–200 г, вода 1000 мл	Травление химическое в горячем растворе. Темный налет удаляют протиранием в азотной к-те, затем – промывкой в воде	То же
Хлорное железо 5–10 г, соляная к-та 10–20 мл, вода 100 мл	Травление химическое, травление при комнатной температуре	» »
Ортофосфорная к-та 10 мл, плавиковая или соляная к-та 5 мл, вода 85 мл	То же	» »
Соляная к-та 250 мл, серная к-та 20–50 мл, вода 300 мл	Травление химическое при температуре 70–90 °С, промывка в горячей воде, нейтрализация в растворе соды	» »
	Титановые сплавы	
Соляная к-та 100 мл, фтористый натрий 3 г, вода 200 мл	Травление химическое при комнатной температуре	Для выявления структуры сплавов на основе титана и их сварных соединений
Плавиковая к-та 50 мл, азотная к-та 950 мл	То же	То же
Плавиковая к-та	Травление химическое. Выполняется смачиванием с быстрой последующей промывкой в воде. Осветление осуществляется в безводном растворе концентрированной азотной кислоты с добавкой 2–5 % плавиковой к-ты; осушка – в струе воздуха	Для выявления структуры технического титана, малолегированных и высоколегированных сплавов
Плавиковая к-та 100–150 мл, азотная к-та 30–100 мл	Травление химическое; промывка холодной водой	Для выявления структуры среднелегированных сплавов. Для сплавов ВТ14 требуется осветление
Плавиковая к-та 150 мл, азотная к-та 50–100 мл	Травление химическое. Промывка холодной водой и осветление обязательны. Осветление производится в концентрированной азотной к-те с добавкой 2–5 % плавиковой к-ты. Травление выполняется смачиванием с быстрой последующей промывкой в воде и сушкой в струе воздуха	Для выявления структуры среднелегированных сплавов

Продолжение табл. 17

Состав травителя	Способ употребления	Область применения
Соляная к-та 250 мл, серная к-та 35 мл, вода 100 мл	Травление химическое погружением шлифа в нагретый до 70–90 °С раствор, время 15–20 с	Для выявления макроструктуры сварных швов титана и его сплавов
Плавиковая к-та 100 мл, глицерин 100 мл	Травление химическое погружением в течение нескольких минут при комнатной т-ре	Для выявления структуры титановых сплавов
Щавелевая к-та – до 35 мл, плавиковая к-та – до 2 мл, азотнокислое железо – до 5 г, метиловый спирт 200 мл	Травление химическое протиранием шлифа при комнатной т-ре в течение нескольких минут	Для выявления структуры сварных соединений титановых сплавов (одно- и двухфазных). При этом обеспечивается качественное выявление структуры шва, околошовной зоны и основного металла
	Медные сплавы	
Азотная к-та 10–50 %, вода 50–10 %	Травление химическое. Время травления при комнатной т-ре от нескольких секунд до нескольких минут. После травления шлиф протирают тампоном, смоченным аммиаком и перекисью водорода	Для выявления макроструктуры меди, латуней и бронз
Азотная к-та 100 мл, соляная к-та 100 мл	Травление химическое. Применять реактив только в горячем состоянии (до 70 °С)	Для хорошего выявления макроструктуры меди, медных сплавов и их сварных соединений
Азотная к-та 100 мл, соляная к-та 50 мл, вода дист. 600 мл	Травление химическое. Применять реактив в горячем состоянии (до 70 °С)	То же
Персульфат аммония 10%-ный раствор в дист. воде	Травление в холодном или кипящем растворе до 15 мин. Резко улучшается действие травителя при добавлении в него перед употреблением нескольких капель конц. раствора аммиака. Кипящий раствор применяют для изучения фигур коррозии на медных сплавах	Для выявления структур меди, латуней, бронзы. Выявляются промежуточные фазы паяных соединений меди и латуни
Насыщенный водный раствор хромпика 50–100 мл, серная к-та 10 мл	Травление при комнатной т-ре в течение 30–60 с Для латуней раствор нагревают до 60 °С	Для выявления макроструктуры медных сплавов, особенно эффективен для латуней
	Магниевые сплавы	
Уксусная к-та 10 мл, вода 100 мл	Травление химическое. Смачивание тампоном с реактивом в течение 0,5–2 мин, затем промывка водой и сушка в струе воздуха	Для выявления макроструктуры магния и его сплавов
Азотная к-та 10 мл, вода 90 мл, (А); хлористый аммоний 25 г, вода 75 мл (В)	Макрошлиф погружают в реактив (А) до образования матово-серебристого оттенка поверхности, промывают, высушивают, затем травят в реактиве (В) 30–60 с	Для выявления макроструктуры большинства магниевых сплавов, в том числе сварных соединений
Азотная к-та 1–5 мл, вода 99–95 мл	Травление химическое на холоду в течение 5–20 с	То же

Продолжение табл. 17

Состав травителя	Способ употребления	Область применения
	Никелевые сплавы	
Азотная к-та 10 мл, соляная к-та 20–30 мл, глицерин 20–30 мл	Травление химическое. Реактив используют свежеприготовленный; продолжительность травления 10–40 с. Можно применять многократное травление с переполировкой; реактив или шлиф подогревают	Для выявления макроструктуры никелевых сплавов
3%-ный водный раствор перекиси водорода 10 мл, 10%-ный водный раствор едкого натра 10–20 мл	Травление химическое. Реактив используют только свежеприготовленным. Реактив применяют нагретым до 40–60 °С, травят несколько секунд	Для хорошего выявления макроструктуры большинства никелевых сплавов и их сварных швов
Соляная к-та 3–5 мл, пикриновая к-та 1–4 г, этиловый спирт 95–100 мл	Травление химическое на холоду в течение до 60 с. Возможно многократное травление по 10 мин (не более) с переполировкой	Для выявления макроструктуры никелевых сплавов и их сварных швов
Соляная к-та 500 мл, серная к-та 25 мл, медный купорос 100 г, вода 200 мл	Травление погружением. Перед травлением шлиф полируют	То же
Пикриновая к-та 3–5 г, этиловый спирт до 100 мл	Травление на холоду любым способом до нескольких минут	Для выявления макроструктуры чугунов
А – 2,5 г надсернокислого аммония, 100 мл дист. воды; Б – то же, плюс 1,5 г иодистого калия; В – то же, что Б, плюс 1,5 г хлористой ртути; Г – то же, что В, плюс 15 мл серной к-ты (плотностью 1,84)	Протереть образец в течение 15 мин р-ром А, затем в течение 10 мин р-ром Б, затем в течение 5 мин р-ром В, затем в течение 5 мин р-ром Г. После травления промывка в воде и сушка в спирте	Для выявления макродендритной структуры большинства чугунов
Хлорное железо 2,5 г, пикриновая к-та 5 г, соляная к-та 2 мл, (d = = 1,19)^2, этиловый спирт 90 мл	Травление химическое протиранием тампоном. Продолжительность травления от 15 с для аустенитных чугунов до нескольких тысяч секунд для высокохромистых ферритных чугунов	Для выявления макроструктуры чугунов, особенно хорошо высокохромистых
	Для выявления микроструктуры стали	
	Стали	
Азотная к-та (d = 1,4) – 1–5 мл, этиловый (или метиловый) спирт 100 мл	Травление химическое от нескольких секунд до 1–2 мин	Для травления железа, серых чугунов, низколегированных сталей
Реактив Фри: хлористая медь 5 г, соляная к-та (d = 1,19) – 40 мл, этиловый спирт 25 мл, вода 30 мл Щелочной пикрат натрия: пикриновая к-та 2 г, едкий натр 25 г, дист. вода 100 мл	Травление химическое, продолжительность ~10 с после отпуска стали при 150–200 °С. 1. Применяется в свежеприготовленном виде. Травление химическое при 50 °С в течение 5–10 мин. 2. Травление электрохимическое при комнатной температуре; U = = 6 В, τ = 40 с	Для выявления цементита и карбидов, а также для выявления фосфидов железа

Продолжение табл. 17

Состав травителя	Способ употребления	Область применения
Реактив Шрадера: пикриновая к-та 1 г, соляная к-та (d = 1,19) – 10 мл, азотная к-та (d = 1,4) – 10 мл, этиловый спирт 80 мл	Травление химическое	Для выявления размера зерна мартенситных структур. Может применяться для хромоникелевых, железохромоникелевых и железохромомарганцевых сталей различных типов. Реактив выявляет также границы зерен в хромоникелевых аустенитных сталях
Реактив Вилелла: пикриновая кислота 1 г, соляная к-та (d = 1,19) – 5 мл, этиловый (метиловый) спирт 100 мл	То же	То же
Насыщенный водный раствор пикриновой к-ты (7 г пикриновой к-ты растворить в 500 мл дист. воды при температуре кипения)	Травление при нагреве до 50–70 °С в течение 2–5 мин. После окончания травления трехкратная промывка: 1) погружением образцов в ацетон; 2) протиранием шлифа ватой, смоченной в чистом ацетоне; 3) протиранием ватой, смоченной в спирте	Для выявления отпускной хрупкости (определяется по относительной интенсивности травимости границ аустенитных зерен)
Насыщенный водный раствор пикриновой к-ты 100 мл, алкисульфонат натрия 0,5–2 г. Вместо алкисульфоната (сульфоната тридецилбензола) натрия можно применять моющие средства типа «Шампунь», «Синтол» в количестве 1–4 %	Травление при нагреве до 50–60 °С в течение 1–4 мин. Рыхлый слой оксидов удаляют ватным тампоном в струе воды	Для выявления границ зерен аустенита в закаленных углеродистых, марганцовистых, никелевых, хромоникель-молибденовых и других сталях. Реактив можно использовать для выявления границ зерен аустенита малолегированных сталей
Реактив Обергоффера: хлористая медь 1 г, хлорное железо 30 г, хлористое олово 0,5 г, соляная к-та (d = 1,19) – 30 мл; вода 500 мл, этиловый спирт 500 мл	Травление химическое	Для установления наличия ликвации в различных сталях. Участки, богатые железом, окрашиваются в более темный цвет
Азотная к-та (d = 1,4) – 10 мл; соляная к-та (d = 1,19) – 30 мл (царская водка)	Реактив готовят за 24 ч до употребления. Травление химическое	Для выявления границ зерен и структуры высоколегированных и нержавеющих сталей аустенитного класса, а также сплавов на основе никеля
Реактив Марбле: сернокислая медь 4 г, соляная к-та (d = 1,19) – 20 мл, вода 20 мл	Травление химическое, промывка горячей водой	Для выявления структуры нержавеющих сталей мартенситного и переходных классов
Щавелевая к-та 10 г, вода 100 мл	Травление электрохимическое: U = 5…6 В, τ = 5…20 с, t = = 18…20 °С. Катод – платина или нержавеющая сталь	Для выявления структуры аустенитных нержавеющих сталей и сплавов на основе никеля
Хромовый ангидрид 10 г, вода 100 мл	Травление электрохимическое: U = 1,5…3 В, τ = 5…60 с, t = = 18…20 °С	Для травления ферритных и аустенитных сталей
Соляная к-та (d = 1,19) – 25 мл, 10%-ный водный раствор хромовой к-ты 5–50 мл	Химическое травление	Для травления термически обработанных нержавеющих сталей

Продолжение табл. 17

Состав травителя	Способ употребления	Область применения
Азотная кислота (d = 1,4) – 3 мл, вода 30 мл	Травление электрохимическое: D = 0,1 А/см^2; U = 6…8 В; τ = 40…120 с	Для выявления зерна в сталях аустенитного класса и переходных классов
Азотная к-та (d = 1,4) – 5 мл, амиловый спирт 100 мл	Травление химическое в холодном состоянии или при 50–60 °С	Для выявления границ зерен в перлитных сталях
Хлорная медь 1 г, соляная кислота (d = 1,19) – 100 мл	Травление химическое	Для выявления структуры высокохромистых сталей ферритного класса
Этиловый спирт 100 мл, хромовый ангидрид 10 г, вода 90 мл	Травление электрохимическое: D_a = 1…1,2 А/см^2, U = 8 В; τ = 10…20 с; t = 18…20 °С	Для выявления структуры высокомарганцовистых сталей
Соляная к-та (d = l,19) – 20 мл, вода 80 мл	Травление электрохимическое: D_a = ,35…0,5 А/см^2, U = 5…6 В; τ = 10…20 с. Пленка удаляется в 10%-ном водном растворе едкого натра (протиранием)	Для выявления микроструктуры высокомарганцовистых сталей
Лимонная к-та 30 г, сернокислый аммоний 30 г, уксусная к-та 50 мл, азотная к-та (d = 1,4) – 100 мл, вода 1000 мл	Травление электрохимическое: D_a = 0,02 А/см^2, τ = 10 с	Для выявления дендритной структуры в сталях аустенитного класса
Азотная к-та (d = 1,4) – 75 мл; уксусная к-та 25 мл	Травление электрохимическое: D_a = 0,02 А/см^2, τ = 1 мин	То же
	Никелевые сплавы	
Азотная к-та (d = l,4) – 20 мл, этиловый спирт 80 мл	Травление химическое	Для выявления структуры никеля и его сплавов
Царская водка 50 мл, глицерин 50 мл	Травление электрохимическое: D_a = 0,1 А/см^2, τ = 20 с	То же
	Алюминиевые сплавы	
Азотная кислота (d = 1,4) – 1–5 мл, соляная к-та (d = 1,19) – 2–3 мл, плавиковая к-та (40 %) – 1–5 мл; вода 90–95 мл (реактив Келлера)	Травление химическое	Для выявления структуры алюминия и его сплавов
Азотная к-та (d = l,4) – 25 мл; вода 75 мл	Травление химическое при нагреве раствора до 70 °С	Для выявления границ зерен в сплавах алюминий – цинк–магний. Фаза $CuAl_2$ окрашивается в коричневый цвет
Серная к-та (d = 1,84) – 20 мл; вода 80 мл	Травление химическое в течение 30 с при нагреве раствора до 70°С	Для выявления структуры сплавов алюминий–медь, алюминий–железо–марганец, алюминий–медь–железо
Соляная к-та (d = l,19) – 10 мл, азотная к-та (d = l,4) – 30 мл, вода 10 мл	Травление химическое в течение 25–30 с при нагреве раствора до 40–45 °С	Для выявления структуры литых сплавов алюминий–марганец
	Медные сплавы	
Хлорное железо 5 г, соляная к-та (d = l,19) – 10 мл; вода 85 мл	Травление химическое в течение 3–10 с	Для выявления структуры латуней и бронз
Азотная к-та (d = l,4), ледяная уксусная кислота 15 мл	Травление химическое в течение 2–3 с	То же

Продолжение табл. 17

Состав травителя	Способ употребления	Область применения
Реактив Александера; уксусная к-та (75%-ный водный р-р) – 30 мл, азотная к-та (d = 1,4) – 20 мл, ацетон 30 мл	Травление химическое в течение 2–3 с	Для выявления структуры латуней и бронз
Аммиак (25 %) – 50 мл, перекись водорода (3 %) – 50 мл	Травление химическое в течение 5–15 с	То же
Ортофосфорная к-та (d = = 1,71) – 75 мл; серная к-та (d = 1,84) – 15 мл, азотная кислота (d = = 1,4) – 10 мл (французский реактив)	Травление химическое в течение 5–10 с при температуре 70 °С	Для выявления структуры оловянных и безоловянных бронз
Титановые сплавы		
Плавиковая к-та (40 %) – 2 мл, вода 98 мл	Травление химическое, промывка в растворе: азотная кислота (d = 1,4) – 95 мл, плавиковая кислота (40 %) – 5 мл, затем в воде	Для выявления структуры титановых сплавов
Плавиковая к-та (40 %) – 5 мл, азотная к-та (d = = 1,4) – 5 мл, глицерин – 15 мл	Травление химическое протиранием в течение 10–60 с	Для выявления структуры сплавов титана с алюминием, ванадием, молибденом, серебром, хромом и др.
Плавиковая к-та (40 %) – 5 мл, азотная к-та (d = = 1,4) – 10 мл, вода 85 мл	Травление химическое в течение 10–15 с. Промывка в растворе: азотная кислота 95 мл, плавиковая кислота 5 мл, затем в воде	Для выявления микроструктуры титановых α-сплавов
Плавиковая к-та (40 %) – 50 мл; глицерин 50 мл	Травление химическое	Для выявления структуры β-сплавов титана
Магниевые сплавы		
Пикриновая к-та 5 г, уксусная к-та 5 мл, этиловый спирт 100 мл, вода 10 мл	Травление химическое погружением или смачиванием в течение 5–120 с. Соотношение кислот можно изменять от 1:20 до 10:1	Для выявления микроструктуры всех магниевых сплавов
Винная к-та – до 10 г, вода 100 мл	Травление химическое в течение 10–20 с, затем промывка водой, затем промывка ацетоном	Для выявления микроструктуры магниевых сплавов с алюминием, марганцем, цинком и др. в различных состояниях

Выявление микроструктуры

Оно сводится к обнаружению границ между отдельными структурными составляющими и к получению между ними рельефа на поверхности шлифа, что позволяет выяснить расположение отдельных фаз, двойниковых образований, форму, 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.

Примеры рекомендуемых реактивов для выявления структуры различных металлов и сплавов приведены в табл. 17.

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 отсутствии 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.

Примеры реактивов и наиболее часто используемых режимов электрохимического травления для различных материалов приведены в табл. 17.

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 перманга-

натом, 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.

Тепловое пленочное травление

При тепловом травлении на поверхности шлифа получают тонкие пленки с интерференционными полосами. При этом виде травления применяют разные способы нагрева: нагрев в воздушной среде (печи), нагрев образца в расплавленном металле или солях, нагрев образца в вакууме.

Примеры применения реактивов для цветного пленочного травления представлены в табл. 18.

Таблица 18. **Способы избирательного выявления (цветного окрашивания) структурных составляющих в свариваемых металлах и сплавах**

Состав травителя (или способ выявления структуры)	Режим травления	Результаты цветного окрашивания
Стали высоколегированные и специальные		
Гипосульфит 30 г, пиросернистокислый калий 10 г, уксусная к-та 5 мл, вода 100 мл	Травление химическое	Для идентификации α- и γ-мартенсита и других структурных составляющих в марганцевохромистых сталях
Насыщенный р-р тиосульфата натрия с добавкой пиросульфата калия (10 г на 100 мл раствора)	То же	Для выявления структуры высокомарганцовистых сплавов. Хорошо различаются γ-, ε-, α-фазы. Фазы приобретают следующие цвета: ε – белый, γ – серый, α – черный
Реактив Мураками: а) красная кровяная соль 10 г, едкий кали 10 г, вода 100 мл или б) красная кровяная соль 30 г, едкий кали 30 г, вода 60 мл	Травление химическое: а) при температуре 70–80 °С в свежеприготовленном реактиве в течение 1,5–10 мин; б) травление при температуре кипения	Цементит окрашивается позже других карбидов в цвета от голубого до серого. В хромоникелевых сталях аустенит остается белым, α-фаза приобретает оттенки от радужного до темно-коричневого, феррит – коричневато-желтый. В ниобиевых сталях фаза Fe_2Nb окрашивается в голубой цвет. В хромистых и хромомарганцевых сталях α-фаза имеет светло-синий оттенок, феррит окрашивается в желтоватый цвет, карбиды – в темные цвета. В никелевых и молибденовых сталях феррит окрашивается в серый цвет
Красная кровяная соль 10 г, вода 100 мл	Травление электрохимическое: U = 2,5 В, τ = = 20–30 с	На светлом фоне аустенита ярко-голубые карбиды и темно-коричневая α-фаза

Продолжение табл. 18

Состав травителя (или способ выявления структуры)	Режим травления	Результаты цветного окрашивания
Насыщенный водный раствор едкого натра	Травление электрохимическое: D_a = 0,5 А/см^2, τ = 15 с	На светло-голубом фоне аустенита α-фаза светло-желтого цвета или на сером фоне аустенита α-фаза – ярко-голубая с черной окантовкой
Царская водка 20 мл; метиловый спирт 60 мл	Травление химическое в течение 30 с – 9 мин	Аустенит светло-коричневый, α-фаза ярко-белая
Уксуснокислый свинец 10 г, вода 90 мл	Травление электрохимическое: D_a = 0,05–0,2 А/см^2, τ = 1–2 с	Аустенит светло-голубой, α-фаза темно-голубая
Тепловое травление	Нагрев до 500 °С, выдержка 1 ч, охлаждение на воздухе	α-фаза белая, аустенит темно-желтый, коричневатый, ε-фаза желтоватая
Сплавы на основе алюминия		
Азотная к-та (d = 1,4) – 10–25 мл; вода 90–75 мл	Травление химическое в нагретом до 70 °С растворе в течение 10–40 с	Фазы $CuAl_2$, $NiAl_3$, Mg_2Si чернеют, $FeAl_3$ приобретает пурпурную окраску. После травления в течение 2–3 с фаза $CuAl_2$ в сплавах алюминий–медь окрашивается в цвет от голубого до коричневатого. Остальные интерметаллиды остаются светлыми
Серная кислота (d = 1,84) – 5–20 мл; вода 95–80 мл	Травление химическое в нагретом до 50–60 °С растворе в течение 5–30 с	Фаза $FeA1_3$ темнеет, а $CuA1_2$ и $NiAl_3$ не травятся. В сплавах алюминия с марганцем γ-фаза темнее β-фазы. В сплавах алюминий–магний–кремний травится только Mg_2Si
Едкий натр 5–20 г, вода 100 мл	Травление химическое на холоду в течение 2 мин, в горячем растворе – несколько секунд. Темный налет с поверхности шлифа удаляют погружением в азотную кислоту	При кратковременном травлении сначала выявляется фаза $FeA1_3$. При дальнейшем травлении фазы $NiAl_3$ и $CuAl_2$ окрашиваются в темно-коричневый цвет, причем $NiAl_3$ окрашивается скорее. Фаза Al_3Mg_2 не выявляется
Плавиковая к-та (40 %) – 2–3 мл, вода 98–97 мл	Травление химическое в течение 10–40 с. Темный налет с поверхности шлифа удаляют погружением в азотную кислоту	Соединения алюминия с железом и никелем окрашиваются в коричневато-желтый цвет, а с кремнием – в пурпурный
10%-ный водный раствор красной кровяной соли 5 мл; плавиковая к-та (40 %) – 5 мл; азотная кислота (d = 1,4) – 5 мл, перекись водорода (30 %) – 50 мл, вода 100 мл (раствор красной кровяной соли прибавляют перед употреблением)	Травление химическое	В сплавах алюминий–кремний фазы $FeAl_3$ и $FeAl_4Si_2$ окрашиваются в голубоватый цвет. 10%-ный раствор красной кровяной соли в сплавах алюминий–никель и алюминий–медь–никель окрашивает фазу Al_2Ni в темно-серый, Al_3Ni – в светло-серый, $CuAl_2$ – в коричневый цвет
Сплавы на основе меди		
Насыщенный водный раствор хромпика 50–100 мл, серная к-та (d = 1,84) – 10 мл	Травление химическое в течение 30–60 с	В двухфазных латунях сильно травится β-фаза, α-фаза – слабее. В сплавах медь–цинк β-фаза окрашивается, γ-фаза остается светлой
Хромовый ангидрид 5–20 г, вода 100 мл	Травление химическое в течение 10–30 с	В двухфазной латуни α-фаза имеет оранжевый оттенок, β-фаза окрашивается в лимонно-желтый цвет

Продолжение табл. 18

Состав травителя (или способ выявления структуры)	Режим травления	Результаты цветного окрашивания
Насыщенный водный раствор хлорного железа 5 мл; 4%-ный водный раствор соляной к-ты (d = 1,19) – 30 мл, этиловый спирт 30 мл, амиловый спирт 30 мл	Травление химическое	Для сплавов меди с оловом, цинком, алюминием: α-фаза оранжевая; η-фаза в алюминиевых бронзах – черная; β-фаза коричневая
Насыщенный водный раствор брома	Травление химическое в течение 10–60 с. Пленку удаляют раствором аммиака	В двухфазных латунях β-фаза темнеет, α-фаза не травится. В сплавах медь–цинк γ-фаза темнеет, β-фаза не травится
Сплавы на основе титана		
Щавелевая к-та 5 г, лимонная к-та 5 г; 85%-ный раствор ортофосфорной к-ты (d = 1,71) – 5 мл, 85%-ный раствор молочной к-ты 100 мл, вода 35 мл, этиловый спирт 60 мл	Травление электрохимическое: U = 65 В, τ = 1,5 с, расстояние анод–катод 12 мм	Зерна α-фазы, ориентированные в базисной плоскости, окрашиваются в желтый цвет, остальные зерна этой фазы – в красный, β-фаза – в темно-красный или фиолетовый
Щавелевая к-та 5 г, винная к-та 5 г, лимонная к-та 5 г, ортофосфорная к-та (d = = 1,71) – 3 мл; вода 50 мл, этиловый спирт 27 мл, метиловый спирт 20 мл	Травление электрохимическое: U = 60 В, τ = 2 с	α-фаза темно-голубая; β-фаза малиновая или фиолетовая; бориды титана желтые, $TiCr_2$ желтый
Сплавы на основе магния		
Соляная к-та 2 мл, вода 98 мл	Травление химическое при комнатной температуре	Твердый р-р магния темнеет в зависимости от продолжительности травления. Фазы Mg_4Al_3 и Mg_2Cu изменяют окраску от белой до голубой и розовой соответственно. Фаза $Mg_2Cu_3Al_2$ сереет

Метод магнитной металлографии

Одной из задач, часто решаемых применительно к аустенитным сталям, является определение в них с помощью магнитной металлографии наличия и распределения α-фазы.

Для обнаружения на микрошлифе структурных составляющих, обладающих ферромагнетизмом, применяют методы магнитного коллоида и магнитной пасты. По первому способу магнитная фаза обнаруживается путем осаждения на полированной поверхности коллоидных частиц оксида железа, которые под влиянием магнитного поля притягиваются к структурным составляющим, обладающим ферромагнетизмом. По образованным из коллоидных частиц узорам можно судить о распределении этих ферромагнитных составляющих.

По второму способу расположение магнитной фазы выявляют путем нанесения на поверхность микрошлифа слоя специальной пасты, содержащей магнитные частицы, и последующей отмывки ее мыльной пеной для удаления частиц, не зафиксированных ферромагнитной составляющей.

Прочие методы выявления микроструктуры

Метод вакуумного травления. При этом методе выявление микроструктуры происходит за счет избирательного испарения при нагреве в вакууме и появления рельефа на поверхности нетравленого шлифа.

Метод ионного травления. При этом методе выявление микроструктуры происходит за счет избирательного испарения при ионной бомбардировке (катодного травления) и появления рельефа на поверхности нетравленого шлифа.

5.2.5. ХАРАКТЕРНЫЕ СТРУКТУРЫ СВАРИВАЕМЫХ И ПАЯЕМЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МЕТАЛЛОВ

Материалы на основе железа (рис. 5.1–5.8)

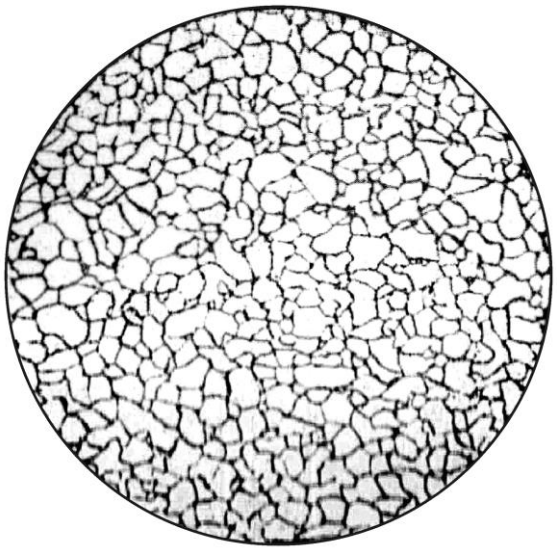


Рис. 5.1. Феррит. × 100

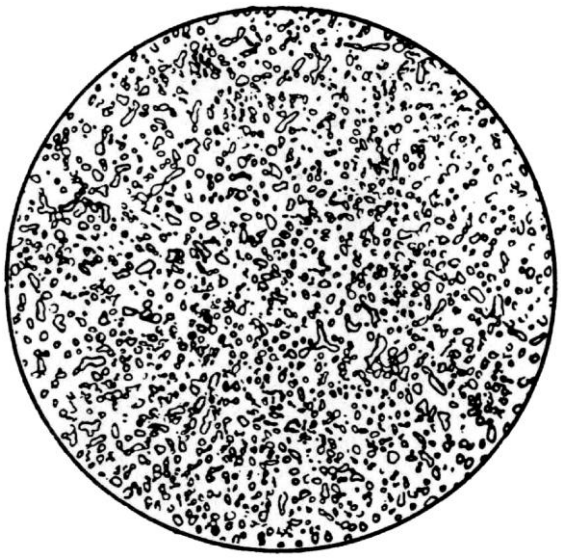


Рис. 5.2. Доэвтектоидная сталь с 0,6 % С: перлит зернистый. × 100

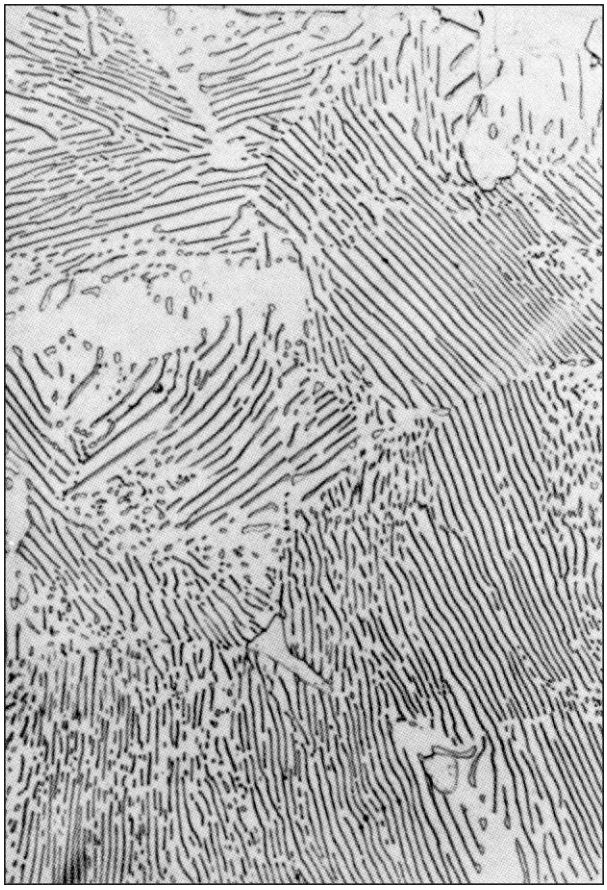


Рис. 5.3. Заэвтектоидная сталь с 1 % С: перлит пластинчатый. × 1000

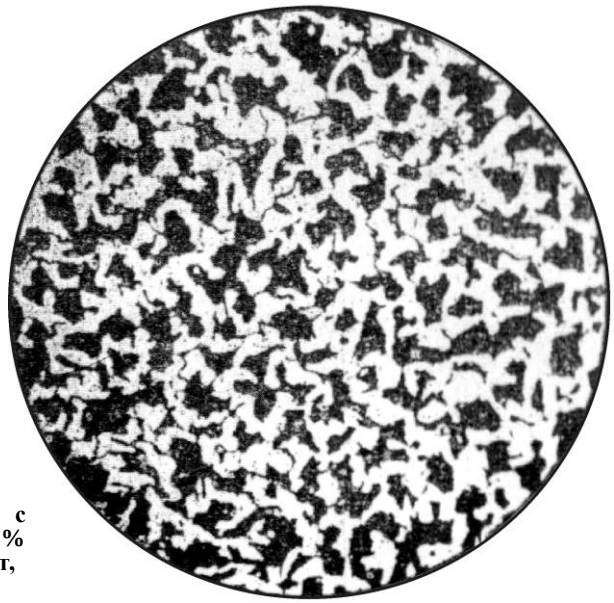


Рис. 5.4. Доэвтектоидная сталь с 0,6 % С: смесь 50 % феррита + 50 % перлита (светлые поля – феррит, темные – перлит)

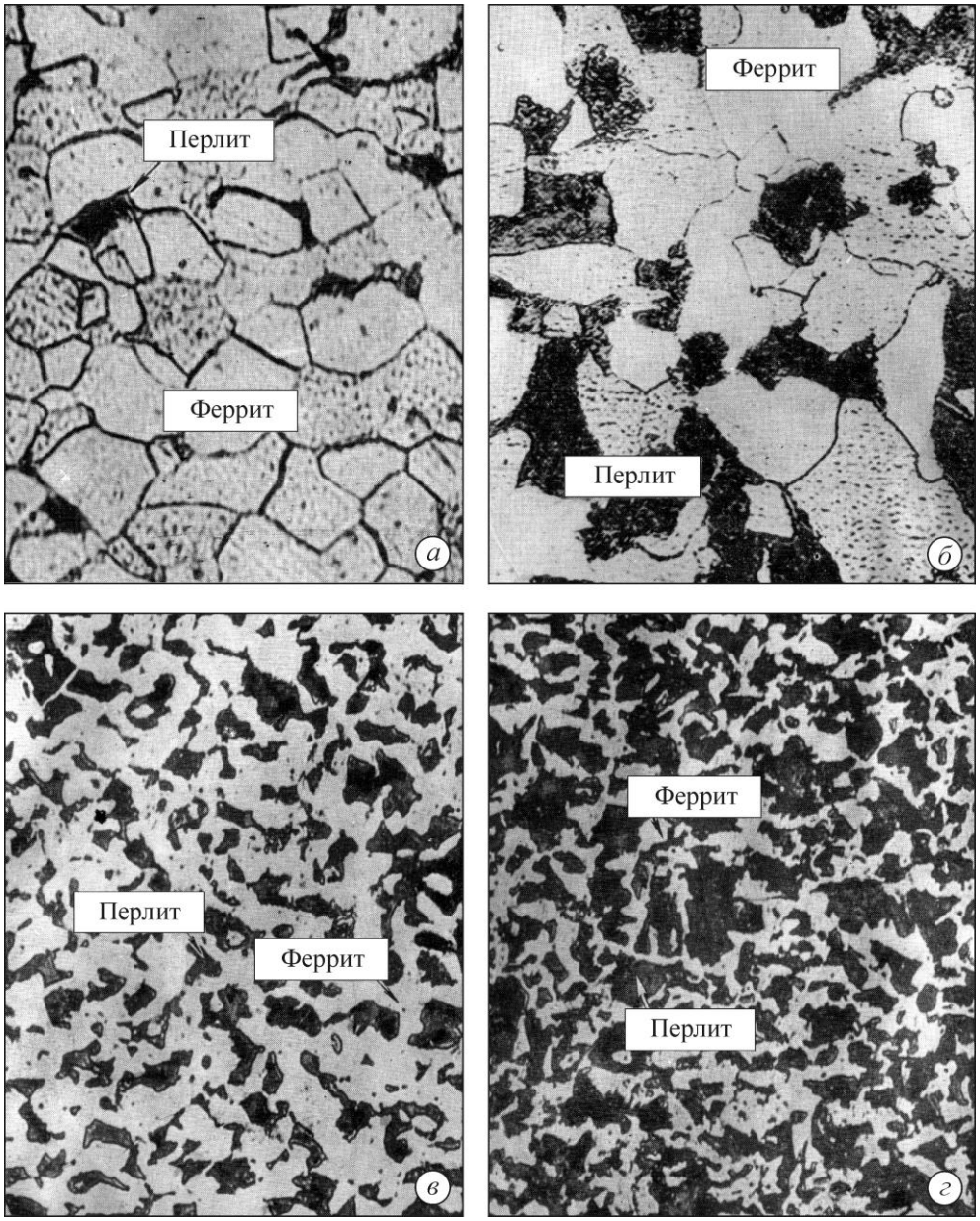


Рис. 5.5. Сталь:
а – с 0,1 % С; *б* – с 0,2 % С; *в* – с 0,3 % С; *г* – с 0,4 % С (светлые поля – феррит, темные – перлит); *д* – с 0,6 % С (темные поля – перлит и светлая сетка феррита); *е* – с 1,2 % С (темные поля – перлит и светлая сетка цементита). × 200

Низколегированные стали

Структура этих сталей чаще всего двухфазная, редко – однофазная или многофазная.

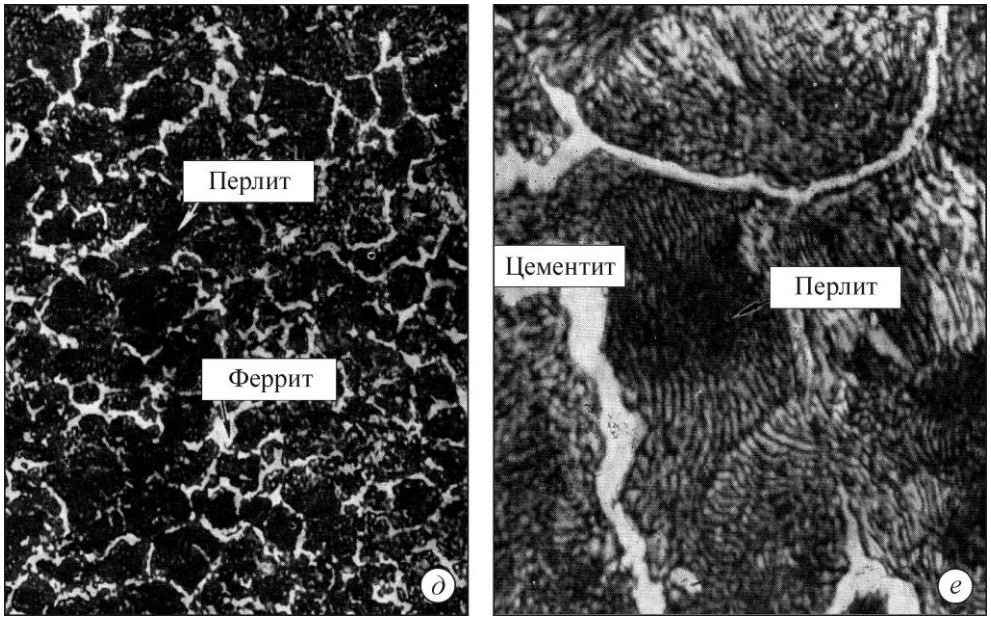


Рис. 5.5. Продолжение

Матрица – твердый раствор углерода в железе (феррит). Основные фазы: Fe_3C (цементит), Fe_2C (ε-карбид). Другие фазы: включения оксидов, сульфидов, оксисульфидов, нитридов, карбонитридов и боридов.

Первичная структура дендритная или ячеистая, вторичная структура разнообразная в зависимости от вида термической или термомеханической обработки.

Высоколегированные стали

Структура этих сталей может быть одно-, двух- или многофазная. Она содержит карбидные или интерметаллидные фазы в матричном твердом растворе, образованные легирующими элементами – хромом, марганцем, никелем, молибденом, вольфрамом, кобальтом, кремнием. В этих сталях присутствуют также фазы – сложные карбиды, цементит, специальные карбиды (простые или двойные карбиды ниобия, титана, вольфрама и других элементов). Форма карбидов глобулярная, стержнеобразная, пластинчатая. Распределение в матрице: равномерное по объему, в виде скоплений, в виде сетки. Структуры: ферритная (α- или β-феррит), аустенитная, аустенитно-ферритная, ледебуритная. Метастабильные карбиды и их переходные формы в оптическом микроскопе не разрешаются, их идентифицируют физическими методами.

Чугуны (рис. 5.9; 5.10)

Основные типы структур те же, что и у стали. Свободный углерод присутствует в виде графитных включений пластинчатой, шаровидной или хлопьевидной формы. Виды пластинчатого графита: равномерно-пластинчатый, неравномерно-

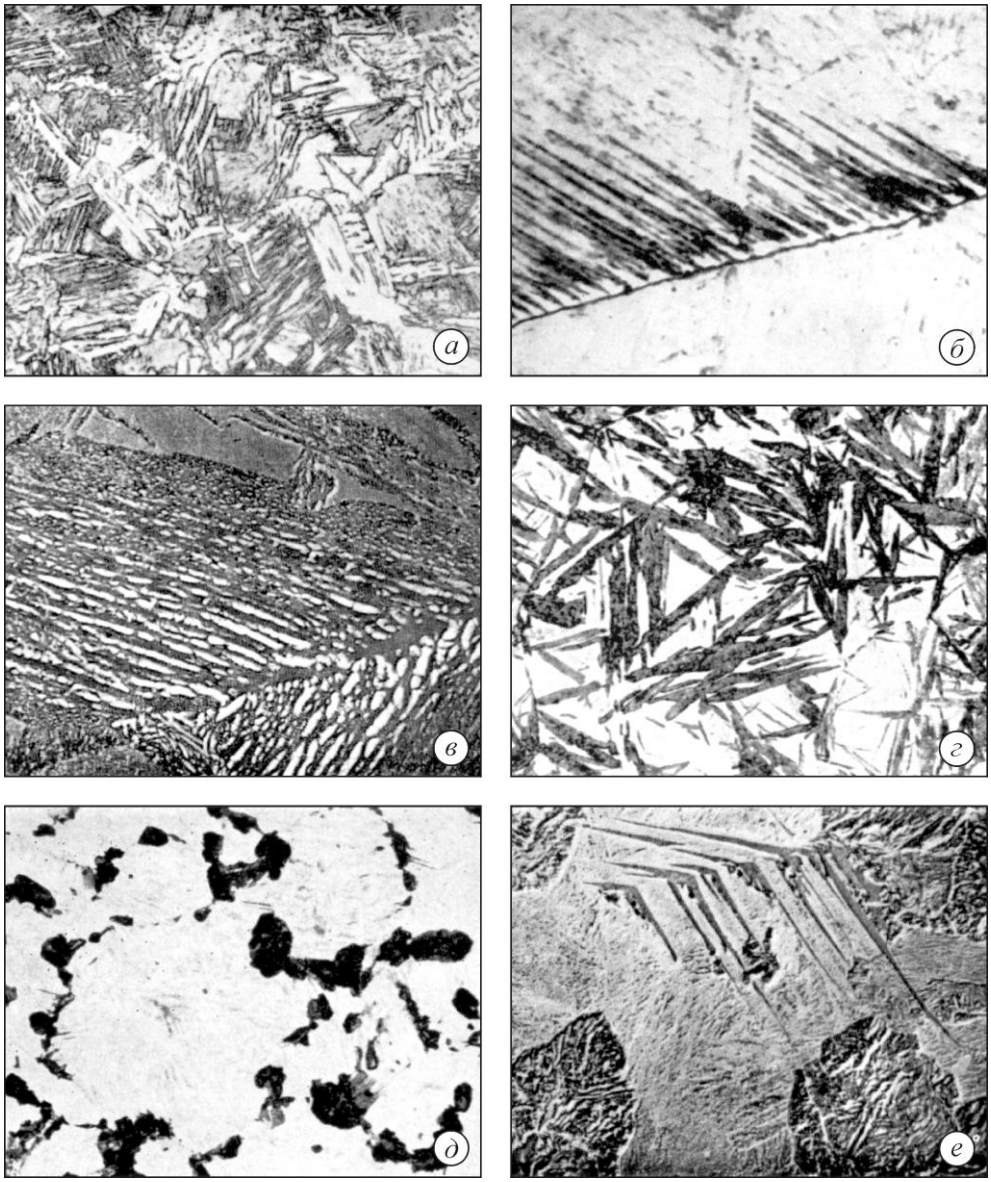


Рис. 5.6. Марганцовистая сталь:
а – с 0,2 % С, × 500; *б* – с 0,6 % С, × 2000; *в* – с 0,8 % С, × 5000 (верхний бейнит); *г* – с 0,6 % С, × 500 (нижний бейнит); *д* – с 0,6 % С, × 500; *е* – с 0,6 % С, × 5000 (троостит)

пластинчатый, междендритный, сетчатый, ветвистый, розеточный, гнездообразный. Виды сфероидизированного графита: совершенной или несовершенной глобулярной формы, червеобразной, узелковой, веретенообразной и др. Виды хлопьевидного графита: компактный, рыхлый, узелковый, облаковидный и т.д. Наряду с графитом, образовавшимся при кристаллизации (сегрегационный графит), в структуре присутствуют тройная или псевдобинарная фосфидная эвтек-

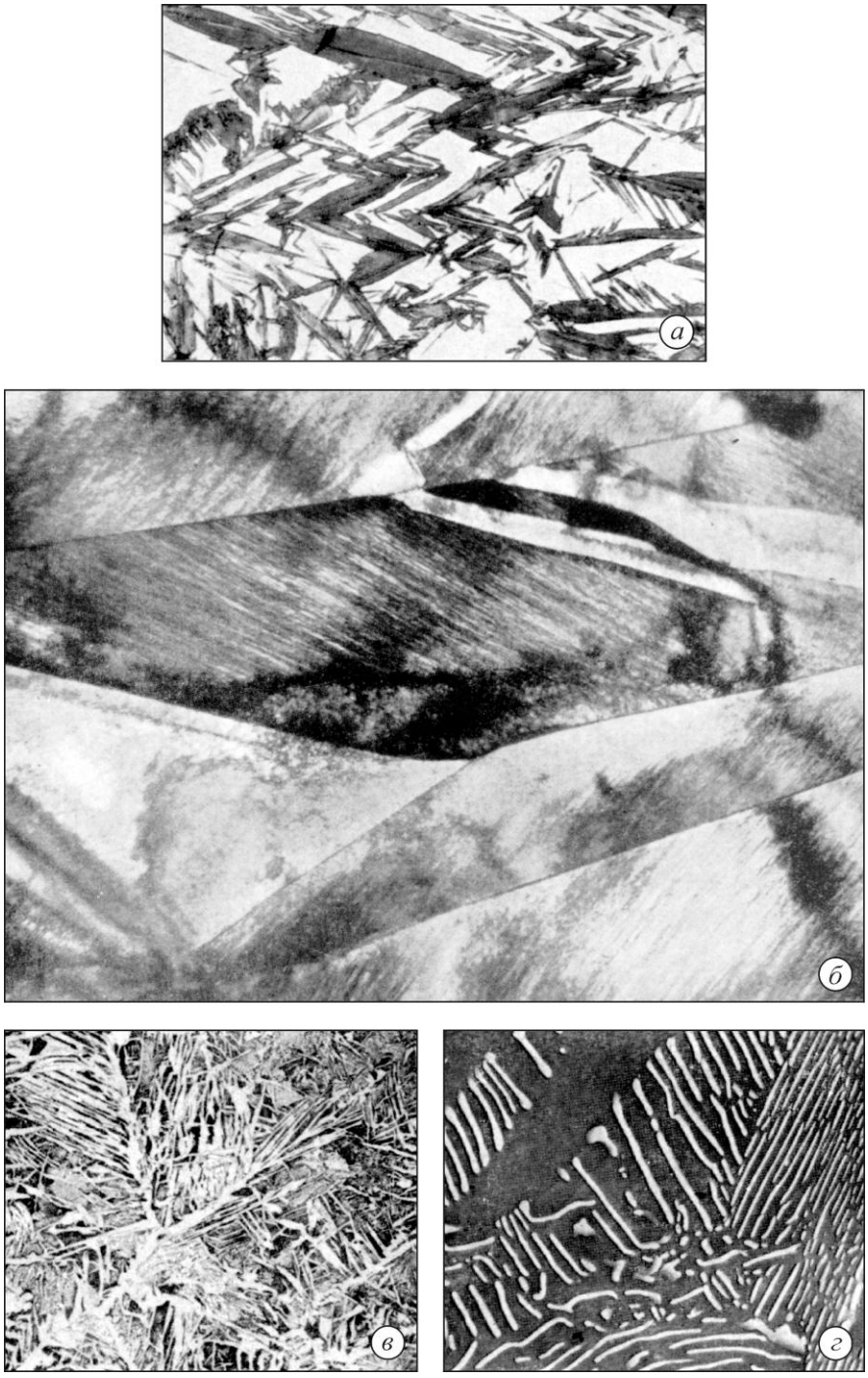


Рис. 5.7. Сталь:
а, б – железоникелевая с 0,6 % С (100 % мартенсита); *в, г* – углеродистая с 0,4 % С (видманштеттова структура); *а* – × 500; *б* – × 20 000; *в* – × 100; *г* – × 5000

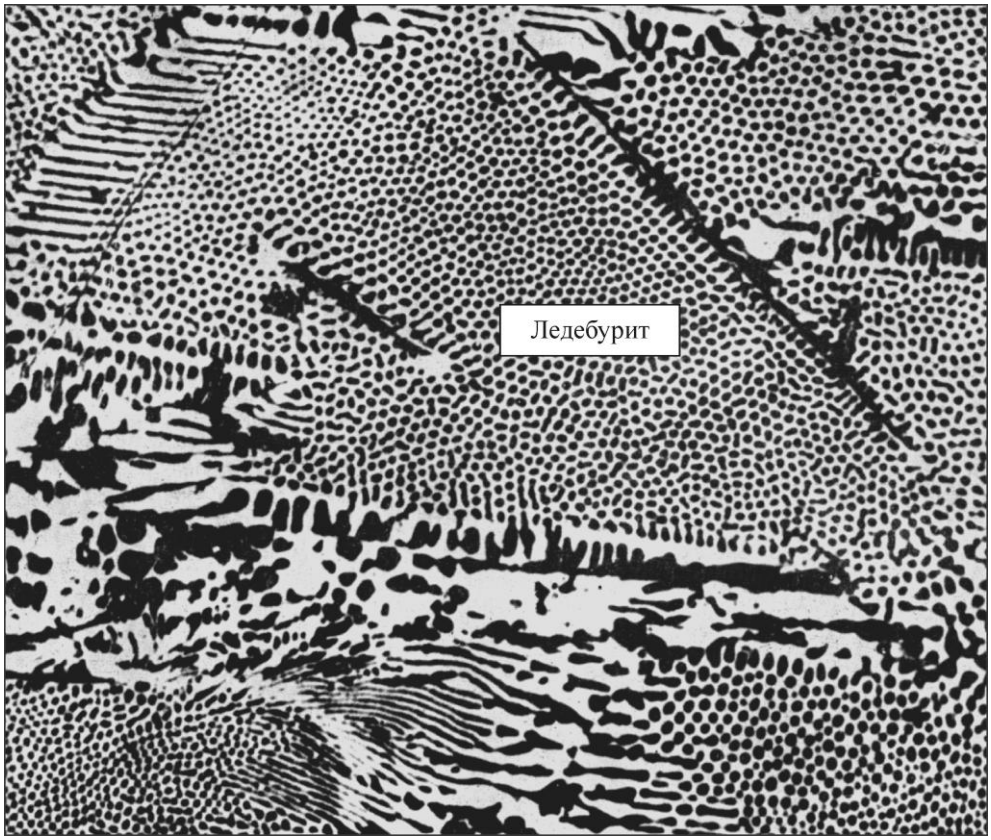


Рис. 5.8. Заэвтектоидная сталь (ледебурит): эвтектика из округлых темных включений перлита, расположенных в светлой цементитной основе. × 500

тика (Fe_3P, Fe_3C, Fe). В ледебуритной структуре первичный цементит бывает компактным, мелкодисперсным, сетчатым, пластинчатым, иглообразным. Вторичный цементит бывает пластинчатым или ромбовидным. Возможная форма цементита: глобулярная, пластинчатая, многогранник, ветвистая. Сульфиды железа и марганца распределены неравномерно.

Графитная фаза в чугунах очень мягкая и хрупкая, выкрашивается при механической обработке, при химической или электрохимической обработке устойчива.

Цветные металлы

Сплавы меди (рис. 5.11–5.13)

Структура чаще всего одно- или двухфазная, реже – многофазная.

Матрица представляет собой однородный твердый раствор на основе меди; зерна обычно полиэдрические, двойникованные. Избыточные фазы – интерме-

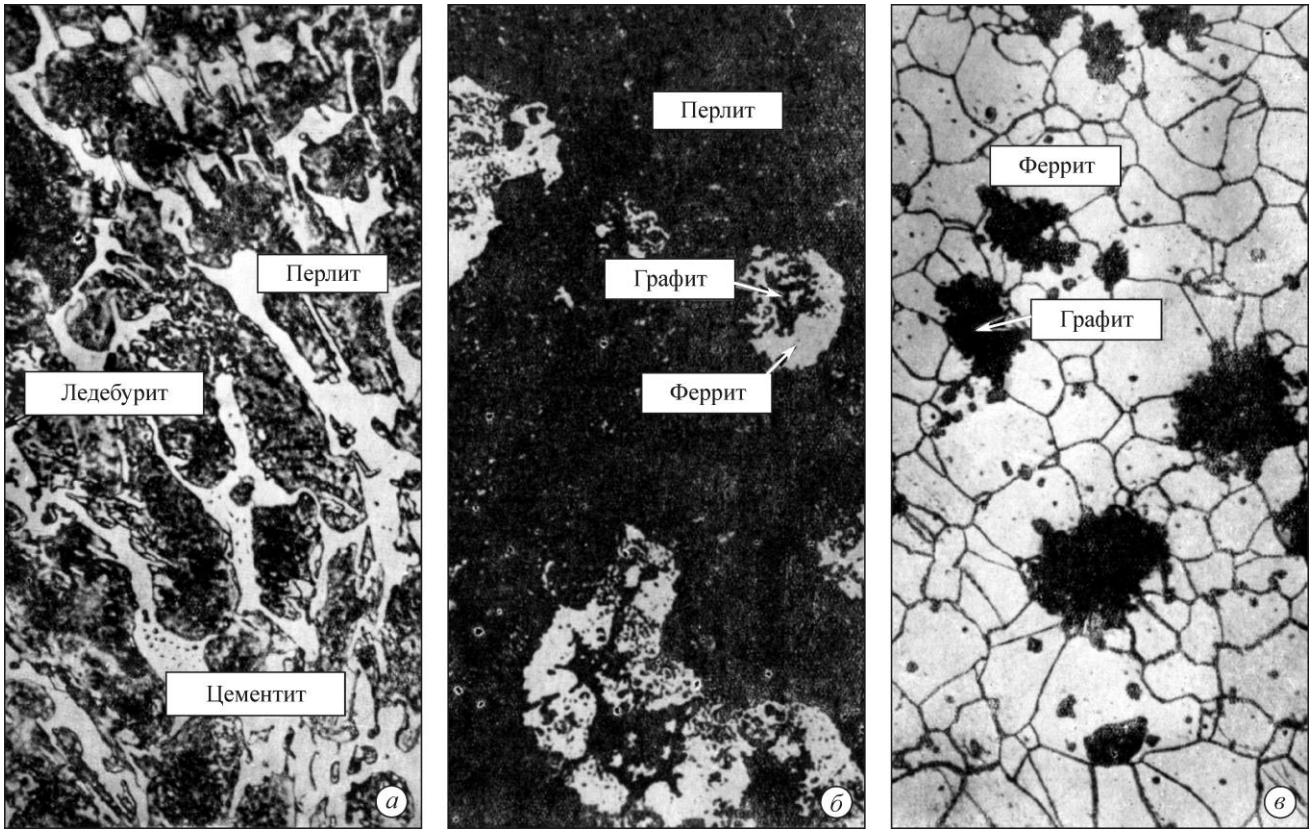


Рис. 5.9. Ковкий чугун:
а – до отжига (белый доэвтектический чугун); *б* – после отжига (после первой стадии графитизации); *в* – после отжига (после второй стадии графитизации). × 250

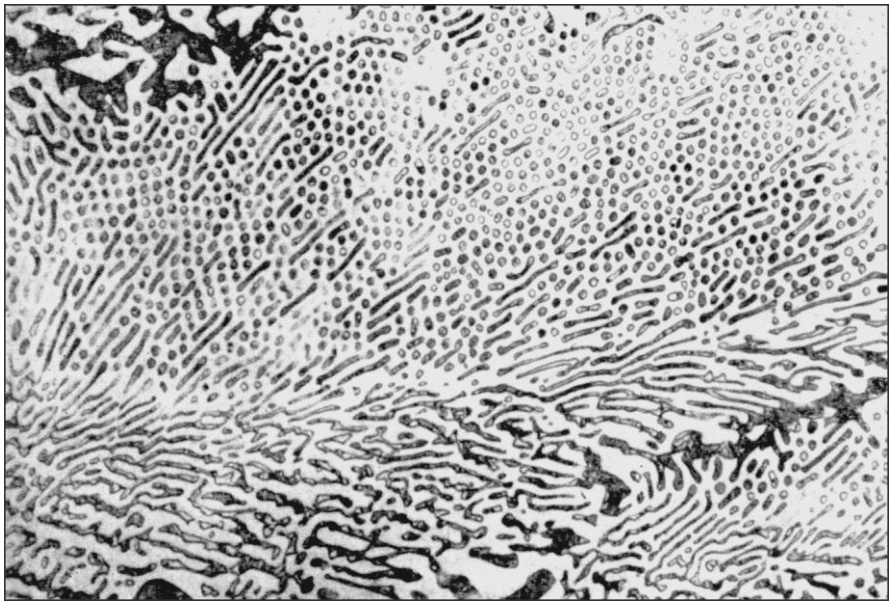


Рис. 5.10. Эвтектический белый чугун с 4,3 % С

таллидные соединения, образовавшиеся при перитектических реакциях или эвтектоидных превращениях.

Первичная структура – эвтектика. Свинец присутствует в виде самостоятельной фазы из-за низкой растворимости в меди.

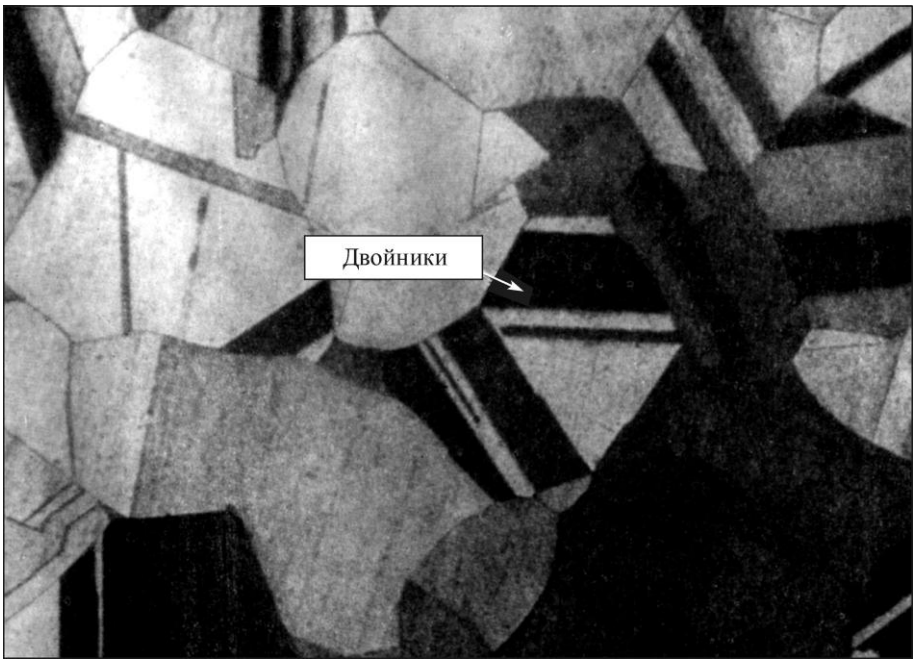


Рис. 5.11. Микроструктура α-латуни. × 250

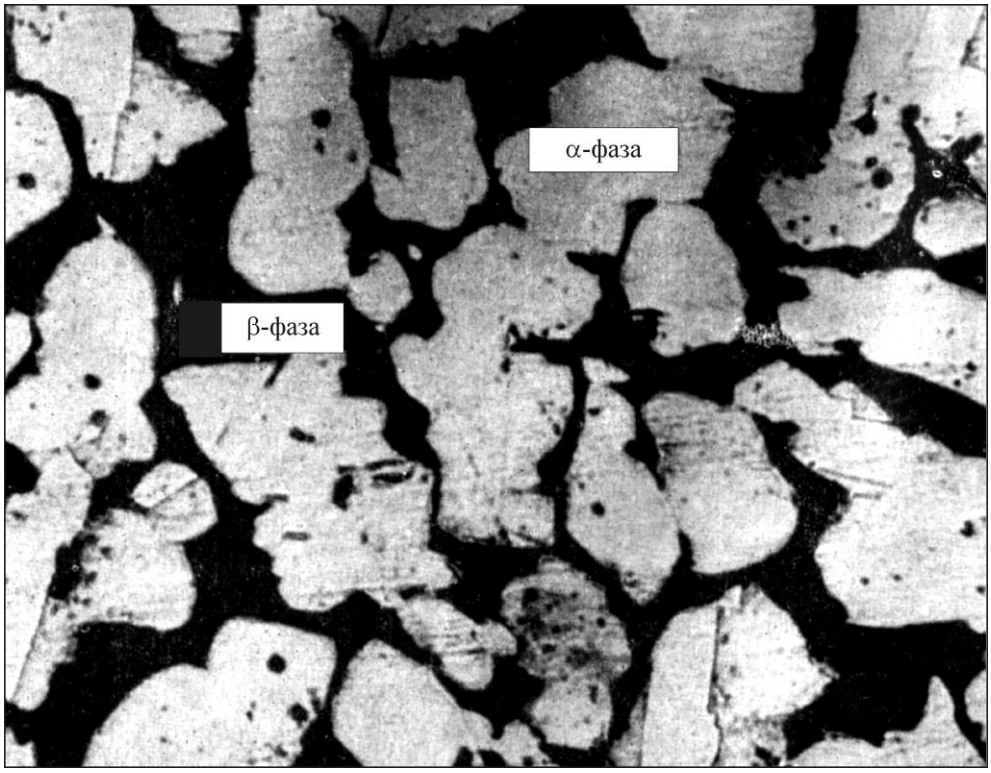


Рис. 5.12. Микроструктура α + β-латуни. × 250

Сплавы алюминия (рис. 5.14–5.16)

Алюминиевые сплавы представляют собой твердый раствор, легированный различными элементами.

Структура сплавов преимущественно многофазная, реже – однофазная. Чистый алюминий обычно представляет собой крупные полиэдрические зерна без двойников; α-твердый раствор имеет низкую предельную растворимость легирующих элементов, чаще всего увеличивающуюся с повышением температуры, что вызывает появление эвтектики; разнообразные интерметаллидные соединения алюминия с легирующими элементами (например, Al_2Cu, Al_3Fe, Al_6Mn, Mg_2Si, $Al_3Si_2Fe_2$) часто встречаются в характерных сочетаниях.

Металлографическая идентификация интерметаллидов по форме и травимости возможна, но затруднительна: первичные выделения кремния компактны, имеют лентообразную, пластинчатую или иглообразную форму. Эвтектика Al–Si грубозернистая, после термической обработки мелкозернистая.

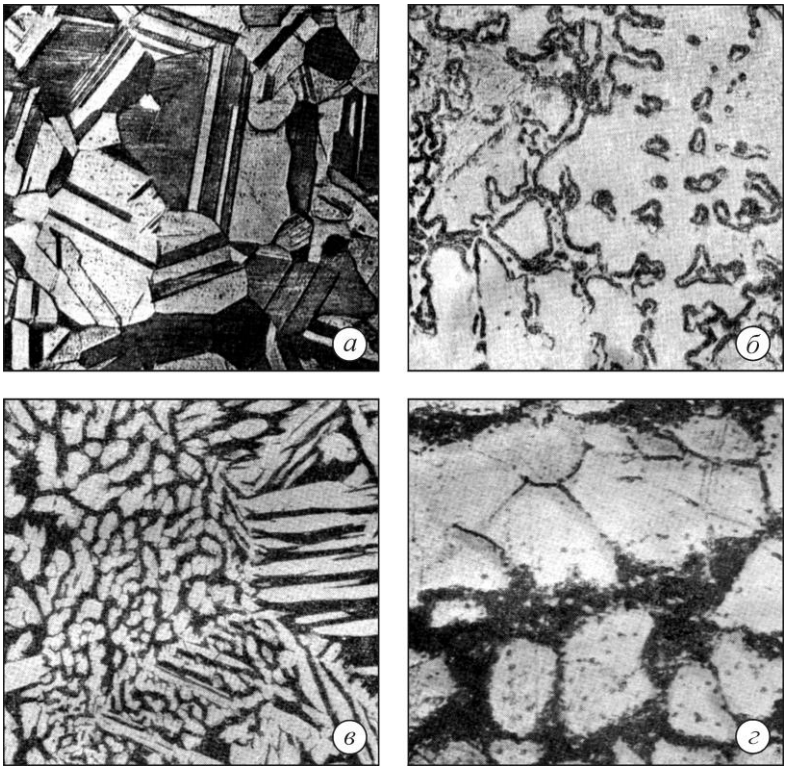


Рис. 5.13. Микроструктура бронзы:
а – оловянисто-свинцовая; полиэдрическая структура с двойниками рекристаллизации, × 130; *б* – оловянисто-свинцовая; в основной массе твердого раствора между осями дендритов расположены участки, богатые оловом, более темного цвета и черные выделения свинца, × 240; *в* – алюминиевая; светлые выделения α-фазы и эвтектоид α + γ (темные участки), × 50; *г* – алюминиевая; светлые участки – твердый α-раствор, темные – распавшийся твердый β-раствор, × 520

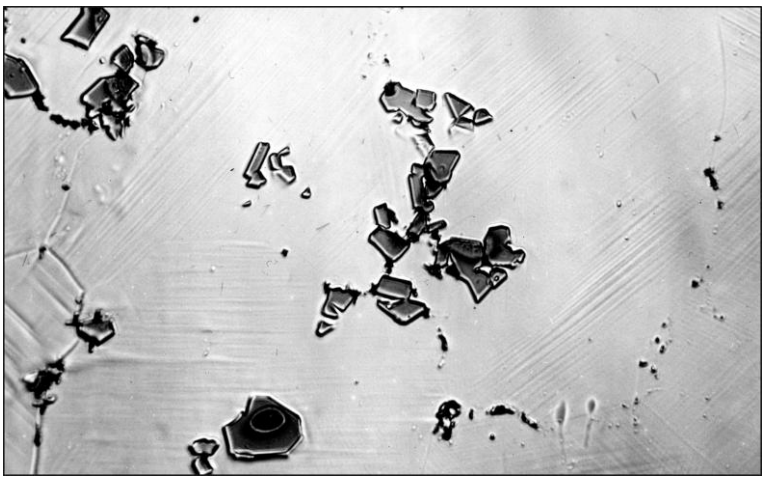


Рис. 5.14. Микроструктура литого алюминиевого сплава Al – 9,5 % Mg с добавкой 1 % Mn: на фоне твердого раствора видны выделения первичных интерметаллических фаз $Al_{10}Mg_2Mn$. × 500

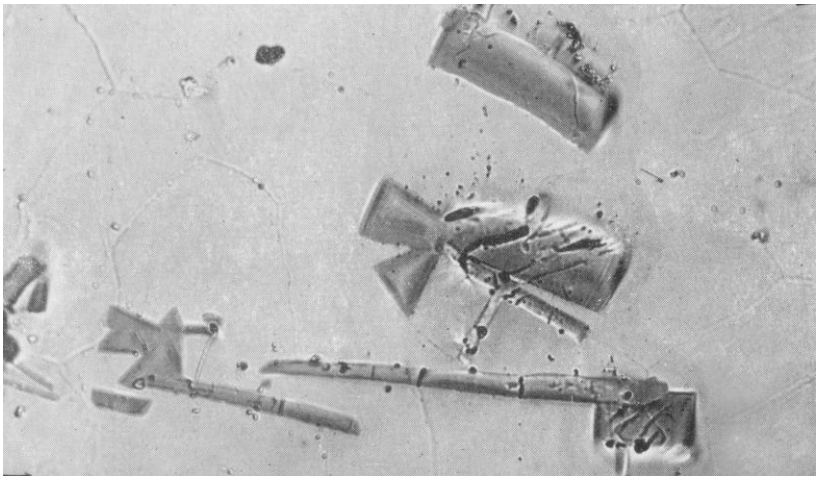


Рис. 5.15. Микроструктура литейного алюминиевого сплава АЛ27-1: на фоне α-твердого раствора видны крупные частицы первичных интерметаллических фаз Al_3Ti и Al_3Zr. × 500

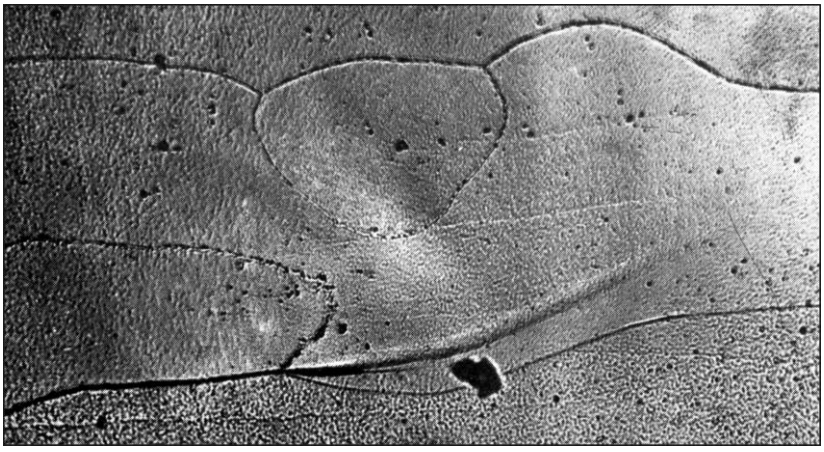


Рис. 5.16. Микроструктура деформируемого алюминиевого сплава В93. × 500

Сплавы магния (рис. 5.17; 5.18)

Основными легирующими элементами в магниевых сплавах являются алюминий и цинк. Они входят как в состав твердого раствора, так и образуют интерметаллидные соединения Mg_4Al_3, $MgZn_2$, $Mg_4Al_3Zn_3$, MgAlZn.

Структура однофазная или многофазная. Магний с алюминием, марганцем, цинком образует твердые растворы с ограниченной, зависящей от температуры растворимостью. Интерметаллидные фазы с алюминием резко ограненные, белого цвета. Труднорастворимые кристаллиты часто выглядят как распавшаяся эвтектика. Эвтектика Mg_2Si с первичными кристаллами магния серо-голубого цвета. В литейных сплавах могут быть выделения кристаллов фазы $Mg_{17}Al_{12}$ по гра-

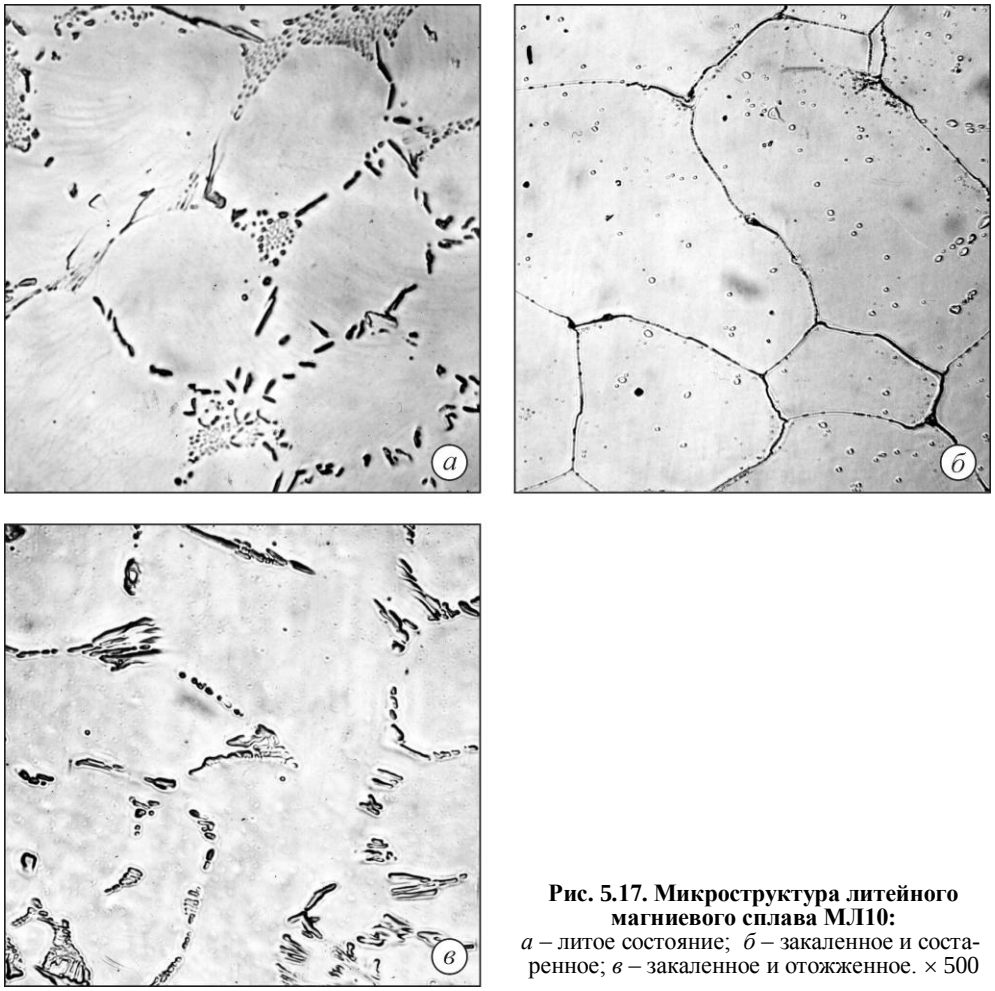


Рис. 5.17. Микроструктура литейного магниевого сплава МЛ10:
а – литое состояние; *б* – закаленное и состаренное; *в* – закаленное и отожженное. × 500

ницам зерен и частицы ZnZr и $ZnZr_3$. В деформированных сплавах встречаются фазы $Mg_{17}Al_{12}$ в виде строчек в направлении деформации, а также фазы $Mg_{12}Nd$, Mg_3Th, $Mg_{24}Y$ и др.

Сплавы титана (рис. 5.19; 5.20)

Сплавы титана бывают одно-, двух- и многофазные; чистый титан полиморфен: гексагональный титан устойчив до 882 °С, β-титан с ОЦК решеткой устойчив до 1668 °С. При охлаждении он претерпевает превращения мартенситного типа. Промышленные сплавы титана имеют структуру трех типов: α, α+β и β. Для сплавов титана характерно образование твердых растворов внедрения, карбидов, нитридов, интерметаллидных фаз TiAl, $TiAl_3$, Ti_2H_7.

Сплавы никеля (рис. 5.21)

Основными легирующими элементами в никелевых сплавах являются те, которые создают гетерогенную структуру с упрочнителями в виде сложных интерметаллидных соединений и карбидов (C, Al, Nb, Ti, Hf, B, Mo, Cr, W).

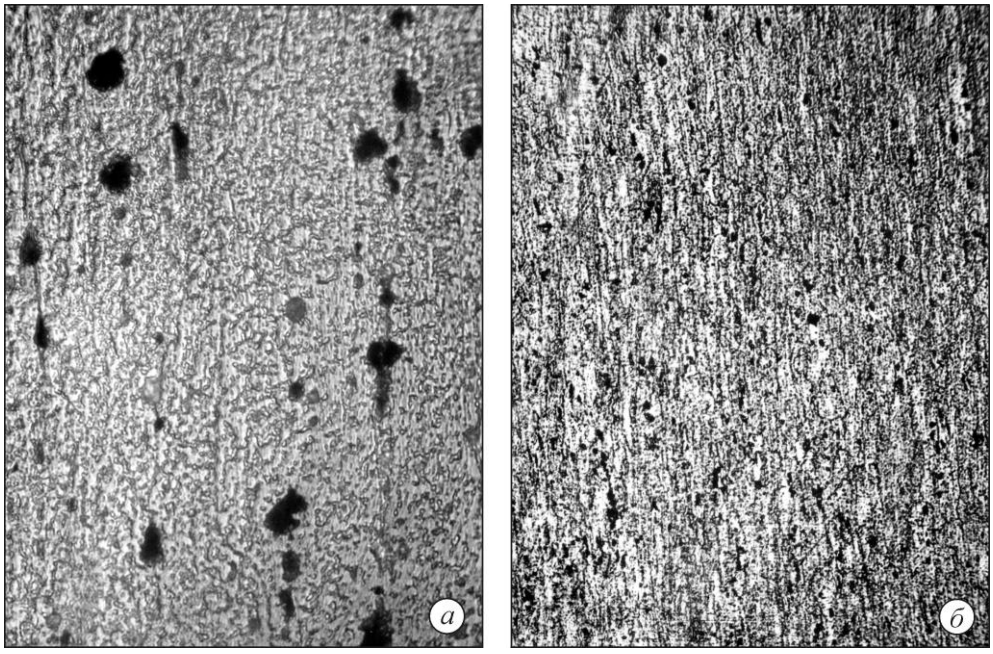


Рис. 5.18. Микроструктура деформируемых магниевых сплавов (лист толщиной 2 мм):
а – сплав МА15; *б* – сплав МА20, отжиг 250 °С, × 500; *в* – сплав МА19, прессованный пруток без термической обработки, × 250

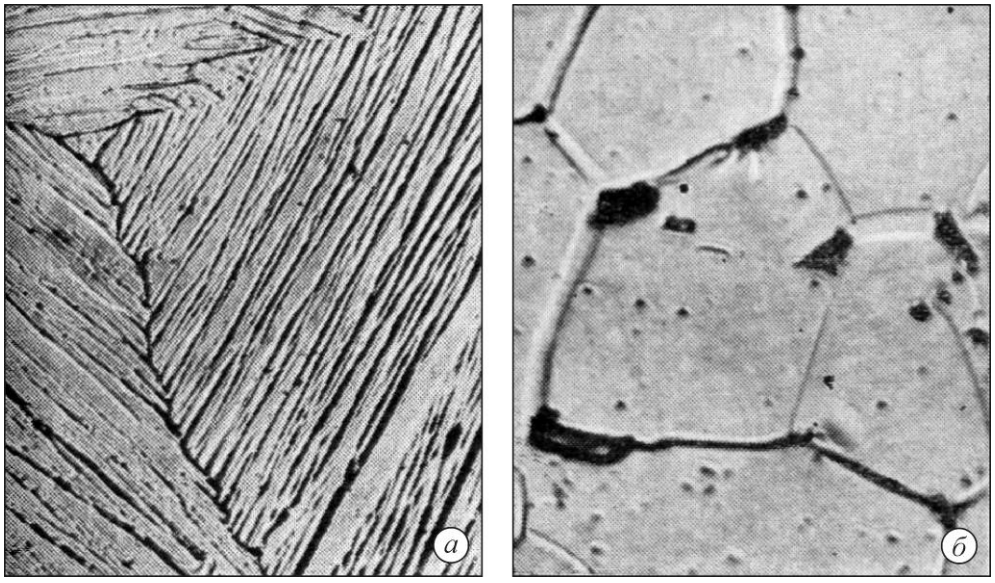


Рис. 5.19. Микроструктура сплава ВТ5 с пластинчатой (*а*) и полиэдрической (*б*) α-фазой. × 200

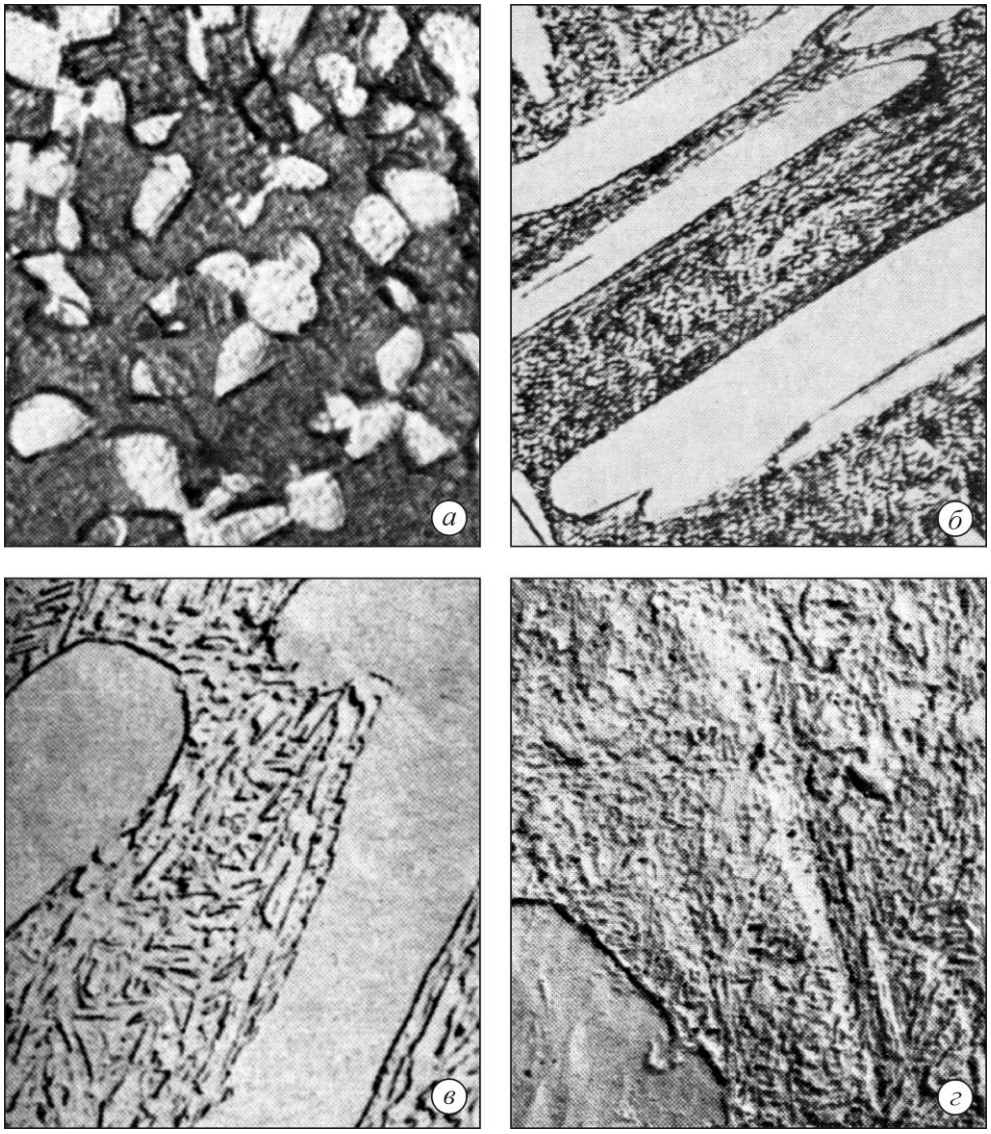


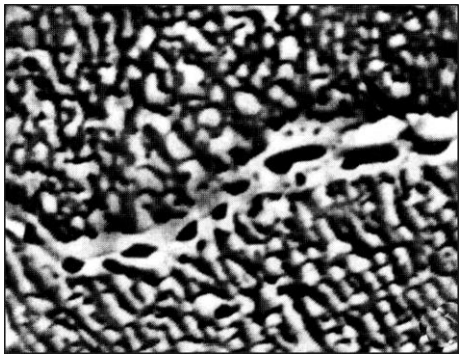
Рис. 5.20. Микроструктура сплава ВТ3-1 после закалки на мартенсит и отпуска в течение 5 ч при температуре:
а, б – 650 °С, × 1000; *в* – 650 °С, × 7000; *г* – 550 °С, × 7000

Основные составляющие структуры сплавов: матрица – аустенитная γ-фаза на никелевой основе, интерметаллидная γ′-фаза, выделяющаяся когерентно с аустенитом, карбиды по границам и в объеме зерен, тройные эвтектики, γ-, γ′-карбиды (МС), карбоборидные фазы.

Структура сварных соединений

Структура сварных соединений подразделяется на структуру шва, зону сплавления и зону термического влияния.

Рис. 5.21. Микроструктура литого никелевого сплава ЖС6У. × 500



Характерная структура сварного соединения проката из стали 30Х2Н2М приведена на рис. 5.22, из алюминиевого сплава В92 (система Al–Zn–Mg), модифицированного титаном и цирконием, – на рис. 5.23.

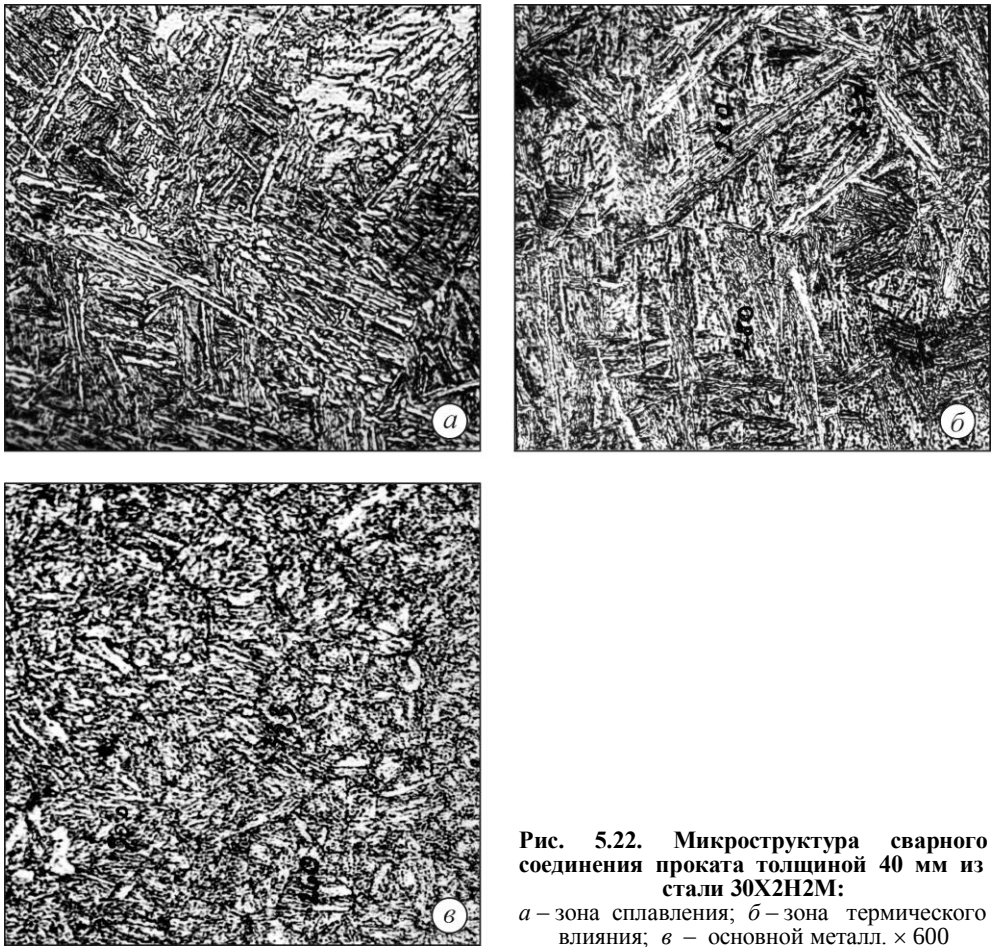


Рис. 5.22. Микроструктура сварного соединения проката толщиной 40 мм из стали 30Х2Н2М:
а – зона сплавления; *б* – зона термического влияния; *в* – основной металл. × 600

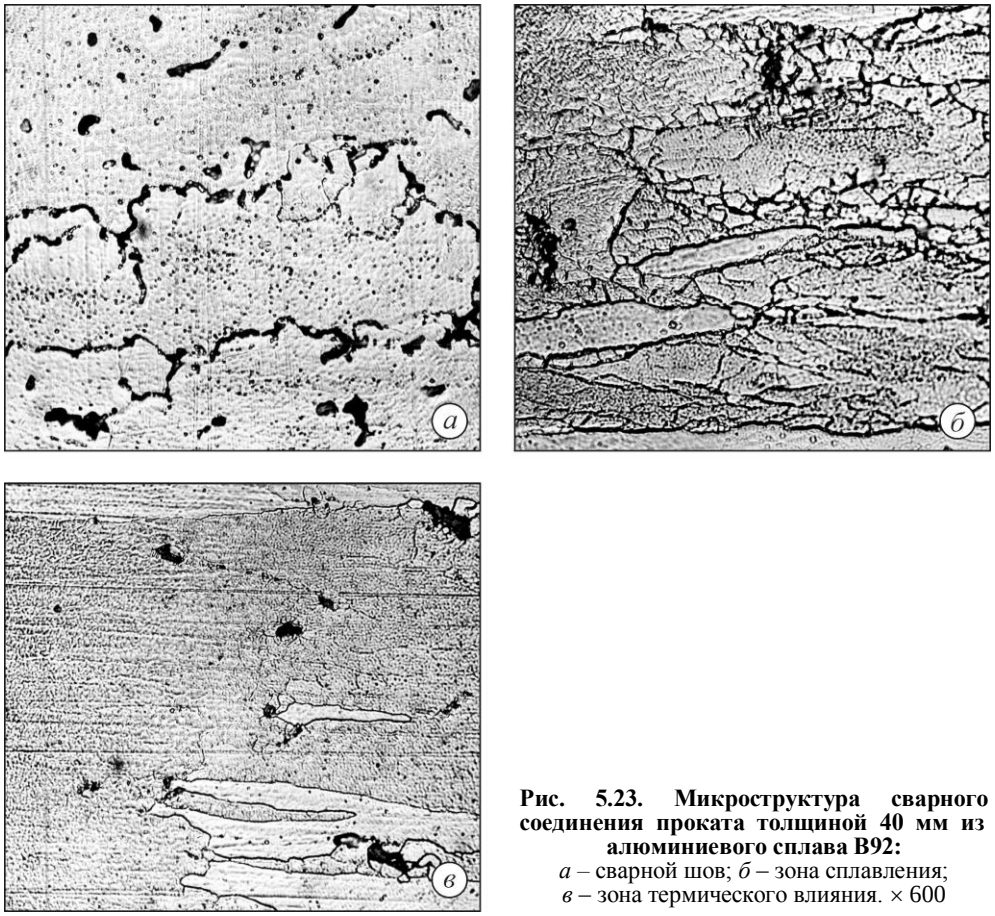


Рис. 5.23. Микроструктура сварного соединения проката толщиной 40 мм из алюминиевого сплава В92:
а – сварной шов; *б* – зона сплавления;
в – зона термического влияния. × 600

5.3. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ РАЗРУШЕНИЯ СВАРНЫХ И ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

5.3.1. ОЧИСТКА ПОВЕРХНОСТЕЙ ИЗЛОМОВ И ИХ КОНСЕРВАЦИЯ

Поверхность разрушения сварных соединений (изломов), возникшая при эксплуатации или натурных 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. Рекомендуемые способы очистки и консервации приведены в табл. 19.

Таблица 19. **Характеристика способов консервации и очистки изломов**

Способ консервации или очистки	Назначение	Порядок проведения операций
	А. Консервация	
Герметизация	Длительное хранение изломов (как правило, образцов малых размеров)	Излом помещают в контейнер с осушителем (силикагелем)
Помещение в защитную среду	Предотвращение отпотевания образцов (как правило, малых размеров) после испытаний при пониженных температурах	Немедленное погружение в спирт (C_2H_5OH) после испытаний до достижения образцами комнатной температуры с последующей тщательной сушкой
Нанесение жидких покрытий	Консервация изломов больших размеров	Нанесение тавота на поверхность излома
	То же, малых размеров	Погружение излома в вакуумное масло или обезвоженное трансформаторное масло
Нанесение твердых покрытий	Консервация изломов больших размеров То же, малых размеров	Нанесение на поверхность лака на основе нитрата целлюлозы, акриловых лаков[*1] 1. Нанесение на поверхность излома пластиковых реплик из ацетата целлюлозы. 2. Напыление металла или погружение излома в жидкий металл, используемый для покрытия
	Б. Очистка	
Осушка	Удаление постороннего материала, а также влаги с поверхности изломов	Обдувка струей сжатого воздуха
Промывка	Удаление масла, загрязнений, консервирующих покрытий	Многократное погружение в растворитель[*2] с протиранием волосяной щеткой, последующая промывка в бензине и спирте (этиловом)
Сухая очистка	Удаление с поверхности изломов неплотно сцепленных с ними материалов	Производится мягкой кистью. Не допускается применение щеток во избежание повреждения поверхности изломов
Очистка с помощью ультразвука	При затруднениях с удалением загрязнений	Очистка производится в растворах[*3] в моечных ультразвуковых ваннах. Продолжительность очистки подбирают экспериментально в зависимости от степени загрязнения излома
Промывка в растворителях (для анализа макростроения излома)	Удаление окисленного слоя	Поочередное погружение излома в растворитель и ингибитор[*4]. Промежуточный контроль состояния рельефа производится визуально или в оптическом микроскопе с увеличением до 120 крат
	Удаление ржавчины	Многократное погружение в раствор аммониевых солей лимонной и щавелевой кислот
	Удаление пластиковых консервирующих покрытий (реплик)	Погружение на 1–15 мин в 20%-ный раствор соляной кислоты в воде. Погружение излома в метилацетат, ацетон или смесь диметилкетона, толуола и трихлорэтилена[*5]

[*1]Способ применяется также для очистки.

[*2]Растворители: 1) бутилацетат 30 %, ацетон 30 %, ортоксилол 40 %; 2) булитацетат 12 %, ацетон 26 %, толуол 62 %.

[*3]0,2%-ный водный раствор четыреххлористого углерода CCl_4 или гексаметилентетрамина с 20%-ной HCl.

[*4]Растворители: 1) 20%-ный раствор HCl в этиловом спирте; 2) раствор 150 г $AgNO_3$ и 3 г Na_2CO_3 в 1 л дистиллированной воды; 3) 20%-ный раствор серной кислоты в воде.

Ингибитор ЧМ (ТУ МНП 521–54) может применяться с любым реактивом.

[*5]Ограничение: трудность полного удаления, что мешает при проведении электронно-микроскопических исследований.

5.3.2. 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 10–14^{o}, 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.

Голографическое изображение

Преимущества объемной съемки изломов по сравнению с их плоским изображением иллюстрируются на рис. 5.24 и 5.25. Видно, что плоское изображение передает только один из ракурсов, существенно отличающийся от других. Голограмма позволяет рассматривать трехмерное изображение объекта и получать о нем полную информацию.

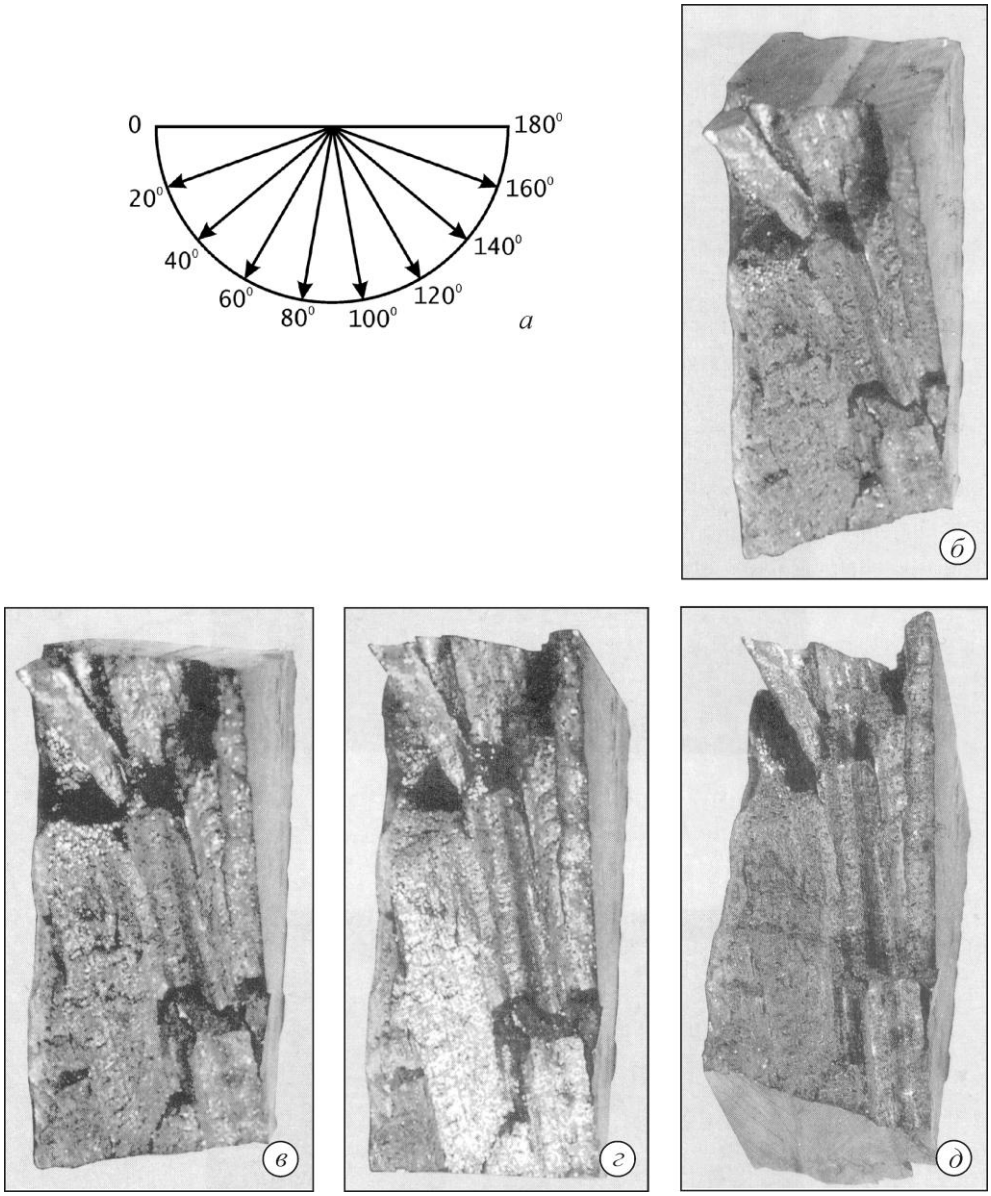


Рис. 5.24. Фрагменты кинограммы излома литой стали:
а – ракурсы съемки; *б* – *к* – виды излома при съемке под различными углами: *б* – 20°; *в* – 40°; *г* – 60°; *д* – 80°; *е* – 100°; *ж* – 120°; *з* – 140°; *и* – 160°; *к* – 180°

Голографический метод дает возможность записывать на плоском регистраторе, а затем восстанавливать объемное изображение реального объекта, которое можно рассматривать визуально. При этом между различными предметами сохраняется реальное пространственное удаление, а наблюдаемые ракурсы меняются в зависимости от угла зрения наблюдателя, т.е. объект можно «оглядывать» (рассматривать с разных сторон).

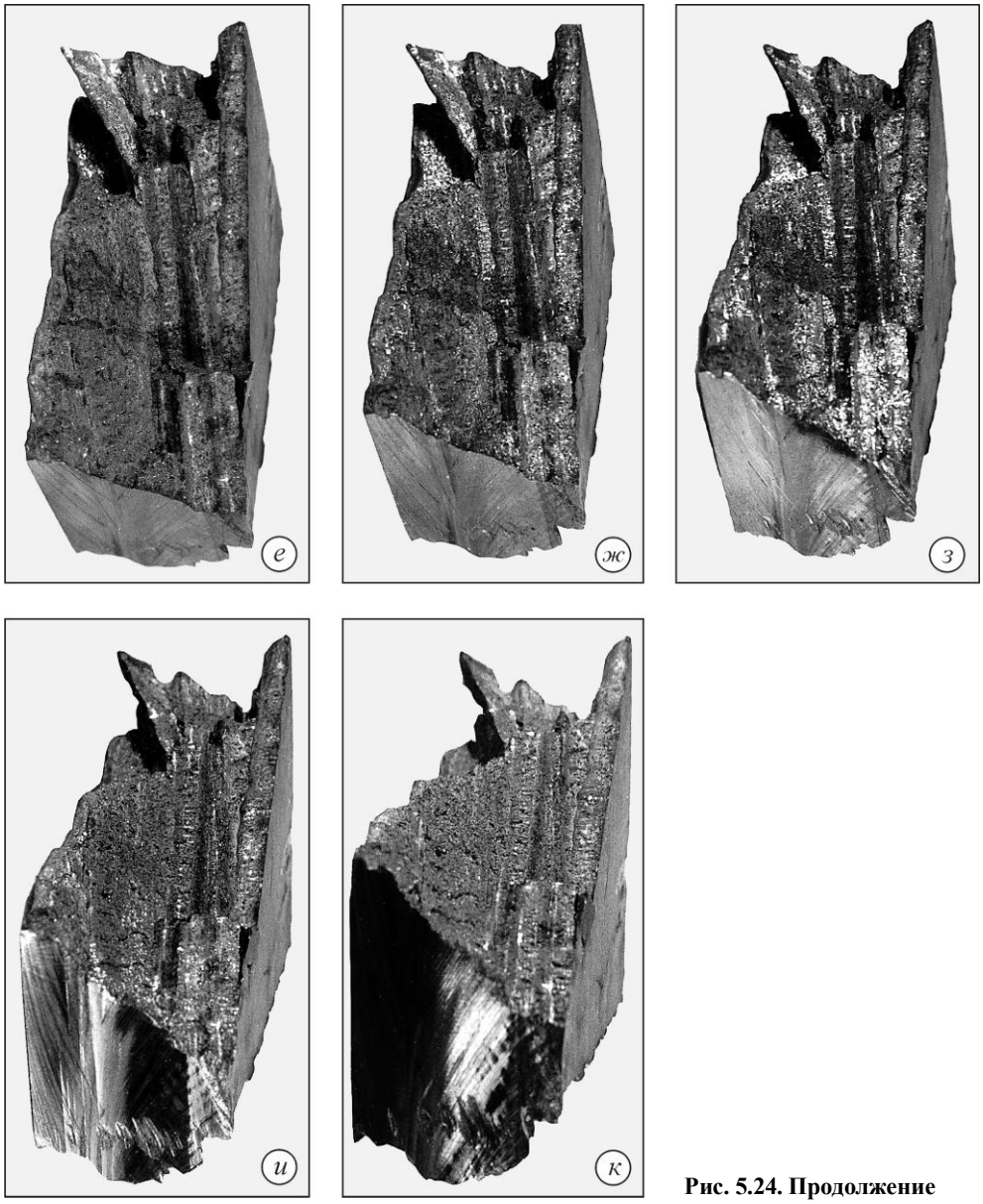


Рис. 5.24. Продолжение

В связи с этим в последнее время получают развитие голографическая и линзо-растровая съемки. Их преимущества перед плоской фотографией следующие:

запись объемного изображения объектов в реальных условиях с сохранением пространственного масштаба изображения;

высокая объективность и информативность;

возможность бессрочного хранения большого количества объемной информации крупногабаритных объектов в компактном виде;

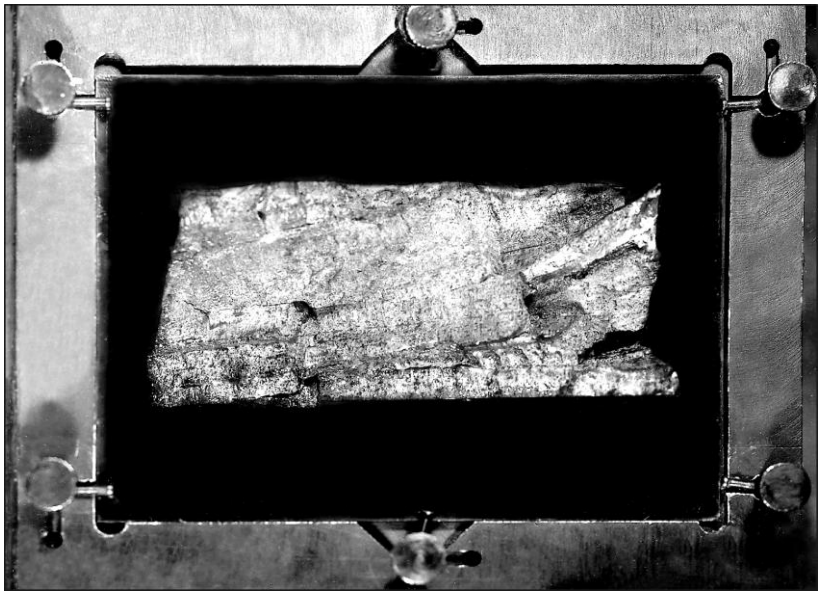


Рис. 5.25. Голограмма излома, показанного на рис. 5.24

возможность исследования голографического изображения поверхности разрушения при увеличениях, ограничиваемых разрешающей способностью применяемых фоторегистрирующих материалов (до 5–10 раз);

возможность замены трудоемких количественных стереоскопических методов исследования рельефа поверхности изломов методами голографической топографии, которая является простым высокочувствительным методом измерения шероховатости поверхности разрушения.

Разработан метод получения трехмерных изображений, восстанавливающихся в белом (полихроматическом) свете.

Наиболее быстрым, простым и максимально удобным является метод голографической съемки «во встречных пучках». При этом методе для получения голограмм используют монохроматический когерентный свет, а записанное на голограмму изображение рассматривают при освещении ее источником белого (полихроматического) света.

При съемке этим методом форма объекта может быть произвольной, но масштаб записи и восстановления изображения равен 1:1, поэтому размеры образцов ограничиваются размерами фотопластины или фотопленки. В качестве регистрирующего материала используют высокоразрешающие (не менее 3000 лин/мм) фотопластины с прозрачной эмульсией. Технология химико-фотографической обработки голографических пластин практически не отличается от принятой для обычных фотоматериалов.

Принципиальная схема записи голограмм по методу встречных пучков показана на рис. 5.26.

Пучок монохроматического когерентного света, испускаемый лазером *1*, проходит через расширитель пучка *2* и направляется зеркалом *3* на объект съемки *5*. Перед объективом установлена фотопластина *4*, на которую записывается голограмма, полученная в результате интерференции падающего на фотопластину опорного пучка света *6* и отраженного от объекта объектного пучка *7*.

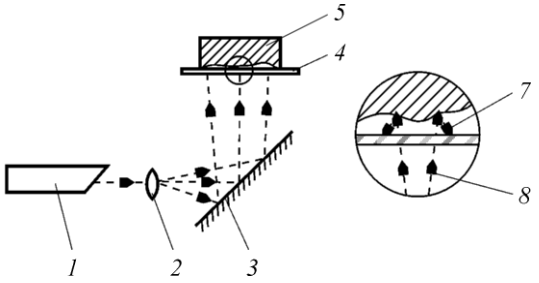


Рис. 5.26. Схема записи голограмм по методу «встречных пучков»

Записанные на голограмму изображения воспроизводятся при освещении любым источником направленного белого полихроматического света.

Линзо-растровая съемка

Метод линзо-растровой съемки позволяет получать объемное изображение объекта при освещении его обычным полихроматическим светом. При этом можно фиксировать трехмерное изображение объектов любых размеров. Особенно удобен этот метод для фиксации фрагментов крупногабаритных объектов при натурной съемке с естественным освещением.

Получение линзо-растровых снимков заключается в следующем: съемочный объектив размещают на расстоянии 50–80 мм от плоскости растра, в фокальной плоскости которого расположена фотопластина, формирующая изображение снимаемого объекта. Схема формирования объемного изображения при линзо-растровой съемке показана на рис. 5.27.

После экспозиции и химико-фотографической обработки линзо-растровый снимок (позитив) просматривают в проходящем белом свете с помощью того же растра, который был использован при съемке, причем фотослой устанавливают в схему на то же самое место, что и при съемке.

Растрово-голографический метод получения объемных изображений

Разработан комбинированный метод объемной съемки, в котором сочетаются следующие преимущества голографической и линзо-растровой съемки:

возможность устранения дискретной растровой структуры (получение слитного объемного изображения);

возможность тиражирования снимков;

возможность рассматривания снимков без наличия растров в белом (некогерентном) свете.

Метод включает в себя три операции:

получение линзо-растрового позитивного объемного изображения, снятого в естественном свете;

получение растрово-голографических изображений;

наблюдение изображений с линзо-растрового снимка, записанных на голограммы.

На первом этапе съемка производится по схеме, приведенной на рис. 5.27. На втором этапе линзо-растровый снимок (фотослой вместе с растром) освещается источником когерентного излучения через светоделитель (диффузный рассеиватель). В плоскости голографической пластины посредством объектива образуется мнимое линзо-растровое изображение, которое записывается на голограмму по-

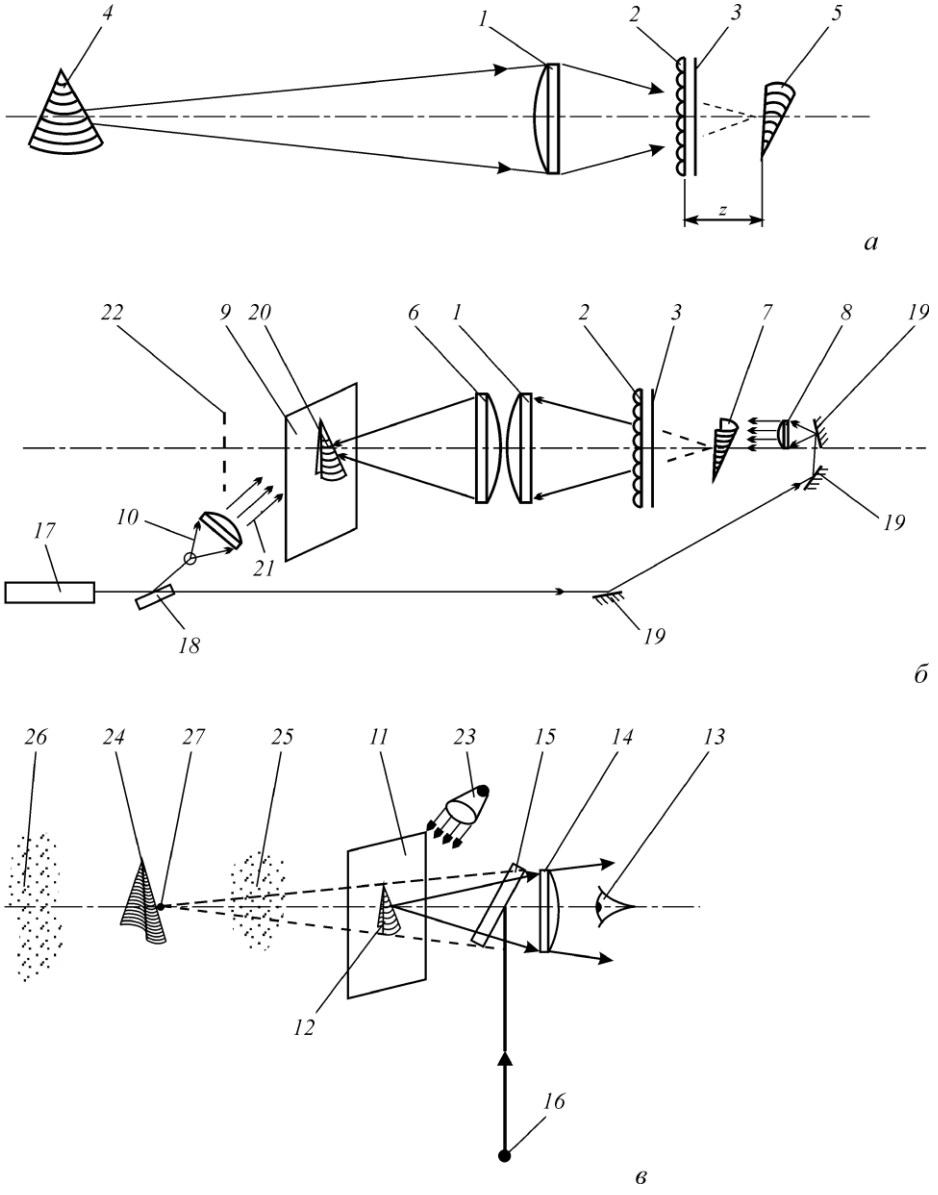


Рис. 5.27. Формирование объемного изображения при использовании растрово-голографического метода:

а – получение линзо-растровой фотографии; *б* – запись линзо-растровой фотографии на голограмму; *в* – восстановление изображения с голограммы; *1* – объектив; *2* – линзовый растр; *3* – фотослой; *4* – снимаемый объект; *5, 7* – изображение объекта, сформированное линзовым растром (*z* – величина размытия изображения); *6, 14* – линза-насадка; *8* – диффузионный рассеиватель (матовая пластина); *9, 11* – голограмма (голографическая пластина); *10* – расширитель пучка когерентного излучения для формирования опорной волны; *12, 20* – мнимое линзо-растровое изображение; *13* – глаз наблюдателя; *15* – полупрозрачное зеркало; *16* – реальная марка; *17* – источник когерентного излучения (лазер); *18* – светоделитель (диффузионный рассеиватель); *19* – отражающие зеркала; *21* – опорный пучок света; *22* – изображение структуры растра; *23* – источник белого (полихроматического) света; *24* – мнимое изображение объекта с реальной маркой; *25, 26* – мнимое изображение структуры растра

средством опорного пучка и производится ее химико-фотографическая обработка, как для голограмм, записанных по схеме встречных пучков.

Таким способом можно получить объемные слитные изображения объектов в истинном пространственном масштабе на расстоянии, находящемся в пределах размеров голографического стенда (2–3 м).

5.3.3. 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 макродефектов. 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 (шва и ЗТВ);

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:

1) изломы волокнистые и кристаллические;

2) изломы, особенности строения которых обусловлены неоднородностью металла;

3) 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.

Изломы второй и третьей групп, показывающие качество металла, влияющего на качество сварных соединений, рассмотрены в главе 4.

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 полностью 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 ГОСТу 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 (рис. 5.28).

Вид кристаллических изломов связан с размером фасеток разрушения, обусловленных величиной зерен. Различают кристаллические и мелкокристаллические изломы, подразделяющиеся, в свою очередь, на бархатистые и фарфоровидные (рис. 5.29).

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.

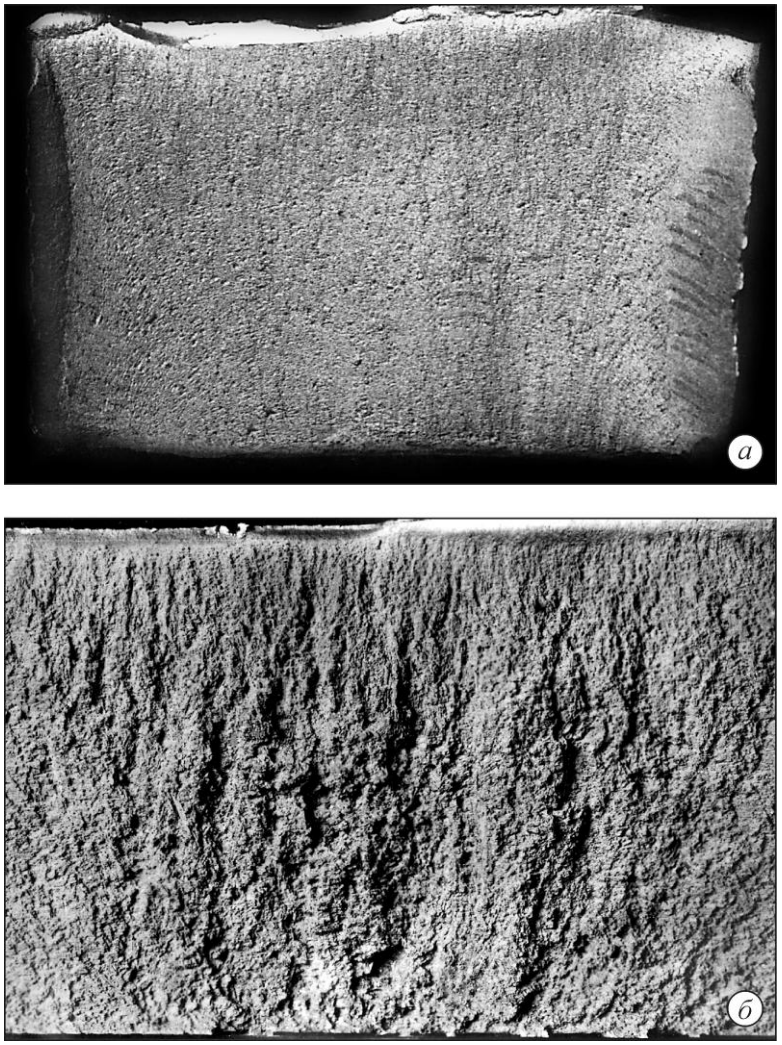


Рис. 5.28. Волокнистый излом стали высокой плотности:
а – прокат; *б* – литье

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.

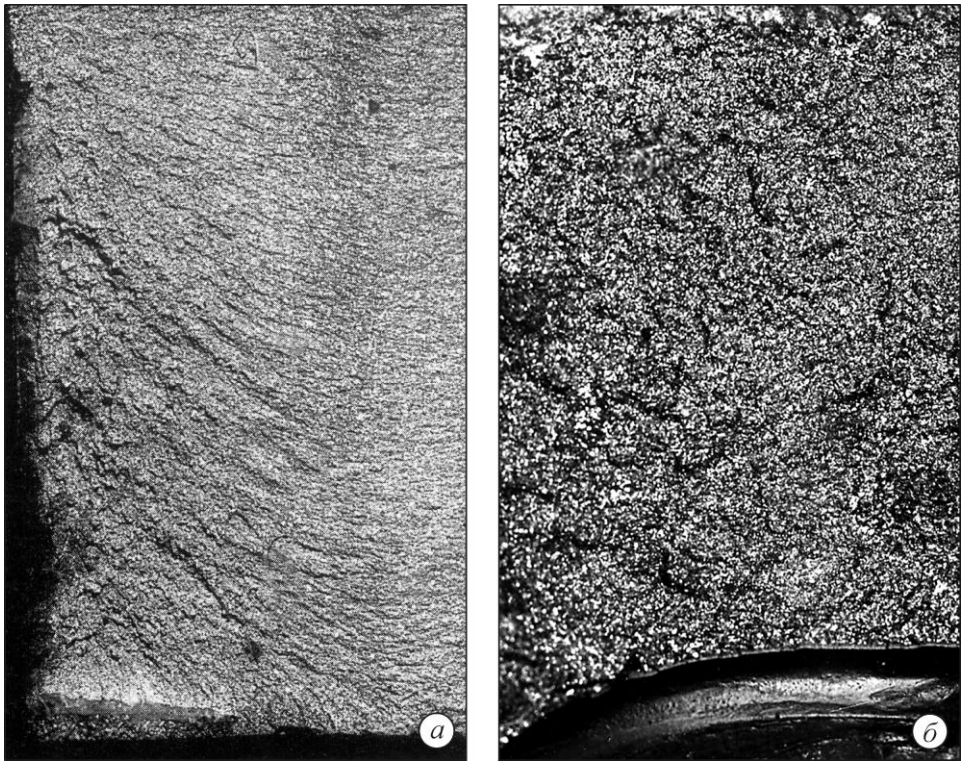


Рис. 5.29. Кристаллический излом стали:
а – прокат; *б* – литье

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 исследо-

вать образцы с площадью излома до 20×70 мм, в то время как максимальный размер реплик для ПЭМ – 3×3 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.

Идентификация выделений на поверхности разрушения

С помощью ПЭМ идентифицируют фазовый состав выделений на поверхности разрушения на экстракционных репликах, используя метод микродифракции. При этом получают микродифракционную картину от отдельных частиц выделений, так как реплика не имеет собственной структуры. Благодаря этому расшифровка микродифракционных картин этим способом проще, чем в случае идентификации частиц, находящихся в металлической матрице (при использовании метода фольг).

Методы получения электронограмм и их расшифровки подробно описаны во многих методических пособиях.

При микродифракционном фазовом анализе решают две задачи: расшифровывают неизвестные выделения и определяют, имеются ли фазы с известными кристаллическими структурами.

Специальные оптические методы исследования строения изломов

Стереоскопические методы исследования изломов (СМИ) позволяют изучать трехмерный рельеф поверхности разрушения по его фотографическим изображениям. Для этого изготавливают два фотографических изображения участков поверхности разрушения, причем второе фотоизображение делают под углом съемки на 10–12°, отличающимся от угла съемки первого изображения. Полученные фотоизображения помещают в стереоскоп, с помощью которого можно наблюдать мнимое объемное изображение объекта.

При стереоисследовании изломов с помощью методов электронной микроскопии изучают фотографии, снятые с объекта исследования (реплики в ПЭМ и изломы в РЭМ), устанавливаемого с наклоном в обе стороны ~5° по отношению к оси, перпендикулярной электронному пучку. Фотоснимки помещают в стереоскоп и исследуют трехмерную картину излома. РЭМ, обеспечивая большую глубину резкости, фиксирует объемные изображения изломов. С помощью СМИ можно увеличить эффект объемности этих изображений. Стереопары фотоизображений позволяют измерять высоту и глубину элементов излома, повышают точность измерения площади, занятой определенными структурными элементами.

Трудоемкость этого способа значительно уменьшается при использовании ЭВМ.

Стереологический метод – метод изучения пространственной структуры и реконструкции этой структуры с помощью измерений, проводимых на плоскости наблюдения. Стереологические исследования дают возможность определять такие важнейшие фрактографические характеристики, как реальная доля вида разрушения (внутризеренного или межзеренного) в случае изучения изломов смешанного вида, распределение размеров и средний поперечный размер частиц включений на поверхности разрушения, удельная поверхность элементов строения излома (например, для фасеток хрупкого разрушения и др.).

В качестве объекта исследования используют непосредственно излом или обычные и экстракционные реплики с него.

Различают непосредственную стереологическую реконструкцию и статистическую. Непосредственную реконструкцию можно осуществлять двумя способами:

последовательных сечений с минимальным шагом, получаемых с помощью механического стачивания поверхности излома;

измерением стереопар изображений изломов, полученных при оптических и электронно-микроскопических увеличениях.

Статистическая реконструкция – преобразование первичных измерений в характеристики геометрической структуры с помощью оператора геометрической вероятности.

Метод оптико-структурного машинного анализа (ОСМА). В основу метода ОСМА положен анализ сигнала, полученного на выходе датчика оптической плотности при сканировании исследуемого объекта считывающим зондом. Полученный сигнал рассматривается как характеристика стационарного случайного процесса, который можно выразить посредством числовых характеристик. Метод ОСМА для исследования изломов можно применять в двух вариантах: сканирующем и дифракционном.

Измерение геометрических параметров изломов по голографическим изображениям. Восстановленное голографическое изображение, представляющее собой точную объемную копию объекта (излома), может быть использовано для измерения геометрических параметров элементов поверхности разрушения. Можно выделить две основные группы способов измерения элементов рельефа поверхности с помощью оптической голографии: 1) интерферометрические методы получения топограмм, по которым можно строить профилограммы; 2) механические методы измерения геометрических параметров рельефа с восстановленного голографического изображения.

В настоящее время можно рекомендовать три наиболее простых голографических метода: интерференционные методы двух источников и иммерсионный, а также метод механического измерения рельефа мнимого голографического изображения с помощью «реальной марки».

Топограммы поверхности разрушения методом двух источников получают, освещая ее сразу двумя когерентными пучками, направленными под углом α, равным $5\cdot10^{-2} – 5\cdot10^{-3}$ град. Это можно осуществить с помощью интерферометра Майкельсона с лазерным источником излучения (рис. 5.30; 5.31).

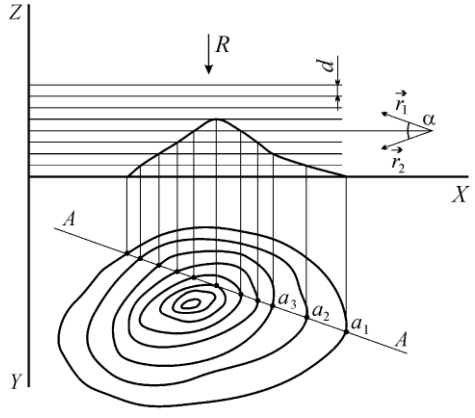


Рис. 5.30. Схема получения голографических топограмм методом двух источников при освещении объекта пучком, перпендикулярным направлению регистрации

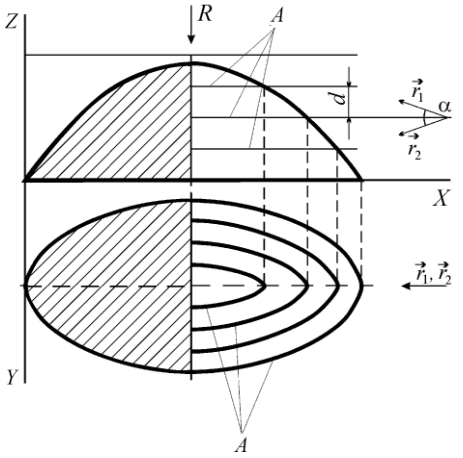


Рис. 5.31. Схема получения голографических топограмм методом двух источников при освещении объекта пучком под некоторым углом к направлению регистрации

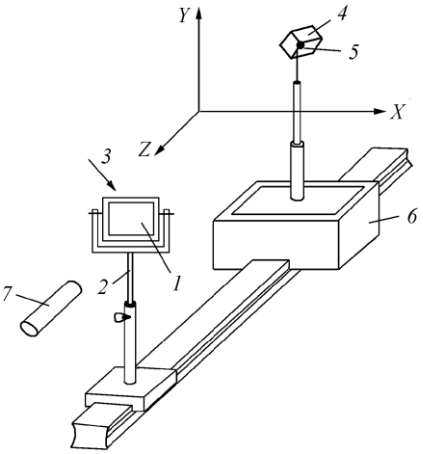


Рис. 5.32. Схема измерительного устройства с реальной маркой:
1 – голограмма; *2* – подставка; *3* – когерентный пучок света; *4* – мнимое изображение предмета; *5* – реальный объект малого размера – «марка»; *6* – координатный механизм; *7* – оптический микроскоп

Метод измерения посредством «реальной марки». Метод реальной марки представляет собой один из инструментальных методов измерения объемной модели излома (рис. 5.32).

Мнимое изображение излома воспроизводится при освещении голограммы *1* пучком когерентного света *3*. При совмещении восстановленного голографического изображения с реальным точечным объектом – светящейся реальной маркой наблюдатель одновременно видит изображение излома и марку. Для измерения линейных размеров элементов излома и определения их расположения в пространстве марку перемещают с помощью координатного механизма *6* и определяют положение отдельных точек на поверхности излома относительно фиксированной системы координат *x–y–z*, а также взаимное расположение элементов поверхности излома.

Метод измерения посредством реальной марки позволяет проводить измерения с использованием оптических микроскопов *7*, что обеспечивает получение разрешения порядка микрометра.

Методы количественной оценки строения изломов

Неавтоматизированные методы

Существует несколько простых методов количественной оценки изломов, проводимых визуально или с помощью оптических приборов, имеющих небольшие увеличения. Этими же методами оценивают фотографии изломов, снятых в натуральную величину и с любым увеличением.

Метод визуальной оценки. Исследуемый излом или его изображение визуально сравнивается с эталонными шкалами, специальными атласами-классификаторами, картами или схемами дефектов, представляющими собой набор характерных изображений изломов, подобранных по заданной градации.

Метод эталонной сетки. При его использовании из прозрачного материала (например, целлулоида) изготавливают эталонную сетку по размеру излома, представляющую собой проекцию площади излома, разделенную на 100 клеток, каждая из которых составляет 1 % площади излома. Эталонную сетку накладывают на поверхность излома и мелом или смывающимся карандашом обводят участки излома, занятые определяемым структурным элементом (например, кристаллическую сыпь, участки кристаллического или шестоватого строения или другие участки излома, подлежащие количественному обсчету). Затем подсчитывают число клеток, занятых структурными элементами. Подсчитанное число клеток с определяемым структурным элементом соответствует количеству этого элемента в процентах.

Метод взвешивания. Из фотографии излома или кальки, на которую нанесены анализируемые структурные составляющие, вырезают изображения элементов излома, подлежащих оценке, и взвешивают. В этом случае содержание анализируемого элемента структурной составляющей (с. с.) излома (в процентах) определяют по формуле

$$\%\ \text{с.с.} = (P_1/P_2)\cdot 100\ \%,$$

где P_1 – масса фотографии или кальки, приходящаяся на анализируемый элемент (с. с.); P_2 – общая масса фотографии или кальки.

Полученные результаты обрабатывают с привлечением аппарата математической статистики.

Метод планиметрирования. С помощью планиметра обводят контуры участков изображения изломов, подлежащих обсчету, и определяют их площадь.

Метод секущих. Применяется при обсчете элементов излома, имеющих замкнутые контуры (ямки, фасетки и др.). Проводится, как правило, по фотографиям. Метод заключается в нанесении на фотоснимок в произвольных направлениях секущих линий определенной длины. Вдоль этих линий определяются размеры сечений элементов счета, их средний размер и распределение элементов по размерам

Метод профилограмм. С помощью этого метода определяют шероховатость поверхности разрушения. Для исследования изломов применяют два способа построения профилограмм поверхности разрушения:

путем механического разреза излома по выбранному сечению и построения профилограммы с использованием световых металлографических или инструментальных луп и микроскопов;

с помощью профилографов (путем перемещения тонкой иглы профилографа по поверхности разрушения с записью профилограммы).

Характеристики шероховатости (одну или несколько) выбирают из приведенной на рис. 5.33 номенклатуры. Полученные результаты обрабатывают с привлечением аппарата математической статистики.

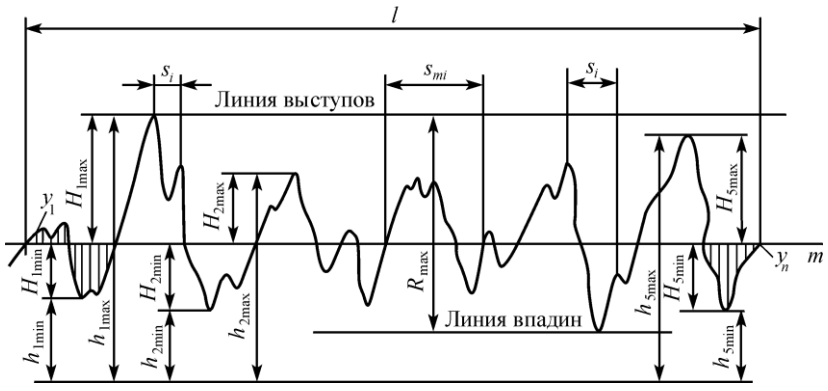


Рис. 5.33. Характеристики шероховатости поверхности разрушения; R_{max} – наибольшая высота неровностей профиля; R_a – среднее арифметическое отклонений профиля; S_{mi} – шаг неровностей в пределах базовой длины; S_i – шаг неровностей по выступам в пределах базовой длины; S_m – средний шаг неровностей; m – средняя линия профиля; l – базовая длина; y – отклонение профиля в системе M; h_{min} – расстояние от низших точек пяти наибольших минимумов до линии m; H_{max} – отклонение пяти наибольших максимумов от линии m

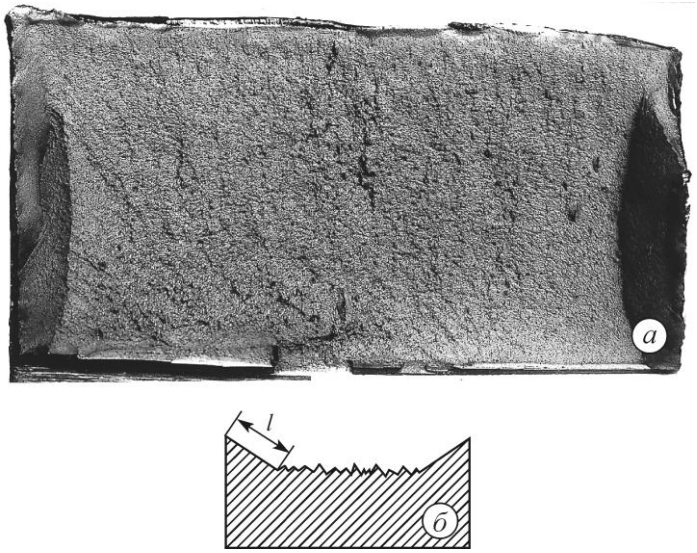


Рис. 5.34. Утяжка:
а – вид излома; *б* – схема измерения утяжки (*l* – величина утяжки, мм)

Метод определения пластической деформации при образовании излома. При испытании металла сварных соединений на ударный изгиб оценить пластические характеристики металла позволяет измерение величины утяжки излома образца, испытанного в соответствии с ГОСТом 6996–66.

На участке излома с максимальной величиной скоса боковых кромок измеряют величину скоса (рис. 5.34). Указанная величина называется *утяжкой* излома, измеряется в миллиметрах и в заводской практике входит в число оценочных характеристик качества металла.

Наиболее существенный недостаток описанных неавтоматизированных методов количественной оценки строения изломов – их значительная трудоемкость.

Автоматизированные методы

Метод количественного анализа элементов структуры позволяет автоматически производить подсчет площади, линейных размеров (длины, ширины, периметра), расстояния между элементами структуры, плотности распределения элементов структуры на шлифах и поверхностях разрушения. Следует отметить, что достаточная достоверность и объективность результатов измерений возможны только в том случае, когда между определяемыми элементами строения имеется четко выраженная граница раздела, иначе говоря, существует различие в отражательной способности отдельных элементов или их различие по цвету в пределах чувствительности прибора. Это обусловливает высокие требования к качеству объекта исследования.

Аппаратура для количественного автоматизированного подсчета элементов изображений подразделяется на две группы: полностью автоматизированные и полуавтоматизированные системы.

В полностью автоматизированных системах для подсчета элементов изображения используется принцип линейного анализа. Осуществляется он с помощью светового луча, сканирующего исследуемую поверхность. Автоматический анализатор изображений (ААИ) выделяет, классифицирует и разделяет по заданным оператором градациям импульсы, соответствующие оптической отражательной способности элементов исследуемой поверхности в соответствии с контролируемыми параметрами элементов строения поверхности металла.

Следует, однако, отметить, что полностью автоматизированные системы ограниченно применимы для оценки реальных изломов по следующим причинам:

в строении большинства изломов отсутствуют четко очерченные границы структурных элементов, поэтому они не могут однозначно детектироваться (выделяться) ААИ;

в строении изломов имеются одинаковые структурные элементы, различающиеся по цветовым оттенкам или блеску из-за различной их ориентации по отношению к источнику освещения, поэтому идентификация их с помощью ААИ затруднена;

в связи с шероховатостью поверхности изломов требуется изменение фокусировки в процессе работы, что затруднено при работе приборов в автоматическом режиме.

Поэтому для исследования реальных поверхностей разрушения весьма эффективны полуавтоматизированные системы обработки изображений (ПААИ). Принципиальное отличие этих систем от полностью автоматизированных заключается в следующем: неподвижное изображение исследуемой поверхности передается на экран с помощью электронного устройства «световое перо», управляемого оператором. Графическая информация, наблюдаемая на экране, преобразуется в электрические сигналы, которые обрабатываются с помощью электронно-вычислительного устройства, вводятся в систему памяти, а затем выдаются в виде окончательного суммарного результата.

Полуавтоматические анализаторы изображений позволяют:

анализировать мелкодисперсные структурные элементы изломов или элементы с нечетко выраженными границами раздела;

оценивать элементы поверхности разрушения путем применения оптических систем со сменными объективами, имеющими различное фокусное расстояние и обеспечивающими получение резкого изображения отдельных участков шероховатой поверхности;

выделять границы объектов, имеющие плавное изменение световой плотности (степени почернения), что значительно повышает точность измерения их геометрических размеров;

выделять из сложных многофазных объектов, однотонных по цвету, структурные элементы, подлежащие обсчету.

В этом состоит несомненное преимущество полуавтоматических анализаторов изображения перед полностью автоматическими.

С помощью светового пера оператор на экране ВКУ может корректировать анализируемое изображение, исключая из него ненужные элементы, или, наоборот, дорисовывать нечетко видимые элементы строения излома. Оператор может очерчивать контур анализируемых элементов изображения, устанавливать те элементы структуры, расстояние между которыми или плотность распределения которых необходимо определить. При этом, что особенно важно, определяется линейная протяженность элементов структуры излома (например, расслоений).

5.3.4. ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И ПОВЕРХНОСТЕЙ РАЗРУШЕНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Общие положения

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 рассмотрены 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 находиться 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

Таблица 20. **Характеристики физических методов микроанализа химического состава**

Методы	Атомный номер определяемых элементов	Локальность		Чувствительность анализа, %	Точность анализа, %	Возможность повторного анализа микрообъектов
		по глубине	по площади			
ОЭС	> 2	1 нм	20 мкм^2	10^{-1}–10^{-2}	5–10	+
ЭСХА	> 2	1 нм	3 мм^2	1–10^{-2}	5–10	+
МСВИ	Все	1 нм	1 мм^2	10^{-2}–10^{-8}	5–10	–
ЛСМА	> 2	5 мкм	100 мкм^2	10^{-1}–10^{-3}	–	–
РСМА	> 4	5 мкм	1 мкм^2	10^{-2}–10^{-3}	2–5	+

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, ЛСМА 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.

Сравнительные характеристики перечисленных методов микроанализа приведены в табл. 20.

В последнее время для изучения атомно-кристаллической структуры и фазового состава поверхности разрушения успешно используется метод ядерного гамма-резонанса. 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.

Рентгеноспектральный микроанализ (РСМА)

Методом РСМА определяют химический состав микрообластей на микрошлифе или изломе, что очень важно при изучении распределения компонентов и примесей на отдельных микроучастках сталей (дендритной ликвации, микросегрегаций, при идентификации отдельных включений и фазовых составляющих, пленок на границах зерен и др.).

Анализ химического состава методом РСМА проводят по точкам путем сканирования вдоль выбранной прямой или по площади участка микрошлифа или излома. Точечный анализ этим методом дает возможность проводить количественные измерения для каждого определяемого элемента с точностью, зависящей от номера элемента, его объемного содержания и влияния остальных элементов. Количественный РСМА можно проводить при размерах частиц включений более 5 мкм.

При непрерывном анализе вдоль выбранной прямой получают полуколичественные сведения об изменениях концентрации элементов. Анализ по площади позволяет дифференцировать фазы по химическому составу, что особенно важно в тех случаях, когда они имеют одинаковую отражательную способность. Кроме того, анализ по площади дает наглядное качественное представление о распределении элементов (например, легирующих) на выбранном участке размерами от 30 до 400 мкм^2.

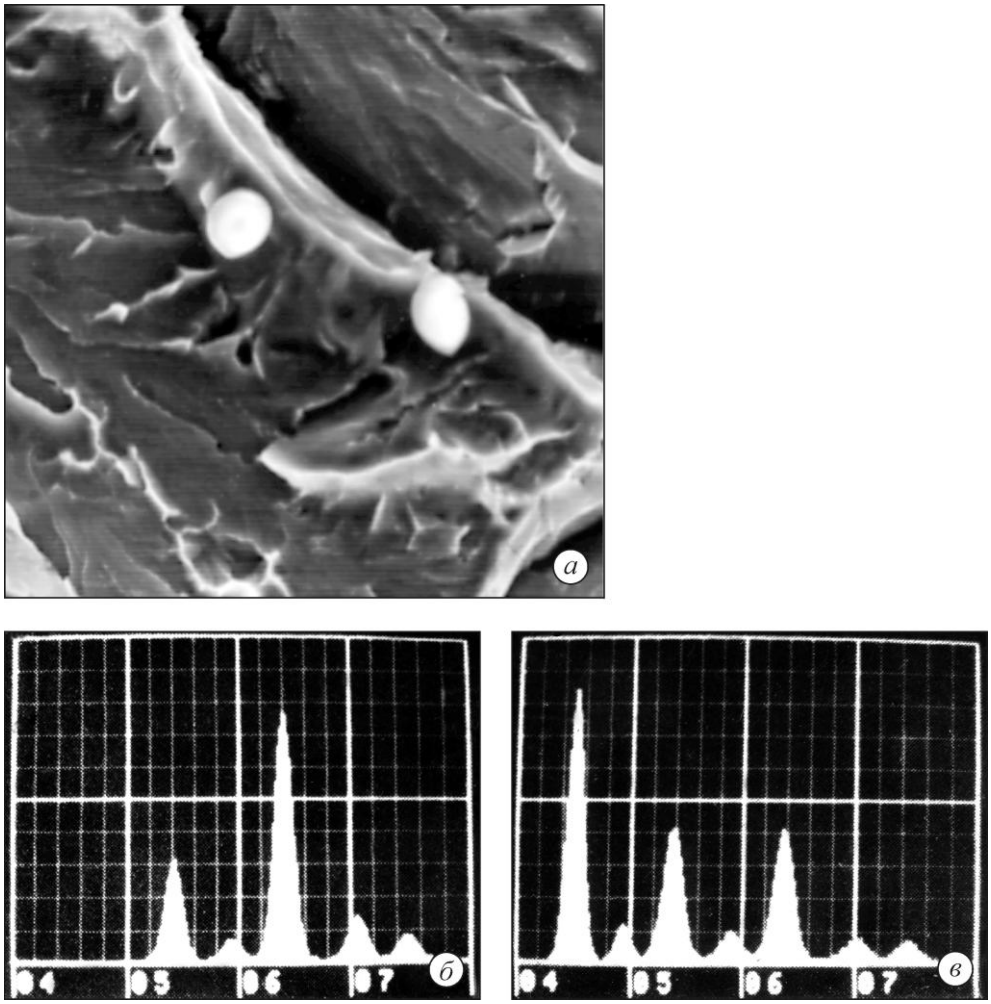


Рис. 5.35. Распределение химических элементов на поверхности разрушения (катаная сталь 30ХГСНА):
а – поверхность разрушения, РЭМ, × 5000; *б* – содержание хрома, железа и никеля в матрице; *в* – содержание титана в белой частице (на рис. *а*)

Качественный анализ позволяет приблизительно судить о составе разных участков сложных включений, выделений по границам зерен и т.д. (рис. 5.35; 5.36). Локальная чувствительность, т.е. абсолютная массовая чувствительность, отнесенная к единичному определению в микрообъеме и выраженная в граммах, различна для каждого вещества и может достигать $4 \cdot 10^{-14}$ г для тяжелых элементов.

Разброс значений количественного РСМА для большинства элементов, за исключением легких ($Z < 11$), обычно составляет 2–5 % при исследовании на шлифе и увеличивается до 20–30 % – при исследовании на изломе.

Метод РСМА дает возможность проводить повторные анализы на одном и том же микроучастке излома.

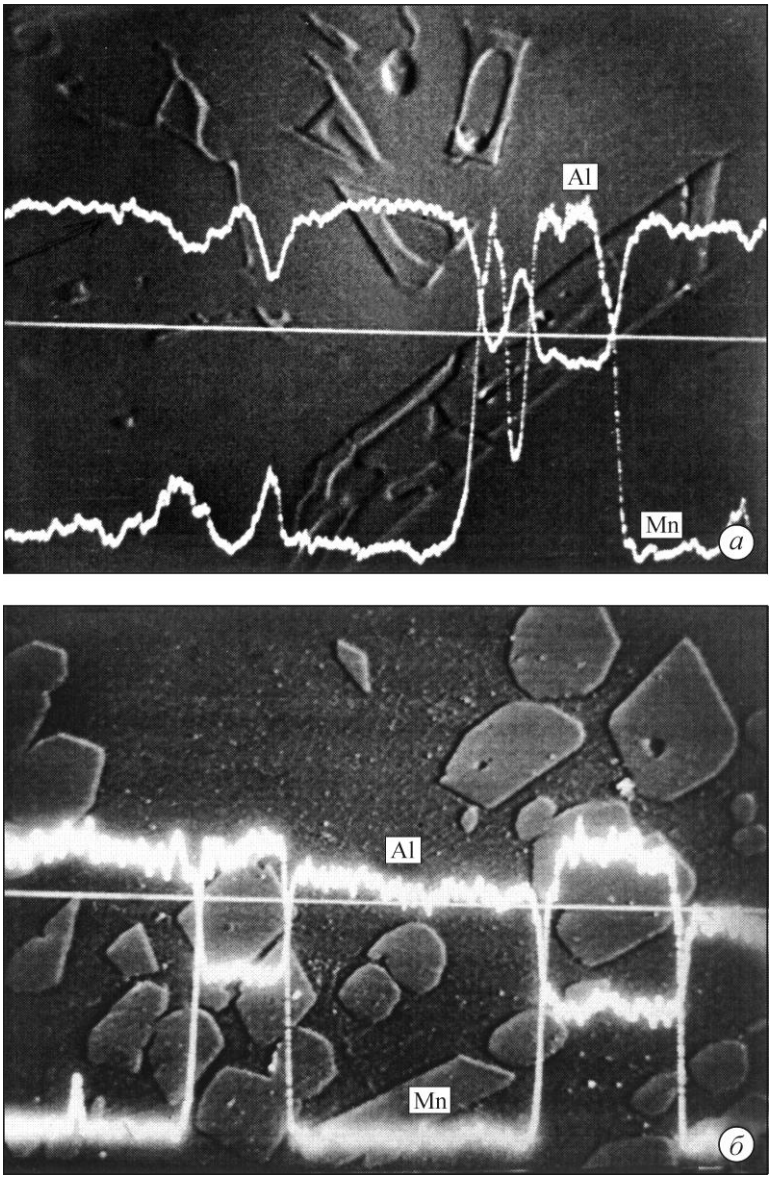


Рис. 5.36. Линейный рентгеноспектральный анализ сплава Al – 3 % Mn:
а – неодинаковое распределение марганца в алюминии в первичных интерметаллидах; *б* – одинаковое содержание марганца и алюминия в эвтектических частицах и первичных неразрушившихся интерметаллидах (Al_6Mn); *в*, *г* – повышенное содержание марганца и пониженное содержание алюминия в разрушившихся частицах (Al_4Mn) по сравнению с их содержанием в эвтектических частицах Al_6Mn

Дополнительные возможности дает сочетание методов рентгено-спектрального микроанализа (РСМА) и растровой электронной микроскопии (РЭМ) – метод ЭЗМА, который в настоящее время нашел широкое применение при анализе

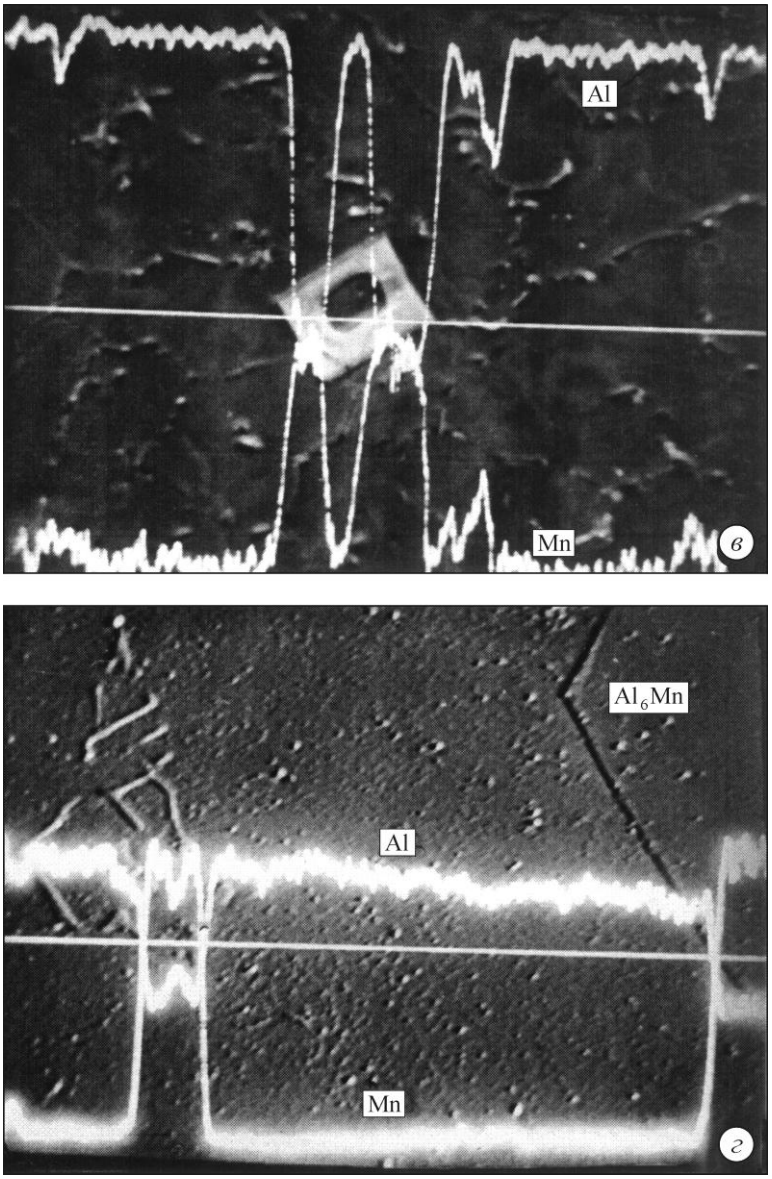


Рис. 5.36. Продолжение

причин брака, экспертизных исследованиях случаев преждевременного разрушения и в начальной стадии новых технологических разработок.

Оже-электронная спектроскопия (ОЭС)

С помощью ОЭС могут быть определены все химические элементы, кроме водорода и гелия в приповерхностных областях твердого тела. Этот метод позволяет обеспечить локальность метода по площади в пределах от 5 до 50 мкм^2. Ме-

тод легко совмещается с растровой электронной микроскопией, что дает возможность непосредственно в процессе изучения морфологии поверхности разрушения проводить прицельный химический микроанализ элементов излома.

Чувствительность при проведении химического анализа поверхностных слоев толщиной до 2–3 нм составляет 10^{-1}–10^{-2} %. Метод особенно эффективен при определении в сталях неметаллических включений, содержащих серу (чувствительность при анализе серы достигает 10^{-4} %), и примесей сурьмы и мышьяка.

Масс-спектрометрия вторичных ионов или ионный микроанализ (МСВИ)

Особенно эффективен метод МСВИ для контроля химического состава ближайших к поверхности атомных слоев. Его рекомендуется использовать, например, для анализа химического состава зернограничных выделений на поверхности разрушения.

Преимущество метода МСВИ – прежде всего возможность послойного анализа образца с использованием ионного травления. Зондирование по толщине слоя и формирование полезного сигнала осуществляются в одном процессе, режимом которого легко управлять. Физический предел послойного разрешения составляет 1 нм.

Недостатки метода – повреждение поверхности излома при анализе и сложность количественного анализа, малая локальность анализа по площади.

Электронная спектроскопия для химического анализа

Метод ЭСХА определяет элементы, находящиеся на поверхности (качественный анализ), оценивает концентрации компонентов или их количественные соотношения (количественный анализ).

Локальность метода ЭСХА по площади невелика, и фиксируемый результат является интегральным для площади от 3 до 100 мм^2. С помощью этого метода анализа можно определить все химические элементы, кроме водорода и гелия. Метод эффективен при исследовании поверхностных слоев или сверхтонких пленок (до 2,5–3 нм). Кроме того, он дает возможность проводить повторные анализы одного и того же исследуемого участка излома.

Следует отметить невысокую чувствительность метода (от 1 до 10^{-2} %), малую локальность по площади.

Оптический эмиссионный спектральный микроанализ

Метод наиболее широко применяется для химического микроанализа металлических образцов. Локальность методов ОЭСМА определяется площадью поверхности на образце, которая подвергается испарению под воздействием искрового разряда или лазерного луча. Существуют методы искрового и лазерного спектрального микроанализа.

Искровой спектральный микроанализ дает информацию о химическом составе участков образца диаметром 50 мкм и более, лазерный эмиссионный спектральный – 10 мкм и более.

Масса вещества, расходуемого при химическом анализе методами ОЭСМА, составляет 10^{-3}–10^{-6} г. С помощью этих методов определяются элементы, начиная с Be ($Z > 2$). Чувствительность анализа для большинства элементов, содержащихся в сталях, составляет 10^{-1}–10^{-3} %.

Одним из определяющих факторов в методах ОЭСМА является минимальная масса вещества, используемая при анализе. Эти методы могут быть охарактери-

зованы локальной чувствительностью, которая составляет $10^{-8} – 10^{-10}$ г для большинства анализируемых элементов.

Методы ОЭСМА по сравнению с другими методами химического микроанализа отличаются быстротой, отсутствием специальных требований к подготовке исследуемой поверхности. В то же время следует отметить недостаточную локальность методов как по площади, так и по глубине исследуемых объектов, а также повреждаемость поверхности в процессе исследования и, следовательно, невозможность повторного анализа того же участка излома. Для искрового спектрального микроанализа можно использовать как призменные, так и дифракционные спектрографы, выпускаемые отечественной и зарубежной промышленностью.

Лазерный спектральный микроанализ изломов более перспективен, чем искровой, так как обладает более высокой локальностью по площади и возможностью анализа изломов, имеющих шероховатую поверхность. Однако при использовании этого метода возникают затруднения при количественном анализе, связанные с отсутствием гомогенных эталонов, а также повреждаемость поверхности образца, что исключает возможность повторного анализа.

При исследовании включений, выявляемых в изломе, весьма эффективным может оказаться использование метода электроразрядного микроанализа с предварительным отбором пробы. Он позволяет определять химический состав микроколичеств исследуемого материала. Локальная чувствительность этого метода для большинства элементов находится в области $10^{-10} – 10^{-12}$ г.

Электроразрядный спектральный микроанализ дает информацию о химическом составе отдельных частиц размером от 0,01 мм и массой порядка 10^{-6} г. В таких малых количествах анализируемого вещества можно определить примеси в количествах $10^{-2} – 10^{-3}$ %.

Основным преимуществом этого метода является высокая локальная чувствительность при минимальной пробе вещества. Для фрактографических целей этот метод особенно удобен, так как позволяет определять химический состав таких малых объемов, которые обнаруживаются только с помощью оптических микроскопов. Метод целесообразно применять при определении химического состава точечных объектов. Такими объектами в зоне разрушения металла, как правило, бывают неметаллические включения, карбиды и т.д., которые обнажаются на поверхности излома и становятся доступными для анализа. Хрупкие и мелкие частицы вдавливанием электродов непосредственно в исследуемую поверхность могут быть перенесены на кончики медных или алюминиевых электродов. Сжигание этих частиц на кончиках электродов позволяет получить информацию об их составе.

Существует другой способ выделения частиц с поверхности излома – метод электролиза в капле электролита, нанесенной на поверхность образца. При этом образец служит анодом, а угольный или платиновый электрод, вводимый в каплю, – катодом. Анализировать в этом случае можно и электролит, и осадок, оставшийся на поверхности образца.

Ядерный гамма-резонанс (ЯГР)

Метод эффективен для исследования поверхности разрушения массивных образцов. Этим методом с помощью рентгеновского излучения и γ-квантов получают информацию о поверхностных слоях толщиной до 1 мкм, а с помощью электронного излучения – толщиной до 0,1 мкм.

Таким образом можно определять изменение структурных составляющих по толщине поверхностного слоя. С помощью получаемых спектров можно изучать фазовый состав, исследовать тонкую кристаллическую структуру и особенности перераспределения легирующих элементов в твердом растворе.

При изучении фазового состава поверхности разрушения стали можно определять состав и количество железосодержащих фаз, таких как мартенсит, аустенит, цементит, оксидные соединения железа, карбиды, нитриды и т.д. Чувствительность и точность фазового анализа зависят от конкретного состава исследуемого образца. Например, чувствительность определения остаточного аустенита в закаленных и низкоотпущенных сталях (не содержащих парамагнитных карбидов) составляет 0,5 %. Погрешность определения количества железосодержащих фаз составляет ориентировочно ±10 %.

Метод ядерного γ-резонанса характеризуется высокой разрешающей способностью, позволяющей не только определять состав фаз, но и исследовать тонкую кристаллическую структуру поверхностных слоев (толщиной менее 1 мкм). Определение областей структурных и концентрационных неоднородностей методом ЯГР возможно в слоях толщиной от 1 до 0,1 мкм, что позволяет анализировать общую площадь излома, а также исследовать отдельные участки изломов.

5.3.5. ФРАКТОГРАФИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ХРУПКОСТИ (КТХ) СТАЛИ

Чаще всего на практике используется определение КТХ по изломам ударных образцов и технологических проб.

Изменение характера разрушения происходит в определенном температурном интервале, который характеризуется двумя температурами:

верхней критической температурой хрупкости ($T_в$), выше которой излом полностью (свыше 95 %) вязкий;

нижней критической температурой хрупкости ($T_н$), ниже которой излом полностью (более 95 %) хрупкий.

Фрактографические методы определения КТХ сталей основаны на определении доли вязкой составляющей (В) в изломах серии образцов, подвергнутых испытаниям на ударный изгиб при различных температурах. Вязкой составляющей в изломе называют участки поверхности разрушения, характеризующиеся при визуальном определении и малых увеличениях волокнистым строением, а при электронно-микроскопическом – ямочным внутризеренным или ямочным межзеренным рельефом.

Хрупкой составляющей в изломе называют участки поверхности разрушения, имеющие при визуальном определении и под оптическим микроскопом блестящее кристаллическое строение, а при электронно-микроскопическом – вид фасеток скола или квазискола.

При резком переходе от вязкого разрушения к хрупкому в узком температурном интервале, когда $T_в - T_н$ составляет 10 °С, за КТХ принимают середину температурного интервала резкого изменения вида излома и обозначают T_{50}, что соответствует 50 % вязкой составляющей в изломе. Для металлов, характеризующихся протяженным температурным интервалом перехода от вязкого разрушения к хрупкому, используют температуры T_{90}, T_{50}, T_{10}, соответствующие присутствию в изломе 90; 50 и 10 % вязкой составляющей. На практике и в этом случае в качестве КТХ удобно использовать T_{50}.

Доля вязкой составляющей (В) и доля хрупкой составляющей (ХР) измеряется в процентах: В = 100 % – ХР.

Для построения зависимости вязкой составляющей от температуры испытаний проводят фрактографическое исследование не менее 18 образцов. Испытание целесообразно вести в две стадии. Для определения переходного интервала испытывают по одному образцу на каждую температуру через 40 °С, затем для уточнения хода кривой в этом интервале остальные образцы испытывают в количестве двух-трех на точку на каждой температуре, обеспечивая тем самым внутри интервала ($T_н < T < T_в$) не менее четырех температурных точек.

Измерения при макрофрактографическом методе

Изломы, получаемые при испытании образцов на ударный изгиб в критическом интервале хрупкости, разделяются на две группы:

макронеоднородные, имеющие локализованные зоны хрупкого и вязкого разрушения, выявляемые при визуальном исследовании (рис. 5.37);

макрооднородные (рис. 5.38).

При определении В в макронеоднородных изломах применяется микрофрактографический метод с использованием растровых и просвечивающих электронных микроскопов. При исследовании макронеоднородных изломов измеряют площадь $F_{хр}$ (оценка В) локализованных участков вязкого и хрупкого разрушения. Измерения можно проводить, во-первых, мерительным инструментом (например, штангенциркулем), во-вторых, визуальным сопоставлением вида исследуемого излома со шкалой (рис. 5.39) или типичными фрактограммами с различным количеством вязкой составляющей (рис. 5.40), в-третьих, планиметрированием увеличенного изображения излома с помощью любых современных приборов. Вязкая составляющая определяется по формуле

$$В = \frac{F_0 - F_{хр}}{F_0} \cdot 100\,\% = \frac{1 - F_{хр}}{F_0} \cdot 100\,\%,$$

где F_0 – исходная площадь поперечного сечения образца под надрезом; $F_{хр}$ – площадь хрупкой составляющей.

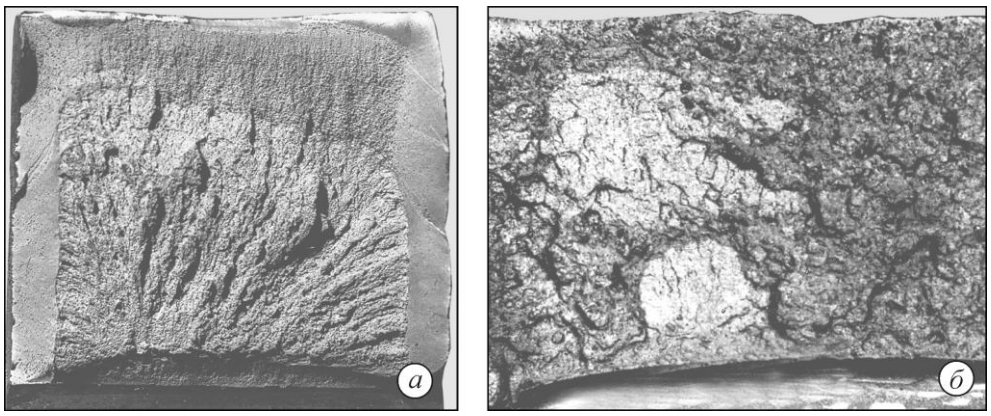


Рис. 5.37. Изломы с макронеоднородным строением:
а – излом с четко выраженной кристаллической зоной в средней части на фоне волокнистого строения; *б* – излом с несколькими кристаллическими зонами

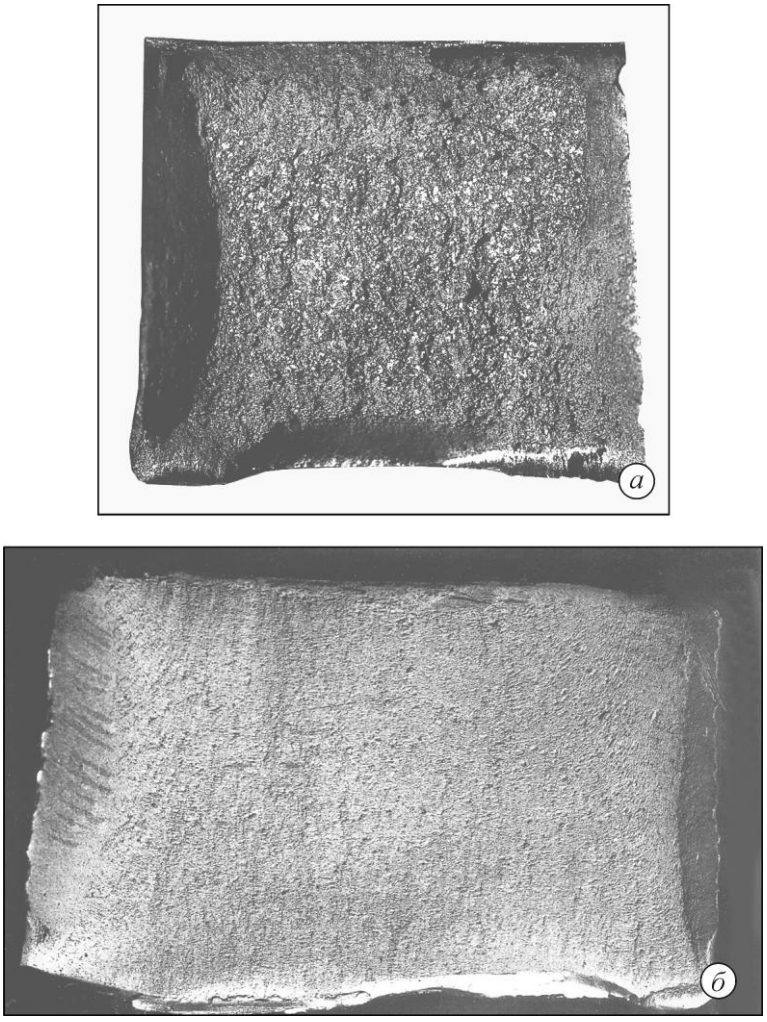


Рис. 5.38. Изломы с макрооднородным строением:
а – кристаллический излом литой стали, технологическая проба; *б* – волокнистый излом стального проката, технологическая проба

Определив долю вязкой составляющей при каждой температуре испытания по средним значениям этой составляющей, строят кривую температурной зависимости в координатах В, % – T °С и на полученном графике находят температуру, при которой в изломе наблюдается заданное количество вязкой составляющей (рис. 5.41).

Измерения при микрофрактографическом методе

При разрушении закаленных и отпущенных сталей образуются макрооднородные изломы, определить долю вязкой составляющей в которых можно только микрофрактографическим методом. В этом случае визуально по цвету, степени шероховатости, наличию боковых скосов и утяжке можно оценить только целиком хрупкие или вязкие изломы.

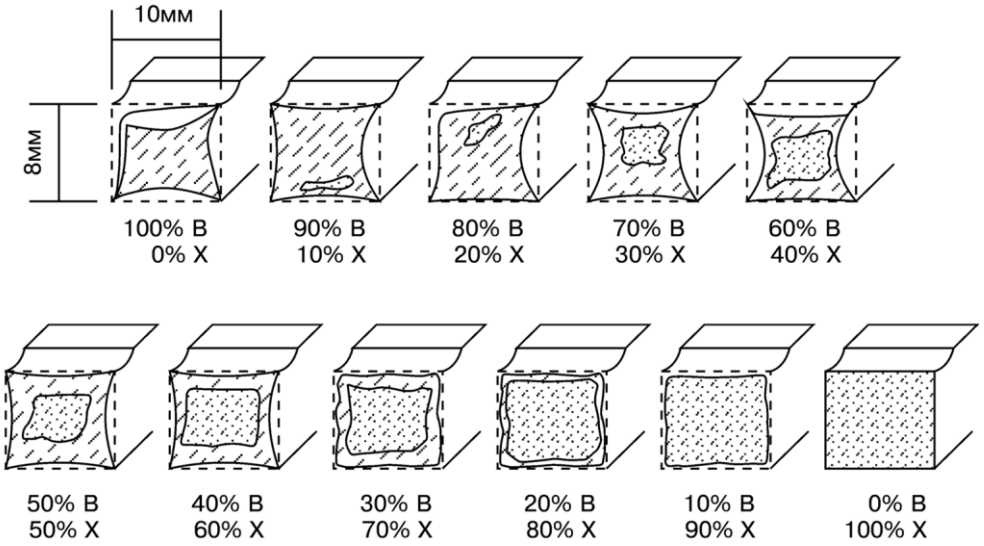


Рис. 5.39. Шкала изломов с различной долей вязкой составляющей, %; В – вязкая составляющая, Х – хрупкая составляющая

Смешанные макронеоднородные изломы, получаемые в интервале критических температур, следует просматривать при электронно-микроскопических увеличениях, выделяя для обсчета участок размерами примерно 3×3 мм^2, расположенный в центральной плоской части излома (вне зон макродеформации). Для измерения следует использовать минимальные увеличения, позволяющие достаточно четко различать участки вязкого разрушения с ямочным рельефом и хрупкого разрушения с фасетками скола и квазискола или межзеренными фасетками. Обычно это увеличение составляет 1000–3000 крат.

Долю хрупкой составляющей определяют или на микрофотографиях путем планиметрирования площадей участков с хрупким рельефом, или непосредственно на экране количественного микроскопа типа «Квартимет». Количество хрупкой составляющей определяют в каждом поле и находят среднее арифметическое ее значения по всем полям (ХР), которое характеризует количество хрупкой составляющей только в плоской части излома без боковых скосов.

Определение КТХ по изломам технологических проб

Проба на излом в статических условиях испытания позволяет классифицировать стали по их чувствительности к температуре испытания с учетом масштабного фактора и правильно определять допустимый диапазон толщин стального проката при их применении в тех случаях, когда испытания ударных образцов не позволяют определить их работоспособность при изменении рабочих температур.

Достаточно полная оценка качества стали может быть получена при сочетании двух показателей: критической температуры хрупкости $T_{к.б}$ (индекс б обозначает большой образец) и ударной вязкости, определенной на образцах, изго-

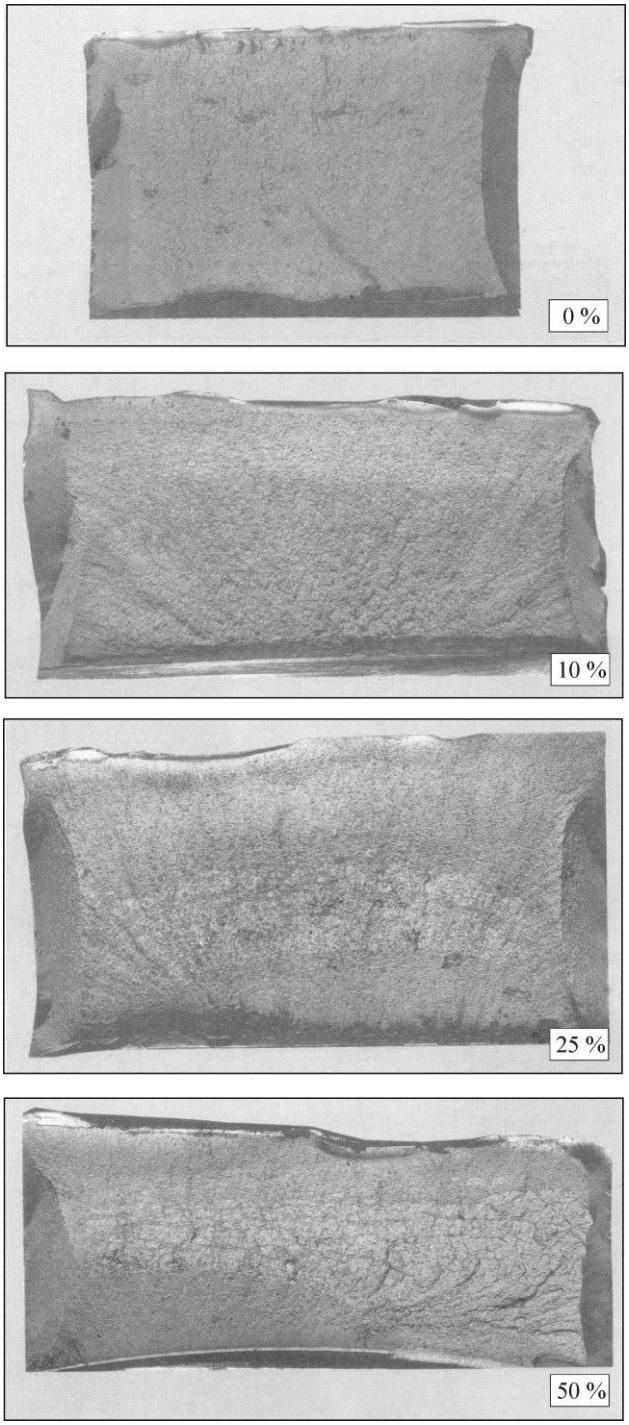


Рис. 5.40. Типичные изломы с различной долей хрупкой составляющей (X, %), технологические пробы

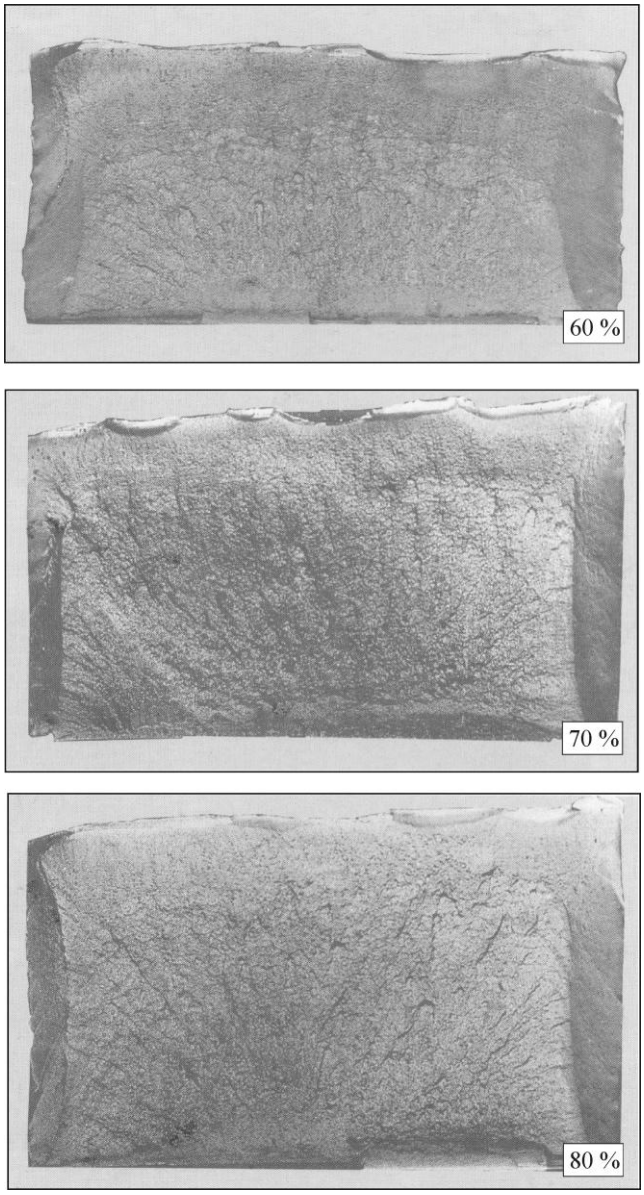
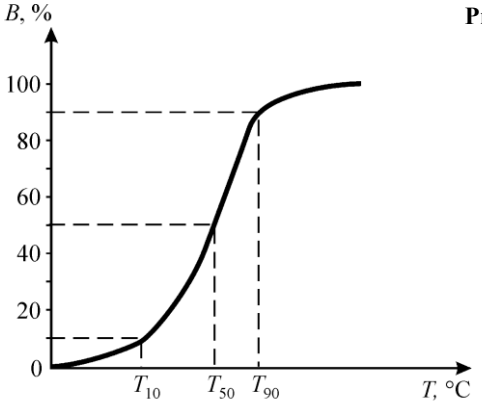


Рис. 5.40. Продолжение

изготовленных из больших проб. Этот метод оценки КТХ применим к сталям, в изломах которых при понижении температуры образуется хорошо видимый визуально кристаллический участок (см. рис. 5.40).

Для определения $T_{к.б}$ рекомендуется первую пробу (или две пробы) испытывать при температуре –40 °С, так как эта температура является наиболее показательной для конструкционных сталей. В зависимости от полученного строения излома назначают температуры испытания следующих проб. Площади волокнистых и кристаллических участков измеряют так же, как для ударных образцов.



(КТХ)

Рис. 5.41. Температурная зависимость доли вязкой составляющей в изломе

5.3.6. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВКЛЮЧЕНИЙ НА РАЗРУШЕНИЕ МЕТАЛЛОВ

В металле, в том числе в металле сварных швов, наблюдаются различные включения, которые могут оказывать отрицательное влияние на характеристики его разрушения. Для анализа влияния включений на процесс разрушения используют два способа.

Первый способ – основан на оценке отношения доли частиц включений, определяемых на проекции, нормальной к поверхности разрушения (излома) $P_и$, к доле частиц включений на поверхности микрошлифа $P_ш$. Это отношение (β) вычисляется по формуле $\beta = P_и/P_ш$. Если оно больше 1, то включения способствуют процессу разрушения, если меньше 1, то препятствуют ему, а если это отношение равно 1, то не влияют на разрушение.

При втором способе используют коэффициент выявляемости включений, учитывающий кроме доли включений в изломе и на поверхности микрошлифа также влияние рельефа в изломе и средний размер частиц. Поверхностный слой металла, участвующий в процессе разрушения, характеризуется объемом $V^S = S_и H$, где $S_и$ – площадь нормальной проекции излома, H – толщина слоя металла, частицы из которого принимают участие в процессе разрушения.

Объемная доля частиц включений в поверхностном слое металла определяется из выражения $V_и^S = P_и L_z/H$, где L_z – средний размер частиц включений по оси z (рис. 5.42).

Участие частиц включений в процессе разрушения, характеризуемое коэффициентом выявляемости включений, определяется по формуле $b_V = V_и^S/P_ш$ либо при объединении уравнений по формуле $P_и L_z/(P_ш H)$.

Значение H определяют на поперечных разрезах изломов как среднее значение из 5–10 замеров максимальных перепадов высот микрорельефа в участках, где располагаются частицы включений. Величину L_z определяют на шлифах, перпендикулярных поверхности излома, как среднюю случайную хорду, ориентированную вдоль оси z.

Величина b равна нулю, когда частиц на поверхности излома нет. Это означает, что частицы препятствуют процессу разрушения. При $b_V = 1$ все частицы из объема V^S участвуют в процессе разрушения. Увеличение b_V от 0 до 1 указывает на усиление влияния частиц включений на процесс разрушения.

В практике нередко возникает необходимость определять долю разрушения по конкретным неметаллическим или другого вида включениям. В пределах гра-

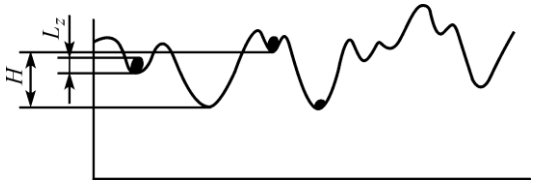


Рис. 5.42. Измерение максимальных перепадов высоты между близко расположенными частицами; H – толщина слоя металла, частицы из которого принимают участие в процессе разрушения; L_z – средний размер частиц включений по координате z

ниц характерных участков разрушения, обусловленных включениями одного вида, любым способом измеряют суммарную площадь этих участков и определяют ее долю по отношению к общей площади анализируемого участка. Определение площади на РЭМ осуществляют с помощью любых количественных микроскопов. Итогом измерения является определение средней площади участков разрушения по конкретным включениям, например типов *a*, *b*, *c*:

$$S_{a\text{ср}} = \sum S_a/(na);\ S_{b\text{ср}} = \sum S_b/(nb);\ S_{c\text{ср}} = \sum S_c/(nc),$$

где *na*, *nb*, *nc* – число включений анализируемого вида.

Доля разрушения для конкретного включения (например, типа *a*) составляет:

$$P_a = \sum S_a/S_{\text{и}},$$

где $S_{\text{и}}$ – проанализированная площадь излома.

Сопоставление полученных данных со свойствами металла позволяет выявить тип включений, оказывающий наибольшее отрицательное влияние на характер разрушения и, следовательно, на уровень свойств металла.

При оценке влияния неметаллических включений на процесс разрушения целесообразно определять природу этих включений на изломах или микрошлифах, изготовленных вблизи зоны разрушения, и проводить их идентификацию по таким характеристикам, как форма, полируемость, твердость, оптические свойства и др. и, главное, химический состав, микроструктурными и физическими методами.

Глава 6
ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ТЕМПЕРАТУРНОЙ МИКРОСКОПИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

6.1. ВОЗМОЖНОСТИ И ПРЕИМУЩЕСТВА МЕТОДА

Практика использования высокопрочных материалов и сплавов на их основе для сложнонагруженных деталей и конструкций показала, что большинство разрушений, не связанных с изменением геометрических размеров деталей, происходит при нагрузках значительно ниже расчетных.

Чтобы предотвратить преждевременное разрушение и обеспечить высокий уровень сопротивления зарождению и развитию трещин в многофазных конструкционных материалах, особенно в материалах, работающих в условиях растягивающих или циклических напряжений, необходимо знать природу разрушения.

Зарождение разрушения связано с пластической деформацией, которая может быть обусловлена различными механизмами в зависимости от условий деформации (температуры, скорости деформации, напряжений и т.д.), но механизм разрушения металлических материалов независимо от механизмов деформации одинаков и состоит в зарождении и развитии трещин. Наиболее важную информацию о природе разрушения получают именно на стадии зарождения разрушения.

Для определения слабых звеньев в строении металлических материалов необходимо установить связь особенностей структуры металла с процессами разрушения. Поэтому большое значение имеет метод температурной микроскопии, который совмещает достоинства микроскопических и фрактографичеких методов, а также методов испытания механических свойств металлических материалов.

Метод температурной микроскопии позволяет определять величину истинной микропластической деформации отдельных структурных элементов (слабых звеньев) в структуре металла в зависимости от напряжений, вызывающих напряжение. Этим он выгодно отличается от других методов изучения изменения механических свойств металлов, дающих усредненные характеристики, отнесенные к наиболее ослабленному сечению в макрообъеме рабочей зоны испытуемых образцов. С помощью метода температурной микроскопии получают сведения:

о закономерностях протекания пластической деформации и разрушения при температурах, при которых невозможно наблюдать зарождение разрушения традиционными методами;

о вкладе микропластической деформации в изменение структурных составляющих и зарождение трещин в металле;

о влиянии фазовых превращений в сплавах на особенности процесса разрушения;

о кинетике процессов старения, разупрочнения и фазовых превращений и об их влиянии на механические свойства при термосиловом воздействии;

об изменении параметров структуры в период термосилового воздействия.

Кроме того, в дополнение к стандартным механическим свойствам этот метод позволяет:

определять прочностные и пластические характеристики, получаемые при проведении экспериментов по заданной программе в процессе термосилового воздействия в интересующий исследователя момент испытания;

с привлечением методов электронной микроскопии, фазового анализа и других физических методов изучать взаимосвязь деформационного и фазового микрорельефов с тонкой структурой.

В настоящее время наибольший практический интерес представляют исследования поведения конструкционных материалов и прежде всего средне- и высоколегированных сталей, имеющих сложную гетерогенную структуру и, как следствие, повышенную склонность к трещинообразованию.

Преимущества метода температурной микроскопии наглядно проявляются при изучении термосилового воздействия на сталь. Обычный метод – закалка не позволяет устанавливать, например, особенности кинетики формирования и роста зерен аустенита, определять продукты его распада при различных режимах термодеформационного воздействия и др., в то время как метод температурной микроскопии дает возможность:

фиксировать процесс превращения ферритно-цементитных структур в аустенит во время нагрева;

фиксировать кинетику изменения зерен аустенита – многократную смену границ во время нагрева и выдержки при заданной температуре;

конкретизировать температурно-временные параметры проявления разных механизмов роста зерна аустенита;

фиксировать кинетику процессов распада аустенита во время охлаждения;

выявлять неоднородность фазовых превращений в металле, сохранившем после неполной гомогенизации ликвационную неоднородность;

исследовать деформационные микрорельефы на различных этапах пластической деформации и сопоставлять их со структурой металла;

выявлять структурные очаги преждевременного зарождения трещин, кинетику их развития и т.д.

Материалы справочника наглядно иллюстрируют методические и экспериментальные возможности метода температурной микроскопии. Его несомненно целесообразно использовать для решения широкого круга задач практического металловедения. Этот метод полезен при проведении исследований, связанных с выбором химического состава и конструирования заданной структуры металлических материалов, в том числе сварных соединений, а также при прогнозировании поведения сварных соединений в условиях термосилового воздействия, в определенной степени моделирующих реальные технологические процессы и условия эксплуатации.

6.2. МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Аппаратура

При исследовании современных материалов, в том числе сварных соединений, имеющих сложную гетерогенную структуру, эффективно использование

метода температурной микроскопии. Для решения различных научных и технологических задач с помощью этого метода созданы специализированные установки, разработаны специальные методики исследований.

Установки для реализации метода температурной микроскопии представляют собой комплексы, в состав которых входит следующее оборудование:

устройства для механического нагружения образцов по заданной программе (растяжение, сжатие, знакопеременный изгиб);

оптическая система для наблюдения и фиксации микроструктуры поверхности исследуемых образцов;

системы для нагрева и охлаждения образцов;

система для создания вакуума или защитной атмосферы;

система для измерения микротвердости при различных температурах;

системы для измерения электрического сопротивления, термофизических и других характеристик.

Наиболее известны зарубежные модели: НМ-3, НМ-4, НМ-100 фирмы «Юнион Оптикал» (Япония), «Хайтиш» фирмы «Лейтц» (Германия), «Вакутерм» фирмы «Рейхерт» (Австрия). Эти установки оснащены качественными высокотемпературными микроскопами и системами для испытаний образцов по схемам растяжения, сжатия, изгиба в вакууме или в защитной среде с приспособлениями для измерения микротвердости, электросопротивления и др.

Основные технические характеристики таких моделей:

температурный интервал испытаний – от –180 до 3000 °С;

нагрев индукционный, радиационный, электронно-лучевой и пропусканием тока через образец;

контроль за температурой – с помощью термопар (до 1600 °С) и пирометров (до 3000 °С);

активное растяжение со скоростью от $8 \cdot 10^{-8}$ м/с, растяжение под действием постоянной нагрузки до 3000 Н, сжатие под действием постоянной нагрузки до 2000 Н;

измерение микротвердости при температурах от –180 до 1600 °С;

максимальное полезное увеличение микроскопа – до 800 крат.

Отечественной промышленностью выпущены установки следующих моделей;

ИМАШ-9 – для измерения микротвердости при температурах до 1100 °С;

ИМАШ-10 – для испытаний на малоцикловой поперечный изгиб;

ИМАШ-20 – для испытаний на активное растяжение или растяжение с постоянной нагрузкой.

В установках предусмотрена возможность проведения испытаний в вакууме или газовых средах.

Однако, используя эти установки, исследователи не всегда могут в полной мере решить все поставленные задачи, поэтому для решения конкретных задач они часто либо существенно модернизируют серийные установки, либо на их базе создают аппаратуру собственной конструкции.

Можно выделить следующие основные направления дополнительных аппаратурно-методических разработок:

автоматизация процесса управления экспериментом (создание систем программного нагрева и нагружения);

автоматизация регистрации и обработки результатов экспериментов с использованием компьютерной техники;

разработка новых конструктивных решений высокотемпературных микроскопов;

создание систем по расширению диапазона температур испытаний, скоростей нагрева и охлаждения образцов;

расширение конструктивно-методических возможностей установок температурной микроскопии путем совмещения их с другими установками (например, с моделями ААИ, РЭМ, МАР и др.).

Большие методические возможности открываются при совмещении этих установок с растровым электронным микроскопом. Для определения взаимосвязи между возникновением оптически разрешаемых микротрещин и микронеоднородностью химического состава эффективно использование температурной микроскопии в сочетании с методами рентгеноспектрального анализа (РСМА, ЛСМА, ЭСХА, Оже-электронная спектроскопия (ОЭС)) и другими методами.

Характеристики перечисленных методов микроанализа приведены в табл. 20.

Для изучения процессов деформации, разрушения и структурных изменений в металлах (литых и деформированных) рекомендуется использовать плоские образцы четырех типов.

Образец типа I (рис. 6.1, *а*) целесообразно применять для исследования металлов с крупнозернистой структурой и металлов с неравномерным распределением структурных составляющих. При использовании такого образца можно наблюдать за сравнительно большой площадью поверхности металла. Недостатками данного типа являются необходимость нанесения реперных отпечатков, слу-

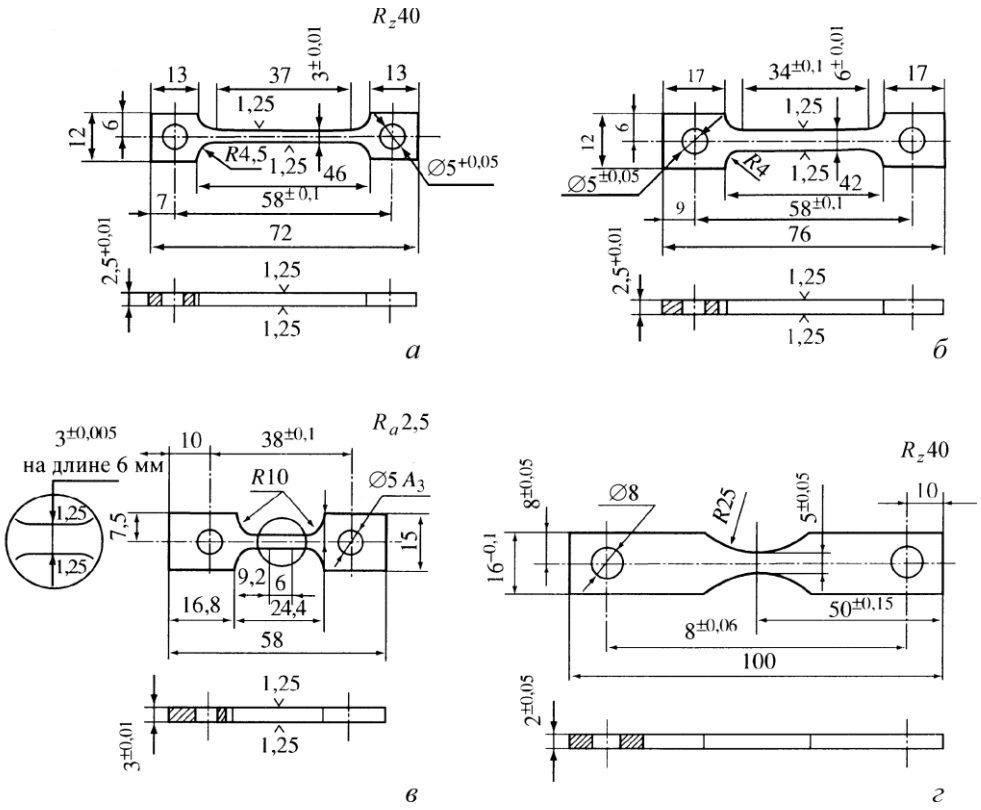


Рис. 6.1. Образцы для проведения испытаний четырех типов:
а – I; *б* – II; *в* – III; *г* – IV

жащих базой для измерения микропластической деформации по всей рабочей длине образца (так как заранее неизвестно место локализации деформации в рабочей зоне), и невозможность проведения испытаний до разрушения высокопрочных материалов (из-за недостаточной мощности серийно выпускаемых установок).

Образцы типа II (рис. 6.1, *б*) целесообразно применять для испытаний на растяжение металлов с мелкозернистой структурой. Достоинство этого образца – уменьшенная по сравнению с образцом типа I площадь сечения, что позволяет испытывать высокопрочные материалы. Недостаток, как и у образцов типа I, – необходимость нанесения реперных отпечатков по всей рабочей длине.

Образцы типа III (рис. 6.1, *в*) целесообразно применять при ускоренных испытаниях металлов. Достоинство данного типа – локализация пластической деформации в рабочей части образца на базе 6 мм, а следовательно, значительное снижение трудоемкости эксперимента благодаря уменьшению длины реперных линий на рабочей базе. Недостаток – малая площадь исследуемой поверхности.

Образцы типа IV (рис. 6.1, *г*) предназначены для испытаний при знакопеременном изгибе. Толщина образца может меняться от 1,5 до 3 мм. Выбор толщины ограничен прочностью материала при исследуемой температуре и мощностью установки.

Существует несколько схем исследований сварных соединений. Для соединений, применяющихся без усиления сварного шва, образец вырезают поперек этого шва. В таком случае пригодны образцы всех типов.

Для сварных листовых соединений используют образцы I и II типов с головками, повернутыми на 90°. Такие образцы пригодны только для листовых соединений толщиной до 3 мм.

Если необходимо исследовать зону термического влияния сварного шва, то рекомендуется проводить имитацию термического нагрева металла при сварочном процессе. Для этого из исследуемого материала делают образцы типа I или II, затем поперек сечения образца неплавящимся электродом быстро нагревают металл до температуры солидуса и охлаждают со скоростями, имитирующими различные режимы сварки. В результате на образце формируется полная картина структур металла, имитирующая зону термического влияния.

На образцах, подвергнутых специальному термическому воздействию, проводят металлографический анализ, выявляют микроструктуру и измеряют микротвердость вдоль образца. Такая методика позволяет определять, по каким структурным составляющим, при каких напряжениях и деформациях происходит зарождение трещин в условиях испытаний на установках температурной микроскопии по заданной программе, в определенной степени имитирующей условия эксплуатации.

Для исследования структурных изменений в процессе термодеформационного воздействия на одной из поверхностей образца изготавливают микрошлиф, который подвергают последующему механическому или электролитическому полированию.

Как правило, большинство образцов испытывают после полирования без выявления микроструктуры травлением, чтобы не осложнять наблюдение за структурными изменениями и микрорельефом, возникающими в условиях термического, деформационного или термодеформационного воздействия. В отдельных случаях для выявления элементов структуры перед деформированием можно применять травление химическими реактивами, однако возникающие при этом структурные концентраторы напряжений на поверхности образца могут искажать следы деформации металла.

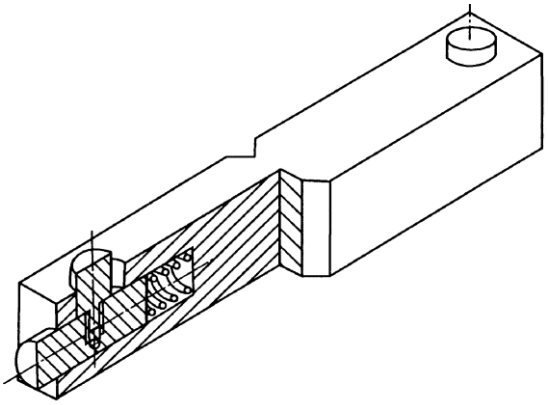


Рис. 6.2. Схема приспособления для шлифования и полирования образцов больших размеров

Шлифование и полирование образцов больших размеров вызывает определенные затруднения. Чтобы ускорить выполнение указанных операций, рекомендуется использовать автоматизированные полировальные установки. Применяют также различные приспособления, принципиальное устройство одного из них иллюстрирует рис 6.2.

Методы измерения локальной деформации

Существуют различные методы измерения микронеоднородности пластической деформации. Наиболее применяемые:

метод искусственных баз, заключающийся в определении пластической микродеформации в данной точке по изменению линейных размеров отпечатка алмазной пирамиды, нанесенного на поверхность образца до деформации;

метод статистической обработки результатов измерения профилограмм искажения плоских сечений образцов в процессе деформирования сжатием;

метод нанесения реперных отметок в виде отпечатков алмазного индентора и определения величины пластической деформации по изменению расстояния между ними;

методы делительных сеток (накатка, травление по трафаретам, напыление, фотопечать, царапание поверхности образца);

метод муара.

При экспериментах измеряют общую деформацию рабочей зоны образца и локальную деформацию (микродеформацию) выбранных участков или отдельных элементов структуры. Эти характеристики определяют как относительное удлинение вдоль оси растяжения: общую деформацию – на рабочей базе образца (6–30 мм), локальную – на микроучастках, сопоставимых с величиной отдельных элементов структуры (10–50 мкм). На рабочую поверхность образца (на расчетную длину l_0) наносят реперные отпечатки с заданным шагом разметки, который выбирают в зависимости от размеров элементов структуры. Обычно на плоскость образца наносят 3–5 реперных линий, каждая из которых содержит от 30 до 130 отпечатков.

Для выполнения трудоемкой операции по нанесению реперных отпечатков и измерению расстояний между ними было разработано специальное приспособление к прибору ПМТ, которое позволяет зафиксировать и быстро найти наблюдаемый участок после эксперимента (рис. 6.3). Приспособление устанавливают двумя штифтами на предметном столике прибора. Двумя другими штифтами (один из них неподвижен) образец закрепляют в исходном либо в растянутом состоянии. Образец строго фиксируют относительно микрометрических винтов, что позволяет наносить отпечатки параллельно или перпендикулярно его оси.

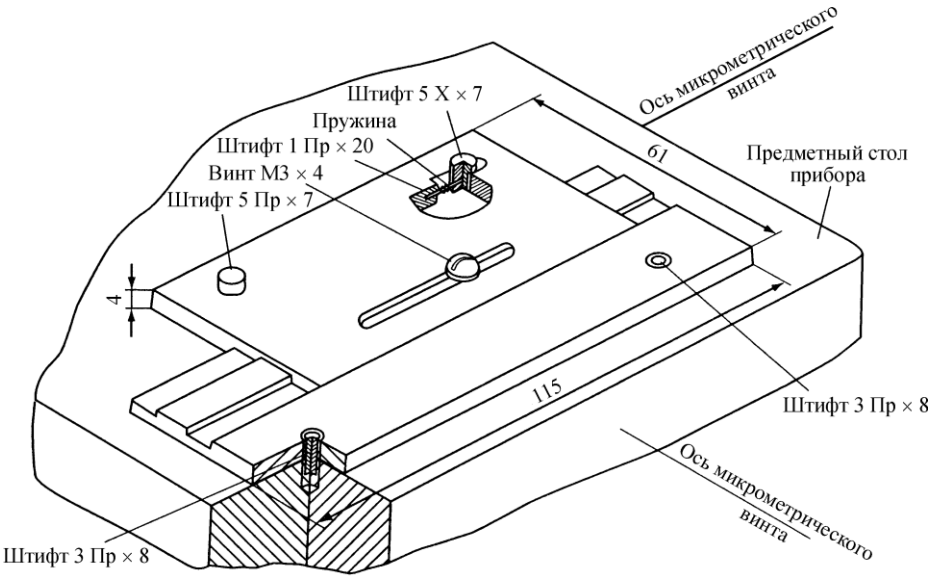


Рис. 6.3. Приспособление для установки и фиксации образцов на твердомере типа ПМТ

Локальную деформацию в объемах зерен ($\varepsilon_з$) и в приграничных участках ($\varepsilon_г$) определяют путем измерения длины фиксированных микроучастков внутри зерен и по границам, при этом граница зерна должна быть внутри измеряемого микроучастка. По результатам изменений длины фиксированных микроучастков в процессе растяжения при разных значениях относительного удлинения образца можно определить среднюю локальную деформацию объемов зерен и зернограничных микрообъемов при конкретной величине относительного удлинения образца.

В свою очередь локальную деформацию микрообъемов можно разделить на локальную деформацию за счет раскрытия микротрещин ($\varepsilon_т$) и за счет пластического деформирования ($\varepsilon_д$) микрообъемов. Для этого измеряют длину фиксированного микроучастка до и после деформации на заданную величину (l_0 и $l_к$ соответственно) и ширину микротрещин (b) вдоль направления разметки после деформации.

Локальную деформацию микроучастка (ε_i, %) определяют по формуле

$$\varepsilon_i = \frac{l_{кi} - l_{0i}}{l_{0i}} \cdot 100 ,$$

а локальную деформацию за счет раскрытия микротрещин ($\varepsilon_т$, %) – по формуле

$$\varepsilon_т = (b/l_0) \cdot 100.$$

Локальную деформацию за счет пластического течения находят как разность

$$\varepsilon_д = \varepsilon_i - \varepsilon_т.$$

Кроме того, количественно оценивают долю удлинения всего образца за счет раскрытия микротрещин. Для этого определяют сумму ширин всех микротрещин

($\sum b_i$) вдоль разметки на поверхности образца и вычисляют долю удлинения ($\delta_т$, %) образца за счет раскрытия микротрещин по формуле

$$\delta_т = (\sum b_i / \sum b_{0i}) \cdot 100,$$

где b_{0i} – исходная ширина всей разметки.

Нагрев образцов

При исследовании структуры и свойств металлов в широком диапазоне температур в вакууме или в защитных газовых средах нагрев и охлаждение образцов до заданных температур осуществляют радиационными (за счет излучения тепловой энергии нагревателей) и контактными (за счет действия пропускаемого электрического тока через образец) методами.

Контактный способ целесообразен при решении задач, требующих высоких скоростей нагрева и охлаждения, что невозможно в условиях радиационного нагрева, однако при контактном способе из-за образования в образце при деформировании макро- и микродефектов повышается вероятность локальных перегревов, ускоряющих разрушение.

Контроль за температурой осуществляют обычно с помощью термопар.

6.3. МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ОБРАЗЦОВ

Процессы деформирования и разрушения с различными скоростями растяжения в условиях нагрева и охлаждения на установках температурной микроскопии

Схема проведения эксперимента при термическом воздействии

1. Подготавливают образец для эксперимента (см. раздел 6.1).
2. Выявляют до начала эксперимента исходную структуру материала (зеренную, дендритную, полосчатость и пр.), подвергая образец химическому или электролитическому травлению, выбирают и фиксируют его характерные участки реперными отметками.
3. Помещают образец в рабочую камеру установки и по заданной программе проводят термическую обработку.
4. Одновременно наблюдают под микроскопом и фиксируют с помощью фото- и киносъемки формирование микрорельефа на поверхности образца.
5. В ходе эксперимента по заданной схеме определяют и исследуют следующее: температурно-временные параметры структурных изменений на поверхности образца; кинетику формирования зерен высокотемпературной фазы (многократную смену границ в процессе нагрева и выдержки при заданной температуре); механизмы роста высокотемпературной фазы; размер зерна на разных этапах термического воздействия; кинетику формирования структур игольчатого типа с идентификацией последних (например, бейнит или мартенсит); термокинетическую диаграмму распада высокотемпературной фазы; кинетику коагуляции структурных составляющих.

Схема проведения эксперимента при деформационном и термодеформационном воздействии

1. Подготавливают образец, как описано выше.
2. Определяют площадь поперечного сечения его рабочей части.
3. Образец помещают в рабочую камеру установки, нагревают и деформируют по заданной программе, варьируя в зависимости от решаемой задачи параметры: температуру и скорость нагрева, продолжительность выдержки при заданной температуре, режим термоциклирования, скорости охлаждения и деформирования, величину и продолжительность действия нагрузки при деформировании постоянной и переменной нагрузкой, степень деформации и др.
4. Изучают под микроскопом и фиксируют с помощью фото- и киносъемки формирование микрорельефа на поверхности образца.
5. Оценивают прочностные и пластические характеристики исследуемого металла в соответствии с данными табл. 21.

Таблица 21. **Характеристики, измеряемые при металлографическом исследовании процессов деформирования и разрушения образца в условиях одноосного растяжения**

Номер п/п	Измеряемая величина	Обозначение	Метод измерения	Связь характеристик, определяемых прямыми и косвенными методами	Погрешность измерения
1	Начальная расчетная длина образца, мм	l_0	Прямой	–	0,1 мм
2	Начальная толщина в рабочей части образца, мм	a_0	»	–	0,05 мм
3	Начальная ширина в рабочей части образца, мм	b_0	»	–	0,05 мм
4	Начальная площадь поперечного сечения в рабочей части образца, мм^2	F_0	Косвенный	$F_0 = a_0 b_0$	–
5	Конечная расчетная длина образца, мм	$l_к$	Прямой	–	0,1 мм
6	Относительное удлинение после разрыва, %	δ	Косвенный	$\delta = \frac{l_к - l_0}{l_0} \cdot 100$	–
7	Осевая растягивающая нагрузка, действующая на образец в данный момент испытания, МПа	P	Прямой	–	1 %
8	Условное нормальное напряжение, МПа	σ	Косвенный	$\sigma = \frac{P}{a_0 b_0}$	–
9	Начальная расчетная локальная длина – измеренное при комнатной температуре расстояние между реперными точками, нанесенными на образец, мкм	l_{0i}	Прямой	–	1 мм
10	Конечная расчетная локальная длина – измеренное после снятия нагрузки расстояние между реперными точками, нанесенными на образец, мкм	$l_{кi}$	»	–	1 мкм
11	Относительное локальное удлинение – отношение приращения расчетной локальной длины образца после снятия нагрузки к ее первоначальной величине, %	ε_i	Косвенный	$\varepsilon_i = \frac{l_{кi} - l_{0i}}{l_{0i}} \cdot 100$	–

Продолжение табл. 21

Номер п/п	Измеряемая величина	Обозначение	Метод измерения	Связь характеристик, определяемых прямыми и косвенными методами	Погрешность измерения
12	Длительность деформирования, с	τ	Прямой	–	0,1 с
13	Скорость деформирования, м/с	v	Косвенный	–	–
14	Расчетная локальная длина до приложения нагрузки – расстояние между реперными точками, измеренное при температуре испытания до приложения нагрузки, мкм	l_{t0i}	Прямой	–	1 мкм
15	Расчетная локальная длина в данный момент испытания – расстояние между реперными точками, измеренное при температуре испытания в данный момент деформирования, мкм	$l_{t\tau i}$	»	–	1 мкм
16	Относительная локальная деформация – отношение приращения расчетной локальной длины в данный момент испытания (t, τ) к ее величине до приложения нагрузки, %	ε_{lti}	Косвенный	$\varepsilon_{t\tau i} = \frac{l_{t\tau i} - l_{t0i}}{l_{t0i}} \cdot 100$	–
17	Условное напряжение разрушения – условное нормальное напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке, отнесенной к начальной площади поперечного сечения в рабочей части образца, МПа	$\sigma_{\text{р}}$	»	$\sigma_{\text{р}} = \frac{P_{\max}}{a_0 b_0}$	–
18	Площадь под кривой растяжения $P = f(\tau)$ при масштабе по оси P, равном M_P, по оси τ, равном M_τ, мм^2	$S_{\text{р}}$	Прямой	–	3 %
19	Работа разрушения – механическая работа деформирования образца до разрушения при скорости деформирования v (м/с), Дж	$A_{\text{р}}$	Косвенный	$A_{\text{р}} = M_{\text{р}} M_\tau S_{\text{р}} v$	–

Примечание. Характеристики №№ 1–9 приведены по ГОСТу 1497–73 «Методы испытания на растяжение», №№ 10–19 – по данным авторов (введены для расширения возможностей метода).

В ходе эксперимента возможно определять: механизмы пластической деформации исследуемого металла; морфологию, размеры и плотность элементов деформационного микрорельефа; поведение структурных составляющих на разных этапах деформирования вплоть до разрушения; взаимосвязь деформационного микрорельефа с элементами структуры исследуемого металла; источники зародышевых микротрещин и характер их развития на различных этапах деформирования; источники пор и изменения пористости на границах и в объеме зерен на разных этапах деформирования; изменение формы зерен.

Результаты измерений обрабатывают, определяя следующие величины:

относительное удлинение после разрыва (δ);

осевую растягивающую нагрузку (P);

напряжение начала пластической деформации (σ_τ);

напряжение зарождения трещин ($\sigma_{\text{тр}}$) и разрушения ($\sigma_{\text{разр}}$);

относительные локальные удлинения после снятия нагрузки (ε_i); относительные локальные деформации в процессе эксперимента ($\varepsilon_{t,\tau,i}$);

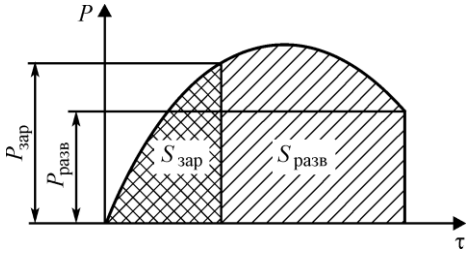


Рис. 6.4. Типичная зависимость осевой растягивающей нагрузки *P* от времени деформации

среднее локальное удлинение ($\varepsilon_{ср}$);
работу зарождения трещины ($A_{зар}$);
работу развития трещины ($A_{развв}$);
работу разрушения образца ($A_р$).

С этой целью на графике изменения осевой растягивающей нагрузки P в зависимости от продолжительности деформирования τ (при изменении нагрузки от $P = 0$ до $P = P_{разр}$) опускают перпендикуляры из точек $P = P_{зар}$ и $P = P_{разр}$ на ось τ (рис. 6.4), измеряют заштрихованную площадь под кривой ($S_{зар} + S_{развв}$) и определяют работы разрушения образца, зарождения и развития трещины:

$$A_{разр} = M_P M_\tau \nu S_{разр},$$

$$A_{зар} = M_P M_\tau \nu S_{зар},$$

$$A_{развв} = A_{разр} - A_{зар},$$

где M_P – масштаб по оси P; M_τ – масштаб по оси τ; ν – скорость деформирования, м/с; $S_{разр}$ – площадь под кривой растяжения, соответствующая работе развития трещины; $S_{зар}$ – площадь под кривой растяжения, соответствующая работе зарождения трещины.

Работу можно измерять любым более современным методом.

Наряду с вышеперечисленными методическими возможностями возможно измерение внутренних напряжений, возникающих в образцах как при изменении температуры, так и при фазовых превращениях. Уровень внутренних напряжений определяют на образце, один конец которого жестко закреплен в захватах установки, а второй присоединен к измерителю статических деформаций, встроенному в установку. Форма и размеры образца для этих измерений представлены на рис. 6.1, *б*. При этом измеряют начальную площадь поперечного сечения образца F_0. Определяют осевую растягивающую нагрузку P, действующую на образец в данный момент времени, внутренние напряжения σ (МПа), возникающие в образце из-за разности удельных объемов фаз при фазовых превращениях и из-за неоднородности протекания фазовых превращений, а также вследствие изменения коэффициента линейного расширения в связи с изменением температуры $\sigma = P/F_0$.

Процессы деформирования и разрушения в условиях знакопеременного изгиба при комнатной и повышенных температурах

Характеристики, определяемые при металлографическом исследовании процессов деформирования и разрушения плоских образцов при знакопеременном изгибе, а также сведения о методах измерений и их погрешностях приведены в табл. 22.

Измерения проводят в следующей последовательности. Измеряют толщину рабочей части образца (тип IV, см. рис. 6.1), отмечают рисками расчетную длину образца, эмпирически подбирают напряжение, обеспечивающее разрушение образца в многоцикловой области при требуемой длительности испытаний. Устанавливают эксцентрик системы нагружения в одно из возможных положений, при котором амплитуда вертикального перемещения свободного конца образца наиболее близка к заданной.

Таблица 22. **Характеристики, измеряемые при металлографическом исследовании процессов деформирования и разрушения образцов в условиях циклического нагружения**

Измеряемая величина	Условное обозначение	Метод измерения	Связь характеристик, определяемых прямым и косвенным методами	Относительная погрешность, %
Толщина образца в рабочей части, мм	h	Прямой	–	1,0
Минимальное перемещение образца – минимальное перемещение свободного конца образца, мм	f_{min}	»	–	1,0
Максимальное перемещение образца – максимальное перемещение свободного конца образца, мм	f_{max}	»	–	1,0
Амплитуда перемещения образца – амплитуда вертикального перемещения свободного конца образца, мм	f_a	Косвенный	$f_a = (f_{max} - f_{min})/2$	–
Минимальная деформация цикла, %	ε_{min}	»	$\varepsilon_{min} = 412 \cdot 10^{-4}\, h f_{min}$	–
Максимальная деформация цикла, %	ε_{max}	»	$\varepsilon_{max} = 412 \cdot 10^{-4}\, h f_{max}$	–
Амплитуда деформации цикла, %	ε_a	»	$\varepsilon_a = 412 \cdot 10^{-4}\, h (f_{max} - f_{min})/2$	–
Коэффициент асимметрии цикла – характеристика степени асимметрии цикла (ГОСТ 2860–85)	R_ε	»	$R_\varepsilon = \varepsilon_{min}/\varepsilon_{max}$	–
Частота циклов – число циклов напряжений в единицу времени, Гц	ω	»	$\omega = 1/\tau$	–
Период цикла – продолжительность одного цикла, мин	τ	Прямой	–	0,8
Длительность циклирования, мин	T	»	–	0,8
Количество циклов – число циклов, пройденных образцом перед разрушением при заданном напряжении	N	»	–	–

С помощью индикатора замеряют величины максимального и минимального перемещений свободного конца образца – F_{max} и F_{min} соответственно. По формулам, приведенным в табл. 22, подсчитывают максимальную и минимальную деформацию цикла, амплитуду деформации цикла, коэффициент асимметрии цикла. Осуществляют нагрев образца до заданной температуры и подвергают его знакопеременному изгибу вплоть до разрушения.

В процессе испытания наблюдают визуально за микроструктурными изменениями, проводят фото- или киносъемку структурных изменений на аппаратуре, встроенной в установку, и фиксируют момент зарождения трещин.

Измерения микротвердости при нагреве и одновременном действии растягивающих напряжений на плоских образцах в условиях нормальных и высоких температур

Использование установок для измерения «горячей микротвердости» открывает принципиально новые возможности для изучения влияния таких факторов, как температура, время и скорость приложения нагрузки на процессы упрочнения и разупрочнения металлов и сплавов с разной структурой, формирующейся после заданных режимов термической или термомеханических обработок. Измерение микротвердости – один из наиболее чувствительных методов изучения механизмов деформации. Одновременно этот метод дает возможность оценить прочностные характеристики поверхностных покрытий и упрочняющих слоев металла при высоких температурах.

Порядок измерения микротвердости следующий. Устанавливают выбранную нагрузку на шток индентора. Нагревают образец до заданной температуры и при необходимости прикладывают к нему растягивающее напряжение заданной величины. С помощью высокотемпературного микроскопа выбирают исследуемые участки или зоны. Индентор, встроенный в установку, нагревают до той же температуры, что и образец, наносят отпечаток на выбранную зону и измеряют его размеры.

Исследование макроструктуры в условиях термодеформационных испытаний

В настоящее время контроль макроструктуры металлов осуществляют двумя способами: первый – изучение макроструктуры полированной и протравленной плоскости разреза, второй – изучение излома в металле, образовавшегося вслед-

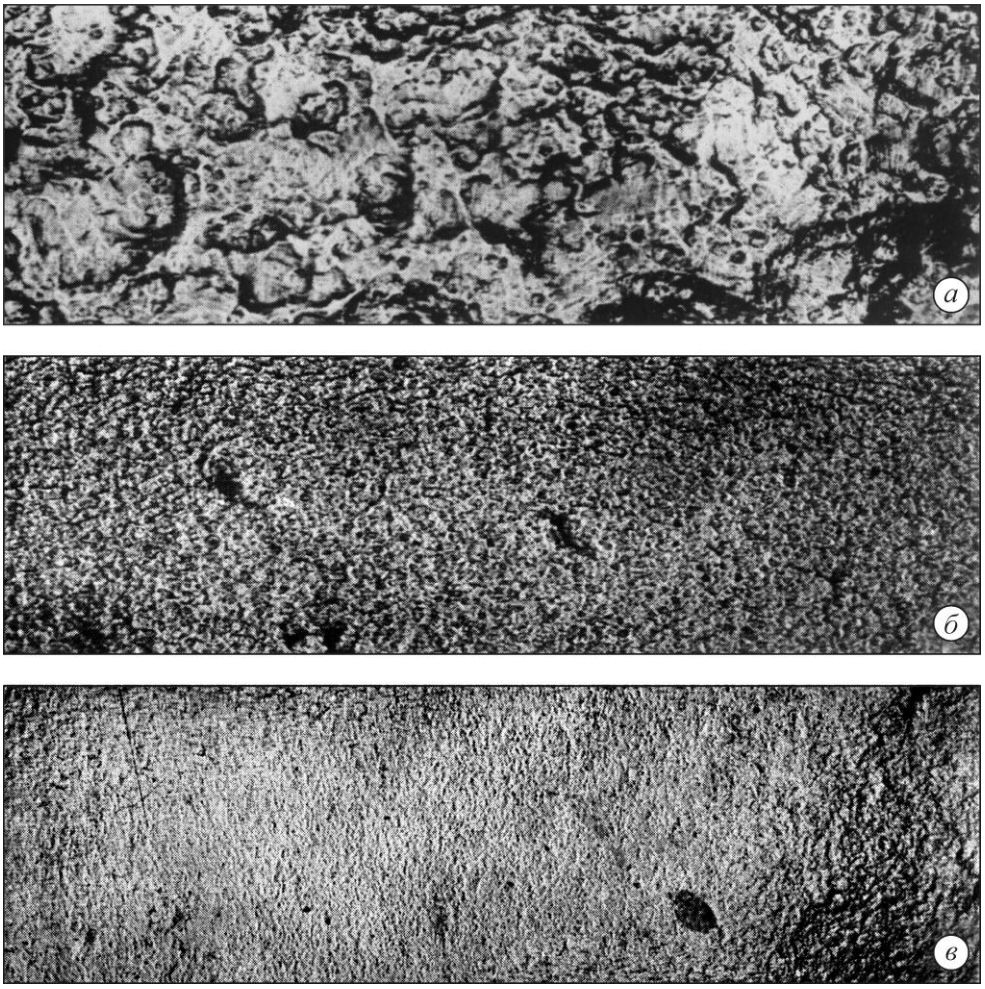


Рис. 6.5. Поверхностный макрорельеф в момент зарождения трещин в образцах из литого сплава Al – 9,5 % Mg:
а – без добавок; *б* – с добавкой 0,1 % Zr (введена из лигатуры); *в* – с добавкой 0,1 % Zr (введена из солей). ×8

ствие удара либо растяжения. Недостаток способа изучения изломов заключается в том, что изломы исследуемых металлов образуются при различных степенях деформации и разных напряжениях, что в ряде случаев не позволяет получать сравнимые результаты.

Более информативный способ состоит в исследовании макроструктуры металлов с помощью установок типа ИМАШ, дающих возможность изучать деформационный макрорельеф, образующийся на полированной поверхности образца при нагреве и растяжении. Способ позволяет сравнивать поведение металлов при одинаковых рабочих температурах и при одинаковых степенях деформации или под воздействием одинаковых напряжений.

Влияние добавки циркония на макроструктуру алюминиевого сплава наглядно иллюстрируют рис. 6.5 и 6.6.

6.4. СОЧЕТАНИЕ МЕТОДА ТЕМПЕРАТУРНОЙ МИКРОСКОПИИ С ДРУГИМИ МЕТОДАМИ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛОВ

Для получения более полной информации о строении металлов целесообразно метод температурной микроскопии совмещать с другими методами. Этот метод может быть использован для количественного металлографического анализа с применением автоматических анализаторов изображений, при этом можно резко повысить результативность исследований, устанавливая количественные корреляции между структурой металла и механизмами его деформации и разрушения.

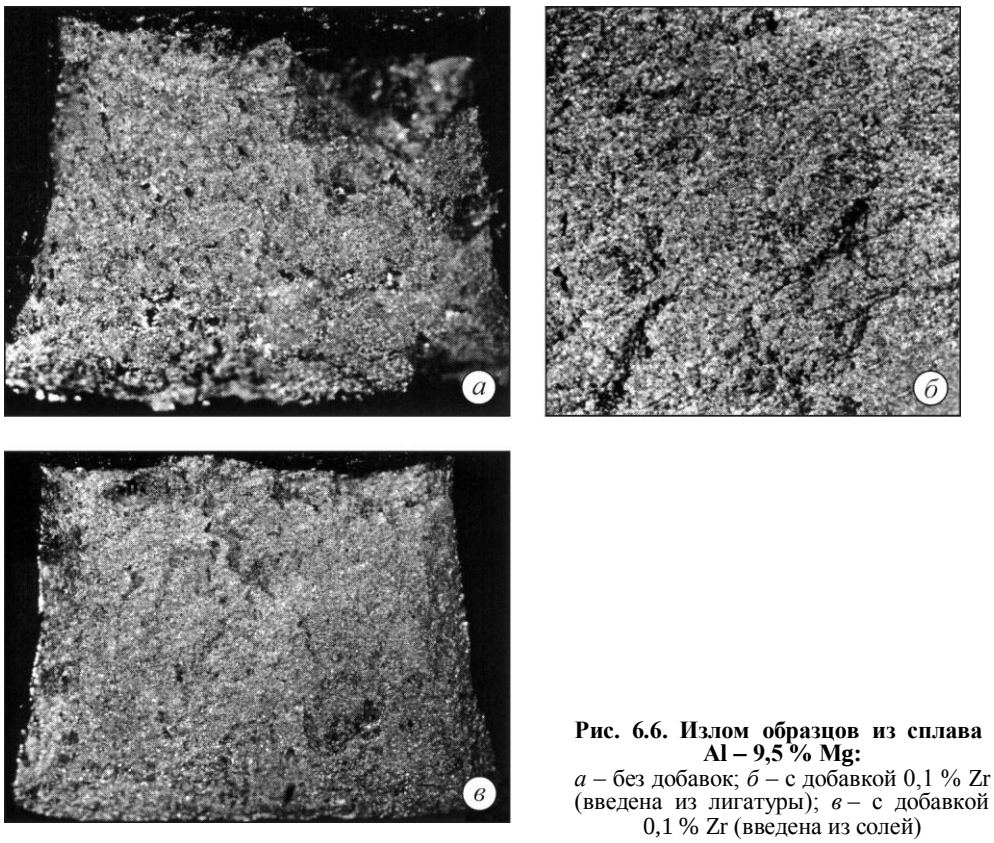
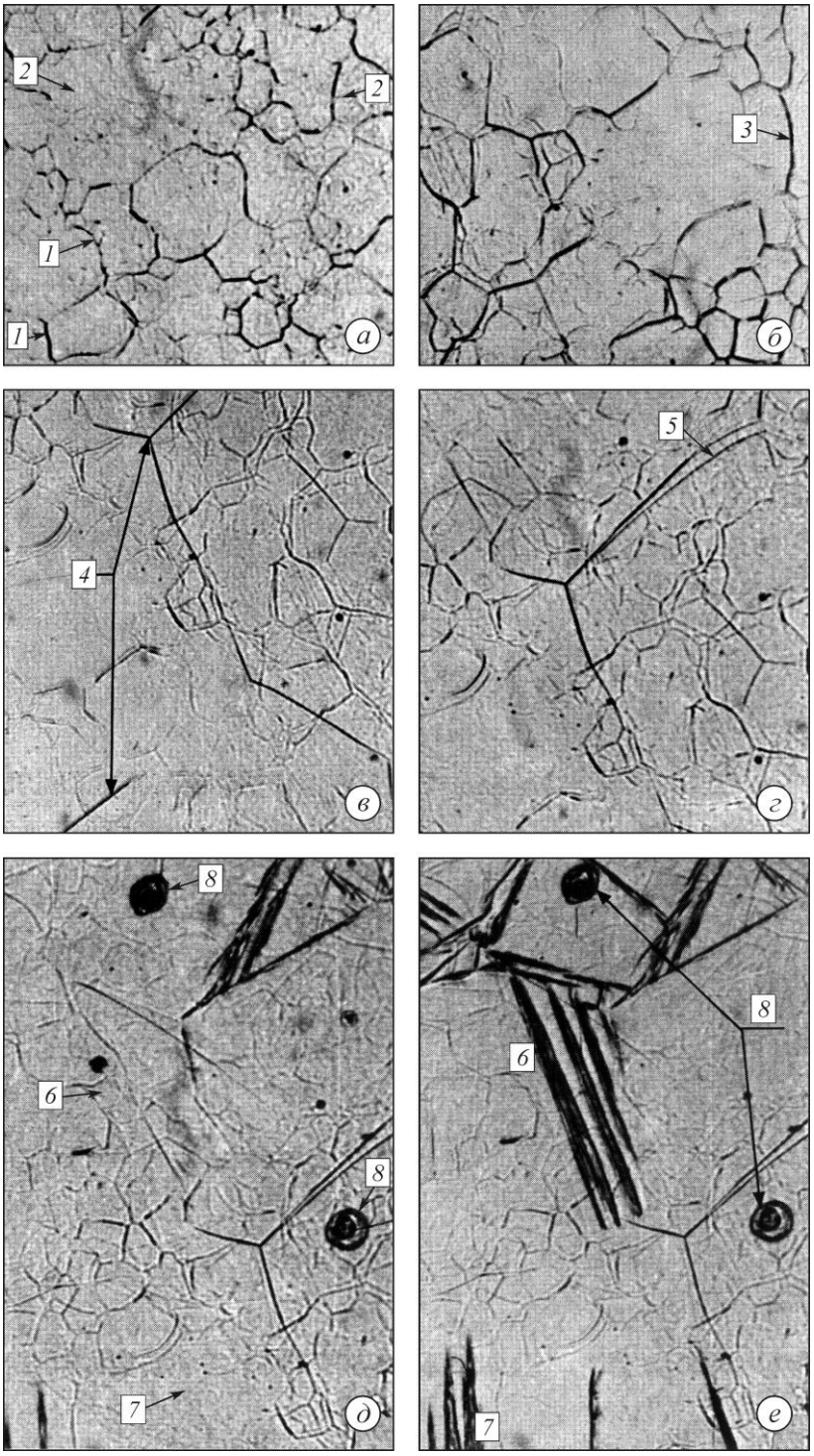


Рис. 6.6. Излом образцов из сплава Al – 9,5 % Mg:
а – без добавок; *б* – с добавкой 0,1 % Zr (введена из лигатуры); *в* – с добавкой 0,1 % Zr (введена из солей)


2
2
1
1
а
3
б
4
в
5
г
8
б
8
7
д
8
б
7
е

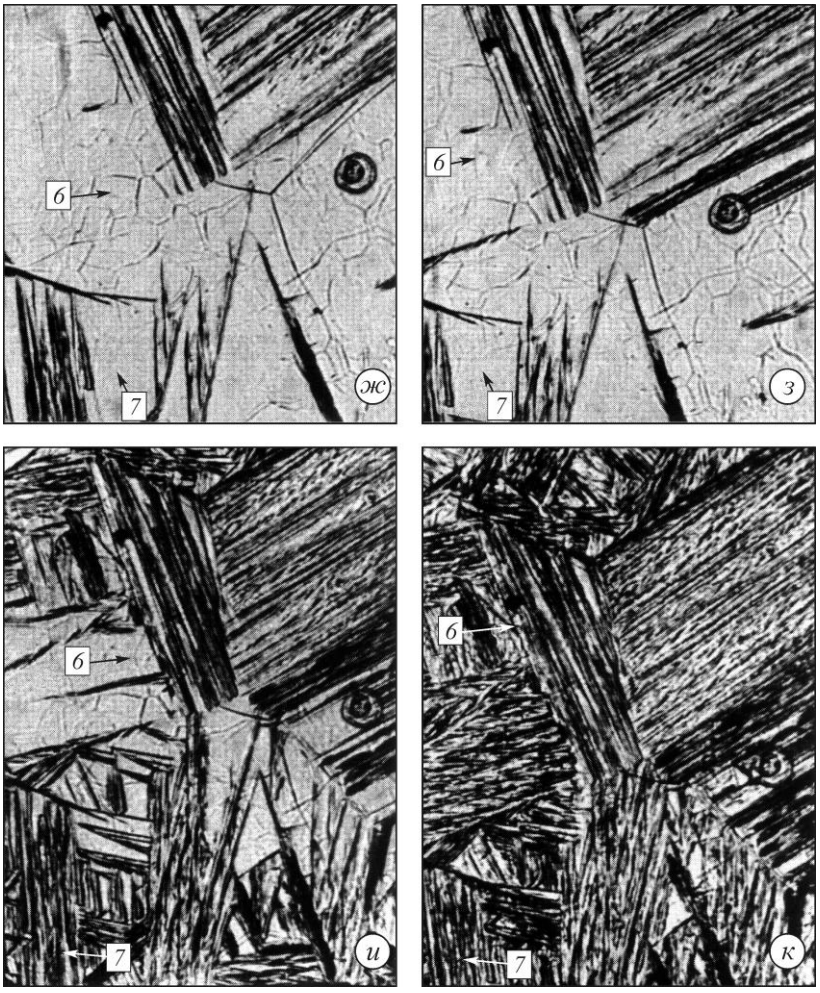


Рис. 6.7. Кинетика формирования термического микрорельефа катаной Cr–Ni–Mo-стали (один и тот же участок): ×100 (при печати ×4):

а–г – при нагреве; *д–к* – при охлаждении; *а* – появление мелких зерен аустенита на фоне исходного зерна; *б* – рост зерен аустенита путем слияния мелких зерен в более крупные – собирательная рекристаллизация в интервале температур 900–950 °С; *в* – изменение механизма роста зерен аустенита в интервале температур 1000–1100 °С, наблюдается образование новых крупных зерен, границы которых не связаны с границами прежних рекристаллизованных зерен; новые границы зерен произвольно ориентированы по отношению к предшествующим границам, прямолинейны, углы на стыке границ таких зерен составляют 120°; *г* – увеличение размеров зерен путем плавного перемещения их границ за счет миграции при повышении температуры до 1150–1200 °С; *д* – образование при охлаждении первых участков структуры игольчатого типа в условиях охлаждения до температуры начала фазовых превращений; *е* – увеличение протяженности кристаллов новой фазы, конечный размер которых определяется размерами действительного зерна аустенита; *ж* – увеличение числа кристаллов новой фазы при дальнейшем охлаждении; *з* – торможение неметаллическими включениями роста кристаллов новой фазы, способствующее дополнительному измельчению структуры игольчатого типа; *и* – превращение аустенита в структуру игольчатого типа при дальнейшем охлаждении; *к* – полностью завершившееся превращение аустенита в структуры игольчатого типа; *1* – границы действительного исходного зерна аустенита; *2* – границы мелких, вновь образовавшихся зерен аустенита; *3* – границы рекристаллизованных зерен аустенита; *4* – прямолинейные границы новых зерен; *5* – миграция границ зерен; *6, 7* – участки, иллюстрирующие характерную эволюцию микрорельефа при фазовом превращении; *8* – включение, тормозящее рост кристаллов новой фазы

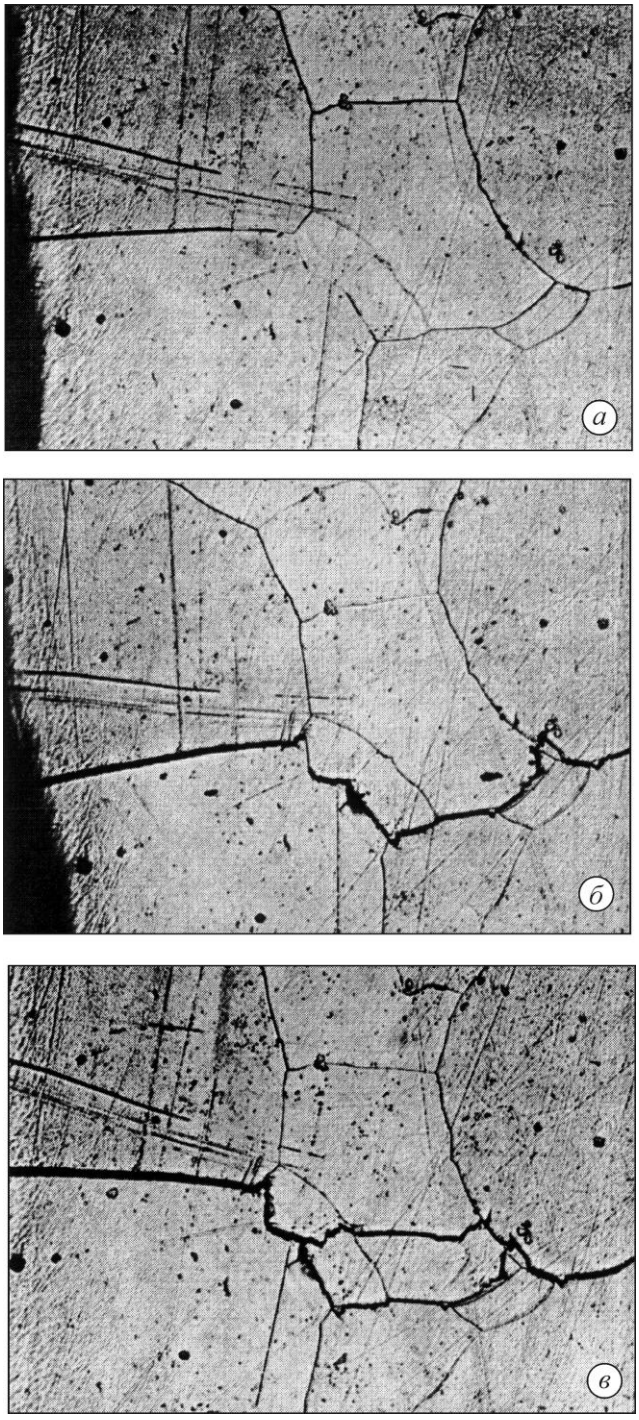


Рис. 6.8. Кинетика зарождения и развития усталостной трещины в сплаве Al – 2,2 % Cu – 1,6 % Mg:
а – после 10^2 циклов; *б* – после $9 \cdot 10^2$ циклов; *в* – после $2{,}4 \cdot 10^3$ циклов. ×500

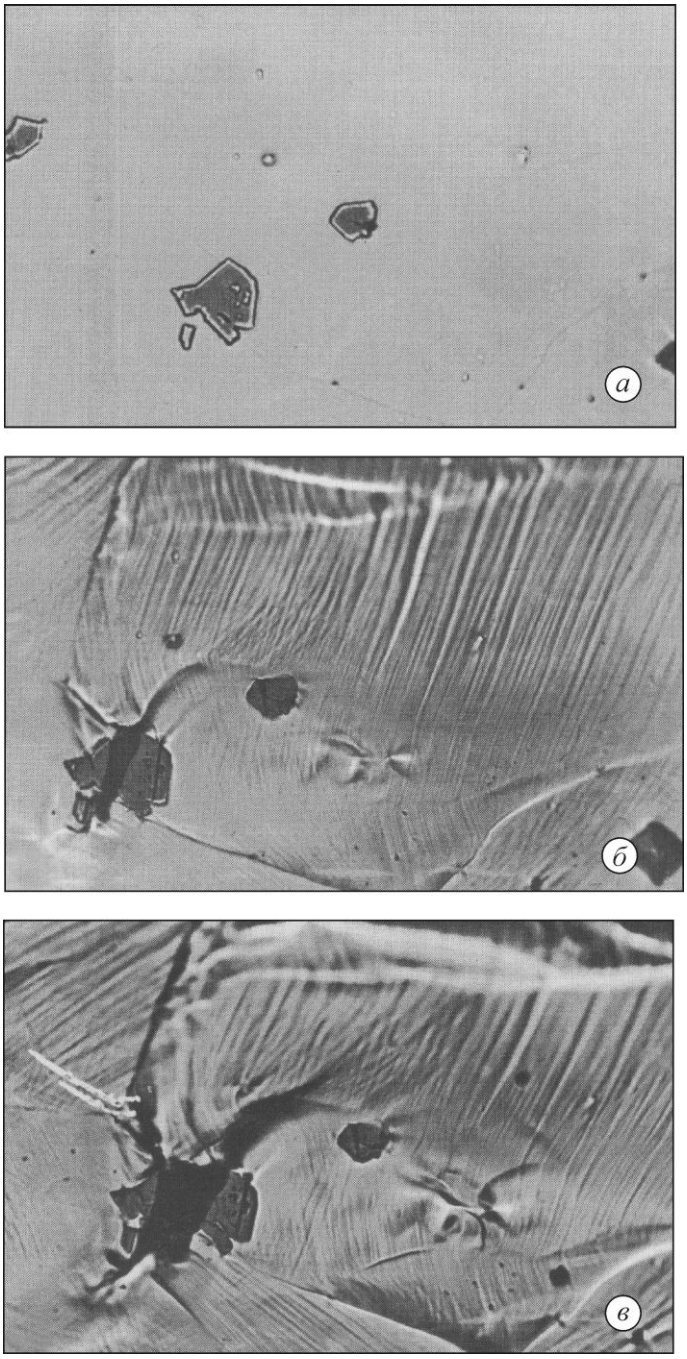


Рис. 6.9. Кинетика разрушения интерметаллидов при растяжении литого сплава Al – 9,5 % Mg – 0,12 % Ti:
а – исходная структура; *б* – $\varepsilon_{ср} = 5$ %; *в* – $\varepsilon_{ср} = 10$ %

Оптические методы микроскопии не позволяют исследовать строение полос скольжения и выявлять в них зародышевые микротрещины, возникающие на самых ранних стадиях пластической деформации. Для этого необходимо использовать электронно-микроскопические методы (ПЭМ и РЭМ). В последнее время созданы установки, совмещающие методические возможности РЭМ и температурной микроскопии.

При изучении деформационных микрорельефов нередко возникает необходимость исследовать химический и фазовый составы определенных участков

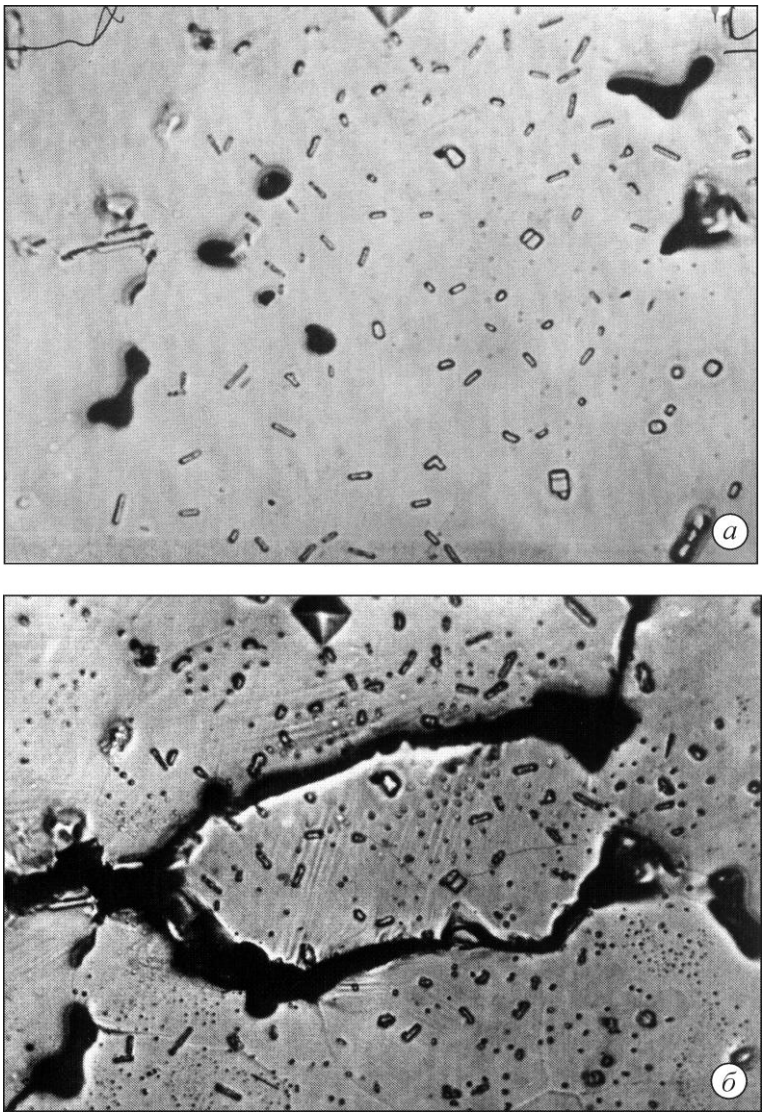


Рис. 6.10. Кинетика превращения пор и рыхлот в трещины при растяжении:
а – исходная структура; *б* – $\varepsilon_{ср} = 1$ %. ×500

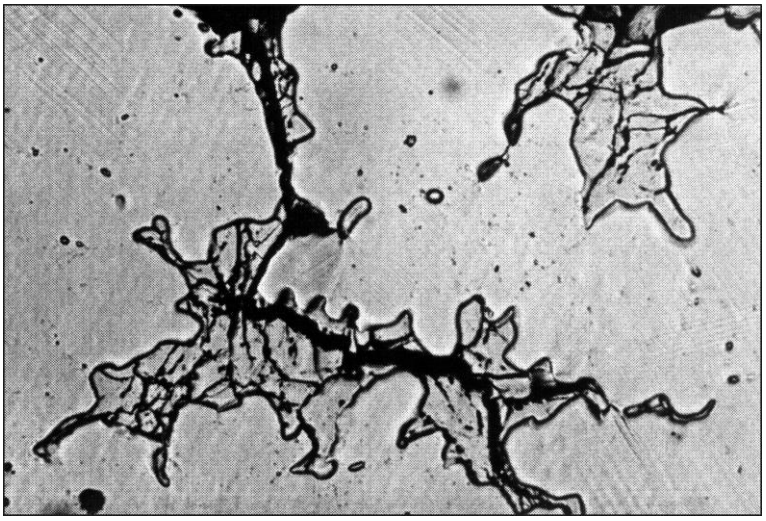


Рис. 6.11. Зарождение микротрещин по выделениям избыточных, нерастворившихся в твердом растворе фаз при деформировании растяжением литого сплава Al – 9,5 % Mg, $\varepsilon_{ср}$ = 1 %. ×500

образца, в том числе строение и химический состав включений, влияющих на процесс разрушения. Для этих целей применяют физические методы анализа микроколичеств вещества, отличающиеся высокой локальностью, позволяющие получать информацию о составе тончайших поверхностных слоев, а также микрообъемов на поверхности образцов.

К таким методам относятся рентгеноспектральный микроанализ (РСМА); Оже-электронная спектроскопия (ОЭС); масс-спектрометрия вторичных ионов (МСВИ); электронная спектроскопия для химического анализа (ЭСХА); лазерный спектральный микроанализ (ЛСМА). Характеристики перечисленных методов микроанализа, их методические возможность и чувствительность приведены в гл. 5.

Итак, используя метод температурной микроскопии, можно выявить скрытые ресурсы прочности и пластичности материала путем выбора рациональных технологий производства изделий. Применение этого метода позволяет расширить возможности традиционных металлографических и фрактографических методов исследований и дополнительно определять:

микроочаги зарождения разрушения;

уровень напряжений в условиях заданных температур, при которых происходит зарождение трещин;

кинетику распространения трещин и их взаимодействие с элементами структуры, ускоряющими или тормозящими развитие трещин.

Примеры, иллюстрирующие возможности метода температурной микроскопии при исследовании поведения металлов в условиях температурно-силового воздействия, показаны на рис. 6.7–6.12.

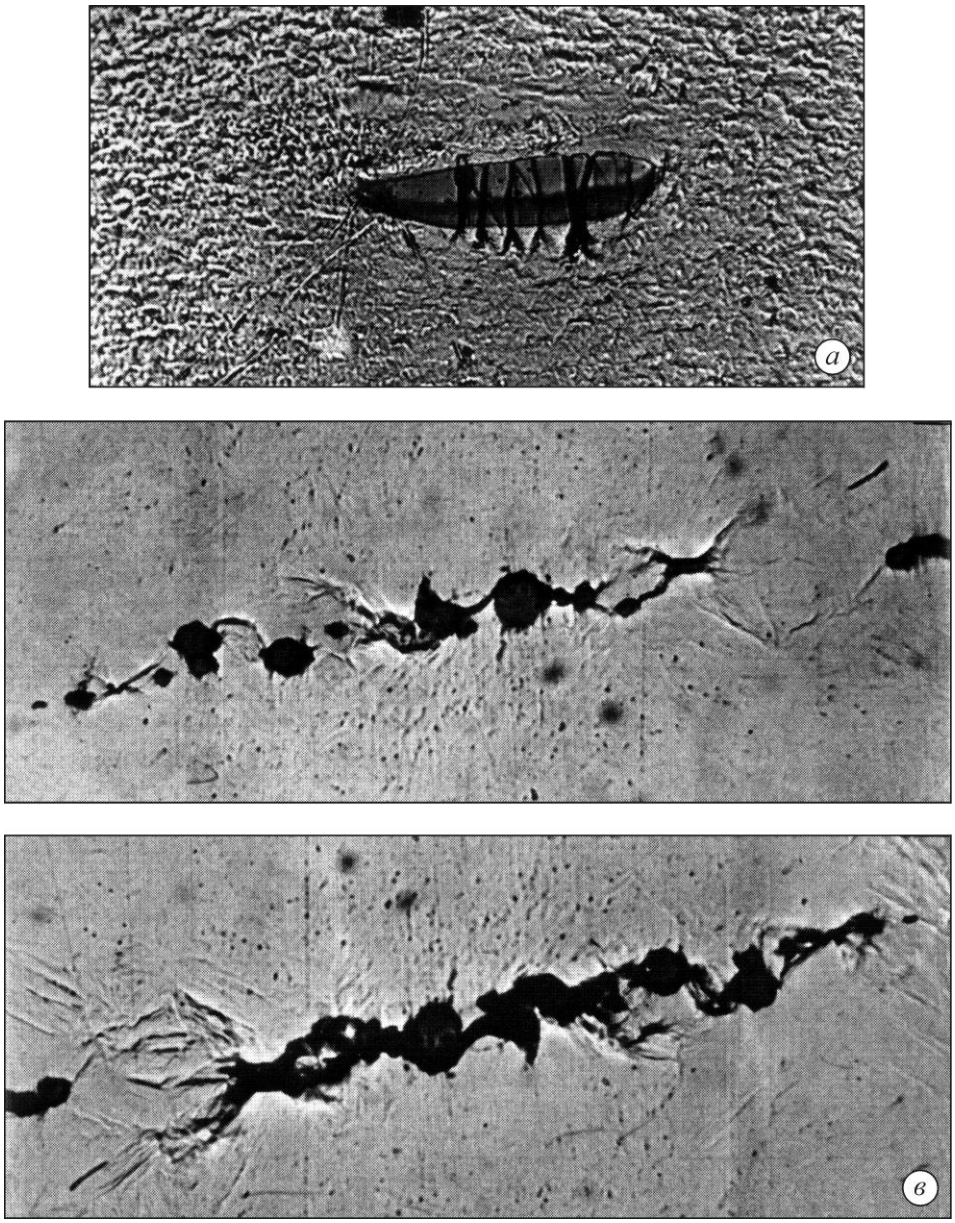


Рис. 6.12. Инициирование микротрещин неметаллическими включениями в стали:
а – сульфидное включение; *б, в* – оксидные включения (кинетика развития трещин на одном и том же участке: *б* – $\varepsilon_{ср} = 2$ %, *в* – $\varepsilon_{ср} = 6$ %). ×500

6.5. ОСОБЕННОСТИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Сварное соединение состоит из трех зон: зоны сварного шва, зоны сплавления и зоны термического влияния. С помощью метода температурной микроскопии на одном образце можно одновременно исследовать поведение металла во всех трех зонах при термосиловом воздействии и выявить слабое звено, ответственное за разрушение. Этот метод позволяет осуществить быстрый нагрев и охлаждение образцов, поэтому можно имитировать термосиловое воздействие на металл в реальном процессе сварки. В методике исследования поведения сварных соединений методом температурной микроскопии выделяют два направления: исследование образцов, вырезанных из сварных соединений, и исследование образцов, подвергнутых термическому воздействию, имитирующему зону термического влияния.

Для создания структуры, имитирующей сварной шов конкретного изделия, необходимо выбрать параметры моделирования термических или термодеформационных циклов сварки, затем разработать программу моделирования этих циклов с фиксацией прочностных и пластических характеристик, а также структурных изменений во взаимосвязи с заданными параметрами термосилового воздействия.

Методики моделирования термодеформационных циклов сварки на установках температурной микроскопии

В установках температурной микроскопии есть нагревательное и нагружающее устройства, что позволяет моделировать различные реальные схемы технологических процессов. Практически все технологические процессы можно представить как ряд последовательных нагревов и охлаждений и параллельно – температурно-силовых воздействий. С помощью высокотемпературного микроскопа можно одновременно осуществлять непосредственное наблюдение за структурными изменениями, происходящими при моделировании, и фиксировать количественные параметры термодеформационного воздействия на изменение структуры и зарождение разрушения.

Особенности теплового режима сварки, а именно: высокая температура нагрева и высокие скорости нагрева и охлаждения определяют своеобразие перечисленных процессов в сварных соединениях.

В связи с широким использованием высокопрочных сталей с мартенситной и бейнитной структурами в сварных конструкциях возникла проблема повышения работоспособности этих сталей в сварных соединениях. Прогнозирование стойкости сварных соединений из высокопрочных сталей к образованию трещин на основе даже максимально полной металловедческой информации практически невозможно, так как структурные превращения в околошовной зоне в условиях термических циклов сварки существенно отличаются от аналогичных превращений при обычной термообработке.

В данной главе в качестве примера полезности применения метода температурной микроскопии рассматриваются процессы, происходящие при сварке высокопрочных сталей, поскольку в них происходят наиболее сложные структурные изменения при термосиловом воздействии по сравнению с другими металлами, исследование которых осуществляется аналогичными методами.

При сварке высокопрочных сталей с мартенситной и бейнитной структурами в процессе нагрева и охлаждения происходят следующие процессы:

образование аустенита, формирование его зеренной структуры, изменение состояния границ и внутризеренной однородности по углероду и легирующим элементам;

превращение аустенита при последующем охлаждении;

формирование химической и структурной неоднородности в зоне сплавления.

Выбор параметров термических циклов сварки

Выше было показано, что процессы, происходящие в околошовной зоне, зависят от скорости нагрева, максимальной температуры нагрева и скорости охлаждения. Для большинства способов сварки характерна почти линейная зависимость температуры нагрева от времени на восходящем участке кривой, поэтому данный процесс можно охарактеризовать одной величиной – скоростью нагрева, которая колеблется главным образом в пределах от 50 до 400 °С.

Максимальная температура цикла – важная величина, которая определяет структурные изменения в стали. Максимальная температура нагрева имеет место в расплавленном металле шва. В зоне термического влияния она понижается, начиная от линии сплавления. Однако в опытах по моделированию термических циклов сварки принята более низкая максимальная температура – 1300–1400 °С. Если использовать истинные температуры нагрева, зерно аустенита в образцах-имитаторах будет значительно крупнее, чем в реальной околошовной зоне при тех же параметрах термического цикла. Это явление связано с большими градиентами температур в реальной околошовной зоне и ограничением физического пространства для роста зерен, поэтому при моделировании термических циклов околошовной зоны для стали рекомендуют использовать максимальную температуру цикла 1300–1400 °С.

Температурная кривая охлаждения имеет вид экспоненты. Моделировать такую зависимость трудно, поэтому стремятся выбрать один характерный интервал температур. У большинства конструкционных свариваемых сталей фазовые превращения происходят в интервале 800–500 °С, что предопределяет выбор данного интервала.

У высоколегированных сталей фазовые превращения происходят при пониженной температуре – в интервале 500–300 °С, поэтому в этом случае правомерно исследовать интервал охлаждения 800–150 °С в качестве критерия, который полностью характеризует процесс их охлаждения.

Учитывая разнообразие структурных превращений в околошовной зоне при охлаждении, можно предположить, что подход, в соответствии с которым выбирают один критерий для характеристики превращений, происходящих при охлаждении, упрощен, и из поля зрения исследователей исчезают многие важные процессы, например такие, как перераспределение углерода.

На основе анализа возможных структурных измерений в околошовной зоне при охлаждении автором предложено несколько температурных интервалов для контроля структурных превращений в этой зоне бейнитных и мартенситных сталей при многопроходной сварке аустенитными материалами:

в интервале T_{max} – 800 °С – возможны подрастания аустенитного зерна и гомогенизация;

в интервале 800–500 °С – при многопроходной сварке возможен процесс перераспределения углерода;

интервал бейнитного превращения 500–300 °С;

интервал мартенситного превращения 300–100 °С.

Выбор параметров деформационных циклов сварки

Деформационный цикл сварки возникает вследствие термического воздействия. Под влиянием теплового расширения в зоне сварного соединения появляются переменные напряжения, величина и характер которых зависят от жесткости закрепления свариваемого узла. При сварке плавлением упругопластические деформации возникают на начальных этапах охлаждения и по мере охлаждения непрерывно меняются как по величине, так и по знаку. Развитие упругопластических деформаций заканчивается формированием поля остаточных напряжений после полного охлаждения сварного соединения. Тот факт, что в ряде методик моделирования условий сварки не предусмотрено приложение растягивающих напряжений, можно объяснить отсутствием информации о закономерностях нагружения зоны сплавления в реальных сварных соединениях. В методиках, где это предусмотрено, условия нагружения предполагают или поэтапное приложение нагрузки, или непосредственное нагружение от точки аустенитного превращения A_{c3} до комнатной температуры.

Целесообразно наложение термического цикла сварки на жестко закрепленный образец с возможностью мгновенного снятия жесткого закрепления и активного растяжения образца в любой заданный момент термического цикла.

Методика автоматического моделирования термодеформационных циклов сварки на установках температурной микроскопии в условиях растягивающих напряжений

Большую полезную информацию дает метод моделирования процессов сварки с помощью указанной выше установки. Моделирование проводят с использованием модернизированной установки типа ИМАШ-20, оснащенной блоком автоматического управления параметрами термодеформационных циклов и системой дозированного спрейерного охлаждения образца защитным газом. При автоматическом моделировании можно воспроизводить термодеформационное воздействие сварки на металл образца-имитатора с одновременным наблюдением, фото- и киносъемкой микроструктурных изменений в металле. Анализ термического и деформационного воздействий на структуру и свойства металла образца-имитатора основан на интерпретации зависимостей $T = f(\tau)$ и $\sigma = f(\tau)$.

Образцы-имитаторы типа II (см. рис. 6.11), на одной стороне которых изготавливали микрошлиф, подвергают термодеформационному воздействию и затем детально исследуют.

Моделирование термодеформационных циклов сварки проводят по следующим параметрам:

для нагрева образцов-имитаторов

максимальная температура нагрева $T_{\max} = 1400$ °С;

скорость нагрева $W_{\text{н}} = 50\ldots150$ °С;

среда нагрева – защитный газ (аргон);

для охлаждения образцов-имитаторов

скорость охлаждения в интервале температур 800 °С $\le T \le$ 1400 °С

$$W_{\text{охл}}^{1400/800} = 50...100\ \text{°С/с};$$

скорость охлаждения в интервале температур 500 °С $\le T \le$ 800 °С

$$W_{\text{охл}}^{800/500} = 3...30\ \text{°С/с};$$

скорость охлаждения в интервале температур 300 °С ≤ T ≤ 500 °С

$$W_{\text{охл}}^{500/300} = 1...15\ \text{°С/с};$$

скорость охлаждения в интервале температур 100 °С ≤ T ≤ 100 °С

$$W_{\text{охл}}^{300/100} = 0,5...2\ \text{°С/с};$$

охлаждающая среда – защитный газ.

Необходимую скорость охлаждения получают, варьируя условия охлаждения. Например:

Скорость охлаждения (°С/с) в интервале 450 °С ≤ T ≤ 550 °С	Условия охлаждения
7	Без дополнительного охлаждения
20	Охлаждение жидким азотом через хладопровод
50	Охлаждение жидким азотом с принудительным напором

Деформирование образцов-имитаторов осуществляют по следующим режимам:

интервал температур деформирования 400 °С ≤ T ≤ 1200 °С;

скорость деформирования $v_{\text{деф}}$ = 0,02…0,05 мм/с;

максимальное напряжение разрушения σ_{max} при приложении постоянной нагрузки 100–300 МПа.

Для определения фактических параметров моделируемых термодеформационных циклов сварки проводят обработку записей измерения температуры образца в процессе термодеформационного цикла (рис. 6.13).

Определяют длительность нагрева ($\tau_{\text{н}}$) и охлаждения ($\tau_{\text{охл}}$) образца по формулам

$$\tau_{\text{н}} = \Delta l_{\text{н}}/v_{\text{д}};\ \tau_{\text{охл}} = \Delta l_{\text{охл}}/v_{\text{д}},$$

где $\Delta l_{\text{н}}$ – отрезок между точками 0 и A, мм; Δl – отрезок между точками B_1 и C_1, мм; $v_{\text{д}}$ – скорость движения диаграммной ленты, мм/с.

Скорости нагрева и охлаждения находят по формулам

$$W_{\text{н}} = \Delta T_{\text{н}}/\tau_{\text{н}},\ W_{\text{охл}} = \Delta T_{\text{охл}}/\tau_{\text{охл}}$$

(в настоящее время такую обработку записей целесообразно проводить с помощью компьютерных программ), где $\Delta T_{\text{н}}$ – разность температур между конечной и начальной температурами нагрева, °С; $\tau_{\text{н}}$ – длительность нагрева, с; $\tau_{\text{охл}}$ – длительность охлаждения, с.

Обработку диаграммы нагрузок и деформаций проводят в такой (рис. 6.14) последовательности: для определения скорости деформирования $v_{\text{деф}}$ из точки A, соответствующей $P = P_{\max}$, опускают перпендикуляр AB на ось абсолютных деформаций, измеряют расстояние l_{τ_n} между точками 0 и B и находят значение абсолютной деформации Δl_{τ_n} в момент деформирования по формуле

$$\Delta l_{\tau_n} = Ml/l_{\tau_n},$$

где Ml – масштаб оси абсолютных деформаций, мм/мм; l_{τ_n} – расстояние между точками 0 и B, мм.

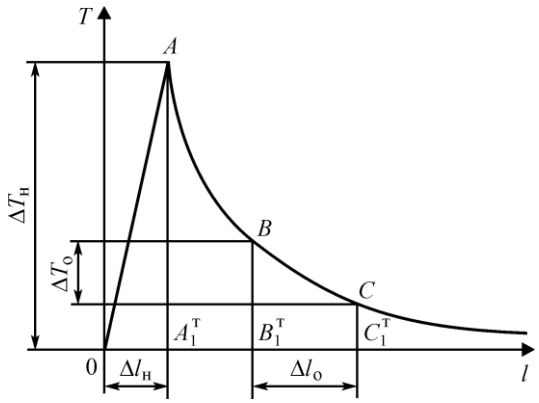


Рис. 6.13. Пример записи изменения температуры образца в процессе испытания

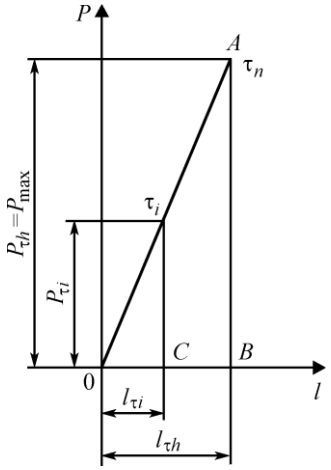


Рис. 6.14. Диаграмма нагрузок и деформаций

Затем определяют скорость деформирования

$$v_{\text{деф}} = \Delta l_{\tau_n} / \tau_n,$$

где τ_n – длительность деформирования, с.

Находят значение осевой растягивающей нагрузки в момент τ_i по формуле

$$P_i = M_{\text{р}} / P_{\tau_i},$$

где $M_{\text{р}}$ – масштаб оси нагрузок; $0P_{\tau_i}$ – отрезок по оси нагрузок между точками 0 и P_{τ_i}, мм.

Определяют напряжение σ_{τ_i} в момент τ_i по формуле

$$\sigma_{\tau_i} = P_{\tau_i} / F_0,$$

где P_{τ_i} – осевая растягивающая нагрузка в момент деформирования τ_i; F_0 – начальная площадь образца, мм^2.

Далее строят совмещенные графики $\sigma = f(\tau)$ и $T = f(\tau)$ с общей осью τ.

Ниже рассмотрены примеры успешного использования метода температурной микроскопии для исследования сварных соединений.

6.6. ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА ТЕМПЕРАТУРНОЙ МИКРОСКОПИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ И РАЗРУШЕНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

6.6.1. ФОРМИРОВАНИЕ ЗЕРЕННОЙ СТРУКТУРЫ И ВНУТРИЗЕРЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ПРИ ОБРАЗОВАНИИ АУСТЕНИТА В ОКОЛОШОВНОЙ ЗОНЕ ПРИ НАГРЕВЕ

Кинетика образования аустенита при непрерывном нагреве (рис. 6.15) отличается от кинетики изотермического процесса и имеет ряд особенностей, одна из которых заключается в следующем: средняя стадия превращения, протекающая с максимальной скоростью, происходит при постоянной температуре. Кинетика превращения такова, что начальная стадия растягивается на ~50 °С и при этом образуется лишь 20 % аустенита, тогда как заключительная стадия процесса охватывает ~30 °С и при этом образуется 40 % аустенита. Около 40 % аустенита образуется при постоянной температуре. С увеличением скорости нагрева на начальной и завершающей стадиях превращение происходит все в больших объемах, а в средней части, протекающей изотермически, объем превращения сокращается и сдвигается к более высоким температурам.

При изучении превращений в зоне термического влияния при сварке сталей также необходимо учитывать особенности сварочного нагрева: высокую скорость нагрева, высокую температуру на границе сплавления основного металла со швом, резкое изменение температур от A_{c1} до температуры плавления в зоне перекристаллизации.

Особенности сварочного нагрева определяют процесс формирования зерна аустенита в околошовной зоне.

Скорость нагрева оказывает влияние не только на кинетику $\alpha \rightarrow \gamma$-превращения, но и на последующие процессы при выдержке металла вблизи температуры плавления, соответствующей гомогенизации, и на рост зерен. В совокупности эти три процесса определяют состояние зерен аустенита в зоне перекристаллизации, от которого зависит ход превращения аустенита при дальнейшем охлаждении. Непосредственными наблюдениями установлено, что наиболее интенсивный рост зерна аустенита в околошовной зоне происходит в период нагрева при температурах, близких к максимальной температуре сварочного цикла. Однако из-за короткого времени пребывания при высоких температурах зерно аустенита при нагреве не достигает предельных размеров (соответствующих данной температуре), поэтому рост зерна продолжается и в период охлаждения, но менее интенсивно. Степень подрастания зерна аустенита на отдельных этапах термического цикла различна для разных режимов сварки.

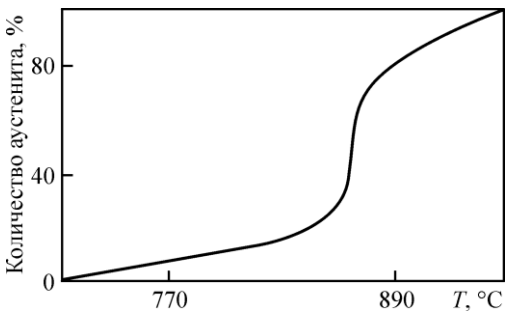


Рис. 6.15. Кинетическая кривая α–γ-превращения при непрерывном нагреве со скоростью 160 °С/с

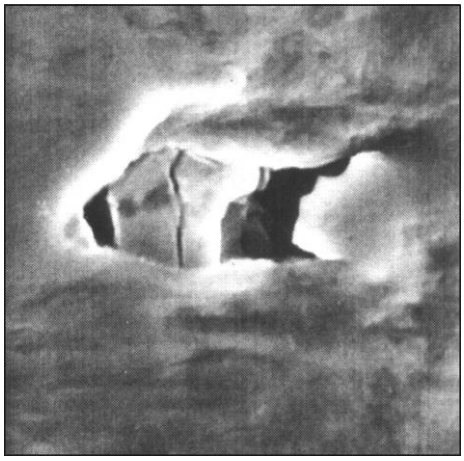


Рис. 6.16. Разрушившееся неметаллическое включение в околошовной зоне образца из стали 30ХГН. ×100

Высокая температура нагрева металла околошовной зоны вплоть до $T_{пл}$ приводит к оплавлению границ аустенитных зерен, вследствие этого на границах зерен появляется химическая неоднородность. На границах могут образовываться сульфиды, карбиды, фосфиды, оксиды (рис. 6.16). Эти вновь образовавшиеся включения, как показали исследования автора, и являются одной из главных причин зарождения горячих надрывов в околошовной зоне, от которых могут начинаться холодные трещины (рис. 6.17).

При электрошлаковой сварке образование надрывов в околошовной зоне связано с наличием в основном металле легкоплавких неметаллических включений, которые располагаются в виде строчек вдоль направления проката. Легкоплавкие включения силицидов, сульфидов и оксисульфидов вблизи от линии сплавления растворяются в аустените, чему способствуют перегрев и пластическая деформация металла, вызванная сварочными напряжениями.

Визуально установлено, что время пребывания металла околошовной зоны при высоких температурах невелико, поэтому крупные (5–15 мкм) сульфидные и оксисульфидные частицы не успевают раствориться в аустените. Пластичные силикаты и сульфиды, залегающие в виде тонких нитей (толщиной 1–3 мкм) вдоль направления проката, почти полностью растворяются. При охлаждении растворенные сульфиды, силикаты и оксиды выделяются из металла и на границах аустенитных зерен образуют гряду сульфидных фаз. В результате свойства

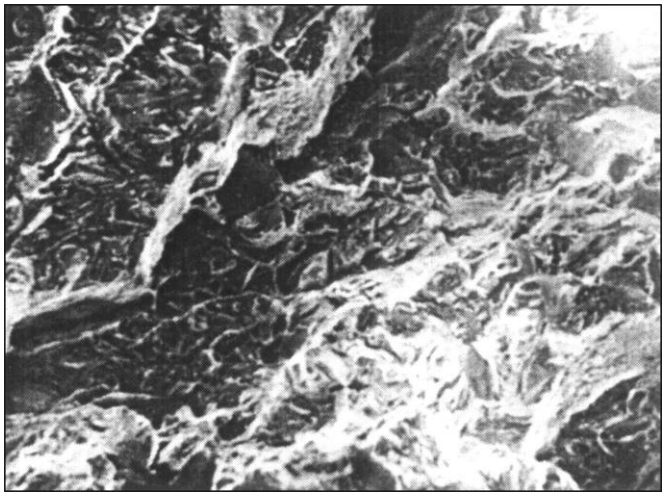


Рис. 6.17. Холодные трещины по границам бывшего зерна аустенита, на которых имеются неметаллические включения (сталь 30ХГН), РЭМ. ×3000

металла околошовной зоны существенно ухудшаются, особенно вязкость разрушения и пластичность: надрывы в околошовной зоне в большинстве случаев проходят по сульфидным включениям.

Степень гомогенизации аустенита определяется длительностью пребывания стали выше точки A_{c3} в цикле нагрева и охлаждения. Процессы диффузии повышают степень гомогенизации аустенита наиболее эффективно в интервале температур от A_{c3} до 1000–1050 °С, т.е. ниже температур начала интенсивного роста зерна. При дальнейшем нагреве рост зерна происходит настолько интенсивно, что процессы диффузии не успевают поддерживать достигнутую однородность твердого раствора, и степень его гомогенизации понижается. Неоднородность аустенита, особенно по углероду, может существенно сказаться на его превращении при охлаждении.

6.6.2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННЫХ ЦИКЛОВ СВАРКИ

Исследовали изменение микроструктуры в процессе моделирования термических циклов сварки среднеуглеродистой стали 30ХГН, свариваемой аустенитным материалом. На образцах моделировали термические циклы сварки со следующими параметрами:

режим I: T_{max} = 1300 °С; $W_н$ = 160 °С/с; $W_{охл}^{1300/800}$ = 42; $W_{охл}^{800/500}$ = 18; $W_{охл}^{500/300}$ = 2; $W_{охл}^{300/100}$ = 0,5 °С/с;

режим II: T_{max} = 1300 °С; $W_н$ = 160 °С/с; $W_{охл}^{1300/800}$ = 58; $W_{охл}^{800/500}$ = 31; $W_{охл}^{500/300}$ = 10; $W_{охл}^{300/100}$ = 1,6 °С/с.

Различие скоростей охлаждения сказалось на формировании микроструктур. В образцах-имитаторах, обработанных по режиму I при температуре ~500 °С, наблюдали распад аустенита с образованием бейнитной структуры. Об этом свидетельствовало появление на полированной поверхности образцов игольчатого микрорельефа, иглы которого с понижением температуры росли как в длину, так и в ширину. По достижении 280 °С на всей поверхности образца наблюдали игольчатый рельеф, причем иглы на участках, свободных от бейнитных игл, образовывались практически мгновенно. Это свидетельствует о мартенситном превращении.

Увеличение скорости охлаждения в интервале температур бейнитного превращения (режим II) приводило к тому, что распад аустенита начинался при ~320 °С и происходил с образованием мартенсита. Об этом свидетельствует появление игольчатого микрорельефа с мгновенным образованием игл конечной длины. Подрастания игл на поверхности образца не замечено. При разных скоростях охлаждения в интервале 1300–800°С образовывались различные по размеру зерна аустенита. Данный факт свидетельствует о значительном росте зерна аустенита при охлаждении, который, вероятно, может превышать рост зерна при нагреве. Это можно объяснить меньшей приблизительно в 4 раза скоростью охлаждения от максимальной температуры по сравнению со скоростью нагрева и, следовательно, более длительным пребыванием металла в области температур интенсивного роста зерна при охлаждении, чем при нагреве.

При одинаковой скорости охлаждения в интервале температур 1300–800 °С зерно аустенита оказывается крупнее там, где скорость нагрева была меньше.

Приведенные выше результаты экспериментов по моделированию термических циклов сварки показывают методические возможности структурных исследований при имитации термодеформационного воздействия при термических циклах сварки. В таких исследованиях можно:

наблюдать и фиксировать бейнитное и мартенситное превращения, их возникновение и кинетику развития в структуре аустенита;

выявлять зеренную структуру аустенита при максимальной температуре, имитирующей максимальную температуру термического цикла сварки.

6.6.3. ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ИЗ СТАЛИ 30ХНМ

При сварке сталей с мартенситной и бейнитной структурами аустенитными материалами в переходной зоне формируется структурная неоднородность, в частности игольчатая прослойка, металлографическое исследование которой представляет большие трудности.

Исследования формирования структурной неоднородности в реальных сварных соединениях стали 30ХНМ, выполненные при моделировании термического цикла сварки (T_{max} = 1200 °С, $W_н$ = 150; $W_{охл}^{800/500}$ = 21,5; $W_{охл}^{500/300}$ = 9; $W_{охл}^{300/100}$ = 2 °С/с) и на установках ИМАШ-20, показали следующее.

При охлаждении превращение мартенситного типа начинается сначала у линии сплавления со стороны основного металла при температуре 400°С и заканчивается при 220 °С. Аналогичное превращение протекает в зоне термического влияния при 320 °С. Мартенситная прослойка в шве формируется при более низких температурах (температуры начала $M_н$ и конца $M_к$ мартенситного превращения составляют соответственно 200 и 100 °С). Доказательством того, что превращение в разных участках переходной зоны носит мартенситный характер, служит то, что в процессе охлаждения во всех участках обнаружены иглы конечных размеров, подрастания которых не происходило.

В металлографических исследованиях мартенситных прослоек с целью их идентификации был применен реактив для цветного травления состава: 100 мл раствора 10%-ной соляной кислоты +1 г метабисульфита калия. Реактив окрашивает мартенситную прослойку в основном металле в зеленый цвет, в шве − в оранжевый цвет; с его помощью можно также выявить неоднородность химического состава аустенита шва вблизи линии сплавления (голубого и коричневого цвета). Прослойка оранжевого цвета располагается в голубых островках аустенита в шве.

Результаты дополнительного микрорентгеноспектрального анализа образцов показали, что мартенситная прослойка в основном металле зеленого цвета содержит 6,2 % Ni, 12,4 % Cr; мартенситная прослойка в шве оранжевого цвета содержит 7,1 % Ni, 16,0 % Cr.

Таким образом, исследование, выполненное с помощью метода температурной микроскопии, показало наличие в переходной зоне сварных соединений из стали 30ХНМ мартенситных прослоек двух типов, различающихся химическим составом, а следовательно, и свойствами.

6.6.4. ВОЗНИКНОВЕНИЕ ТРЕЩИН В СВАРНЫХ РАЗНОТОЛЩИННЫХ СТАЛЬНЫХ ОТЛИВКАХ

При исследовании причин возникновения трещин в сварных разнотолщинных стальных отливках использован метод имитации изменения структуры в зоне

сварного шва.

При сварке отливок из стали 30ХГН, имеющих перепады толщин от 100–200 до 400 мм, в зоне термического влияния (ЗТВ) толстостенных участков появляются трещины. В тонкостенных участках подобных трещин не обнаружено.

Выявленные трещины расположены перпендикулярно поверхности раздела сварного шва и основного металла и локализуются в ЗТВ, не распространяясь ни в шов, ни в основной металл (рис. 6.18).

Протяженность трещин 3–5 мм, их поверхность окислена, распространяются они в основном транскристаллитно.

В предварительных исследованиях установлено, что изменение микроструктуры и размеров зерен в металле ЗТВ в обоих сечениях аналогично. В металле преобладает игольчатая структура мартенситного типа, постепенно переходящая в структуру сорбита отпуска, характерную для отливки. Металл ЗТВ

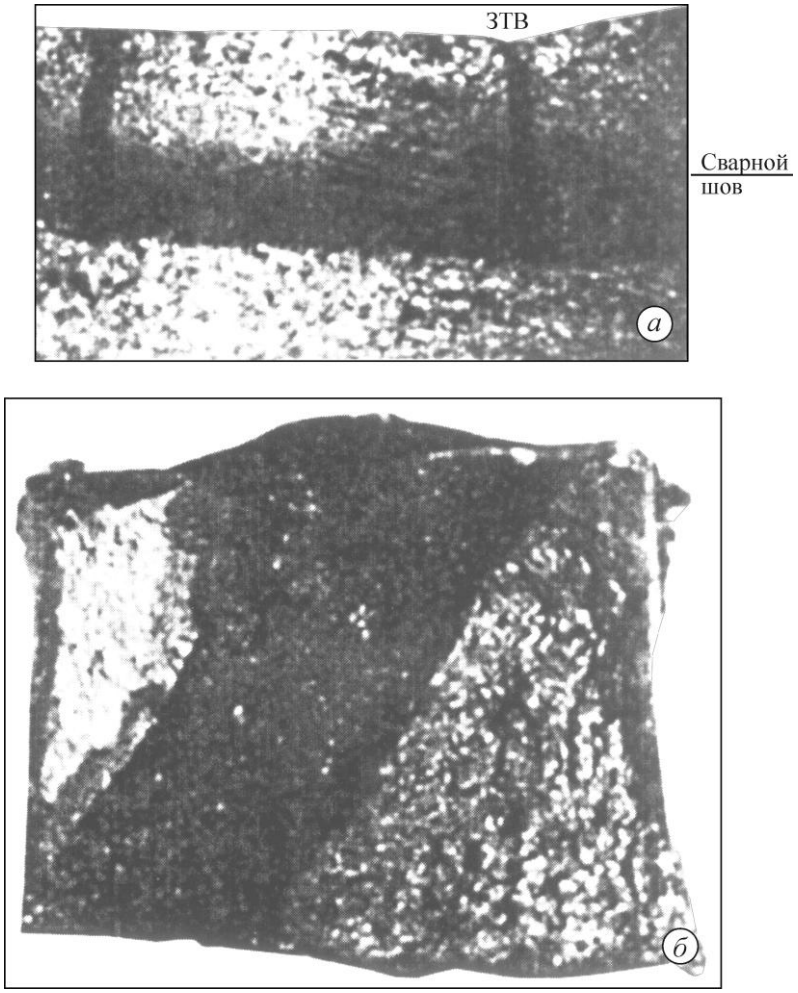


Рис. 6.18. Трещины в металле в зоне термического влияния (сталь 30ХГН):
а – общий вид; *б* – раскрытая трещина. ×7

характеризуется высокой твердостью – наибольшей в середине массивных частей (4500 МПа) при твердости основного металла 2500 МПа и пониженной пластичностью.

На склонность металла ЗТВ к трещинообразованию может оказывать влияние качество самого металла, его загрязненность неметаллическими включениями и уровень механических свойств. Проведены соответствующие сравнительные исследования.

Металлографический анализ показал, что как в тонких, так и в толстых сечениях отливок металл плотный, макроликваций серы и фосфора не обнаружено. Металлографическими и микрорентгеноспектральными исследованиями установлено, что по химическому составу неметаллические включения толстой и тонкой частей отливок не отличаются.

Основными типами включений являются сульфиды марганца, оксисульфиды (сульфиды с вкраплениями алюминатов), алюминаты, алюмосиликаты и сложные оксиды.

Сравнительный количественный анализ загрязненности металла неметаллическими включениями, проведенный по 300 полям зрения (×400), показал, что в более массивных частях отливок количество неметаллических включений значительно больше, чем в менее массивных. Различие достигало 50 % (0,1016 и 0,1483 % соответственно). По-видимому, это обусловлено разными условиями процесса заполнения литейной формы при кристаллизации массивных и тонких частей отливок. Включения в массивных частях крупнее, чем в тонких, а в наружных зонах в 2 раза выше содержание мелких (до 2,5 мкм) включений.

Прочностные и пластические свойства, а также работу разрушения металла разных частей отливок исследовали на плоскоразрывных образцах (с помощью установок ИМАШ-20) при скорости испытания 10 мм/мин. Для выяснения влияния длительного действия растягивающих напряжений на свойства металла проводили дополнительные исследования при замедленных скоростях растяжения, равных 0,1 и 0,005 мм/мин (т.е. в 10 и 200 раз меньше скорости растяжения при стандартных испытаниях механических свойств).

Прочностные и пластические свойства металла в центре массивной части (в зоне сварки) ниже, чем в остальных частях (рис. 6.19): напряжение разрушения на 8–10 %, относительное удлинение и работа разрушения в 1,5–2 раза.

С замедлением скорости приложения растягивающих напряжений во всех случаях наблюдали тенденцию к снижению прочностных и пластических характеристик и работы разрушения. С уменьшением скорости растяжения в 200 раз работа разрушения металла в середине массивной части уменьшалась в 1,5–2,5 раза по сравнению с работой разрушения в других зонах. Причем это дополнительное снижение работы разрушения происходило в основном за счет работы развития трещин.

Таким образом, возникновению трещин в металле ЗТВ толстостенных участков при сварке могут способствовать следующие факторы: повышенное содержание неметаллических включений более крупного размера; пониженные прочностные и пластические свойства (особенно при длительном действии растягивающих напряжений); повышенная твердость металла ЗТВ.

Однако остался невыясненным вопрос, почему зарождение трещин в ЗТВ происходит в структурной составляющей мартенситного типа? Последняя, хотя и обладает пониженной пластичностью, но имеет наиболее высокий предел текучести по сравнению с другими структурными составляющими. Известно, что разрушение – результат пластической деформации, начинающейся только при превышении предела текучести. Значит, существуют какие-то факторы, способст-

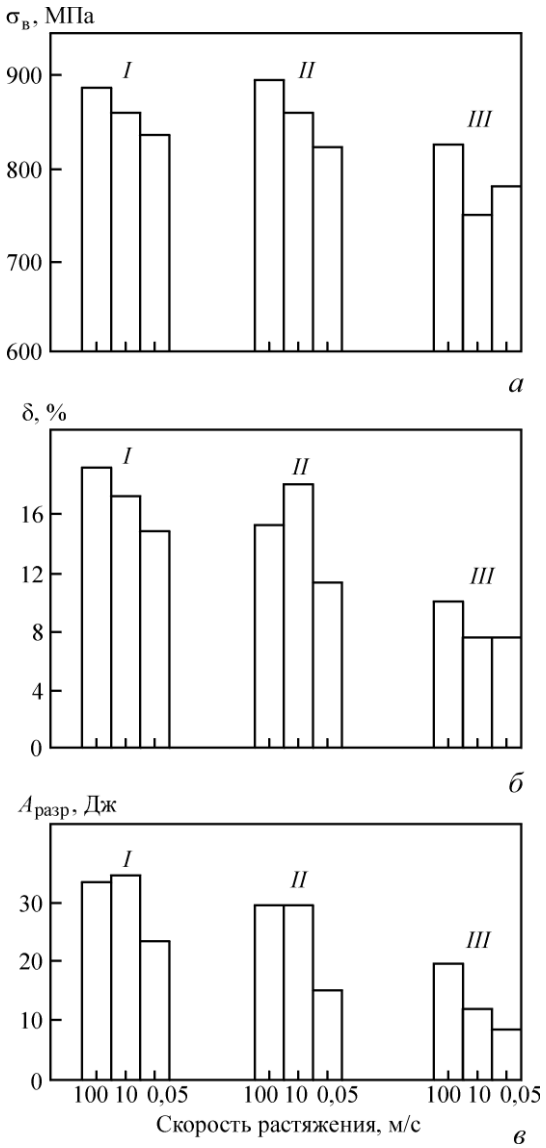


Рис. 6.19. Диаграммы, иллюстрирующие прочностные (*а*), пластические (*б*) свойства и работу разрушения (*в*) образцов из стали 30ХГН при разных скоростях растяжения:
I – тонкое сечение; *II* – массивное сечение, край; *III* – массивное сечение, центр

вующие разрушению мартенситной составляющей. Чтобы это выяснить, были проведены исследования по следующей методике: в середине плоскоразрывного образца, вырезанного из исследуемого металла (рис. 6.20), поперек сечения неплавящимся электродом быстро нагревали металл до 1100 °С и охлаждали с различными скоростями, имитируя разные режимы сварки. Таким образом, на образце формировалась полная картина структур металла ЗТВ с мартенситом в центре образца. Затем проводили металлографический анализ образца, в котором определяли микроструктуру и измеряли микротвердость вдоль направления растяжения через каждые 50 мкм.

Такая методика дала возможность установить, по каким структурным составляющим и при какой величине напряжений происходит зарождение трещин в условиях растягивающих напряжений. Указанная линия микротвердости служила одновременно реперной линией для определения пластической деформации (она равна относительному удлинению) отдельных структурных составляющих в момент разрушения. Испытания проводили на установке ИМАШ-20 при скорости деформирования 0,1 мм/мин в условиях одноосного растяжения.

При режимах термического воздействия №№ 3, 4, 5 (табл. 23) в центре образца была мартенситная структура, которая постепенно переходила в основную сорбитную, при режимах №№ 6, 7 – в центре образца была структура отпущенного мартенсита.

Анализ характера разрушения образцов, подвергшихся термическому воздействию, имитирующему сварку, показал, что все образцы разрушились по основному металлу вне ЗТВ (образцы №№ 3–7).

Сравнение прочностных и пластических свойств металла исследуемых образцов показало, что при термическом нагреве, имитирующем нагрев ЗТВ по режи-

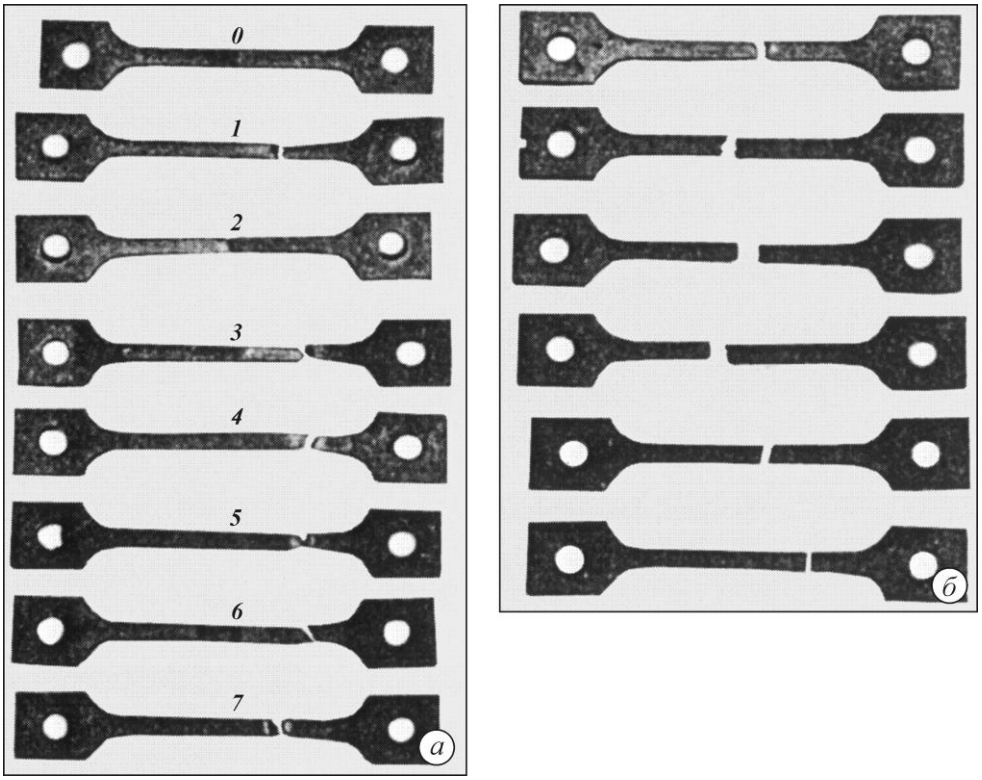


Рис. 6.20. Характер разрушения образцов с различной структурой в ненаводороженном (*а*) и наводороженном (*б*) состояниях:
0 – образец, не подвергнутый термическому воздействию; *1–7* – режимы термического воздействия на образцы, приведенные в табл. 23

мам №№ 3, 4, 5, заметного изменения прочностных свойств не происходит, а относительное удлинение и работа разрушения даже несколько повышаются по сравнению с аналогичными характеристиками исходного металла. Следовательно, только структурные изменения, вызванные термическим нагревом при сварке, не ухудшают свойств металла в ЗТВ и не приводят к образованию в ней трещин.

В табл. 23 приведены также свойства исходных образцов со структурой сорбита и тех же образцов, закаленных на мартенсит. Так как предел текучести сорбита значительно ниже, чем мартенсита (850 и 1700 МПа соответственно), естественно, что в первую очередь при растяжении был достигнут предел текучести, а затем предел прочности в структуре сорбита. Однако в связи с тем, что в реальных условиях разрушение происходит в ЗТВ по участкам мартенситной структуры, осталось неясным, в каком случае разрушение будет происходить по структуре мартенсита.

Чтобы разрушение происходило по мартенситной структуре, должен быть какой-либо фактор, снижающий предел ее текучести до величины, меньшей предела текучести сорбитной структуры. Одним из таких факторов может быть водород, содержание которого в металле ЗТВ повышенное. В связи с этим было изучено влияние наводороживания на изменение прочностных и пластических ха-

Таблица 23. **Результаты испытаний ненаводороженных и наводороженных образцов в режимах имитации термического воздействия при сварке**

Номер режима	Режим имитации	Ненаводороженные образцы				Время пластической деформации при скорости 0,1 мм/мин, мин	Наводороженные образцы			
		$\sigma_т$, МПа	$\sigma_р$, МПа	δ, %	$A_{разр}$, Дж		$\sigma_т$, МПа	δ, %	$A_{разр}$, Дж	τ, мин
1	Исходное состояние, сорбит	821	940	11,2	30,1	48	747	2,0	6,7	18
2	Закалка на мартенсит	1100	1120	2,0	12,4	29,5	376	0,1	2,0	6
3	Термическое воздействие (нагрев до 1100 °С + быстрое охлаждение)	769	890	11,0	25,8	48	264	1,0	0,6	4
4	Термическое воздействие + последующий нагрев до 200 °С, 2 ч, охлаждение с печью	802	932	12,8	31,6	51	455	1,0	1,85	7
5	Нагрев до 200 °С, 30 мин + термическое воздействие с последующим быстрым охлаждением	824	956	12,0	31,1	46	352	0,7	1,3	6
6	Нагрев до 350 °С + термическое воздействие с последующим быстрым охлаждением	749	845	7,8	20,4	34	102	0	0,07	0,5
7	Нагрев до 350 °С, 30 мин, термическое воздействие + последующий нагрев до 400 °С, 30 мин, охлаждение с печью	729	825	7,2	16,7	31	308	0,4	0,08	5

рактеристик, работы разрушения, особенностей разрушения образцов с сорбитной и мартенситной структурами и образцов, предварительно подвергнутых специальной термической обработке по режимам, указанным в табл. 23.

Результаты исследования показали, что наводороживание всех исследованных образцов до 3–4 $см^3$/100 г (в исходных образцах содержалось водорода 0,5 $см^3$/100 г) привело к существенному изменению как прочностных и пластических характеристик, так и характера разрушения исследованных образцов. Разрушение образцов, подвергнутых термическому воздействию, во всех случаях происходило на участке ЗТВ с мартенситной структурой.

Наводороживание образцов с сорбитной структурой (режим № 1) привело к снижению разрушающего напряжения менее чем на 5 %, относительного удлинения и работы разрушения – в 2–2,5 раза, в то время как то же количество водорода в образцах с мартенситной структурой привело к снижению напряжения разрушения в 3 раза (с 1120 до 376 МПа), относительного удлинения практически до 0 и работы разрушения – в 6 раз. При этом напряжение разрушения образцов с мартенситной структурой стало в 2 раза ниже, чем образцов с сорбитной структурой. Этим и объясняется то, что при наводороживании разрушение образцов, предварительно подвергнутых специальной термической обработке, происходило в ЗТВ по структуре мартенсита. Следовательно, повышенное содержание водорода в мартенситной структуре значительно более опасно, чем в сорбитной структуре основного металла.

При наводороживании наблюдается также резкое снижение разрушающего напряжения (в 2–4 раза), относительное удлинение снижается с 7–13 % до 0.

Во всех исследованных случаях при наводороживании установлено хрупкое разрушение. При этом наиболее низкие прочностные и пластические характеристики имели образцы, подвергнутые нагреву, имитирующему режим сварки с быстрым охлаждением, т.е. образцы со структурой мартенсита. Относительно более высокими свойствами обладали образцы, подвергнутые термическому воздействию с быстрым охлаждением до 200 °С и выдержанные при этой температуре в течение 2 ч (режим № 4). В этом случае напряжение разрушения было в 2–5 раз выше, чем при быстром охлаждении без последующего отпуска (режимы – №№ 3, 5, 6).

Таким образом, с помощью метода температурной микроскопии показано, что одним из факторов, способствующих появлению трещин в ЗТВ (по структурным составляющим мартенситного типа), является наличие повышенного содержания диффузионно-подвижного водорода, который резко снижает прочностные и пластические свойства мартенсита.

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ[1]

Аустенит	Твердый раствор углерода и/или легирующих элементов в железе с гранецентрированной кубической решеткой
Бейнит	Метастабильная структура, состоящая из смеси частиц пересыщенного углеродом феррита с дисперсными карбидами, образующаяся из аустенита в температурном интервале между температурой образования перлита и температурой начала образования мартенсита (бейнитная область на С-образной диаграмме)
Волосовина	Дефект в виде нитевидных несплошностей в металле, расположенный вдоль направления деформации
Время пребывания в температурном интервале хрупкости (ТИХ)	Разность между временем достижения нижней и верхней границ ТИХ
Газовая пористость	Дефект в виде несплошностей округлой или неправильной формы, располагающийся в отдельных участках или по всему объему слитка или отливки
Газовая раковина	Дефект в виде полости, имеющий округлую или вытянутую форму со сглаженной поверхностью, расположенный в теле слитка или отливки (закрытая раковина) или выходящий на поверхность (открытая раковина)
Газовые пузыри	Дефект в виде не связанных с поверхностью газовых полостей в литом металле округлой или вытянутой формы, располагающийся в виде отдельных образований, строчек, скоплений отдельных пузырей или пузырей, соединенных между собой каналами во внутренних объемах слитка или отливки
Гетерогенная структура	Неоднородная структура металлов и сплавов

[1]Составлены на основе ГОСТов с учетом объяснений толкового словаря «Металлы. Строение. Обработка» / Под ред. В.Я. Кершенбаума, Б.А. Прусакова. – М.: Изд. центр «Наука и техника», 1999.

Гомогенизация	Процесс выравнивания состава и устранения концентрационных неоднородностей, как правило, осуществляется путем гомогенизационного отжига с нагревом как ниже, так и выше температуры неравновесного солидуса
Двойник	Несовершенство кристаллического строения – объемный дефект кристаллической решетки, характеризующийся зеркально-симметричным расположением в нем атомов по отношению ко всему кристаллу
Диффузия	Процесс перехода вещества из одной части системы в другую вследствие теплового движения частиц, в результате которого устанавливается равновесная концентрация внутри фаз
Длительная прочность	Способность материала, находящегося под действием напряжений, сопротивляться разрушению при данной (повышенной) температуре в течение заданного промежутка времени
Закалка	Термическая обработка, в результате которой в металлах и сплавах образуется неравновесная структура, а охлаждение, как правило, проводится со скоростью, превышающей скорость охлаждения на спокойном воздухе
Закат	Дефект в виде наплыва металла, представляющий собой прикатанный налип или выступ на поверхности проката
Зерно	Кристаллит в поликристаллическом теле, отделенный от других кристаллитов большеугловой границей и обладающий определенной кристаллографической ориентировкой
Зона сплавления при сварке	Зона сварного шва, в которой соединение материалов осуществилось при затвердевании жидкой фазы; как правило, в этой зоне металл нагревается в интервале температур «солидус-ликвидус»
Зона термического влияния при сварке и пайке	Участок основного металла при сварке и пайке, подвергшийся тепловому воздействию, в результате которого изменились структура и свойства материала, но при этом не происходило его плавления (в том числе при резании, наплавке и т.д.)
Излом вязкий (волокнистый)	Излом, образующийся при вязком разрушении, обусловленный пластической деформацией зерен в процессе разрушения. Сопровождается заметной пластической макродеформацией
Излом камневидный	Хрупкий излом с металлическим блеском
Излом нафталинистый	Излом с характерным блеском, напоминающим блеск нафталина
Излом хрупкий (кристаллический)	Поверхность разрушения поликристаллического металла, образующаяся при хрупком разрушении и представляющая собой совокупность блестящих плоских фасеток, возникших в результате разрушения сколом множества отдельных кристаллитов (зерен). Излом не сопровождается заметной (макроскопической) пластической деформацией. Происходит в результате распространения хрупкой трещины

Интерметаллидное (интерметаллическое) включение	Промежуточная фаза, состоящая из двух или более металлов в виде кристаллов игольчатой, пластинчатой или многогранной формы
Коагуляция	Процесс укрупнения, например, выделений, пор и т.д.
Контроль капиллярный неразрушающий	Неразрушающий контроль, основанный на проникновении жидких веществ в капилляры на поверхности объекта контроля с целью их выявления
Контроль магнитный неразрушающий	Неразрушающий контроль, основанный на регистрации магнитных полей рассеяния, возникающих над дефектами, или на определении магнитных свойств объекта контроля
Контроль радиационный неразрушающий	Неразрушающий контроль, основанный на регистрации проходящего через изделие ионизирующего излучения
Контроль радиоволновой неразрушающий	Неразрушающий контроль, основанный на анализе взаимодействия электромагнитного излучения радиоволнового диапазона с объектом контроля
Контроль тепловой неразрушающий	Неразрушающий контроль, основанный на регистрации температурных полей объекта контроля
Контроль электрический неразрушающий	Неразрушающий контроль, основанный на регистрации параметров электрического поля, взаимодействующего с объектом контроля или возникающего в объекте контроля в результате внешнего воздействия
Коррозионная среда	Среда, в которой происходит коррозия металла
Коррозионная стойкость (сопротивление коррозии)	Способность металла сопротивляться коррозионному воздействию среды
Коррозионная хрупкость	Хрупкость металлов, возникающая в результате коррозионного воздействия (как правило, через границы зерен); проявляется в резком снижении пластичности
Коррозионное растрескивание	Растрескивание металла вследствие воздействия коррозионной среды
Коррозионные потери	Количество металла, превращенного в продукты коррозии за определенное время
Коррозия металлов	Разрушение изделий под воздействием окружающей среды; разрушение начинается с поверхности вследствие химического или электрохимического взаимодействия металлических тел с внешней средой
Коррозия под напряжением	Коррозия при одновременном воздействии коррозионной среды и механических напряжений
Коррозия сварных соединений	Коррозия, идущая по шву или рядом с ним
Коррозия эрозионная	Коррозия, происходящая при одновременном эрозионном воздействии
Кристаллит	Кристалл, формирующийся в металле в процессе роста в жидко-твердом состоянии
Критическая температура хрупкости (КТХ)	Температура перехода от вязкого разрушения к хрупкому, зависящая от температуры испытания. Характеризуется определенной величиной ударной вязкости или заданным уровнем вязкой составляющей в изломе

Ледебурит	Структура, состоящая из смеси зерен аустенита и цементита, образующаяся при эвтектическом превращении в системе железо–углерод
Ликвация	Неоднородность сплава по химическому составу, возникающая при кристаллизации
Ликвидус	Температура, выше которой сплав находится в жидком состоянии
Мартенсит	Метастабильный твердый раствор, образующийся в результате бездиффузионного превращения
Металл шва	Сплав, образованный расплавленным основным и наплавленным металлами или только переплавленным основным металлом
Металлография цветная	Область металлографии, применяющая методы выявления структуры путем окрашивания ее составляющих в различные цвета
Метод контроля разрушающий	Метод контроля, при котором происходит разрушение контролируемого изделия
Методы контроля металлографические (металлографические исследования)	Методы изучения микро- и макроструктуры металлов и сплавов при различном увеличении или визуальном наблюдении
Методы контроля механические (механические испытания)	Испытания, заключающиеся в определении механических свойств материалов
Методы контроля технологические	Методы, определяющие возможность осуществления технологического процесса изготовления изделия
Методы контроля физические	Методы, определяющие свойства металлов и сплавов в условиях, исключающих приложение силы (например, плотность, магнитные свойства, электропроводность, прохождение акустических волн и излучений)
Методы контроля фрактографические	Изучение строения изломов металла методами визуального рассмотрения, оптическими и физическими методами
Миграция границ зерен	Диффузионное перемещение границ зерен в металле под действием температуры и напряжений во времени
Модификатор	Элемент, специально вводимый в расплав с целью изменения размеров и формы кристаллитов (зерен), образующихся при затвердевании
Наварка	Нанесение слоя металла на поверхность изделия посредством сварки с применением давления
Надрез	Резкое изменение размеров и формы объекта, вызывающее концентрацию напряжений
Наплавка	Нанесение посредством сварки плавлением слоя металла на поверхность изделия
Наплавленный металл	Переплавленный присадочный металл, введенный в сварочную ванну или наплавленный на основной металл
Неметаллическое включение	Неметаллическая частица (оксид, сульфид, силикат и др.) в металлах и сплавах, образующаяся в результате раскисления металла, разрушения огнеупоров, окисления расплава и другими путями, не имеющая металлической связи с металлом

Непровар	Дефект в виде несплавления в сварном соединении вследствие неполного расплавления кромок или поверхностей ранее выполненных валиков сварного шва
Непропай	Дефект паяного соединения, проявляющийся в частичном или полном незаполнении паяльного зазора припоем
Неспай	Дефект паяного соединения, проявляющийся в отсутствии сцепления паяемого материала с материалом паяного шва
Нормализация	Термическая обработка сплавов железа, состоящая из аустенизации и охлаждения на воздухе
Отжиг	Термическая обработка, заключающаяся в нагреве металла до определенной температуры, выдержке и последующем охлаждении, проводимая с целью получения структуры, наиболее близкой к равновесной
Отпуск	Термическая обработка закаленной на мартенсит стали, заключающаяся в нагреве, при котором происходит распад и/или возврат и рекристаллизация мартенсита
Пайка	Образование соединения с межатомными связями путем нагрева соединяемых материалов ниже температуры их плавления, их смачивания припоем, затекания припоя в зазор и последующей его кристаллизации
Паяльный флюс	Вспомогательный материал, применяемый для удаления оксидов с поверхности паяемого материла и припоя и предотвращения их образования
Перегрев	Нагрев металла до высокой температуры, при которой во время выдержки возникают крупное зерно и структурные изменения, охрупчивающие металл, которые в некоторых случаях могут быть устранены последующей термической обработкой
Пережог	Нагрев металла до высокой температуры, при которой во время выдержки возникают крупное зерно и структурные изменения, охрупчивающие металл: окисление или оплавление границ зерен, не устраняющиеся последующей термической обработкой
Перитектика (перитектическое превращение)	Процесс взаимодействия кристаллов твердого раствора с жидкостью, происходящий в двухкомпонентной системе изотермически при постоянной концентрации фазы, приводящий к образованию кристаллов другого твердого раствора
Перлит	Структура железоуглеродистых сплавов, представляющая собой смесь феррита и цементита, образующуюся при эвтектоидном превращении аустенита
Подрез зоны сплавления	Дефект в виде углубления по линии сплавления сварного шва с основным металлом
Подрез при пайке	Дефект паяного соединения, проявляющийся в виде незаполненного припоем углубления в паяемом материале у галтельного участка, образовавшегося вследствие локальной химической эрозии
Подслой	Каждый из слоев многослойного покрытия, располо-

	женный под внешним слоем покрытия
Полирование механическое	Обработка поверхности основного покрываемого металла и (или) покрытия специальными пастами для уменьшения шероховатости и придания блеска
Полирование химическое	Обработка поверхности основного покрываемого металла и (или) покрытия в растворах избирательным растворением для уменьшения шероховатости и придания блеска
Полирование электрохимическое	Химическое полирование под действием электрического тока от внешнего источника
Пора в сварном шве	Дефект сварного шва в виде полости округлой формы, заполненной газом
Предел выносливости (предел усталости)	Максимальное по абсолютному значению напряжение цикла, при котором еще не происходит усталостное разрушение до базы испытания
Предел длительной прочности	Наибольшее условное напряжение, под действием которого материал при данной температуре разрушается через заданный промежуток времени
Предел ограниченной выносливости	Максимальное по абсолютному значению напряжение цикла, соответствующее задаваемой циклической долговечности
Предел прочности (временное сопротивление разрыву) при растяжении	Условное напряжение, равное отношению максимальной нагрузки при растяжении, предшествующей разрушению, к начальной площади поперечного сечения образца
Предел текучести	Наименьшее условное напряжение, при котором появляются первые признаки макропластической деформации либо остаточная деформация достигает определенной заданной величины
Припой	Материал для пайки и лужения с температурой плавления ниже температуры плавления паяемых материалов
Прожог сварного шва	Дефект в виде сквозного отверстия в сварном шве, образовавшегося в результате вытекания части металла сварочной ванны
Раковина	Полость, образующаяся в металле при его затвердевании
Раскисление	Процесс удаления из жидких металлов растворенного в них кислорода путем введения химических элементов, имеющих к кислороду большее химическое сродство, чем металл, составляющий основу расплава
Расслоение	Дефект в виде несплошностей, ориентированных строго вдоль направления деформации, и проявляющийся в изломе в виде трещин
Рафинирование	Очищение жидкого металла от вредных примесей
Рекристаллизация	Процесс образования и роста новых зерен с более совершенной структурой из исходных зерен той же фазы
Релаксация	Процесс самопроизвольного уменьшения напряжений в упругонапряженном металле в условиях сохранения неизменными линейных размеров тела
Свищ в сварном шве	Дефект в виде воронкообразного углубления в свар-

	ном шве
Сквозная несплошность	Сквозной капилляр, соединяющий противоположные стенки объекта контроля
Солидус	Температура, ниже которой сплав находится в твердом состоянии
Сорбит	Структура железоуглеродистых сплавов: высокодисперсная разновидность перлита, образующаяся из аустенита при охлаждении или из мартенсита при отпуске
Старение	Термическая обработка, проводимая после закалки, заключающаяся в выдержке сплава при одной или нескольких температурах, обеспечивающих дисперсионное упрочнение твердого раствора
Стойкость против образования горячих трещин при сварке	Способность металла образовывать шов без горячих трещин при сварке конкретного узла в установленных режимах сварки
Структура металла	Строение металлов и сплавов, характеризующееся наличием фаз, дефектов, их количеством, взаиморасположением и формой
Твердый раствор	Твердая фаза, имеющая кристаллическую решетку металла растворителя, в которой находятся атомы одного или нескольких растворенных легирующих элементов
Текстура	Преимущественная ориентация кристаллической решетки зерен в поликристалле, вызывающая анизотропию свойств материала
Температурный интервал хрупкости (ТИХ)	Разность между верхней $T_{в.г}$ и нижней $T_{н.г}$ границами температурного интервала образования горячих трещин: ТИХ = $T_{в.г} - T_{н.г}$
Трещина	Нарушение сплошности металла в виде щелевого разрыва. В сварном соединении подразделяются на горячие, холодные, трещины повторного нагрева
Трещина горячая	Трещина, возникающая в металле при высоких температурах
Трещина повторного нагрева	Трещина, возникающая при повторном термическом воздействии на металл шва
Трещина при ползучести	Трещина, возникающая при непрерывной пластической деформации, происходящей при постоянной температуре и постоянной нагрузке в зависимости от времени
Трещина сварного соединения	Дефект сварного соединения в виде разрыва в сварном шве и/или прилегающих к нему зонах
Трещина сварного соединения поперечная	Трещина сварного соединения, ориентированная поперек оси сварного шва
Трещина сварного соединения продольная	Трещина сварного соединения, ориентированная вдоль оси сварного шва
Трещина усталостная	Трещина, возникающая под действием переменных напряжений
Трещина холодная при сварке (ХТ)	Трещина, возникающая в металле при низких температурах
Троостит	Структура железоуглеродистых сплавов; высокодис-

	персная разновидность перлита, образующаяся из аустенита при охлаждении или из мартенсита при отпуске
Усадочная раковина в сварном шве	Дефект в виде несплошности в металле, образовавшейся вследствие усадки во время затвердевания металла сварного шва и имеющей поверхность, характерную для свободной кристаллизации металла
Усадочная рыхлость	Дефект в виде скопления несплошностей неправильной формы, проявляющегося в виде отдельных участков с пористым ноздреватым строением без явных признаков пластической деформации
Усталостное разрушение	Разрушение металла нагружаемого объекта до полной потери его прочности или работоспособности вследствие распространения усталостной трещины
Усталость	Процесс постепенного накопления повреждений материала под действием переменных напряжений, приводящий к изменению свойств, образованию трещин, их развитию и разрушению материала
Усталость коррозионная	Процесс развития (накопления) повреждений, возникающих при одновременном воздействии переменных напряжений и коррозионных сред, снижающих долговечность
Усталость малоцикловая	Усталость материала, при которой усталостное повреждение или разрушение происходит при упругопластическом деформировании
Усталость многоцикловая	Усталость материала, при которой усталостное повреждение или разрушение происходит в основном при упругом деформировании
Фаза	Однородная часть гетерогенной структуры металла, имеющая собственный химический состав, свойства и отделенная от других фаз границей раздела
Фасетка	Участок хрупкого разрушения с блестящей кристаллической поверхностью, соизмеримый с размерами зерен
Феррит	Твердый раствор одного или нескольких легирующих элементов в железе с объемноцентрированной кубической решеткой
Флокены	Внутренние трещины в металле, заполненные водородом под высоким давлением
Флюс для дуговой сварки	Сварочный флюс, защищающий дугу и сварочную ванну от вредного воздействия окружающей среды и используемый для металлургической обработки ванны
Флюс сварочный	Материал, используемый при сварке для химической очистки соединяемых поверхностей и улучшения качества шва
Хладноломкость	Способность материала хрупко разрушаться при низких температурах, возрастающая с понижением температуры
Цвета побежалости	Окраска, приобретаемая поверхностью металла при повышенных температурах (при отпуске)

Цементит	Карбид железа (Fe_3C), являющийся структурной составляющей железоуглеродистых сплавов
Эвтектика	Смесь двух и более фаз, образующаяся из расплава при постоянной температуре во время эвтектического превращения и кристаллизующаяся при постоянной температуре
Экзогенное включение	Неметаллическое включение, образующееся в результате попадания в расплав шлака, частиц огнеупоров и др.
Электрод неплавящийся для дуговой сварки	Деталь из электропроводного материала, включаемая в цепь сварочного тока для подвода его к сварочной дуге и не расплавляющаяся при сварке
Электрод плавящийся для дуговой сварки	Металлический электрод, включаемый в цепь сварочного тока для подвода его к сварочной дуге, расплавляющийся при сварке и служащий присадочным металлом
Электрод покрытый	Плавящийся электрод для дуговой сварки, имеющий на поверхности покрытие, адгезионно связанное с металлом электрода
Эндогенное включение	Неметаллическое включение, образующееся в результате реакций, протекающих в расплаве
Эрозия	Постепенное разрушение поверхности металлических изделий в потоке газа или жидкости

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

К главе 1

1. Сварка в машиностроении [Текст]: справочник в 4 т. / Ред. Ю.Н. Зорина. – М.: Машиностроение, 1979. – 512 с.

2. **Селиванов, В.Ф.** Основы организации и методологии научных исследований конструкционных металлических материалов и сварных соединений [Текст] / В.Ф. Селиванов, В.В. Пешков, И.Е. Ковалев, В.А. Фролов, В.А. Казаков. – Воронеж: Изд. Воронежского гос. ун-та, 2004. – 215 с.

3. **Фетисов, Г.П.** Материаловедение и технология металлов [Текст]: учебник для вузов / Г.П. Фетисов, М.Г. Карпман, В.М. Матюнин и др. – М.: Высшая школа, 2002. 630 с.

4. Сварка, резка, контроль [Текст]: справочник: в 2 т. / Ред. Н.П. Алешин, Г.Г. Чернышев. – М.: Машиностроение, 2004. – 619 с.

5. Сварка и сварочные материалы [Текст]: справочник: в 3 т. / Ред. В.Н. Волченко. – М.: Металлургия, 1991, т. 1, 525 с.; 1997, т. 2, 575 с.; 1998, т. 3, 575 с.

6. **Алешин, Н.П.** Методы акустического контроля металлов [Текст]: / Н.П. Алешин, В.Е. Белый, А.Х. Вопилкин и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 456 с.

7. **Колманов, А.Г.** Методы измерения твердости [Текст] / А.Г. Колманов, В.Ф. Терентьев, М.Б. Бакиров. – М.: Интермет Инжиниринг, 2005. – 150 с.

8. **Терентьев, В.Ф.** Усталостная прочность металлов и сплавов [Текст] / В.Ф. Терентьев. – М.: Наука, 2002. – 288 с.

К главе 2

1. **Лашко, С.В.** Пайка металлов [Текст] / С.В. Лашко. – М.: Машиностроение, 1988. – 374 с.

2. Краткий справочник паяльщика [Текст] / Ред. И.Е. Петрушин и др. – М.: Машиностроение, 1991. – 212 с.

3. Справочник по пайке [Текст]. – М.: Машиностроение, 1984. – 398 с.

4. **Хряпин, В.Е.** Справочник паяльщика [Текст] / В.Е. Хряпин. – М.: Машиностроение, 1985. – 349 с.
5. **Смирнов, Г.Н.** Прогрессивные способы пайки алюминия [Текст] / Г.Н. Смирнов. – М.: Металлургия, 1983. – 240 с.
6. Сварка, резка, контроль [Текст]: справочник: в 2 т. / Ред. Н.П. Алешин, Г.Г. Чернышев. – М.: Машиностроение, 2004. – 619 с.

К главе 3

1. **Генкин, И.З.** Сварные рельсы и стрелочные переводы [Текст] / И.З. Генкин. – М.: Интекст, 2003. – 93 с.
2. **Хромченко, Ф.А.** Сварочные технологии при ремонтных работах. Т.2. [Текст] / Ф.А. Хромченко. – М.: Интермет Инжиниринг, 2005. – 368 с.
3. Сварка, резка, контроль [Текст]: справочник: в 2 т. / Ред. Н.П. Алешин, Г.Г. Чернышев. – М. Машиностроение, 2004. – 480 с.
4. **Гуревич, С.М.** Справочник по сварке цветных металлов [Текст] / С.М. Гуревич. – Киев: Наукова думка, 1981. – 608 с.
5. **Редчин, В.В.** Пористость при сварке цветных металлов [Текст] / В.В. Редчин, В.А. Фролов, В.А. Казаков, В.И. Лукин. – М.: Технология машиностроения, 2002. – 147 с.
6. **Николаев, Г.А.** Свариваемые алюминиевые сплавы [Текст] / Г.А. Николаев, И.Н. Фридляндер, Ю.П. Арбузов. – М.: Металлургия, 1990. – 296 с.
7. **Хромченко, Ф.А.** Ресурс сварных соединений паропроводов [Текст] / Ф.А. Хромченко. – М.: Машиностроение, 2002. – 351 с.
8. **Земзин, В.Н.** Термическая обработка и свойства сварных соединений [Текст] / В.Н. Земзин, Р.З. Шрон. – М.: Машиностроение, 1978. – 867 с.

К главе 4

1. **Ежов, А.А.** Дефекты в металлах [Текст]: справочник – атлас / А.А. Ежов, Л.П. Герасимова. – М.: Русский университет, 2002. – 360 с.
2. **Шаповалов, В.И.** Флокены и контроль водорода в стали [Текст] / В.И. Шаповалов, В.В. Трофименков. – М.: Металлургия, 1987.
3. Ковка и штамповка [Текст]: справочник: в 4 т. Т. 2. Горячая объемная штамповка / Ред. Е.И. Семенов. – М.: Машиностроение, 1986. – 592 с.
4. **Калинина, З.М.** Дефекты легированной стали [Текст] / З.М. Калинина. – Свердловск: Металлургиздат, 1960.
5. Алюминий. Свойства и физическое металловедение [Текст]: справочник / Ред. Дж. Е. Хэтч: пер. с англ. / Ред. И.Н. Фридляндер. – М.: Металлургия, 1989.
6. Атлас структур слитков и полуфабрикатов из алюминиевых сплавов [Текст] / Ред. Добаткин В.И. и др. – М.: Металлургия, 1971.
7. Атлас дефектов стали [Текст]: пер. с нем. – М.: Металлургия, 1979.
8. Дефекты стали [Текст] / Ред. С.М. Новокщенова, М.И. Виноград. – М.: Металлургия, 1984. – 200 с.
9. **Явойский, В.И.** Неметаллические включения и свойства стали [Текст] / В.И. Явойский, Ю.И. Рубенчик, А.П. Оконко. – М.: Металлургия, 1980.
10. **Аверин, В.В.** Металлургические методы повышения качества стали [Текст] / В.В. Аверин. – М.: Наука, 1979.

К главе 5

1. **Ежов, А.А.** Дефекты в металлах [Текст]: справочник – атлас / А.А. Ежов, Л.П. Герасимова. – М.: Русский университет, 2002. – 360 с.
2. Дефекты стали [Текст]: справочник / Ред. С.М. Новокщенова, М.И. Виноград. – М.: Металлургия, 1984. – 200 с.
3. Атлас дефектов стали [Текст]: пер. с нем. – М.: Металлургия, 1979. – 188 с.
4. **Явойский, В.И.** Неметаллические включения и свойства стали [Текст] / В.И. Явойский, Ю.И. Рубенчик, А.П. Оконко. – М.: Металлургия, 1980. – 176 с.
5. Голография. Методы и аппаратура [Текст] / Ред. В.М. Гинзбург, Б.М. Степанов. – М.: Советское радио, 1974. – 376 с.
6. **Голенко, Г.Г.** Растровые голограммы с устраненной дискретной структурой [Текст] / Г.Г. Голенко // Техника кино и телевидения. – 1983. – № 8. – С. 31–37.
7. Оптическая голография [Текст]: пер. с англ. / Ред. Г.М. Колфилд. – М.: Мир, 1982. – 735 с.

8. **Томас, Л.** Просвечивающая электронная микроскопия материалов [Текст] / Л. Томас, М. Горинджж. – М.: Наука, 1983. – 352 с.
9. Практическая растровая электронная микроскопия [Текст]: пер. с англ. / Ред. Д. Гоулдстейн, Х. Яковиц. – М.: Мир, 1978. – 656 с.
10. Практические методы в электронной микроскопии [Текст] / Ред. О.М. Глоэр. – М.: Машиностроение, 1980. – 375 с.
11. Методы анализа поверхностей [Текст]: пер. с англ. / Ред. А.М. Зандера. – М.: Мир, 1979. – 582 с.
12. **Карлсон, Т.А.** Фотоэлектронная и оже-спектроскопия [Текст]: пер. с англ. / Т.А. Карлсон. – Л.: Машиностроение, 1981. – 431 с.
13. Металловедение и термическая обработка стали [Текст]: справоч. изд.: в 3 т. / Ред. М.Л. Бернштейн, А.Г. Рахштадт. Т. 2. Основы термической обработки / Ред. С.Б. Масленков. – М.: Металлургия, 1995. – 368 с.
14. **Малинина, Р.И.** и др. Практическая металлография [Текст] / Р.И. Малинина и др. – М.: Интермет Инжиниринг, 2004. – 240 с.
15. **Бокштейн, Б.С.** Металловедение и термическая обработка стали и чугуна [Текст]: справ. изд.: в 3 т. / Б.С. Бокштейн, Ю.Г. Векслер, Б.А. Дроздовский и др. Т.1. Методы испытаний и исследования. – М.: Интермет Инжиниринг, 2004.
16. Избранные методы исследования в металлургии [Текст]: пер. с нем. / Ред. Г.И. Хургер. – М.: Металлургия, 1985. – 415 с.
17. **Вашуль, Х.** Практическая металлография [Текст]: пер. с нем. / Хорст Вашуль. – М.: Металлургия, 1988. – 318 с
18. **Шмитт Т.** Металловедение для машиностроения [Текст]: справочник / Томас Шмитт: пер. с нем. – М.: Металлургия, 1995. – 512 с.
19. Атлас микро- и макроструктур сварных соединений [Текст] / Ред. Б.Е. Патон. – Киев: Наукова думка, 1978. – 188 с.
20. **Попилов, Л.Я.** Электрополирование и электротравление металлографических шлифов [Текст] / Л.Я. Попилов, Л.Н. Зайцева. – М.: Научно-техн. изд-во литературы по черной и цветной металлургии, 1963. – 410 с.
21. **Червяков, А.Н.** Металлографическое определение включений в стали [Текст] / А.Н. Червяков. – М.: Научно-техн. изд-во литературы по черной и цветной металлургии, 1953. – 116 с.

К главе 6

1. **Лозинский, М.Г.** Тепловая микроскопия материалов [Текст] / М.Г. Лозинский. – М.: Металлургия, 1976. – 303 с.
2. **Ежов, А.А.** Разрушение металлов [Текст] / А.А. Ежов, Л.П. Герасимова. – М.: Наука, 2004. – 400 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

I. ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНЫХ ГОСУДАРСТВЕННЫХ СТАНДАРТОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА СВАРНЫХ И ПАЯНЫХ ИЗДЕЛИЙ И ТЕРМИЧЕСКОЙ РЕЗКИ

В приложение I включены общероссийские стандарты, наиболее часто используемые для всех видов сварки, пайки и термической резки, действовавшие до 1 января 2005 года.

ГОСТы объединены в следующие разделы:

Общие положения.

Оборудование, аппаратура, приспособления.

Материалы для сварки и пайки.

Технология сварки и пайки.

Средства безопасности труда.

Контроль качества сварных и паяных соединений, резки плавлением.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

ГОСТ 2601–84	Сварка. Термины и определения
ГОСТ 2789–73	Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики
ГОСТ 7713–62	Допуски и посадки. Основные положения
ГОСТ 8908–58	Нормальные углы и допуски на угловые размеры
ГОСТ 9378–75	Образцы шероховатости поверхности (сравнения). Технические требования
ГОСТ 10356–63	Отклонение формы и расположения поверхностей. Основные определения. Предельные отклонения
ГОСТ 11969–79	Сварка плавлением. Основные положения
ГОСТ 14249–73	Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность
ГОСТ 17325–71	Пайка. Термины и определения
ГОСТ 17349–71	Пайка. Способы
ГОСТ 19248–73	Припои. Классификация
ГОСТ 19249–73	Соединения паяные. Основные типы и параметры
ГОСТ 19521–74	Сварка металлов. Классификация
ГОСТ 24715-81	Соединения паяные. Метод контроля качества
ГОСТ 29273–92	Свариваемость. Термины и определения
ГОСТ 29297–92	Сварка, пайка. Обозначение процессов
ГОСТ 30430–96	Сварка дуговая конструкционных чугунов. Требования к техпроцессу
ГОСТ 30482–97	Сварка сталей электрошлаковых. Требования к техпроцессу
ГОСТ 2.307–68	Нанесение размеров и предельных отклонений
ГОСТ 2.308–68	Указание на чертежах предельных отклонений формы и расположения поверхностей
ГОСТ 2.309–73	Обозначение шероховатости поверхностей
ГОСТ 2.310–68	Нанесение на чертежах обозначений покрытий, термической и других видов обработки
ГОСТ 2.312–72	Условные изображения и обозначения швов сварных конструкций
ГОСТ 2.313–68	Условные изображения и обозначения швов неразъемных соединений
ГОСТ 2.314–68	Указания на чертежах о маркировании и клеймении изделий
ГОСТ 2.410–68	Правила выполнения чертежей металлических конструкций
ГОСТ 2.413–72	Правила выполнения конструкторской документации изделий, изготовляемых с применением электрического монтажа
ГОСТ 2.702–75	Правила выполнения электрических схем
ГОСТ 3.1402–74	Правила оформления документов на раскрой и отрезку заготовок
ГОСТ 3.1406–74	Правила оформления документов на сварку
ГОСТ 3.1413-73	Правила оформления документации на процессы сварки трением
ГОСТ 3.1417–74	Правила оформления документации на процессы пайки
ГОСТ 3.1419–74	Правила оформления документов на типовые технологические процессы сварки
ГОСТ 3.1426-76	Правила оформления документов, применяемых при автоматизированном проектировании технологических процессов. Сварка
ГОСТ 3.1427–77	Правила оформления документов на процессы пайки: вол-

	ной припоя, погружением в расплавленный припой, индукционной, электродуговой, электросопротивлением, электронным лучом, оптическим излучением, плазменной пайкой
ГОСТ 3.1502–74	Правила оформления документов на технический контроль
ГОСТ 3.1705–81	Правила записи операций сварки

ОБОРУДОВАНИЕ, АППАРАТУРА, ПРИСПОСОБЛЕНИЯ

ГОСТ 95–69	Трансформаторы однофазные однопостовые для ручной электродуговой сварки
ГОСТ 297–80	Машины электросварочные контактные. Общие технические условия
ГОСТ 304–77Е	Генераторы постоянного тока для электродуговой сварки
ГОСТ 699–76	Вентиль кислородного баллона средней вместимостью на $P_р \leq 20$ МПа (200 кгс/см^2). Технические условия
ГОСТ 1077–79	Горелки однопламенные универсальные для ацетилено-кислородной сварки, пайки и подогрева. Типы, основные параметры и размеры. Общие технические требования
ГОСТ 1078–71	Ниппели к резиновым рукавам аппаратуры для пламенной обработки металлов
ГОСТ 2402–82	Агрегаты сварочные с двигателями внутреннего сгорания. Общие технические условия
ГОСТ 5190–67	Генераторы ацетиленовые низкого и среднего давления
ГОСТ 5191–79	Резаки инжекторные для ручной кислородной резки. Типы, основные параметры и общие технические требования
ГОСТ 5614–74	Машины для термической резки металлов. Типы, основные параметры и размеры
ГОСТ 6268–68	Редукторы для газопламенной обработки металлов. Типы и основные понятия
ГОСТ 7012–69	Трансформаторы однофазные однопостовые для автоматической электродуговой сварки под флюсом. Технические условия
ГОСТ 7219–77	Паяльники электрические бытовые
ГОСТ 7237–77Е	Преобразователи сварочные для дуговой электросварки с генераторами постоянного тока
ГОСТ 7237–82	Преобразователи сварочные. Общие технические условия
ГОСТ 8213–75	Автоматы для дуговой сварки плавящимися электродами. Общие технические условия
ГОСТ 8213–75Е	Автоматы для дуговой сварки плавящимся электродом самоходные
ГОСТ 8766–73	Затворы предохранительные жидкостные для ацетилена
ГОСТ 8856–72	Аппаратура для газопламенной обработки. Давление горючих газов
ГОСТ 9356–75	Рукава резиновые для газовой сварки и резки металлов

ГОСТ 10594–74	Оборудование для дуговой сварки. Ряд номинальных токов
ГОСТ 10594–80	Оборудование для дуговой, контактной, ультразвуковой сварки и для плазменной обработки. Ряды параметров
ГОСТ 10796–74	Резаки ручные воздушно-дуговые. Типы и основные параметры
ГОСТ 11966–78	Аппаратура для нанесения покрытий по способу газотермического напыления. Типы и основные параметры
ГОСТ 12221–79	Аппаратура для плазменно-дуговой резки металлов. Типы и основные параметры
ГОСТ 13045–67	Ротаметры общепромышленные
ГОСТ 13333–75	Аппараты электрические коммутационные. Контакты на основе вольфрама
ГОСТ 13821–68	Выпрямители с крутопадающими внешними характеристиками для дуговой сварки. Основные параметры и технические требования
ГОСТ 13861–68	Редукторы баллонные для газопламенной обработки. Присоединительные размеры и технические условия
ГОСТ 13861–89	Редукторы для газопламенной обработки. Общие технические условия
ГОСТ 14111–77	Электроды прямые электросварочных контактных точечных машин
ГОСТ 14651–78	Электродержатели для ручной дуговой электросварки. Основные параметры и технические требования
ГОСТ 15878–70	Соединения сварные, выполненные контактной электросваркой. Основные типы и конструктивные элементы
ГОСТ 16152–70	Соединения ниппельно-муфтовые для газорежущих машин
ГОСТ 17356–71	Горелки газовые. Термины и определения
ГОСТ 18130–79	Полуавтоматы для дуговой сварки плавящимся электродом. Общие технические условия
ГОСТ 18130–79Е	Полуавтоматы шланговые для электродуговой сварки плавящимся электродом
ГОСТ 18205–72	Редукторы рамповые для газопламенной обработки
ГОСТ 18636–73	Реостаты балластные для многопостовых источников питания ручной дуговой сварки
ГОСТ 18698–73	Рукава резиновые напорные с текстильным каркасом
ГОСТ 19140–94	Вращатели сварочные горизонтальные двухстоечные. Типы, основные параметры и размеры
ГОСТ 19141–94	Вращатели сварочные вертикальные. Типы, основные параметры и размеры
ГОСТ 19143–94	Вращатели сварочные универсальные. Типы, основные параметры и размеры
ГОСТ 20549–75	Диффузионная сварка в вакууме рабочих элементов разделительных и формообразующих штампов. Типовой технологический процесс
ГОСТ 21694–94	Оборудование сварочное механическое. Общие техниче-

	ские условия
ГОСТ 22990–78	Машины контактные. Термины и определения
ГОСТ 23556–95	Колонны для сварочных автоматов. Типы, основные параметры и размеры
ГОСТ 25444–90	Электроды прямые и электродержатели для контактной точечной сварки. Посадки конические. Размеры
ГОСТ 25445–82	Барабаны, катушки и сердечники для сварочной проволоки. Основные размеры
ГОСТ 25616–83	Источники питания для дуговой сварки. Методы испытания сварочных свойств
ГОСТ 26054–85	Роботы промышленные для контактной сварки. Общие технические условия
ГОСТ 26056–84	Роботы промышленные для дуговой сварки. Общие технические условия
ГОСТ 26408–85	Колонны для сварочных полуавтоматов. Типы, основные параметры и размеры
ГОСТ 27387–87	Роботы промышленные для контактной точечной сварки. Основные параметры и размеры
ГОСТ 27776–88	Модули производственные гибкие дуговой сварки и плазменной обработки. Основные параметры
ГОСТ 28332–89	Модули производственные гибкие дуговой сварки. Нормы надежности и основные требования к методам контроля
ГОСТ 28920–95	Вращатели сварочные роликовые. Типы, основные параметры и размеры
ГОСТ 28944–91	Оборудование сварочное механическое. Методы испытаний
ГОСТ 29091–91	Горелки ручные газовоздушные инжекторные. Технические требования и методы испытаний
ГОСТ 30220–95	Манипуляторы для контактной точечной сварки. Типы, основные параметры и размеры
ГОСТ 30260–96	Оборудование для наплавки поверхностей тел вращения. Типы, основные параметры и размеры
ГОСТ 30261–96	Оборудование для сварки кольцевых швов. Типы, основные параметры и размеры
ГОСТ 30275–96	Манипуляторы для контактной точечной сварки. Общие технические условия
ГОСТ 30295–96	Кантователи сварочные. Типы, основные параметры и размеры
ГОСТ Р 5039–92	Герметичность оборудования и аппаратуры для газовой сварки, резки и аналогичных процессов. Допустимые скорости внешней утечки газа и метод их измерения
ГОСТ Р 50402–92	Устройства предохранительные для горючих газов и кислорода или сжатого воздуха, используемые при газовой сварке, резке и аналогичных процессах. Основные понятия, общие технические требования и методы испытаний
ГОСТ 4.41–85	Машины для термической резки металлов. Номенклатура

	показателей
ГОСТ 4.44–89	Оборудование сварочное механическое. Номенклатура показателей
ГОСТ 4.140–85	Оборудование электросварочное. Номенклатура показателей
ГОСТ 5.70–68	Установка вакуумного напыления УВН-2М-2. Требования к качеству аттестованной продукции
ГОСТ 5.71–68	Установка для сварки давлением с косвенным импульсным нагревом СКИН-1. Требования к качеству аттестованной продукции
ГОСТ 5.153–77Е	Выпрямитель электросварочный многопостовой типа ВКСМ-1000-1-1 на полупроводниковых кремниевых вентилях. Требования к качеству аттестованной продукции
ГОСТ 5.154–69	Установка для ультразвуковой сварки с импульсным косвенным нагревом УЗСКН-1. Требования к качеству аттестованной продукции
ГОСТ 5.384–75Е	Выпрямитель электросварочный многопостовой типа ВДМ-1601 на полупроводниковых кремниевых вентилях. Требования к качеству аттестованной продукции
ГОСТ 5.524–70	Установка «Контакт-1А» для термокомпрессионной микросварки проволочных выводов. Требования к качеству аттестованной продукции
ГОСТ 5.525–70	Установка «Контакт-3А» для импульсной микросварки проволочных выводов. Требования к качеству аттестованной продукции
ГОСТ 5.643–70	Установка для полуавтоматической сварки типа МС-41П2-1. Требования к качеству аттестованной продукции
ГОСТ 5.754–71	Установка термокомпрессионного присоединения выводов типа ЭМ-422. Требования к качеству аттестованной продукции
ГОСТ 5.782–71	Установка вакуумного напыления УВН-71Р-2. Требования к качеству аттестованной продукции
ГОСТ 5.915–71	Машина подвесная К-355 для контактной сварки рельсов. Требования к качеству аттестованной продукции
ГОСТ 5.917–71	Горелки ручные для аргонодуговой сварки типов РГА-150 и РГА-400. Требования к качеству аттестованной продукции
ГОСТ 5.1108–71	Машина типа АСШ-70 для кислородной резки листового металла. Требования к качеству аттестованной продукции
ГОСТ 5.1498–72	Горелка типа ГГП-1-66 для сварки термопластичных материалов. Требования к качеству аттестованной продукции
ГОСТ 5.1584–72	Автомат сварочный тракторного типа ТС-17Р. Требования к качеству аттестованной продукции
ГОСТ 5.1919–73	Горелка – «звездочка» для ацетилено-кислородной сварки, пайки и подогрева. Требования к качеству аттесто-

	ванной продукции
ГОСТ 12.1.035–81	Оборудование для дуговой и контактной электросварки. Допустимые уровни шума и методы измерений
ГОСТ 12.2.008–75	Оборудование и аппаратура для газопламенной обработки металлов и термического напыления покрытий. Требования безопасности
ГОСТ 31.211.41–93	Детали и сборочные единицы сборно-разборных приспособлений для сборочно-сварочных работ. Основные конструктивные элементы и параметры. Нормы точности
ГОСТ 31.211.42–93	Детали и сборочные единицы сборно-разборных приспособлений для сборочно-сварочных работ. Технические требования. Правила приемки. Методы контроля. Маркировка, упаковка, транспортирование и хранение
ГОСТ 31.2031.01–91	Приспособления сборно-разборные, переналаживаемые для сборки деталей под сварку. Типы, параметры и размеры
ГОСТ 31.2031.02–91	Приспособления сборно-разборные, переналаживаемые для сборки деталей под сварку. Технические условия

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СВАРКИ И ПАЙКИ

ГОСТ 1066–75	Проволока латунная
ГОСТ 1071–67	Проволока стальная пружинная термически обработанная
ГОСТ 1429.0–77	Припои оловянно-свинцовые. Общие требования к методам анализа
ГОСТ 1429.1–77	Припои оловянно-свинцовые. Методы определения сурьмы
ГОСТ1429.2–77	Припои оловянно-свинцовые. Методы определения олова
ГОСТ 1429.3–77	Припои оловянно-свинцовые. Методы определения железа
ГОСТ 1429.4–77	Припои оловянно-свинцовые. Методы определения меди
ГОСТ 1429.5–77	Припои оловянно-свинцовые. Методы определения висмута
ГОСТ 1429.6–77	Припои оловянно-свинцовые. Методы определения серы
ГОСТ 1429.7–77	Припои оловянно-свинцовые. Методы определения никеля
ГОСТ 1429.8–77	Припои оловянно-свинцовые. Методы определения цинка
ГОСТ 1429.9–77	Припои оловянно-свинцовые. Методы определения алюминия
ГОСТ 1429.10–77	Припои оловянно-свинцовые. Методы определения мышьяка
ГОСТ 1429.11–77	Припои оловянно-свинцовые. Методы определения кадмия
ГОСТ 1429.12–77	Припои оловянно-свинцовые. Метод определения свинца
ГОСТ 1429.13–77	Припои оловянно-свинцовые. Спектральный метод определения примесей сурьмы, меди, висмута, мышьяка, железа, никеля, цинка, алюминия с использованием синтетических градуировочных образцов
ГОСТ 1429.14–77	Припои оловянно-свинцовые. Спектральный метод определения примесей сурьмы, меди, висмута, мышьяка, железа, никеля
ГОСТ 1429.15–77	Припои оловянно-свинцовые. Спектральный метод определения примесей сурьмы, меди, висмута, мышьяка, железа,

	свинца
ГОСТ 1535–71	Прутки медные
ГОСТ 2112–71	Проволока медная круглая электротехническая
ГОСТ 2179–75	Проволока из никеля и кремнистого никеля
ГОСТ 2246–70	Проволока стальная сварочная. Технические условия
ГОСТ 2671–70	Прутки чугунные для сварки и наплавки
ГОСТ 5222–72	Проволока из кремнемарганцевой бронзы. Сортамент и технические условия
ГОСТ 5307–77	Проволока константановая неизолированная
ГОСТ 6132–71	Проволока алюминиевая круглая электротехническая
ГОСТ 7222–75	Проволока из золота, серебра и их сплавов
ГОСТ 7348–63	Проволока стальная круглая для армирования предварительно напряженных железобетонных конструкций
ГОСТ 7871–75	Проволока сварочная из алюминия и алюминиевых сплавов
ГОСТ 8803–77	Проволока нихромовая микронных размеров
ГОСТ 9087–81	Флюсы сварочные плавленые
ГОСТ 9389–75	Проволока стальная углеродистая пружинная
ГОСТ 9466–75	Электроды покрытые металлические для ручной дуговой сварки сталей и наплавки. Классификация, размеры и общие технические требования
ГОСТ 9467–75	Электроды покрытые металлические для ручной дуговой сварки конструкционных и теплоустойчивых сталей. Типы
ГОСТ 10051–75	Электроды покрытые металлические для ручной дуговой наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами. Типы
ГОСТ 10052–75	Электроды покрытые металлические для ручной дуговой сварки высоколегированных сталей с особыми свойствами. Типы
ГОСТ 10543–98	Проволока стальная наплавочная. Технические условия
ГОСТ 10988–75	Прутки из бескислородной меди для электровакуумной промышленности
ГОСТ 11930.0–79 до 11930.4–79	Материалы наплавочные. Методы анализа
ГОСТ 13842–74	Катанка медная
ГОСТ 13843–68	Катанка алюминиевая
ГОСТ 14085–68	Проволока круглая горячекатаная из углеродистой стали обыкновенного качества. Технические требования
ГОСТ 14963–78	Проволока стальная легированная пружинная
ГОСТ 15527–70	Сплавы медно-цинковые (латуни), обрабатываемые давлением. Марки
ГОСТ 16130–72	Проволока и прутки из меди и сплавов на медной основе сварочные
ГОСТ 16883.0–71 до 16883.3–71	Серебряно-медно-цинковые припои. Общие требования к методам анализа
ГОСТ 18143–72	Проволока из высоколегированной коррозионностойкой и жаростойкой стали
ГОСТ 18389–73	Проволока из платины и ее сплавов
ГОСТ 18390–73	Проволока из палладия и его сплавов
ГОСТ 18903–73	Проволока вольфрамовая. Сортамент
ГОСТ 18905–73	Проволока молибденовая. Сортамент
ГОСТ 19250–73	Флюсы паяльные. Классификация

ГОСТ 19738–74	Припои серебряные. Марки
ГОСТ 19746–74	Проволока из припоев серебряных
ГОСТ 21449–75	Прутки для наплавки. Технические условия
ГОСТ 21639.0 до 21639.11–76	Флюсы для электрошлакового переплава. Общие требования и методы определения составляющих
ГОСТ 21930–76	Припои оловянно-свинцовые в чушках. Технические условия
ГОСТ 21931–76	Припои оловянно-свинцовые в изделиях. Технические условия
ГОСТ 22974.0–96 до 22974.13–96	Флюсы сварочные плавленые. Методы химического анализа
ГОСТ 23137–78	Припои медно-цинковые. Марки
ГОСТ 29090–91	Материалы, используемые в оборудовании для газовой сварки, резки и аналогичных процессов. Общие требования
ГОСТ 5.807–74	Катанка алюминиевая круглая. Требования к качеству аттестованной продукции
ГОСТ 5.1074–71	Проволока из припоя марки ПСр45. Требования к качеству аттестованной продукции
ГОСТ 5.1149–71	Прутки латунные марки ЛС59-1. Требования к качеству аттестованной продукции
ГОСТ 5.1163–71	Прутки из стали Х15Н5Д2 Т-Ш (ЭП410У-Ш). Требования к качеству аттестованной продукции
ГОСТ 5.1165–71	Прутки из сплава 0Х15Н65 М16В (ЭП-567). Требования к качеству аттестованной продукции
ГОСТ 5.1168–71	Припой оловянно-свинцовый ПОС-25 в прутках. Требования к качеству аттестованной продукции
ГОСТ 5.1215–72	Электроды металлические марки АНО-1 для дуговой сварки малоуглеродистых конструкционных сталей. Требования к качеству аттестованной продукции
ГОСТ 5.1491–72	Проволока порошковая марки ПП-АН125 для наплавки. Требования к качеству аттестованной продукции
ГОСТ 5.1619–72	Проволока вольфрам-молибденовая. Требования к качеству аттестованной продукции. Марка ВАМ-5
ГОСТ 5.1620–72	Проволока вольфрам-рениевая. Марка ВАР-5. Требования к качеству аттестованной продукции
ГОСТ 5.1929–73	Флюсы сварочные плавленые марок АН 20С и АН 20П. Требования к качеству аттестованной продукции

ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ И ПАЙКИ

ГОСТ 5264–80	Ручная дуговая сварка. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры
ГОСТ 8713–79	Сварка под флюсом. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры
ГОСТ 11533–75	Автоматическая и полуавтоматическая дуговая сварка под флюсом. Соединения сварные под острыми и тупыми углами. Основные типы, конструктивные элементы и размеры
ГОСТ 11534–75	Ручная дуговая сварка. Соединения сварные под острыми и тупыми углами. Основные типы, конструктивные элементы и

	размеры
ГОСТ 11969–79	Сварка плавлением. Основные положения
ГОСТ 12169–82	Заготовки стальные, вырезанные кислородной резкой. Припуски. Точность деталей и заготовок и качество поверхности реза
ГОСТ 14771–76	Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры
ГОСТ 14776–79	Дуговая сварка. Соединения сварные точечные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры
ГОСТ 14792–80	Кислородная и плазменно-дуговая резка металлов. Обозначения основных положений сварки плавлением
ГОСТ 14806–80	Дуговая сварка алюминия и алюминиевых сплавов в инертных газах. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры
ГОСТ 15164–78	Электрошлаковая сварка. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры
ГОСТ 15878–79	Контактная сварка. Соединения сварные. Конструктивные элементы и размеры
ГОСТ 16037–80	Соединения сварные стальных трубопроводов. Основные типы, конструктивные элементы и размеры
ГОСТ 16038–80	Сварка дуговая. Соединения сварные трубопроводов из меди и медно-никелевого сплава. Основные типы, конструктивные элементы и размеры
ГОСТ 16098–80	Соединения сварные из двухслойной коррозионностойкой стали. Основные типы, конструктивные элементы и размеры
ГОСТ 23240–78	Дуговая сварка в защитных газах. Соединения сварные под острыми и тупыми углами. Основные типы, конструктивные элементы и размеры
ГОСТ 27580–88	Дуговая сварка алюминия и алюминиевых сплавов в инертных газах. Соединения сварные под острыми и тупыми углами. Основные типы, конструктивные элементы и размеры
ГОСТ 28915–91	Сварка лазерная импульсная. Соединения сварные точечные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры
ГОСТ 29297–92	Сварка высокотемпературная и низкотемпературная. Пайка, пайкосварка металлов. Перечень и условные обозначения процессов

СРЕДСТВА БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА

ГОСТ 1361–69	Щитки и маски для защиты электросварщика. Основные параметры и технические требования
ГОСТ 9398–68	Костюм мужской брезентовый
ГОСТ 9402–70	Костюм мужской для работы в горячих цехах
ГОСТ 12.2.007.0–75	Оборудование электротехническое. Общие требования безопасности
ГОСТ 12.2.007.8–75	Оборудование электросварочное и для плазменной обработки. Требования безопасности
ГОСТ 12.3.003–86	Работы электросварочные. Требования безопасности
ГОСТ 12.4.001–73	Очки защитные. Термины и определения
ГОСТ 12.4.003–74	Очки защитные. Типы

ГОСТ 12.4.023–76	Средства индивидуальной защиты. Щитки защитные. Общие технические требования и методы испытаний
ГОСТ 12.4.035–78	Средства индивидуальной защиты. Щитки защитные для электросварщиков. Технические условия

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ И ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, РЕЗКИ ПЛАВЛЕНИЕМ

ГОСТ 1429.9–77	Припои оловянно-свинцовые. Методы определения химического состава (девять стандартов)
ГОСТ 3242–79	Швы сварных соединений. Методы контроля качества
ГОСТ 6996–66	Сварные соединения. Методы определения механических свойств
ГОСТ 7122–75	Швы сварные и металл наплавленный. Методы отбора проб для определения химического состава
ГОСТ 7512–82	Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Радиографический метод
ГОСТ 12503–75	Сталь. Методы ультразвукового контроля. Общие требования
ГОСТ 13585–68	Сталь. Метод валиковой пробы для определения допускаемых режимов дуговой сварки и наплавки
ГОСТ 14782–76	Швы сварных соединений. Методы ультразвуковой дефектоскопии
ГОСТ 18353–73	Контроль неразрушающий. Классификация методов
ГОСТ 18442–73	Качество продукции. Неразрушающий контроль. Капиллярные методы
ГОСТ 14.317–75	Правила разработки процессов контроля
ГОСТ 22368–77	Контроль неразрушающий. Классификация дефектности стыковых сварных швов по результатам ультразвукового контроля
ГОСТ 21397–75	Контроль неразрушающий. Комплект стандартных образцов для ультразвукового контроля полуфабрикатов и изделий из алюминиевых сплавов. Основные параметры и технические требования
ГОСТ 20426–75	Контроль неразрушающий. Радиационные методы дефектоскопии. Область применения
ГОСТ 20415–75	Контроль неразрушающий. Методы акустические. Общие положения
ГОСТ 20485–75	Пайка. Метод определения заполнения зазора припоем
ГОСТ 20486–75	Пайка. Метод определения растекания припоя
ГОСТ 20487–75	Пайка. Метод испытаний для оценки влияния жидкого припоя на механические свойства паяемого материала
ГОСТ 21547–76	Пайка. Метод определения температуры распайки
ГОСТ 21548–76	Пайка. Метод выявления и определения толщины прослойки химического соединения
ГОСТ 21549–76	Пайка. Метод определения эрозии паяемого материала
ГОСТ 23046–78	Соединения паяные. Метод испытания на удар
ГОСТ 23047–78	Соединения паяные. Метод испытания на растяжение
ГОСТ 23055–78	Контроль неразрушающий. Сварка металлов плавлением. Классификация сварных соединений по результатам радиографического контроля

ГОСТ 23240–78	Конструкции сварные. Метод оценки хладостойкости по реакции на ожог сварочной дугой
ГОСТ 23338–91	Сварка. Метод определения содержания водорода
ГОСТ 23870–79	Свариваемость сталей. Метод определения влияния сварки плавлением на основной металл
ГОСТ 23904–79	Пайка. Метод определения смачивания материалов припоями
ГОСТ 24715–81	Соединения паяные. Методы контроля качества
ГОСТ 25225–82	Контроль неразрушающий. Швы сварных соединений трубопроводов. Магнитографический метод
ГОСТ 26126–84	Контроль неразрушающий. Соединения паяные. Ультразвуковые методы контроля качества
ГОСТ 26388–84	Соединения сварные. Методы испытаний на сопротивляемость образованию холодных трещин при сварке плавлением
ГОСТ 26389–84	Соединения сварные. Методы испытаний на сопротивляемость образованию горячих трещин при сварке плавлением
ГОСТ 28277–89	Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Электрорадиографический метод. Общие требования
ГОСТ 30242–97	Дефекты соединений при сварке металлов плавлением. Классификация, обозначение и определения

II. ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНЫХ МЕЖДУНАРОДНЫХ СТАНДАРТОВ (ИСО), РЕКОМЕНДУЕМЫХ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА СВАРНЫХ И ПАЯНЫХ ИЗДЕЛИЙ И КОНСТРУКЦИЙ

В приложение II включены международные стандарты (ИСО), рекомендуемые для использования для всех видов сварки, пайки и термической резки, действовавшие до 1 января 2005 г.

ИСО объединены в следующие разделы:

Общие положения.

Методы контроля качества сварных и паяных соединений.

Оборудование для сварки и пайки (твердыми и мягкими припоями).

Электроды и присадочные материалы.

Технология сварки и пайки (твердыми и мягкими припоями).

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

581:1980	Свариваемость. Определение
2553:1984	Швы сварные. Условные обозначения на чертежах
3041:1975	Сварка. Категории эксплуатационных требований к сварным швам
3088:1975	Сварка. Основные характеристики, включаемые в технические требования на швы, полученные сваркой плавлением по стали
3834:2000	Комплексные сварочные процедуры сертификации производства сварочных конструкций на базе предприятий
4063:1990	Сварка высокотемпературная и низкотемпературная пайка, пайкосварка металлов. Перечень и условные обозначения процессов

6520:1982	Классификация дефектов сварных швов, полученных металлическим плавящимся электродом, и пояснительные замечания
6947:1980	Основные положения о сварном шве. Определение величины и углов наклона и поворота прямых швов для этих положений

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ И ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

146:1982	Материалы металлические. Испытание на твердость. Поверка приборов для определения твердости по Виккерсу от HV 0,2 до HV 100
156:1982	Материалы металлические. Испытание на твердость. Поверка испытательных машин для определения твердости по Бринеллю
Р-293-1981	Сталь. Метод испытания на ползучесть при высоких температурах (прерывистые нагрузки и температура)
Р-294-1981	Сталь. Непрерывное испытание на ползучесть при повышенных температурах
Р-295-1981	Сталь. Методы определения длительной прочности при повышенных температурах
409-1982	Материалы металлические. Испытание на твердость. Таблицы величин твердости по Виккерсу, используемые при испытаниях на плоских поверхностях. Часть 1
409-2-1982	Материалы металлические. Испытание на твердость по Виккерсу для использования при испытаниях, проводимых на плоских поверхностях. Часть 2
410-1982	Материалы металлические. Испытание на твердость. Таблицы величин твердости по Бринеллю, используемые при испытаниях, проводимых на плоских поверхностях
Р-442-1985	Копры маятниковые для ударных испытаний стали. Методы поверки
474-1988	Материалы металлические. Испытание на твердость. Поверка образцовых мер твердости для твердомеров Роквелла (шкалы A, B, C, D, E, … H, K)
615:1967	Методы определения механических свойств металла, наплавленного электродами диаметром 3,15 мм и более
640:1984	Материалы металлические. Испытание на твердость, калибрование образцовых мер твердости, используемых для поверки твердомеров Виккерса от HV 0,2 до HV 100
674:1988	Материалы металлические. Испытание на твердость. Калибрование аттестованных образцов, используемых в приборах для определения твердости по Роквеллу (шкалы A, B, C, D, … H, K)
698:1975	Прутки присадочные для пайки-сварки. Методы определения прочности соединения со сталью, чугуном и другими металлами
716:1986	Определение твердости по Роквеллу (шкалы A, B, C, D, E, … H, K)
726: 1982	Материалы металлические. Испытание на твердость. Калибрование аттестованных образцов, используемых в приборах для определения твердости по Бринеллю
783: 1988	Сталь. Механические испытания при повышенных температурах. Определение нижнего предела текучести и остаточной деформации
1079:1989	Материалы металлические. Испытание на твердость. Поверка приборов для определения поверхностей твердости по Роквеллу

	(шкалы 15, 30, 45, 15T, 30T, 45T)
1106-1:1984	Метод радиографического контроля сварных соединений, полученных сваркой плавлением. Часть 1. Сварные стыковые соединения, полученные сваркой плавлением в стальных плитах толщиной до 50 мм
1106-2:1985	Метод радиографического контроля сварных соединений, полученных сваркой плавлением. Часть 2. Сварные стыковые соединения, полученные сваркой плавлением в стальных плитах толщиной от 50 до 200 мм
1106-3:1984	Рекомендуемый метод радиографического контроля сварных соединений, полученных сваркой плавлением. Часть 3. Круговые соединения, полученные сваркой плавлением, для стальных труб с толщиной стенок до 50 мм
1355:1989	Материалы металлические. Калибрование аттестованных образцов, используемых в приборах для определения поверхностной твердости по Роквеллу со шкалами 15, 30, 45, 15T, 30T, 45T
2401:1972	Электроды покрытые. Метод определения КПД, коэффициента перехода металла стержня в шов и коэффициента наплавки
2437:1972	Рекомендуемый метод рентгенографического контроля стыковых соединений, полученных сваркой плавлением алюминия, магния и их сплавов толщиной от 5 до 50 мм
2504:1973	Контроль радиографический и условия просмотра рентгеновских снимков сварных швов. Применение рекомендуемых образцов эталонов чувствительности
3651-1:1998	Стали и сплавы коррозионностойкие. Методы испытания на стойкость к межкристаллитной коррозии
3690:1977	Сварка. Определение содержания водорода в наплавленном металле при использовании покрытых электродов для мягких и низколегированных сталей
3738:1988	Сплавы твердые. Испытание на твердость по Роквеллу (шкала А). Подготовка и калибрование аттестованных образцов
3777:1976	Контроль радиографический полученных точечной сваркой швов для алюминия и алюминиевых сплавов. Рекомендуемые методы
4136:1989	Соединения стыковые по стали, полученные сваркой плавлением. Испытание на растяжение образца с поперечным швом
4965:1979	Машины для испытания на усталость при осевой нагрузке. Калибрование динамических усилий. Методика с применением тензометра
5173:1981	Соединения стыковые по стали, полученные сваркой плавлением. Испытание образца с поперечным швом на загиб корнем шва наружу и лицевой поверхностью шва наружу
5177:1981	Соединения стыковые по стали, полученные сваркой плавлением. Испытание на боковой загиб образца с поперечным швом
5179:1983	Исследование способности к пайке с помощью испытательного образца с изменяющимся зазором
5187:1985	Сварка и аналогичные процессы. Соединения, паянные мягкими и твердыми припоями. Методы механических испытаний
5187.6:1985	Методы механических испытаний соединений, паянных мягкими и твердыми припоями
7500-1:1986	Материалы металлические. Поверка машин для статических одноосных испытаний. Часть 1

7539-1:1987	Металлы и сплавы. Общие требования к методам испытаний на коррозионное растрескивание
7539-2:1989	Металлы и сплавы. Испытания на коррозионное растрескивание образцов в виде изогнутого бруса
7539-4:1989	Металлы и сплавы. Испытания на коррозионное растрескивание образцов при одноосном растяжении
8249:1985	Сварка. Определение ферритного числа в аустенитном металле, наплавленном электродами из хромоникелевой стали
8491:1986	Материалы металлические. Трубы (отрезки). Испытание на изгиб
8492:1986	Материалы металлические. Трубы. Испытание на сплющивание
8568:1989	Удар механический. Машины для испытаний. Характеристики и эксплуатационные качества
9302:1989	Трубы стальные бесшовные и сварные (кроме труб, полученных дуговой сваркой под флюсом) напорные. Электромагнитный метод контроля герметичности
9303:1989	Трубы стальные бесшовные и сварные (кроме труб, полученных дуговой сваркой под флюсом) напорные. Ультразвуковой контроль всей периферийной поверхности для обнаружения продольных дефектов
9304:1989	Трубы стальные бесшовные и сварные (кроме труб, полученных дуговой сваркой под флюсом) напорные. Контроль методом вихревых токов для обнаружения дефектов
9402:1989	Трубы стальные бесшовные и сварные (кроме труб, полученных дуговой сваркой под флюсом) напорные. Контроль всей периферийной поверхности труб из ферромагнитной стали путем исследования магнитных полей рассеяния для обнаружения продольных дефектов
9591:1989	Сплавы алюминиевые и магниевые. Методы ускоренного испытания на коррозионное растрескивание
9764:1989	Трубы стальные, полученные электрической контактной сваркой и индукционной сваркой, напорные. Ультразвуковой контроль шва для обнаружения продольных дефектов

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СВАРКИ И ПАЙКИ (ТВЕРДЫМИ И МЯГКИМИ ПРИПОЯМИ)

669:1981	Оборудование для контактной сварки. Номинальные характеристики
693:1982	Размеры заготовок для сварочных роликов
700:1982	Источники питания для ручной дуговой сварки металлическими покрытыми электродами и для дуговой сварки вольфрамовым электродом в среде инертного газа
865:1981	Пазы в плитах машин для рельефной сварки
1089:1980	Электродержатели конических машин для точечной сварки
2400:1972	Швы сварные по стали. Эталонный блок для калибрования оборудования ультразвукового контроля
2503:1983	Регуляторы для газовых баллонов, применяемых при сварке, резке и аналогичных процессах
3253:1975	Соединения шлангов оборудования для сварки, резки и анало-

	гичных процессов
3821:1977	Сварка. Гибкие шланги для газовой сварки и аналогичных процессов
4850:1979	Устройства для защиты глаз индивидуальные, используемые при сварке и аналогичных процессах. Фильтры. Требования к применению и коэффициенту пропускания
5171:1980	Манометры, применяемые при сварке, резке и аналогичных процессах
5172:1977	Горелки ручные газовые для сварки и резки
5175:1987	Оборудование для газовой сварки, резки и аналогичных процессов. Защитные устройства для горючих газов и кислорода или сжатого воздуха
5183-1:1988	Сварка контактная точечная. Патроны для закрепления электрода с наружным конусом 1:10, часть 1. Хвостовики с конусностью 1:10
5183-2:1988	Сварка контактная точечная. Патроны для закрепления электрода с наружным конусом 1:10, часть 2. Цилиндрические хвостовики для электродов с торцевым упором
5621:1979	Концы съемные электродов для контактной точечной сварки
5822:1988	Оборудование для точечной сварки. Калибры – пробки и кольцевые калибры для проверки конусов
5826:1983	Трансформаторы для контактных сварочных машин. Общие технические условия, применяемые для всех трансформаторов
5827:1983	Сварка точечная. Упоры и зажимы для электродов
5828:1983	Оборудование для контактной сварки. Вторичные соединительные кабели с зажимами, присоединенными к скобкам с водяным охлаждением. Размеры и характеристики
5829:1984	Сварка контактная точечная. Электродержатели с внутренним конусом
5830:1984	Сварка контактная точечная. Съемные концы электродов с посадкой по наружной поверхности
7284:1984	Оборудование для контактной сварки. Специальные требования к трансформаторам с двумя независимыми вторичными обмотками для многоточечной сварки, применяемой в автомобильной промышленности
7286:1986	Обозначения условные графические оборудования для контактной сварки
7931:1985	Колпачки и втулки изоляционные оборудования для контактной сварки
7963:1985	Швы сварные по стали. Эталонный образец № 2 для ультразвукового контроля швов
8167:1989	Рельефы для контактной сварки
8430-1:1988	Сварка контактная точечная. Электродержатели. Часть 1. Хвостовики с конусностью 1:10
8430-2:1988	Сварка контактная точечная. Электродержатели. Часть 2. Хвостовики с конусом Морзе
8430-3:1988	Сварка контактная точечная. Электродержатели. Часть 3. Цилиндрические хвостовики с торцевым упором
9012:1988	Горелки газовоздушные ручные. Технические условия
9090:1989	Газонепроницаемость аппаратов для газовой сварки и аналогич-

ных процессов

9313:1989 Оборудование для контактной точечной сварки. Охлаждение трубки

9539:1988 Материалы, применяемые в оборудовании для газовой сварки, резки и аналогичных процессов

ЭЛЕКТРОДЫ И ПРИСАДОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

544:1989 Металлы присадочные для ручной сварки. Требования к размерам

636:1989 Прутки присадочные сплошные голые для газовой сварки и дуговой сварки вольфрамовым электродом в среде инертного газа для наплавления на нелегированной или низколегированной стали. Кодирование

864:1988 Сварка дуговая. Проволока электродная сплошная и трубчатого сечения с осаждением углеродистой и марганцовистоуглеродистой стали. Размеры проволоки, катушек, ободьев и бухт

1071:1983 Электроды покрытые для ручной дуговой сварки чугуна. Система условных обозначений

2560:1973 Электроды покрытые для ручной дуговой сварки малоуглеродистых и низколегированных сталей. Система условных обозначений

3580:1975 Электроды покрытые для ручной дуговой сварки стойких к ползучести сталей

3581:1976 Электроды покрытые для ручной дуговой сварки коррозионностойких и других высоколегированных сталей. Система условных обозначений

3677:1976 Металлы присадочные для сварки и пайки. Система условных обозначений

5182:1978 Материалы электродов для контактной сварки вспомогательного оборудования

5184:1979 Электроды для контактной точечной сварки

6847:1985 Электроды покрытые для ручной дуговой сварки. Наплавка слоя металла для химического анализа

6848:1984 Электроды вольфрамовые для дуговой сварки в среде инертного газа и плазменной резки и сварки. Обозначение

ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ И ПАЙКИ (ТВЕРДЫМИ И МЯГКИМИ ПРИПОЯМИ)

581:1980 Свариваемость. Определение

857:1979 Определения процессов сварки

3834:1978 Сварка. Факторы, используемые для оценки предприятий, применяющих сварку в качестве основного способа производства

4063:1978 Сварка, высокотемпературная пайка, пайка-сварка и низкотемпературная пайка металлов. Перечень процессов для графического изображения на чертежах

6213:1989 Сварка. Факторы, которые необходимо учитывать для обеспечения качества сварных конструкций

6761:1981 Трубы стальные. Разделка концов труб и фитингов под сварку

III. ХАРАКТЕРИСТИКА ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ И ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Наименование	Назначение	Технические характеристики	Изготовитель, контактные данные
Инвертированный универсальный металлографический микроскоп Axiovert 200 MAT/M	Исследование различных материалов в отраженном свете. Проведение ана-лиза крупногабаритных образцов	ICS-оптика, общее увеличение 12,5–3200x Методы исследования: светлое поле, темное поле, ДИК и С-ДИК, поляризация, люминесценция, 4 выхода для установки фото-видеосистем. Дисплей с указанием режима работы	Carl Zeiss Германия, г. Геттинген, тел. +49 180 3336 334, факс +49 551 5060 464. Контакты в Москве: тел. (495) 933-51-51, факс (495) 933-51-55, www.zeiss.ru office@zeiss-msk.ru
Сканирующие электронные микроскопы серии EVO	Исследования в области материаловедения	Разрешение: 3,0 нм (вольфрамовый катод); 2,0 нм (гексаборид лантана); 4,5 нм (в режиме сверхнизкого вакуума). Увеличение: от 5x до 1 000 000x. Возможность оснащения аналитическим оборудованием: спектрометрами, кристаллографическими приставками, рентгеновскими трубками, держателями для проведения экспериментов в динамике (сжатие, растяжение, нагрев, охлаждение и т.п.)	Carl Zeiss Германия, г. Геттинген, тел. +49 180 3336 334, факс +49 551 5060 464. Контакты в Москве: тел. (495) 933-51-51, факс (495) 933-51-55, www.zeiss.ru office@zeiss-msk.ru
Сканирующий электронный микроскоп VEGA2 TS 5136LM	То же	Разрешение: 3,0 нм в режиме высокого вакуума и 3,5 нм в режиме низкого вакуума. Большая камера для образцов. Активная пневмоподвеска. Возможность оснащения аналитическим оборудованием: спектрометрами, кристал-лографическими приставками, рентгеновскими трубками, держателями для проведения экспериментов в динамике (сжатие, растяжение, нагрев, охлаждение и т.п.)	TESCAN Чехия, г. Брно, тел. +420 547130411, факс +420 547130415. Контакты в С.-Петер-бурге: тел. (812) 322-58-99, факс: (812) 322-58-98, www.exiton-analytic.ru sales@exiton-analytic.ru
Оптический эмиссионный спектрометр OBLF RS 1000	Высокоточное определение химического состава металлов на одной основе	Максимум 30 аналитических каналов	OBLF Германия, г. Виттен, тел. +49 2302 98 79-0, факс +49 2302 98 79-80. Контакты в Москве: тел. (095) 152-0390, факс (095) 152-1816, www.nalkho.com info@nalkho.com
Оптический эмиссионный спектрометр OBLF QSN 750	Высокоточное определение химического состава металлов на нескольких основах	Максимум 60 аналитических каналов	OBLF

Продолжение приложения III

Наименование	Назначение	Технические характеристики	Изготовитель, контактные данные
Спектрометры рентгеновские «СПЕКТРОСКАН МАКС-FC» и «СПЕКТРОСКАН МАКС-G»	Определение содержания химических элементов в различных веществах, находящихся в твердом, порошкообразном или растворенном состояниях, а также нанесенных на поверхности и осажденных на фильтры	Диапазон определяемых элементов – от ^{20}Ca до ^{94}Pu	НПО «Спектрон», г. С.-Петербург, тел. (812) 325-8183, факс (812) 325-8503, www.spectron.ru to@spectron.ru
Ультразвуковой дефектоскоп УД2-70	Контроль продукции на наличие дефектов типа нарушения сплошности и однородности материалов, полуфабрикатов, готовых изделий и сварных соединений; измерение глубины залегания и координат дефектов, а также отношения амплитуд сигналов от дефектов	Диапазон толщин контролируемого материла (по стали) 2–5000 мм; диапазон рабочих температур от –20 до +50 °С; масса с аккумулятором – не более 3 кг	ОАО ИТЦ «Прометей». МО, г. Чехов, тел. (Чехов) (09672) 6-27-84, тел. (Москва) (495) 191-21-40, факс 946-28-10, www.prometey.ru info@prometey.ru
Ультразвуковой дефектоскоп УД2-12	То же	Толщина просвечиваемой стали 1–1000 мм; диапазон рабочих температур от –10 до +50 °С; масса с аккумуляторной батареей – 8,4 кг	То же
Вихретоковый дефектоскоп ВД-87НСт	Обнаружение поверхностных дефектов в материалах в широком диапазоне электропроводности, включая ферромагнитные стали и сплавы, а также обнаружение подповерхностных дефектов в немагнитных материалах, титановых, нержавеющих и алюминиевых сплавах	Порог чувствительности к поверхностным дефектам: глубина 0,2 мм; ширина 0,1 мм. Работоспособность при температуре окружающей среды от 5 до 50 °С. Масса – не более 8 кг	» »
Вихретоковый дефектоскоп ВД-89НП	Поиск, обнаружение и оценка поверхностных трещин на изделиях различной формы из ферромагнитных и немагнитных металлов и сплавов: трубах, отливках, деталях машин	Индикация результата измерений: цифровая, цифровая+графическая. Объем памяти для запоминания результатов 7500. Радиус кривизны поверхности > 5 мм. Масса 0,4 кг	» »

Продолжение приложения III

Наименование	Назначение	Технические характеристики	Изготовитель, контактные данные
Дефектоскоп МД-6	Выявление поверхностных дефектов типа нарушения сплошности металла магнитопорошковым методом на локальных участках крупногабаритных деталей	Работоспособность при температуре окружающей среды от –40 до +50 °С. Средний размер контролируемого при дефектации участка на поверхности детали 120×80 мм. Масса в комплекте – не более 5 кг	ОАО ИТЦ «Прометей» МО, г. Чехов, тел. (Чехов) (09672) 6-27-84, тел. (Москва) (495) 191-21-40, факс 946-28-10, www.prometey.ru info@prometey.ru
Рентгеновские аппараты с постоянным анодным напряжением типа «РАПАН»	Радиографический контроль сварных соединений изделий машиностроения, трубопроводов АЭС, нефте- и газопроводов	Анодное напряжение: РАПАН 160/50, РАПАН 160/50п – 120–160 кВ; РАПАН 200/100, РАПАН 120/100п – 120–200 кВ. Мощность дозы (на расстоянии 500 мм): РАПАН 160/50 – 0,8 Р/мин; РАПАН 160/50п – 0,5 Р/мин; РАПАН 200/100 – 1,5 Р/мин; РАПАН 120/100п – 0,7 Р/мин. Толщина просвечиваемой стали: РАПАН 160/50п – 12 мм; РАПАН 200/100 – 25 мм; РАПАН 120/100п – 20 мм. Масса: РАПАН 160/50, РАПАН 160/50п – 4,5 кг; РАПАН 200/100 – 8,5 кг; РАПАН 120/100п – 9,5 кг. Рабочая температура от –40 до +40 °С	То же»
Рентгеновские аппараты Арина-3, Арина-05-2М	Рентгенографический контроль качества сварных соединений магистральных газонефтепроводов, различных металлоконструкций в нестационарных условиях	Рабочее напряжение на рентгеновской трубке: Арина-3 – 220 кВ; Арина-05-2М – 160 кВ. Максимальная толщина просвечиваемой стали: Арина-3 – 50 мм; Арина-05-2М – 40 мм. Масса излучателя 5,5 кг; масса пульта управления 4,5 кг	» »
Динамический твердомер ТДМ-1	Измерение твердости конструкционных и углеродистых сталей, нержавеющих сталей и сплавов из цветных металлов в лабораторных, цеховых и полевых условиях	Пределы измерения: шкала HRC – 20–70 (погрешность ±2.0); шкала НВ – 90–450 (погрешность ±15); шкала HV – 375–850 (погрешность ±15). Диапазон рабочих температур от 0 до +45 °С. Масса – не более 0,3 кг	» »
Динамический твердомер ТДМ-2	Измерение твердости конструкционных и углеродистых сталей, нержавеющих сталей и сплавов из цветных металлов в лабораторных, цеховых и полевых условиях	Пределы измерения: шкала HRC – 20–70 (погрешность ±2.0); шкала НВ – 90–450 (погрешность ±15). Диапазон рабочих температур от –20 до –50 °С. Масса – не более 0,4 кг	» »

Продолжение приложения III

Наименование	Назначение	Технические характеристики	Изготовитель, контактные данные
Твердомер HR-521	Измерение твердости по Роквеллу и Роквеллу поверхностного типа	Шкала твердости устанавливается автоматически на сенсорном экране; компенсация цилиндрических и сферических поверхностей; автоматический перевод во все шкалы твердостей или в сопротивление растяжению; вывод в различном формате данных, включая SPC и RS-232C	Mitutoyo Япония, г. Kawasaki. Контакты в Москве: тел. (095) 152-0390, факс (095) 152-1816, www.nalkho.com info@nalkho.com
Твердомер AR-10	Измерение твердости металлов по Роквеллу	Тестовая нагрузка 588,4 Н, 980,7 Н, 1471 Н. Выбор тестовой нагрузки – весовая замена. Цена деления шкалы 0,5. Максимальная высота пробы 140 мм на плоской опоре, 150 мм на круглом столе. Максимальная глубина образца 115 мм от центра оси индентора	То же
Твердомер Роквелла модели 600MRD и 600MRD/s	Измерение твердости металлов по Роквеллу	Нагрузка 30; 60 и 150 кгс. Точность измерения 0,1 единицы. Возможность выбора времени приложения нагрузки. Ведение статистики по результатам измерений, перевод шкал	INSTRON США. Контакты в Москве: тел. (495) 788-55-23, www.novatest.ru info@novatest.ru
Твердомер Виккерса модели 430SVD и 450SVD	Измерение твердости металлов по Виккерсу	Нагрузки 0,3; 0,5; 1; 3; 5; 10; 20; 30 и 50 кгс. Разрешающая способность измерителя 0,1 мкм. Автоматическое приложение нагрузки. Ведение статистики по результатам измерений, перевод шкал	То же
Твердомер Бринелля модели 3000BLD	Измерение твердости металлов по Бринеллю	Нагрузки 187,5; 250; 500; 750; 1000; 1500; 3000 кгс. Точность измерения 0,1 единицы. Автоматическое приложение нагрузки. Ведение статистики по результатам измерений, перевод шкал	» »
Универсальный твердомер «DIGI-TESTOR»	Измерение твердости металлов	Датчик нагрузки для испытаний от 1 до 250 кгс. Автоматическое приложение нагрузки; оптическая система Zeiss, увеличение от ×20 до ×250. Система автофокусировки изображения. Ведение статистики, возможность перевода шкал	» »

Продолжение приложения III

Наименование	Назначение	Технические характеристики	Изготовитель, контактные данные
Твердомеры портативные INSTRON	Измерение твердости металлов в лабораторных или полевых условиях	Точность измерений 0,5 %. Возможность вывода данных на ПЭВМ. Возможность статистики и перевода шкал	INSTRON США. Контакты в Москве: тел. (495) 788-55-23, www.novatest.ru info@novatest.ru
Универсальные гидравлические машины для статических испытаний INSTRON, серия LX, серия DX, серия KN	Проведение испытаний на растяжение, сжатие или изгиб при высоких нагрузках (от 30 тс)	Нагружающая способность до 5 МН (500 тс). Возможность комплектования дополнительными принадлежностями: экстензометрами, разнообразными типами захватов и приспособлений, высокотемпературными печами, температурными камерами для работы от криогенных до повышенных температур, средствами видеонаблюдения, автоматическими роботами-податчиками образцов	То же
Сервогидравлические машины для циклических испытаний INSTRON, серия 8870, серия 8800	Проведение испытаний на знакопеременную усталость материалов и узлов	То же	» »
Машина для усталостных испытаний на изгиб INSTRON моделей SF-01U, SF-1U, SF-2U и SF-10U	Проведение усталостных испытаний на изгиб материалов и узлов	Нагружающая способность до 50 кН (5 тс)	» »
Машины для многоосных циклических испытаний INSTRON	Проведение многоосных циклических испытаний	Высокоточный цифровой контроллер с частотой обработки данных 5 кГц. Мощное программное обеспечение FastTrack	» »
Сервоэлектрические машины для циклических испытаний INSTRON, серия 8860	Проведение высокоточных испытаний на малоцикловую усталость, термомеханическую усталость и ползучесть	Нагружающая способность до 100 кН (10 тс). Возможность комплектования дополнительными принадлежностями: экстензометрами, разнообразными типами захватов и приспособлений, высокотемпературными печами, температурными камерами для работы от криогенных до повышенных температур, средствами видеонаблюдения, автоматическими роботами-податчиками образцов	» »

Продолжение приложения III

Наименование	Назначение	Технические характеристики	Изготовитель, контактные данные
Машина для усталостных испытаний на изгиб с вращением INSTRON модели R.R. Moore	Проведение высокоскоростных усталостных испытаний металлических материалов по стандартной схеме нагружения – изгиб с вращением	Испытания круглых образцов диаметром до 10 мм в диапазоне частот вращения от 500 до 10 000 об/мин. Возможность установки на машину высокотемпературной печи до +1000 °С	INSTRON США. Контакты в Москве: тел. (495) 788-55-23, www.novatest.ru info@novatest.ru
Машины для испытаний на кручение металлических образцов INSTRON	Проведение испытаний на многократное скручивание и усталостные испытания на знакопеременное вращение	Возможность комплектования высокотемпературными печами (до 1200 °С)	То же
Машины для испытаний металлов на ползучесть INSTRON, серия М3	Испытания металлов на ползучесть	Возможность поддержания скорости деформации с высокой точностью, возможность проведения испытаний при температурах до +1200 °С	» »
Копры с падающим грузом INSTRON, серия Dynatup	Проведение ударных испытаний металлических образцов по методикам Шарпи, Изод, а также испытаний на трехточечный изгиб, прокол и многих других видов испытаний	Скорость удара – до 20 м/с; энергия удара – до 27 000 Дж; энергия удара при среднем молоте 4,6–300 Дж. Масса большого молота – до 1180 кг. Максимальная высота падения молота – до 2,5 м. Скорость возврата молота – 1600 мм/мин. Точность измерения скорости удара ±2 %. Возможность использования дополнительных пружин и низкотемпературной камеры	» »
Копры маятниковые для ударных испытаний INSTRON, серия Metrocom	Проведение ударных испытаний металлических образцов по методикам Шарпи и Изод	Разрешающая способность показаний 0,1 Дж. Совместимость с программным обеспечением	» »
Лаборатория контроля качества сварных соединений	Техническое обеспечение работ по контролю качества сварных соединений стальных конструкций методами рентгенографии и ультразвуковой дефектоскопии в заводских и монтажных условиях	Работоспособность при температуре окружающей среды – от 0 до +40 °С Масса – не более 350 кг. Лаборатория оснащена ультразвуковым дефектоскопом, рентгеновским импульсным аппаратом, принадлежностями для проведения контроля, дозиметрической аппаратурой, эталонами чувствительности, оснасткой и принадлежностями для обработки радиографической пленки, измерительными инструментами и приборами	ОАО ИТЦ «Прометей», МО, г. Чехов, тел. (Чехов) (09672) 6-27-84, тел. (Москва) (495) 191-21-40, факс 946-28-10, www.prometey.ru info@prometey.ru

Продолжение приложения III

Наименование	Назначение	Технические характеристики	Изготовитель, контактные данные
Шлифовально-полировальные станки серии «GRIPO»	Подготовка шлифов	GRIPO 1:1 диск ∅ 200/250 мм, одна скорость 300 об/мин; GRIPO 1V:1 диск ∅ 200/250 мм, переменная скорость 50–600 об/мин; GRIPO 2: 2 диска ∅ 200/250 мм, одна скорость 300 об/мин; GRIPO 2V: 2 диска ∅ 200/250 мм, переменная скорость 50–600 об/мин; GRIPO 2 M: 2 диска ∅ 200/250 мм, 2 мотора, 2 скорости 150/300 об/мин; GRIPO 300 1V: 1 диск ∅ 300 мм, переменная скорость 50–600 об./мин	Metkon, Турция, г. Бурса, тел. +90 224 2611840, факс +90 224 2611844. Контакты в Москве: тел. (095) 152-0390, факс (095) 152-1816, www.nalkho.com info@nalkho.com
Шлифовально-полировальные станки серии «DIGISET»	Автоматическая и/или ручная подготовка металлографических шлифов	DIGISET 1V: 1 диск ∅ 200/250 мм, переменная скорость 50–600 об/мин; DIGISET 2V: 2 диска ∅ 200/250 мм, переменная скорость 50–600 об/мин; DIGISET 300 1V: 1 диск ∅ 300 мм, переменная скорость 50–600 об/мин	То же