

**А. Н. СМЕРНОВ**

**НЕРАЗРУШАЮЩИЕ И РАЗРУШАЮЩИЕ ИСПЫТАНИЯ  
СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

Учебное пособие

**Кемерово 2009**

Федеральное агентство по образованию  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Кузбасский государственный технический университет»

А. Н. СМИРНОВ

## **НЕРАЗРУШАЮЩИЕ И РАЗРУШАЮЩИЕ ИСПЫТАНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

Учебное пособие

Допущено УМО вузов по университетскому политехническому образованию в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по направлению подготовки дипломированных специалистов 150200 «Машиностроительные технологии и оборудование» специальности 150202 «Оборудование и технология сварочного производства»

Кемерово 2009

УДК 621.79: 620.179.16

*Рецензенты:*

Доктор физико-математических наук, профессор, академик МАН ВШ, заведующий кафедрой физики Томского государственного архитектурно-строительного университета Э. В. Козлов

Доктор технических наук, профессор кафедры физических методов и приборов контроля качества Томского политехнического университета Б. И. Капранов

**Смирнов, А. Н.** Неразрушающие и разрушающие испытания сварных соединений : учеб. пособие / А. Н. Смирнов ; ГУ КузГТУ. – Кемерово, 2009. – 187 с.

ISBN 978-5-89070-656-0

В учебном пособии изложены основы теории и практики неразрушающих и разрушающих испытаний и контроля качества основного металла и сварных соединений. В отдельную главу вынесены наиболее широко распространенные и развивающиеся методы неразрушающего контроля – акустические методы. Детально, с примерами исследований рассмотрены спектрально-акустический и акустико-эмиссионный методы.

Для студентов специальности 150202 «Оборудование и технология сварочного производства», а также для студентов других машиностроительных и строительных специальностей, аспирантов и специалистов по сварке, неразрушающему контролю и технической диагностике.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Кузбасского государственного технического университета.

УДК 621.79:62 620.179.16

© ГУ КузГТУ, 2009

© Смирнов А. Н., 2009

ISBN 978-5-89070-656-0

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Данное пособие посвящено изучению и анализу широкого круга методов неразрушающих и разрушающих испытаний сварных соединений. Практика показывает, что аварии и техногенные катастрофы, происходящие при разрушении элементов конструкций различных технических устройств, очень часто связаны с наличием в них дефектов. Детальному описанию дефектов металла посвящено учебное пособие «Металловедение сварки и дефекты металла». Для эффективного выявления дефектов используют различные виды контроля, а специалисты по любому виду контроля должны уметь выбрать подход, разработать методику проведения испытания и создать необходимые приспособления.

Специалистам высокой квалификации, проводящим испытание для достижения конечной цели, необходимо:

- знать применяемые материалы для сварки, их свойства и характеристики, иметь информацию о влиянии условий изготовления, эксплуатации, режимов термообработки на эти свойства;
- иметь информацию и знать причины образования дефектов, пути предотвращения, способы их устранения и механизмы разрушения сварных соединений;
- знать взаимосвязи между механическими свойствами, структурно-фазовым состоянием и параметрами различных физических процессов, происходящих при взаимодействии физических полей с изучаемым материалом;
- иметь представление об основных физических принципах различных методов неразрушающего контроля (НК);
- знать достоинства и недостатки, пределы применимости каждого из многочисленных методов НК;
- разбираться в способах регистрации, хранения и обработки данных, получаемых с использованием различных методов НК.

На основании вышеизложенного, нормативные документы по сертификации специалистов НК (национальные, региональные, международные) требуют от аттестуемых глубоких знаний как по материаловедению, так и по причинам, типам и вероятным зонам возникновения дефектов. Специалист по НК, не знающий и не понимающий технологий изготовления изделий, а также причин

возникновения дефектов при изготовлении и эксплуатации, не сможет надежно, качественно и экономно их проконтролировать.

Специалисты сварочного производства обязаны не хуже сертифицированного персонала по НК знать достоинства и недостатки всех существующих методов контроля качества сварных соединений, области их применения, способы оценки результатов контроля. Эти знания необходимы в первую очередь инженеру-практику, который непосредственно выполняет руководство сварочными работами при изготовлении, монтаже, ремонте, реконструкции технических устройств опасных производственных объектов. Непосредственно руководитель сварочных работ несет ответственность за качество выполненных работ, за качество сварных соединений. Вот поэтому с целью предотвращения конфликтных ситуаций контроль качества сварных соединений специалистами НК желательно проводить при участии руководителя сварочных работ.

Данное учебное пособие содержит основы теории и практики неразрушающих и разрушающих испытаний сварных соединений и основного металла. Здесь изложены современные и перспективные методы и способы контроля качества сварных соединений.

Учебное пособие соответствует учебному плану специальности 150202 «Оборудование и технология сварочного производства». Перед студентами ставятся следующие задачи: ознакомление с классификацией и выбором методов НК; изучение физических основ радиационного, ультразвукового, магнитного, вихретокового, акустико-эмиссионного и других методов НК; изучение научных подходов к проблеме качества сварных соединений; изучение методик исследования тонкого строения и структуры сталей и сварных соединений, определение их разнообразных свойств (механических, физических, эксплуатационных).

Учебное пособие обобщает многочисленные результаты в анализируемой области и отражает результаты научных исследований по данной проблеме, выполняемых автором на кафедре «Технология машиностроения» в ГУ КузГТУ. При написании учебного пособия использован опыт преподавания соответствующей дисциплины в ГУ КузГТУ.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время улучшение качества выпускаемой продукции является одной из важнейших задач нашей экономики. Современное производство не в полной мере решает проблемы обеспечения качества продукции, так как даже при хорошо отработанной технологии изготовления материалов и изделий (технических устройств опасных производственных объектов – ТУОПО) возможны существенные отклонения от допустимых норм. В связи с этим большое значение приобретают неразрушающие и разрушающие методы контроля физико-механических и других свойств материалов и изделий. Во многих отраслях промышленности неразрушающий контроль выделен в самостоятельный технологический процесс, так как затраты на контроль в большинстве случаев соизмеримы с затратами на изготовление самого изделия. Благодаря контролю продукции на всех этапах изготовления и приемки, затраты радикально быстро окупаются из-за повышения качества. Понятие **качества** изделий и сварных соединений, с одной стороны, находится в непрерывном развитии, а с другой стороны – настолько обширно, что не представляется возможным рекомендовать даже для частичной его оценки какой-либо один физический метод контроля. Качество продукции – это «совокупность свойств продукции, обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением» (ГОСТ 15467). Высококачественное изделие должно обладать постоянством химического состава и физических свойств, макро- и микроструктуры, неизменными геометрическими размерами и повышенными механическими и технологическими характеристиками.

*Для объективной оценки перечисленных параметров необходим комплексный подход, использующий разные физические методы исследования.* Только разные по принципу взаимодействия с веществом методы контроля могут исключать недостатки исследования, взаимно дополнять друг друга и обеспечивать получение необходимой информации о качестве изделия (ТУОПО). Над созданием новых и совершенствованием существующих ме-

тодов и средств неразрушающего контроля работает большое число школ, фирм и организаций в России и за ее пределами.

Зарождение неразрушающего контроля связывают обычно с временем открытия в ноябре 1895 года рентгеновских лучей, которые позволили обнаружить металлический предмет в закрытой деревянной коробке и неоднородность внутренней структуры металла. Значительная роль в развитии методов неразрушающего контроля принадлежит российским ученым Н. С. Акулову, Н. П. Алешину, И. Н. Ермолову, Л. Г. Меркулову, М. Н. Михееву, С. Т. Назарову, С. В. Румянцеву, Н. В. Химченко и многим другим. В настоящее время одним из основных методов неразрушающего контроля является **акустический**. В наиболее развитых странах на его долю приходится 70–75 %. Метод ультразвуковой дефектоскопии впервые был предложен в 1928 году российским ученым проф. С. Я. Соколовым. Этот метод получил в России наибольшее развитие при контроле качества сварных соединений. Возрастающие требования к качеству выпускаемой продукции, в частности к качеству сварных соединений, выдвигают задачу подготовки специалистов сварочного производства, *владеющих необходимыми знаниями не только в области сварочных технологий, оборудования, материалов, но и методов и средств неразрушающего и разрушающего контроля.*

Изучению дисциплины «Методы контроля сварных соединений» должны предшествовать курсы, в которых излагаются основы физики, металловедения, прочности и пластичности, производства сварных конструкций и других технических дисциплин.

С целью четкого понимания перспектив неразрушающего контроля необходимо рассмотреть существующие наиболее важные направления его развития.

**1. Интеллектуализация методов и средств неразрушающего контроля и диагностики (НК и Д).** Интеллектуализация методов НК и Д в современных условиях связана с широким внедрением компьютерных технологий, разработкой специализированных программ и алгоритмов тестового и функционального диагностирования. Все вышеизложенное требует разработки и изготовления новых образцов аппаратуры с множеством специальных процессоров и устройств. Для постоянного контроля за техниче-

ским состоянием основного металла и сварных соединений длительно-работающих технических устройств создаются многомашинные испытательные комплексы, позволяющие проводить оценку остаточного ресурса потенциально-опасного оборудования.

**2. Разработка единой системы контроля качества технических устройств и окружающей среды.** В связи с бурным ростом экологических проблем во всем мире, в последнее время все более актуальной является задача установления взаимосвязи методов и средств определения технического состояния промышленных предприятий и окружающей среды. Диагностика экологической обстановки должна быть неотделимой от НК и Д технических устройств и всех рабочих мест внутри предприятия. Необходимо создание нового класса диагностического оборудования.

**3. Совершенствование диагностических технологий.** По мнению ведущих специалистов в области НК и Д [1], разработке необходимой технологической документации, методикам контроля, исследованию процедур НК и Д уделяется явно недостаточное внимание. Технология НК и Д должна иметь банк данных алгоритмов и программ НК, созданных для конкретных изделий и задач выявления в них дефектов.

**«Самый важный момент – принятие решения о несоответствии изделия предъявляемым требованиям и прекращении его эксплуатации или функционирования – должен быть особо отмечен и научно обоснован в технологии» [1].**

При выполнении НК главной задачей становится не вычисление размеров дефектов, а оценка остаточного ресурса оборудования.

**4. Организационное обеспечение НК и Д на международном уровне.** В большинстве стран мира к специалистам по НК существуют единые требования. В связи с выходом России на международный уровень возрастают требования к специалистам по НК, необходимо проведение сертификации не только специалистов, но и приборов, методик и лабораторий, стандартов и технологий. Важнейшей задачей является переход на международ-

ный уровень выполнения научно-исследовательских и проектно-конструкторских работ по НК и Д.

В учебном пособии большое внимание уделено разрушающим методам испытаний, здесь наряду с традиционными методами изучения структуры и свойств (макро- и микроанализ, определение механических свойств при растяжении, ударе, циклическом нагружении и т. д.) рассмотрены развитые в последнее время тонкие методы структурных исследований, такие как просвечивающая электронная и растровая микроскопия и методы определения сопротивления разрушению в различных условиях нагружения (параметры вязкости разрушения и износостойкость) в сочетании с подробным изложением методики фрактографического анализа. В настоящем учебном пособии студент найдет данные о целесообразности применения того или иного конкретного метода исследования в комплексе с другими для получения наиболее достоверных результатов, определяющих работоспособность сварных соединений в реальных конструкциях.

Автор выражает благодарность рецензентам – доктору физико-математических наук, профессору Э. В. Козлову и доктору технических наук, профессору Б. И. Капранову за ряд ценных замечаний по настоящей работе.

# 1. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ (НК) КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

## 1.1. Характерные признаки методов НК

Одна из основных задач по надежной и безопасной эксплуатации оборудования заключается в обеспечении достоверного контроля сплошности основного металла и сварных соединений ТУОПО.

При контроле применяют разные методы испытаний и исследования металла. Обычно их подразделяют на неразрушающие и разрушающие методы.

Разрушающие методы контроля и исследования связаны с разрушением металла, и их проводят либо на образцах-свидетелях, либо на моделях, либо на вырезках из деталей и узлов, реже на самих изделиях. Эти испытания позволяют получить числовые данные, характеризующие прочность, качество, надежность, оценить макро- и микроструктуру и т. д. Методы разрушающих испытаний будут рассмотрены далее. Неразрушающие методы контроля и испытания металлов составляют отдельную группу. Они включают безобразцовые испытания и непосредственно дефектоскопию. Принято, что под термином *неразрушающие физические методы контроля* понимают виды контроля, обладающие двумя характерными признаками:

1. Они не должны приводить к разрушению (повреждению) контролируемого объекта.

2. Они основаны на взаимодействии физических полей или веществ с дефектами.

Согласно ГОСТ 18353, в основу классификации методов НК положен физический процесс с момента взаимодействия физического поля или вещества с контролируемым объектом до получения первичной информации [2].

Неразрушающий контроль подразделяется на следующие виды:

1. Визуально-измерительный (ВИК).
2. Акустический.
3. Радиационный.
4. Магнитный.

5. Вихретоковый.
6. Радиоволновой.
7. Тепловой.
8. Оптический.
9. Проникающими веществами.
10. Течеисканием.
11. Электрический.

Поскольку акустические методы контроля очень широко применяются в сварочном производстве, их изучению посвящена отдельная глава (см. гл. 3).

ВИК является важнейшим методом при первичной оценке технического состояния потенциально опасного оборудования. На основе результатов ВИК назначаются объемы контроля и методы контроля.

Ни один из методов НК не универсален, поэтому при техническом диагностировании очень важен не только правильный выбор метода контроля, но и комбинирование ряда методов, сочетание неразрушающих и разрушающих испытаний, а также проведение микроскопического исследования и т. д.

Методы НК классифицируют по трем признакам:

1. Характер взаимодействия полей или веществ с контролируемым объектом.

2. Первичный информативный параметр, под которым понимают одну из основных характеристик физического поля или проникающего вещества, регистрируемую после взаимодействия последнего с контролируемым объектом.

3. Первичная информация, которая представляет собой совокупность характеристик физического поля или проникающего вещества, регистрируемая после взаимодействия поля (вещества) с объектом.

Важнейшими характеристиками неразрушающих методов контроля являются их *чувствительность и разрешающая способность, простота и доступность технологического процесса контроля, надежность аппаратуры.*

*Чувствительность* метода определяется наименьшими размерами выявляемых дефектов, она зависит от физических особенностей метода НК, технических характеристик применяемой

аппаратуры, чистоты обработки поверхности, условий контроля и многих других факторов.

*Разрешающая способность* метода определяется наименьшим расстоянием между двумя соседними минимальными выявляемыми дефектами, для которых возможна их отдельная регистрация.

Чувствительность к обнаружению дефектов для каждого метода определяют по-разному, она колеблется в широком диапазоне. Общая характеристика чувствительности некоторых методов приведена в табл. 1.1.

Чувствительность подразделяется на следующие виды:

1. *Предельная чувствительность* – характеризует наименьшие (предельные) размеры эталонной модели дефекта, оптимальной по выявляемости, уверенно обнаруживаемой при заданной настройке аппаратуры.

2. *Реальная чувствительность* – характеризует наименьшие размеры реального дефекта, обнаруженного в контролируемом объекте и определенного при сравнении результатов НК и размеров дефекта после разрезки изучаемого участка.

3. *Условная чувствительность* – характеризует наименьшие размеры уверенно обнаруживаемой условной модели дефекта, выполненной в эталонном образце.

Для количественной оценки результатов требуется четкое представление о рациональных границах чувствительности каждого метода. Главными критериями при контроле должны быть: *выявляемость дефектов данным методом; стоимость и производительность контроля.*

Кроме того, изделие должно обладать *дефектоскопической технологичностью*, под которой понимают совокупность свойств объектов на различных этапах проектирования, изготовления и монтажа, необходимых для обеспечения возможности обоснованного дефектоскопического контроля деталей и узлов при производстве, испытании, монтаже, эксплуатации и ремонте.

Эти свойства должны обеспечивать возможность контроля проверяемых деталей по их конструктивному исполнению и свойствам материалов, доступность контролируемых зон объекта при изготовлении, монтаже, ремонтах и эксплуатации.

Таблица 1.1

**Общая характеристика чувствительности методов  
дефектоскопического контроля**

Метод неразрушающего контроля	Минимальные размеры обнаруживаемых дефектов, мм		
	Ширина раскрытия	Глубина раскрытия	Протяженность
<b>Поверхностные дефекты</b>			
Визуально-оптический	0,005–0,01	–	0,1
Цветной	0,001–0,002	0,01–0,03	0,1–0,3
Люминесцентный	0,001–0,002	0,01–0,03	0,1–0,3
Магнитно-порошковый	0,001	0,01–0,05	0,3
Токовихревой	0,005–0,001	0,15–0,2	0,6–2,0
<b>Внутренние дефекты</b>			
Ультразвуковой импульсный эхо-метод	0,001–0,03	0,1–0,3	–
Рентгенографический	–	1,1–3 % от толщины	–
Гаммаграфический	–	4–6 % от толщины	–

**Примечание.** Нижняя граница минимальных размеров дефектов относится к контролю деталей и образцов в лабораторных условиях

## 1.2. Визуально-измерительный контроль (ВИК)

Техническое диагностирование объектов повышенной опасности следует начинать всегда с визуально-измерительного контроля; как мы уже отмечали, только после визуального осмотра объекта можно оценить общее состояние оборудования, выбрать узлы и детали, которые по внешнему виду внушают некоторые сомнения по возможности их дальнейшей эксплуатации, определить дефектоскопическую технологичность и предложить методы НК.

Глаз человека является основным прибором при контроле для обнаружения различных поверхностных дефектов в сварных соединениях и в основном металле, обнаружения отклонений формы и размеров, остаточных деформаций, коррозионных повреждений и т. д.

*Визуальный контроль с применением оптических приборов называют визуально-оптическим.* Его применяют для выявления различных поверхностных дефектов в труднодоступных местах.

При контроле используют оптические приборы, создающие полное изображение контролируемого участка. Однако визуально-оптический метод контроля имеет невысокую чувствительность, поэтому этот метод применяется исключительно для обнаружения крупных поверхностных дефектов, следов течей, остаточных деформаций, повреждения конструкций, для анализа и типа дефектов, обнаруженных при контроле каким-либо методом НК.

В связи с применением оптических приборов значительно сокращается поле зрения и глубина резкости, снижаются производительность и надежность контроля. В основном применяют оптические приборы с увеличением в 10–30 раз. Визуальный контроль применяется в дополнение к капиллярным методам контроля.

Для контроля внутренних поверхностей относительно полых деталей, например: деталей энергооборудования, корпусов различных машин и механизмов и т. д., применяют перископические дефектоскопы типа ПД-60, ПДК-60. Прибор ПД-60 предназначен для осмотра внутренних поверхностей труб диаметром более 35 мм, глубиной до 900 мм с увеличением в 4 раза. Перископический дефектоскоп ПДК-60 коленчатый, имеет два кольца, которые позволяют изменять ход лучей на угол в 90°, его применяют тогда, когда из-за сложности конструкции невозможен контроль другими приборами.

Семейство приборов РВП (РВП-497, РВП-469, РВП-479) позволяет контролировать трубы и другие объекты диаметром до 870 мм и длиной до 16,5 м с увеличением до 15 раз.

В последнее время все шире стали применять новое поколение приборов – эндоскопов. Это приборы с гибкими телескопическими оптическими жгутами (ГОВЖ). Жгуты представляют собой пачку гибких стеклянных волокон с высокими показателя-

ми преломления и коэффициентом светопропускания. Разработано довольно много моделей и модификаций эндоскопов, и жгуты в настоящее время изготавливают не только из стекла, но и из новых материалов. С 1996 года для объектов повышенной опасности в России введена в действие инструкция по визуальному и измерительному контролю (РД 34.10.130-96). Действие РД распространяется на визуальный и измерительный контроль (ВИК) качества: основного материала (полуфабрикатов, заготовок, изделий); подготовки деталей к сварке, сборки соединений деталей (изделий) под сварку; сварных соединений и наплавов; изготовления деталей и сборочных единиц; исправления дефектов в сварных соединениях и основном металле, который проводится на стадиях входного контроля основного материала, изготовления, монтажа, ремонта деталей, сборочных единиц и изделий.

С 2003 года для технических устройств в России действует вновь введенная Инструкция по визуальному и измерительному контролю (РД 03-606-03, прил. 1), которая устанавливает обязательные требования к организации и порядку производства работ по ВИК, включая требования к подготовке, аттестации персонала, средствам контроля организации работ, регистрации результатов контроля и т. д.

Среди разнообразия методов НК рассмотрим лишь некоторые из них, которые нашли наибольшее применение при контроле качества сварных соединений.

### **1.3. Радиационный метод**

Область применения радиационного метода в последнее время несколько снижается, но, однако, он незаменим при контроле крупных литых деталей, толстостенных заготовок и сварных соединений. Одним из главных достоинств метода является наличие реального документа контроля – *рентгеновского снимка*, где четко показано наличие дефекта либо его отсутствие [3].

В основу применения радиационных методов контроля положено свойство проникающих излучений (рентгеновского и гамма-излучений) проходить через непрозрачные для видимого света тела. Сущность радиационной дефектоскопии заключается

В измерении интенсивности излучения после прохождения его через изделие (рис. 1.1).

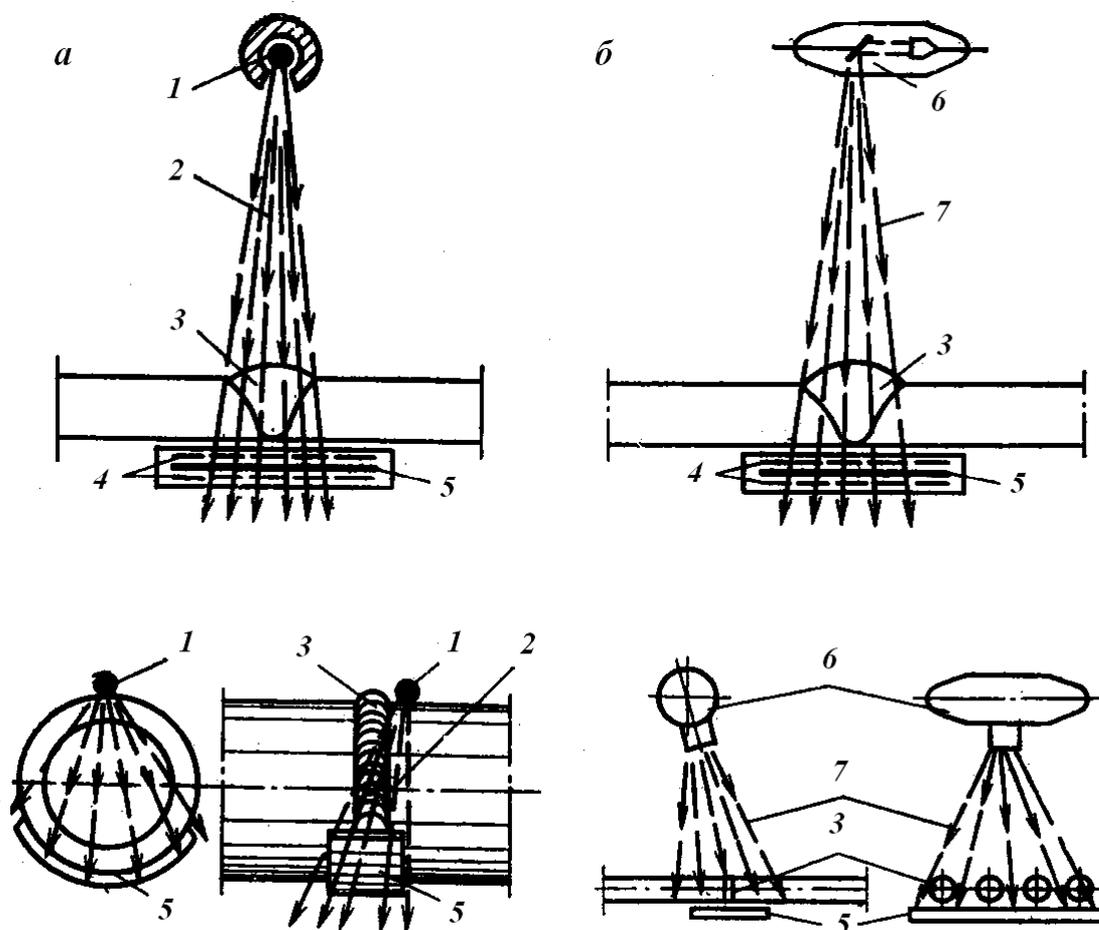


Рис. 1.1. Схема контроля металла методами радиационной дефектоскопии: *а* – просвечивание гамма-лучами; *б* – просвечивание рентгеновскими лучами; 1 – ампула с изотопом; 2 – гамма-лучи; 3 – сварной шов; 4 – усиливающий экран; 5 – рентгеновская пленка; 6 – рентгеновская трубка; 7 – рентгеновские лучи

Гамма-излучение испускается при самопроизвольном распаде неустойчивых ядер радионуклидов. В результате ядерных превращений радиоактивные ядра становятся стабильными, их общее число в источнике убывает. Число таких превращений в единицу времени называют *активностью радиоизотопного источника*. Активность источника уменьшается со временем по экспоненциальному закону.

Гамма-излучение характерно для некоторых тяжелых элементов, ядра атомов которых имеют избыток нейтронов, приводящих атомы в неустойчивое состояние (*уран, радий и ряд других элементов*). Переход их в устойчивое состояние сопровождается излучением нейтронов, альфа- и бета-частиц, а также и гамма-излучением. В ядрах более легких элементов (кобальт, цезий, иридий и др.) неустойчивое состояние создают искусственно путем облучения их в ядерных реакторах.

Рентгеновское излучение возникает при прохождении потока электронов через вещество и торможении этого потока на вольфрамовом или молибденовом аноде. Место торможения электронов на аноде, являющееся источником излучения, называют фокусом излучения.

Диаметр активной части источника при просвечивании аналогичен фокусу рентгеновской трубки. Из фокуса рентгеновской трубки и из активной части источника рентгеновские и гамма-лучи распространяются во все стороны прямолинейно. Основными радиационными характеристиками источников являются спектральный состав (энергия квантов, излучаемых источником, и их процентное содержание в общем потоке излучения) и активность источника.

Проникающая способность лучей с возрастанием частоты электромагнитного колебания возрастает, она характеризуется жесткостью излучения. В зависимости от энергии гамма-квантов источники излучения подразделяют на три группы: источники с жестким излучением и энергией около 1 МэВ, источники с излучением средней жесткости с энергией 0,3–0,7 МэВ (цезий-137, иридий-192) и источники с мягким излучением с энергией ниже 0,3 МэВ (тулий-170).

**Гамма-излучение.** Для просвечивания с помощью проникающих веществ служат гамма-дефектоскопы. Они являются автономными и не требуют электропитания от внешних источников, что обеспечивает возможность их применения как в монтажных условиях, так и при ремонтах во время контроля элементов конструкций в труднодоступных местах. Они имеют защитные радиационные головки с источником излучения, органы управления, систему сигнализации о положении источника и транспорт-

ного устройства. Органы управления осуществляют перемещение ампулы с радиоактивным изотопом в положение просвечивания и возвращение ее в положение хранения.

При просвечивании с помощью дистанционного управления открывают затвор радиационной головки и либо применяют образовавшийся при этом направленный пучок излучения, либо выводят источник за пределы головки, что обеспечивает просвечивание панорамным методом.

**Рентгеновское излучение.** Источником его служит вакуумная камера бетатрона или трубка рентгеновского аппарата. С увеличением анодного напряжения излучение становится более жестким. Увеличение или уменьшение анодного тока приводит к увеличению или уменьшению интенсивности излучения соответственно. Максимальная энергия рентгеновского излучения численно равна напряжению на рентгеновской трубке.

Для просвечивания рентгеновскими лучами применяют аппараты, которые по режиму работы делятся на две группы: аппараты, работающие в режиме импульсного излучения, и аппараты, работающие в режиме непрерывного излучения.

Источники гамма-излучения или рентгеновского излучения выбирают в зависимости от толщины контролируемого материала с учетом условий и доступа к зоне контроля.

**Радиография.** Способ контроля заключается в фиксации на рентгеновской пленке изображения контролируемой зоны с темными пятнами в местах расположения дефектов. В радиографии используют свойство рентгеновских пленок чернеть под воздействием излучения после соответствующей фотообработки. Участки снимков с большим потемнением характеризуют большую интенсивность излучения за объектом и свидетельствуют о нарушении сплошности контролируемой зоны, т. е. о наличии определенного дефекта.

Способность пленки темнеть после облучения при проявлении характеризует ее фоточувствительность. Зернистость пленки зависит от неравномерности распределения в эмульсии атомов серебра, формирующих рентгеновское изображение.

При выборе пленки, если требуется выявление очень мелких дефектов, применяют пленку менее чувствительную, но более

мелкозернистую, если решающим фактором является величина экспозиции, то применяют более чувствительную пленку. Для получения плотных снимков без увеличения времени экспозиции применяют усиливающие экраны, о чем подробно изложено в соответствующей литературе.

Область применения любого источника ограничена задаваемой величиной минимального выявляемого дефекта.

В основном гамма-аппараты применяют при контроле массивных отливок, сварных швов трубопроводов, сосудов, барабанов котлов для выявления крупных дефектов.

Бетатроны применяют в основном для просвечивания толстостенных изделий, особенностью снимков является весьма четкое изображение.

Радиографический метод контроля, согласно ГОСТ 7512, предусматривает применение гамма- и тормозного излучения с регистрацией на рентгеновской пленке. Этим методом выявляют в сварных соединениях внутренние дефекты: трещины, поры, непровары, неметаллические включения и т. д., а также недоступные для внешнего осмотра наружные дефекты, такие как утяжины, превышения проплава и др.

*Радиографический контроль не обеспечивает выявление дефектов, если их протяженность в направлении излучения меньше удвоенной чувствительности контроля в метрах или если изображения дефектов совпадают на снимке с другими изображениями, а также: непроваров и трещин с раскрытием менее 0,1 мм для сварных соединений с толщиной до 40 мм, непроваров и трещин с раскрытием менее 0,25 % для сварных соединений с толщиной более 40 мм, непроваров и трещин, плоскость раскрытия которых не совпадает с направлением излучения, и т. д.*

Для надежного выявления трещин с шириной раскрытия до 0,1 мм необходимо, чтобы лучи совпадали с плоскостью нарушения сплошности или составляли с ней угол не более 12°.

Характер и размер дефектов обычно определяют по эталонным снимкам, полученным экспериментальным путем при контроле деталей с аналогичными характерными дефектами.

Глубину залегания дефектов определяют по специальным эталонам, путем сравнения потемнения на снимке с потемнением изображения соответствующей канавки пластинчатого эталона.

#### 1.4. Магнитные методы контроля

Магнитными методами контролируют детали из ферромагнитных материалов. При этом выявляют поверхностные и подповерхностные дефекты типа трещин с раскрытием до 1 мкм, подрезы, непровары в сварных соединениях и металлургические дефекты типа волосовин и др.

Магнитные методы дефектоскопии основаны на следующем принципе: магнитный поток, проходя в однородном металле детали, без резких изменений ее сечения не изменяется на границе перехода «деталь-воздух» (рис. 1.2, *a*). При наличии в контролируемом изделии несплошности, в зоне дефекта образуется участок с резкоизменяющейся магнитной проницаемостью, вследствие чего происходит перераспределение магнитного потока. Часть потока при этом выходит на поверхность, образуя поле дефекта и создавая в месте дефекта на поверхности детали локальные магнитные полосы.

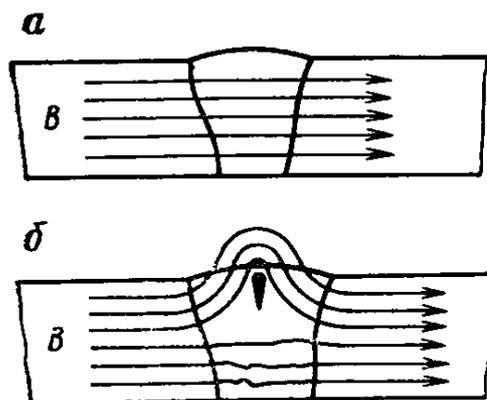


Рис. 1.2. Распределение магнитного потока  $B$  по сечению качественного (*a*) и дефектного (*б*) сварных швов

При нарушении сплошности, в районе дефектного участка часть магнитного потока перераспределяется, а в бездефектной зоне первоначальный магнитный поток остается неизменным, к

нему добавляется часть перераспределенного потока, который направляется по трем путям: через воздушные пути над дефектом, непосредственно через дефект и по металлу под дефектом (рис. 1.2, б).

Чем меньше дифференциальная магнитная проницаемость материала в рабочей точке на кривой намагниченности и больше магнитное сопротивление дополнительному потоку под дефектом, тем меньшая часть этого дополнительного потока пройдет через металл в бездефектной части детали под дефектом и, следовательно, тем большая часть его пройдет через воздушные пути над дефектом.

То же самое происходит и с нормальной магнитной проницаемостью; чем меньше магнитная проницаемость материала изделия, тем больше его магнитное сопротивление и тем большая часть выйдет на поверхность изделия над дефектом [4]. Для получения оптимального поля дефекта контролируемое изделие должно иметь достаточно высокую индукцию.

В магнитопорошковой дефектоскопии для выявления дефектов применяют тонкий ферромагнитный порошок, частицы которого притягиваются полем дефекта, образуя видимый глазом валик порошка. Интенсивность оседания порошка зависит от величины поля дефекта, которая определяется магнитными характеристиками материала изделия и напряженностью намагничивающего поля.

Детали обычно намагничивают с помощью специальных приборов – дефектоскопов. Дефектоскопы, применяемые при МПД, делят на универсальные и специализированные. Как те, так и другие могут быть стационарными, передвижными или переносными.

В соответствии с ГОСТ 21105 в зависимости от магнитных свойств материалов, размеров и формы контролируемого изделия, а также оборудования, используемого для намагничивания, применяют два способа контроля: способ приложенного магнитного поля и способ остаточной намагниченности.

При способе приложенного магнитного поля намагничивание начинается раньше или одновременно с моментом нанесения порошка или магнитной суспензии. Контроль способом остаточной намагниченности заключается в предварительном намагни-

чивании изделия и последующем нанесении на него порошка либо суспензии. Оседание порошка происходит в зоне дефекта при отсутствии внешнего намагничивающего поля.

Кроме того, существуют три способа намагничивания: продольный, циркуляционный и комбинированный.

На чувствительность контроля и, следовательно, выявляемость дефектов значительно влияют вышеуказанные способы намагничивания. Род тока намагничивания и способ нанесения порошка также влияют на обнаружение подповерхностных дефектов.

На результат МПД в значительной мере влияет состояние контролируемой поверхности. Чем грубее поверхность, тем хуже чувствительность. В зависимости от вида контролируемого изделия условный уровень чувствительности подразделяют на группы от А до Д, соответственно ширина выявляемого дефекта составляет от 2,5 до 100 мкм [4].

### 1.5. Капиллярные методы

Одним из наиболее распространенных методов контроля качества металла и сварных соединений ТУОПО является капиллярная дефектоскопия (КД).

КД предназначена для определения мест расположения поверхностных дефектов с открытой полостью, их направления, протяженности, характера развития.

Методы КД позволяют выявлять дефекты с раскрытием до одного микрона и с протяженностью, соизмеримой со средним размером зерна металла. КД основана на капиллярном проникновении индикаторных пенетрантов в полости поверхностных дефектов и регистрации индикаторного следа от дефекта тем либо иным способом. Пенетрант – специальное светоцветоконтрастное вещество.

Методы КД подразделяются:

*яркостный* (ахроматический) метод проникающих растворов, применяемые материалы – керосин, проявитель, мел;

*цветной* (хроматический) метод проникающих растворов, материалы – пенетрант, образующий после проявления красный след;

*люминесцентный* метод, для выявления дефектов применяют специальные ультрафиолетовые установки и лампы;

*люминесцентно-цветной* метод, приборы и материалы – совместное применение материалов и оборудования для цветной и люминесцентной дефектоскопии;

*капиллярно-электростатический* метод, здесь используют электростатическую установку и пенетрант (ионогенная жидкость);

*капиллярно-электроиндукционный* метод, применяют электроиндукционную установку и электропроводящие жидкости или органические растворители;

*капиллярно-магнитопорошковый* метод, используют прибор МПД и пенетрант (ферромагнитный порошок);

*капиллярно-радиационный* метод поглощения, применяют источник радиационного излучения и пенетрант (оптически плотные жидкости);

*капиллярно-радиационный* метод контроля, приборы и материалы – источник радиационного излучения и радиоактивный пенетрант.

Капиллярная дефектоскопия основана на проникновении индикаторных пенетрантов в полости дефектов, сорбции и диффузии, яркостном и цветном контрастах дефектоскопических материалов.

Размеры дефектов, выявляемые методами КД, так малы, что обнаружение их невооруженным глазом практически невозможно. Дефект заметен только при наличии контраста между дефектом и фоном. Поэтому для обнаружения дефектов следует искусственно повысить контрастность дефектного и неповрежденного участков контролируемой поверхности.

Заполнение полостей дефектов специальными светоцветоконтрастными индикаторными веществами – пенетрантами – основная задача КД. Микроскопическое сечение и протяженность дефектов уподобляет их капиллярным сосудам, обладающим способностью всасывать смачивающие их жидкости под действием капиллярных сил.

Явления, обусловленные втягиванием смачивающихся жидкостей в капилляры или выталкиванием несмачивающихся жидкостей из капилляров, называются капиллярными явлениями.

На границе соприкосновения твердых тел с жидкостью наблюдаются явления смачивания, проявляющиеся в искривлении свободной поверхности жидкости около стенки дефекта (сосуда).

Искривленная поверхность жидкости на границе с твердым телом называется мениском, а линия, по которой он пересекается с твердым телом, называется периметром смачивания. При дефектоскопии лучшее смачивание обеспечивают жидкости с малым поверхностным натяжением, что и учитывается при выборе жидкостей для КД.

На смачивание существенное влияние оказывает шероховатость контролируемой поверхности: чем выше шероховатость, тем лучше смачиваемость. У стенок дефектов шероховатость выше, чем на бездефектной поверхности изделия, следовательно, при КД в чистых полостях дефектов у жидкости будет более высокая смачиваемость по отношению к изделию. Под действием поверхностного натяжения поверхность жидкости сокращается.

При проникновении жидкости в дефект искривление поверхности жидкости создает дополнительное давление на жидкость по сравнению с давлением под плоской поверхностью. Явление капиллярности используется в методах КД для того, чтобы внедрить в мелкие поверхностные дефекты различные индикаторные пенетранты.

*Сорбционные явления.* Для отыскания дефекта необходимо возможно большее количество индикаторного пенетранта, находящегося в его микрополостях, извлечь на поверхность, подвергаемую контролю.

Извлечение и локализация пенетранта достигается вследствие *сорбционных* свойств проявителей пенетранта.

При использовании в качестве проявителя сухих порошков или суспензий на поверхности каждой частицы проявителя адсорбируются молекулы индикаторного пенетранта. При физической адсорбции молекулы индикаторного пенетранта сохраняют свое первоначальное строение, а при химической они образуют на поверхности частиц химическое соединение с веществом проявителя пенетранта. Схематическое изображение процесса КД представлено на рис. 1.3.

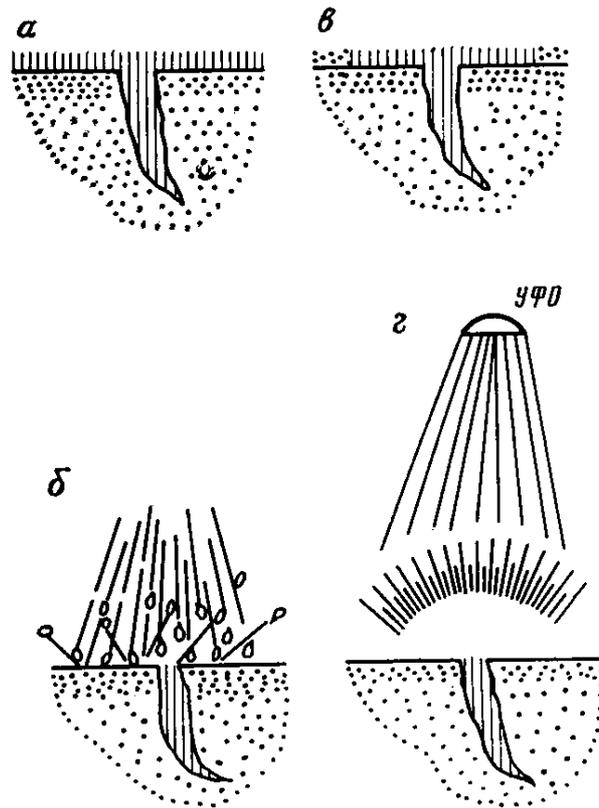


Рис. 1.3. Схематическое изображение процесса капиллярной дефектоскопии: *а* – нанесение и проникновение пенетранта в несплошности; *б* – удаление излишков пенетранта; *в* – нанесение проявляющей жидкости и проявление несплошностей при цветной дефектоскопии; *г* – проявление несплошностей ультрафиолетовым облучением (УФО) при люминесцентной дефектоскопии

*Чувствительность методов КД* условно определяется наименьшими значениями ширины раскрытия, глубины и длины надежно выявляемого дефекта по его индикаторному следу и зависит от свойств применяемых дефектоскопических материалов, качества и состояния поверхности.

Согласно ГОСТ 18442, в зависимости от минимальных размеров выявляемых дефектов, метода контроля, используемых дефектоскопических материалов и технологии контроля устанавливаются следующие условные классы чувствительности: I-IV и технологический.

Для каждого класса установлены минимальные размеры выявляемых дефектов в мкм: I – менее 1; II – от 1 до 10; III – от 10 до 100; IV – от 100 до 500; технологический не нормируется. Оп-

ределяющим параметром при выборе класса чувствительности метода является ширина раскрытия дефекта. Глубина зародышевых трещин деформационного происхождения обычно оценивается в  $10^{-3}$  мм.

Размер пор диффузионного происхождения такого же порядка. При слиянии микродефектов формируется макродефект, который и выявляется методом КД. Приведенные выше минимальные размеры дефектов и определяют границу необходимой чувствительности методов КД [1, 4, 5].

## 1.6. Вихретоковые методы

Вихретоковые методы основаны на анализе взаимодействия внешнего электромагнитного поля с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых возбуждающей катушкой в электропроводящем объекте контроля.

Согласно закону индукции, любое относительное перемещение магнитного поля и проволоочной катушки наводит в последней импульс электродвижущей силы.

Если две катушки поместить рядом и по одной из них пропустить электрический ток, а ко второй подключить быстродействующий вольтметр, то он покажет наличие ЭДС как при изменении силы тока в возбуждающей катушке, так и при изменении положения катушек и изменении формы и размеров любой из катушек. На величину ЭДС влияют взаимосвязь между катушками, сила тока и число витков.

Вихревые токи в металле распространяются в поверхностных слоях в направлении от источников поля. Из-за экранирующего действия вихревых токов и потерь на тепло электромагнитное поле в металле быстро затухает.

Глубина проникновения поля зависит от частоты электромагнитных колебаний, электропроводности, магнитной проницаемости, коэрцитивной силы, формы поля, создаваемого источником, и размеров контролируемого объекта. Низкочастотные электромагнитные поля проникают в металл глубже, нежели высокочастотные.

Поле вихревых токов взаимодействует с полем возбуждающей катушки, образуя результирующее поле, несущее в себе ин-

формацию об электромагнитных характеристиках, расстоянии до поверхности, о нарушении однородности, изменении формы и размеров контролируемого изделия.

На величину вихревых токов значительно влияют геометрические параметры объекта: форма, размеры, взаимное расположение измерительного вихретокового преобразователя (ВТП) и изделия, толщина детали, толщина покрытия, толщина слоя после ХТО и другие факторы.

Об изменениях величины вихревых токов и, следовательно, о наличии дефектов судят по изменению тока в возбуждающей катушке, изменению составляющих комплексного сопротивления этой катушки или ЭДС преобразователя [1, 6].

В качестве ВТП используют обычно индуктивные катушки, одну или несколько. В катушках ВТП создается электромагнитное поле, возбуждающее вихревые токи в объекте, и далее, регистрируя напряжение на зажимах катушки или их сопротивление, получают информацию о свойствах объекта. Эта информация – многопараметровая, что и определяет как преимущество, так и недостатки при реализации вихретокового метода (ВТМ). Часто при контроле одного из параметров влияние остальных на сигнал преобразователя становится мешающим.

Большим преимуществом ВТМ, особенно при проведении технического диагностирования объектов повышенной опасности, является то, что контроль можно проводить *без контакта преобразователя и объекта*. Их взаимодействие происходит обычно на расстоянии, достаточном для свободного движения преобразователя относительно объекта, от долей мм до нескольких мм. ВТМ можно применять без зачистки поверхностного слоя, что очень важно при работе в полевых условиях.

Одной из особенностей ВТМ является то, что на сигналы преобразователя практически не влияют влажность, давление и загрязненность среды, радиоактивное излучение, наличие на поверхности объекта контроля непроводящих веществ.

Простота конструкции преобразователя и хорошая защита позволяют применять ВТМ при контроле металла как в агрессивных средах, так и в широком интервале температур и давлений, преобразователи устойчивы против механических воздействий.

В дефектоскопии ВТМ выявляют дефекты типа несплошностей, выходящих на поверхность или залегающих на небольшой глубине, а также трещины, расслоения, закаты, крупные неметаллические включения и т. д. При оптимальных условиях контроля можно выявить дефекты глубиной 0,1–0,2 мм, протяженностью 1–2 мм.

С помощью ВТМ решаются задачи контроля размеров деталей. Ими измеряют диаметры труб, проволоки, прутков, толщину металлических листов и стенок труб, толщину покрытий на электропроводящих основах, глубину зоны химико-термической обработки. Измеряемые величины могут изменяться в пределах от мкм до десятков мм.

Характер микроструктуры металлов и сплавов в значительной степени влияет на их электромагнитные характеристики. Вот именно эта зависимость позволяет контролировать не только однородность химического состава, но и структуру металлов и сплавов, а также определять механические напряжения. Кроме того, с помощью вихревых токов проводят контроль качества термической и химико-термической обработки, состояние поверхности деталей после механической обработки, наличие остаточных напряжений, наличие различных фаз и т. д.

### **1.7. Безобразцовые методы испытаний**

Для оценки реального состояния металла объектов повышенной опасности необходимо владеть информацией не только о присутствии или отсутствии дефектов, выявляемых методами неразрушающего контроля, но и знать его физико-механические характеристики, состав, характер микроструктуры, способ изготовления, условия эксплуатации и т. д. Основные важнейшие характеристики металла обычно определяют с помощью разрушающих методов исследования, однако очень часто при проведении технического диагностирования необходимо владеть информацией о динамике изменения механических характеристик в процессе длительной эксплуатации объекта. Вырезать металл для исследования непосредственно из объекта зачастую не представляется возможным, вот поэтому ряд ученых [4–12] обратили

внимание на создание безобразовых методов и средств оперативной оценки механических свойств материалов.

Среди существующих методов контроля механических свойств материалов методы, основанные на измерении твердости, являются сравнительно простыми, доступными, но и вместе с тем перспективными, содержащими в себе еще много нераскрытых возможностей [7, 11].

Главное их достоинство заключается в возможности ускоренной оценки некоторых механических характеристик металла различных изделий, деталей, конструкций, не выводя их из рабочего состояния и не вырезая образцов для испытаний.

В некоторых случаях безобразцовые методы являются пока единственными для количественной оценки механических свойств малых объемов или локальных зон исследуемого металла.

Большой вклад в развитие отечественных безобразцовых методов оценки механических свойств, в теоретические и экспериментальные обоснования взаимосвязи характеристик твердости с показателями прочности и пластичности материалов, находящихся в различном структурном и напряженно-деформированном состоянии, внесли ученые и специалисты кафедры технологии металлов Московского энергетического института – технического университета под руководством профессора М. П. Марковца [7]. В. М. Матюниным [12] разработаны научные основы и решена актуальная научно-техническая проблема безобразцовой оперативной оценки прочностного состояния металла в элементах конструкций на стадии их изготовления и эксплуатации с целью выявления наиболее опасных зон, определения остаточного ресурса и предотвращения аварийных ситуаций.

В работе установлена взаимосвязь напряжений и деформаций при растяжении образца с напряжениями и деформациями при вдавливании сферического индентора в пластической области деформирования упрочняющихся материалов. Выявлено распределение интенсивности напряжений и интенсивности деформаций в зоне контакта индентора. Разработана методика оценки пластической деформации при растяжении по результатам вдавливания индентора с учетом упрочняемости материала. Автор разработал методы инденторных испытаний с регистрацией диаграмм вдавли-

ливания и царапания. Установлены особенности и определены характерные параметры диаграмм вдавливания и царапания.

Для практического использования разработаны методы, включая автоматизированные, безобразцовой экспресс-оценки комплекса механических свойств конструкционных материалов по параметрам твердости и диаграммам инденторных испытаний: предела текучести, временного сопротивления, истинного сопротивления разрыву, предельной равномерной деформации, относительных удлинения и сужения, степени наклепа.

Большой научный и практический интерес представляют полученные автором зависимости критического коэффициента интенсивности напряжений и ударной вязкости от параметров отношений сопротивления отрыву и истинного сопротивления разрыву к пределу текучести с учетом величины зерна металла.

При техническом диагностировании в основном применяют простые корреляционные зависимости между твердостью и механическими характеристиками типа

$$\sigma_B = 0,36HB, \quad (1.1)$$

$$\sigma_{0,2} = \frac{0,41HB - 167}{1,37} \quad (1.2)$$

для углеродистых сталей. Подобные зависимости установлены и для легированных сталей, применяемых для крепежных деталей, паропроводов и их сварных соединений, литья и т. д.

Твердость обычно измеряют малогабаритными переносными приборами Московского энергетического института (МЭИ) и Волгоградского политехнического института (ВПИ). Хорошие результаты дают отечественные приборы, разработки последних лет серий УЗИТ и ТЕМП. Они дешевы и просты в эксплуатации. Погрешность определения механических характеристик безобразцовыми методами не превышает 20–25 МПа.

Для определения марки стали применяют *методы спектрального анализа*.

В основе спектрального анализа лежит исследование излучения паров металла. Перевод испытываемого металла в парообразное состояние достигается действием дугового или искрового

разряда между металлом и электродом, изготовленным из угля, чистого железа или меди. Для испарения металла и возбуждения спектра применяются искровые и дуговые генераторы, которые входят в комплект стилоскопических установок.

Возбужденные атомы, образующие разрядное облако, дают излучение, длина волны которого определяется природой элемента [4]. Это излучение при помощи оптической системы спектрального аппарата, представляющей собой систему линз и призм, разлагается с образованием линейчатого спектра.

Наличие в спектре характерных линий определенных химических элементов указывает на присутствие данных элементов в анализируемом металле. Определение элементов сводится к отысканию и оценке интенсивности спектральных линий, соответствующих данному элементу. Фотографирование спектров проводят на спектрографе. Интенсивность линий определяют фотометрированием сравнительно с эталоном.

При определении наличия химических элементов непосредственно на объекте применяют переносные приборы – стилоскопы, при их использовании спектр рассматривают непосредственно в окуляр и интенсивность линий определяют визуально, сравнивая их с некоторыми линиями постоянной интенсивности, например железа, и с эталонными шкалами. Данный метод применяют для качественного или полуколичественного анализа легированных сталей. Стилоскопирование широко используется при монтаже и ремонте технических устройств опасных производственных объектов (ТУОПО), при их техническом диагностировании, благодаря возможности проведения анализа даже в труднодоступных местах.

Среди большого разнообразия разработанных и перспективных разрабатываемых методов НК мы рассмотрели лишь те, которые нашли широкое применение при контроле качества сварных соединений и техническом диагностировании объектов повышенной опасности.

Дальнейшие направления и перспективы развития неразрушающих испытаний рассмотрены в следующих разделах.

## 1.8. Экономические аспекты неразрушающего контроля

Необходимость проведения неразрушающего контроля (НК) сварных соединений регламентирована нормативными документами Ростехнадзора и оправдана экономическим эффектом, который создается в результате повышения качества и надежности работы технических устройств, эксплуатирующихся в сложных напряженных условиях, зачастую при высоких (низких) температурах и давлениях, нередко в присутствии агрессивных сред.

Эти положение качественно иллюстрируется зависимостями, приведенными на рис. 1.4 [13].

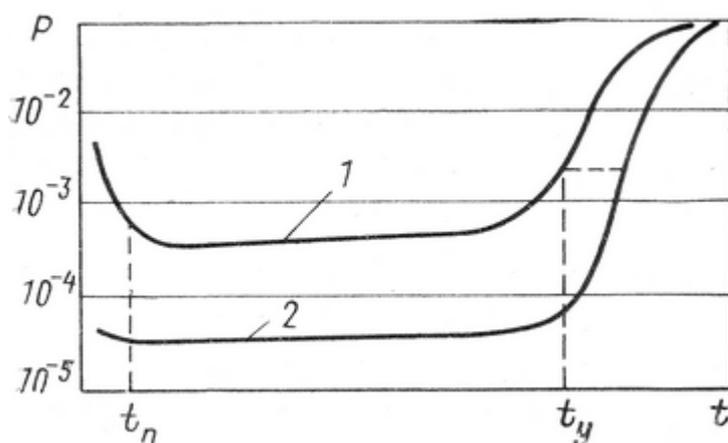


Рис. 1.4. Вероятность отказа  $P$  объектов в процессе эксплуатации:  
1 – без применения НК; 2 – с применением НК;  $t_y$  – установленный срок службы;  $t_n$  – время приработки

Зависимости отражают изменение вероятности выхода из строя работающего оборудования на различных стадиях жизненного цикла. Повышенное число отказов для кривой 1 в начальный период можно объяснить приработкой оборудования, когда разрушаются (повреждаются) элементы с заводскими дефектами. После периода отбраковки начинается нормальная эксплуатация оборудования (здесь отказы редки) вплоть до выработки ресурса. В этот период вероятность отказов повышается из-за ряда эксплуатационных факторов (усталость, ползучесть, коррозионно-

термическая усталость и т. д.), обусловленных старением материала и деградацией его свойств.

Кривая 2 отражает, по сути, экономические аспекты применения НК. При этом снижается вероятность отказов в начальный период эксплуатации; применение НК в рабочий период позволяет выявить дефекты (эксплуатационные), снизить вероятность отказов и продлить срок службы оборудования.

Анализу эффективности применения НК в техническом и экономическом аспектах посвящены исследования многих ученых [13–17]. Весьма плодотворным является системный подход, который обеспечивает всесторонний анализ всех факторов, влияющих на качество металлоконструкций при минимальных затратах. В конечном итоге применение НК можно оценить в стоимостном эквиваленте, разные формы которого используют разные исследователи. А. К. Гурвич [14] применение НК оценивает параметром эффективности

$$Q_i = \frac{\Delta G_i}{\Omega_\Sigma}, \quad (1.3)$$

где  $\Delta G_i$  – техническая эффективность;  $\Omega_\Sigma$  – суммарные затраты.

А. З. Райхман [15] характеризует НК функцией потерь

$$W = r_F F_\rho + r_\beta \beta(1 - \rho) + C, \quad (1.4)$$

где  $r_F$ ,  $r_\beta$  – плата за пропуск дефектов и их перебраковку соответственно;

$F_\rho$ ,  $\beta$  – вероятность пропуска и перебраковки;  $\rho$  – уровень дефектности;  $C$  – стоимость НК.

В. Н. Волченко [13] при анализе норм допустимых дефектов связывает их с необходимостью оптимизировать затраты, т. е. нормы должны быть такими, чтобы сумма затрат на НК и предотвращения появления дефектов в процессе производства и затрат в эксплуатации на проведение контроля и ликвидацию последствий аварий была минимальной. Это положение иллюстрировано на рис. 1.5.

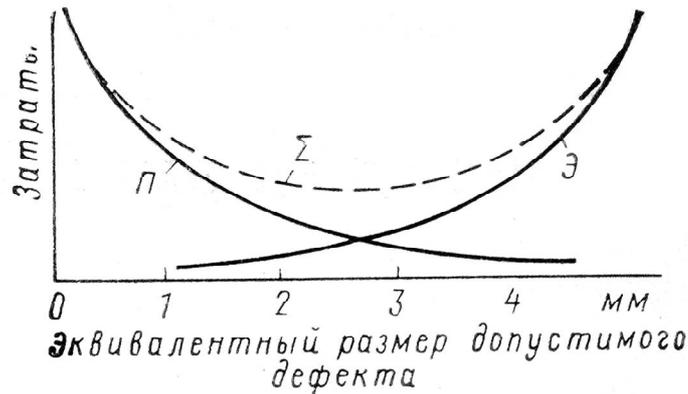


Рис. 1.5. Зависимость затрат от размера допустимых дефектов:  
 $P$  – затраты в производстве;  $\mathcal{E}$  – затраты в эксплуатации;  
 $\Sigma$  – суммарные затраты

Аналогичный подход рассмотрен в работах американских специалистов [18]. Действительно, уменьшение размера допустимого дефекта потребует увеличения чувствительности НК, что увеличит число забракованной продукции, объем ремонтных работ и резко повысит стоимость производства. При увеличении размеров дефектов, оставляемых в изделиях и пропускаемых в эксплуатацию, повышается вероятность выхода изделия из строя со значительными экономическими потерями.

Конкретные значения параметров контроля, норм допустимых дефектов, объемов затрат при использовании НК или его отсутствии в производстве и эксплуатации зависят от многих факторов, которые в каждом случае определяют положение минимума на кривой (см. рис. 1.5).

В ряде случаев [15, 19], когда имеется возможность возмещать потери от бракуемых малоответственных изделий путем их замены, функция затрат или потерь монотонно уменьшается с увеличением допустимого размера дефекта и не имеет минимума, что свидетельствует о возможности снижения требований к нормам оценки качества этих изделий.

### 1.9. Контрольные вопросы

1. Назовите характерные признаки НК.
2. Назовите основные методы НК для оценки качества сварных соединений.

3. По каким признакам классифицируются методы НК?
4. Что такое чувствительность метода НК?
5. В каких случаях применяют ВИК?
6. Какие основные преимущества у радиационных методов контроля?
7. Что представляет собой рентгеновское излучение, гамма-излучение?
8. Что такое радиография?
9. В чем заключается сущность магнитных методов контроля?
10. Что представляют собой сорбционные явления?
11. На какие методы подразделяется капиллярная дефектоскопия?
12. Что такое вихретоковая дефектоскопия?
13. Какие характеристики основного металла и сварных соединений определяются безобразцовыми методами контроля?
14. В чем заключается эффективность применения методов НК?

## 2. АКУСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

### 2.1. Теоретические основы акустических методов контроля

Любая материальная среда, в каком бы состоянии она не находилась, благодаря взаимодействию между частицами обладает упругими свойствами.

Колебания одной из частиц будут передаваться другим частицам, т. е. в среде будет распространяться волновое движение, называемое *акустическими колебаниями*.

Частицы среды совершают колебания около точки равновесия, а волна распространяется с некоторой постоянной скоростью.

В теории и практике акустических колебаний важное место занимают гармонические волны, в которых все изменения состояния происходят по синусоидальному закону [20].

Реальные волны не являются гармоническими колебаниями, однако их представляют в виде совокупности гармонических волн, называемых группой волн или *волновым пакетом*. В неограниченной однородной изотропной среде распространение упругих волн имеет пространственный характер и в зависимости от формы фронта волны могут быть плоскими, сферическими и цилиндрическими.

Упругие колебания и акустические волны, особенно ультразвукового диапазона, нашли широкое применение в технике. Мощные ультразвуковые колебания применяют для сварки, для локального разрушения хрупких материалов, диспергирования, коагуляции и др.

Другая область применения акустических колебаний и волн – контроль и измерения. Сюда относят локацию, медицинскую диагностику, контроль уровня жидкости, скорости потока и т. д., а также использование акустических колебаний для неразрушающего контроля. Для контроля применяют колебания частотой от 50 Гц до 50 МГц.

В зависимости от упругих свойств среды в ней могут возникать упругие волны различных видов, отличающиеся скоростью распространения, направлением колебания частиц и другими признаками. Их и называют *модами*.

Различают продольные волны (расширения-сжатия), сдвиговые, поверхностные, нормальные и другие волны. В жидкостях и газах существует только один тип волн – волны расширения-сжатия. В твердых телах, кроме продольных волн, существуют поперечные волны (сдвига), так как твердое тело обладает не только упругостью объема, но и упругостью формы. Скорость продольной волны примерно в два раза больше скорости поперечной. Комбинации этих волн создают другие типы волн.

На свободной поверхности твердого тела могут распространяться поверхностные волны или волны Рэлея. По характеру траекторий частиц поверхностная волна как бы состоит из колебаний продольных и сдвиговых волн. Амплитуда колебаний частиц по мере удаления от свободной поверхности убывает по экспоненте, поэтому волна локализована в тонком поверхностном слое толщиной в одну-полторы длины волны.

В тонких плоских телах (листах, пластинах, проволоке) возбуждаются нормальные волны или волны Лэмба. В металлах возбуждаются все типы волн.

*Для ультразвуковых колебаний характерны те же явления преломления, отражения, дифракции, интерференции, реверберации, что и для любых волновых явлений [20–22].*

Для ультразвуковой дефектоскопии большое значение имеет удельное акустическое сопротивление среды, которое выражается произведением плотности среды на скорость распространения в ней упругих волн данного типа.

Удельное акустическое сопротивление газов, жидкостей и металлов относят как 1:3000:100000. Такие отношения позволяют использовать их для ультразвуковой дефектоскопии. Чем больше отличается акустическое сопротивление дефектов от общей массы металла, тем проще их обнаружить, так как в этом случае большая часть ультразвуковой энергии будет отражаться от дефектов.

Ультразвуковая дефектоскопия (УЗК) основана на свойстве УЗ колебаний распространяться в однородном плоском теле и на его плоских или криволинейных поверхностях в виде лучей и отражаться от границ тела или нарушений сплошности, обладающих другими акустическими свойствами.

При неразрушающем контроле акустические волны возбуждают и принимают путем преобразования электрических колебаний в упругие и наоборот. Для этой цели используют специальные устройства – *электроакустические преобразователи (ЭАП)* или просто преобразователи.

Если преобразователь используют для излучения волн, то его называют *излучателем*, если для приема – *приемником*.

Если один и тот же преобразователь выполняет обе функции, то его называют *совмещенным*.

Если излучатель и приемник разделены, то схему контроля называют *раздельной*.

Если раздельные излучатель и приемник объединены в одном блоке, то преобразователь называют *раздельно-совмещенным*.

Ультразвуковые колебания получают за счет пьезоэффекта, который был открыт братьями Кюри в 1880 г.

Он заключается в следующем: при сжатии или растяжении специальной пластинки на ее гранях появляется электрический заряд. Пьезоэффект обратим, так как под влиянием электрического поля пластинки деформируются.

Пьезопластины обычно изготавливают из монокристалла кварца или из кристаллических соединений, таких как титанат бария, цирконат титаната свинца и др. (ГОСТ 13927).

Амплитуда колебаний пластины зависит от напряжения на электродах и соотношения частоты переменного напряжения и собственной частоты колебаний пластины.

Максимальная амплитуда колебаний пьезоэлемента наблюдается при резонансе, когда собственная частота колебаний пластины совпадает с частотой вынужденных колебаний от приложенного внешнего напряжения.

Собственная частота пластины зависит от ее толщины и скорости упругих волн

$$f = c / 2b, \quad (2.1)$$

где  $f$  – собственная частота пластины;  $c$  – скорость упругих волн;  $b$  – толщина пластины.

При приложении пьезопластины к поверхности контролируемой детали в ее материале возбуждаются упругие волны.

Если подавать на пьезоэлемент переменное напряжение с частотой, отличной от собственной, то можно получить вынужденные колебания пьезоэлемента с любой частотой. Однако излучаемая энергия будет меньше, чем на резонансной частоте.

Распространение ультразвуковых колебаний происходит по законам геометрической оптики и основывается на представлении об ультразвуке как о совокупности ультразвуковых лучей – линий, вдоль которых распространяется звуковая энергия. Если материал однороден и изотропен, то пьезоэлемент создает волновое поле, которое вблизи имеет цилиндрическую форму (зона дифракции Френеля), а на некотором расстоянии – форму усеченного конуса (дальняя зона, или зона дифракции Фраунгофера).

Протяженность ближней зоны (зоны Френеля) прямо пропорциональна квадрату диаметра излучателя и обратно пропорциональна длине волны. Чем больше диаметр излучателя и частота упругих волн, тем выше направленность пучка лучей. При диаметре излучателя, большем длины волны, энергия концентрируется преимущественно вдоль нормали к излучающей поверхности [2, 20].

По мере удаления от излучателя амплитуда колебаний падает, и интенсивность волн убывает. Это вызвано геометрическим расхождением лучей и наличием потерь в среде, приводящих к постепенному затуханию колебаний при их распространении. Затухание происходит по экспоненциальному закону. Коэффициенты затухания различны для разных материалов и складываются из коэффициентов поглощения и рассеяния:  $\delta = \delta_{\text{погл}} + \delta_{\text{рас}}$ .

При распространении ультразвуковых волн в упругой среде возможна *реверберация* – *постепенное затухание колебаний вследствие повторных многократных отражений*. Реверберация бывает объемной (из-за отражений колебаний от граней контролируемого объекта) и структурной (из-за многократных отражений границами зерен). При распространении упругих волн в твердом теле наблюдаются процессы дифракции и интерференции.

*Дифракция – явление огибания волнами малых препятствий, размеры которых соизмеримы с длиной звуковой волны или меньше ее.* Отражение волны происходит в том случае, если размеры препятствий больше длины волны. По характеру отражения ультразвуковых волн от несплошностей судят о размере и расположении дефектов.

*Интерференция – результат сложения двух или нескольких когерентных колебаний, воздействующих на одну и ту же точку среды.* Интерференция может привести к образованию стоячих волн, характеризующихся тем, что вдоль оси поля наблюдается чередование неподвижных точек и точек, колеблющихся с максимальной амплитудой.

Интерференция и дифракция взаимно связаны и существуют одновременно, что усложняет измерения в режиме непрерывного излучения. Поэтому более предпочтительным является импульсный метод, при котором короткие импульсы следуют друг за другом через промежутки времени, достаточные для того, чтобы падающая и отраженная волна не встретились.

***Отражение и преломление ультразвуковых волн.*** Законы отражения и преломления УЗ волн аналогичны законам геометрической оптики. Встречая на своем пути среду с другими акустическими свойствами, часть энергии ультразвуковых волн отражается, а оставшаяся часть входит в новую среду. При этом проходящая и отраженная волна будут того же вида, что и падающая.

При перпендикулярном падении УЗК луча на границу раздела отраженный луч будет также перпендикулярен к этой границе (рис. 2.1). При неровной поверхности раздела с выступами и впадинами более 0,1 мм наблюдается диффузионное отражение.

При падении ультразвукового луча на границу раздела сред под углом, отличным от прямого, наряду с отражением наблюдается преломление, причем отношение синусов углов падения, отражения и преломления равно отношению скоростей распространения колебаний соответствующего вида в первой и второй средах.

Если  $\rho_1 c_1 < \rho_2 c_2$ , то при переходе продольных упругих волн из одной твердой среды в другую кроме двух отраженных лучей будут наблюдаться и два преломленных (рис. 2.2).

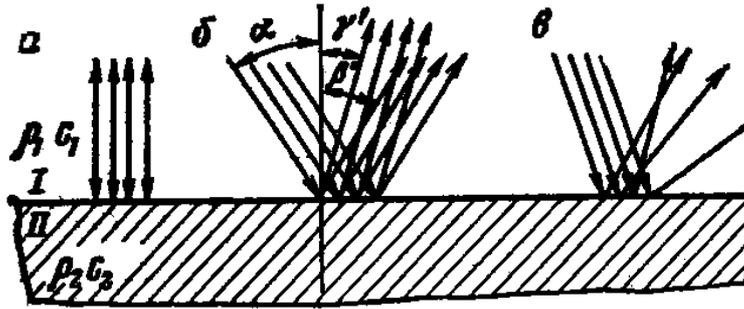


Рис. 2.1. Отражение ультразвуковых волн на плоской границе двух сред при перпендикулярном (а) и наклонном падении луча (б, в) (б – зеркальное отражение, в – диффузное отражение)

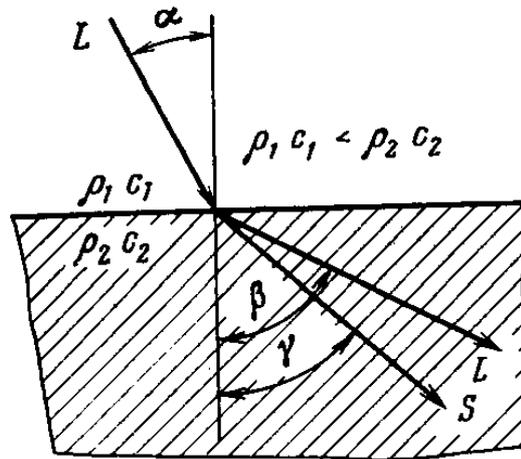


Рис. 2.2. Преломление ультразвуковых волн на плоской границе двух твердых сред

Углы падения, отражения и преломления связаны следующим соотношением или законом Снеллиуса:

$$\frac{\sin \alpha}{C_{L1}} = \frac{\sin \gamma}{C_{S1}} = \frac{\sin \beta}{C_{L2}} = \frac{\sin \gamma}{C_{S2}}, \quad (2.2)$$

где  $C_{L1}$ ,  $C_{S1}$ ,  $C_{L2}$ ,  $C_{S2}$  – скорости распространения продольных и сдвиговых волн в первой и второй средах соответственно. При увеличении угла падения  $\alpha$  продольной волны  $L$  углы  $\beta$  и  $\gamma$  также возрастают и при некотором значении  $\alpha = \alpha_{кр1}$  продольные волны распространяются по поверхности, не проникая вглубь второй

среды, при этих условиях возникает головная волна (первый критический угол). При дальнейшем увеличении угла падения до значения  $\alpha_{кр2}$  (второй критический угол) по поверхности будут распространяться преломленные сдвиговые волны (рис. 2.3).

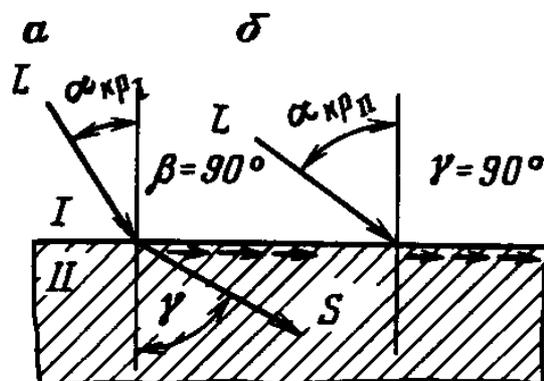


Рис. 2.3. Распространение продольной (а) и сдвиговой (б) преломленных волн на границе раздела сред при критических углах

Для упругих волн справедлив закон обратимости. Если луч от первой среды во вторую падает под углом  $\alpha$ , то луч, падающий из второй среды на границу с первой под углом  $\beta$ , войдет в первую среду под углом  $\alpha$ .

Все эти свойства ультразвуковых волн широко используются при разработке и внедрении акустических методов контроля, приборов, при конструировании призматических преобразователей.

*Акустические методы неразрушающего контроля* основаны на анализе параметров упругих колебаний, возбуждаемых в контролируемом объекте (ГОСТ 23829).

Методы акустического контроля подразделяют на две большие группы: *активные*, использующие излучение и прием акустических колебаний, и *пассивные*, основанные только на приеме акустических волн.

## 2.2. Активные акустические методы НК

Методы, в которых применяют бегущие волны, делят на подгруппы. В практике используют методы прохождения и мето-

ды отражения волн. Комбинированные методы применяют как отражение, так и прохождение (рис. 2.4).

Методы прохождения предполагают наличие при контроле двух преобразователей: излучающего и приемного, расположенных по разные стороны контролируемого объекта.

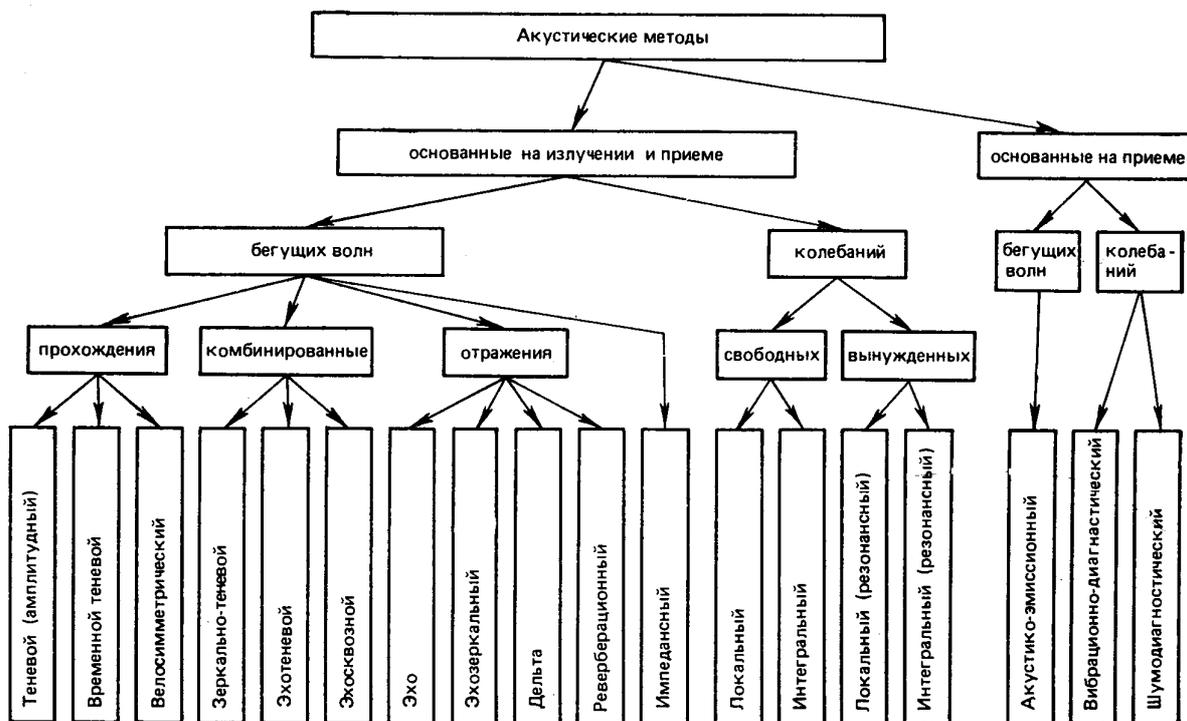


Рис. 2.4. Классификация акустических методов контроля [20]

### 2.2.1. Методы прохождения и отражения волн, комбинированные методы

К методам прохождения относят следующие методы:

- *теневой или амплитудно-теневой* основан на регистрации уменьшения амплитуды прошедшей волны из-за наличия дефекта. Применяют импульсное и непрерывное излучение (рис. 2.5, а);
- *временный теневой метод* основан на измерении запаздывания импульсов, вызванного огибанием дефектов (рис. 2.5, б).

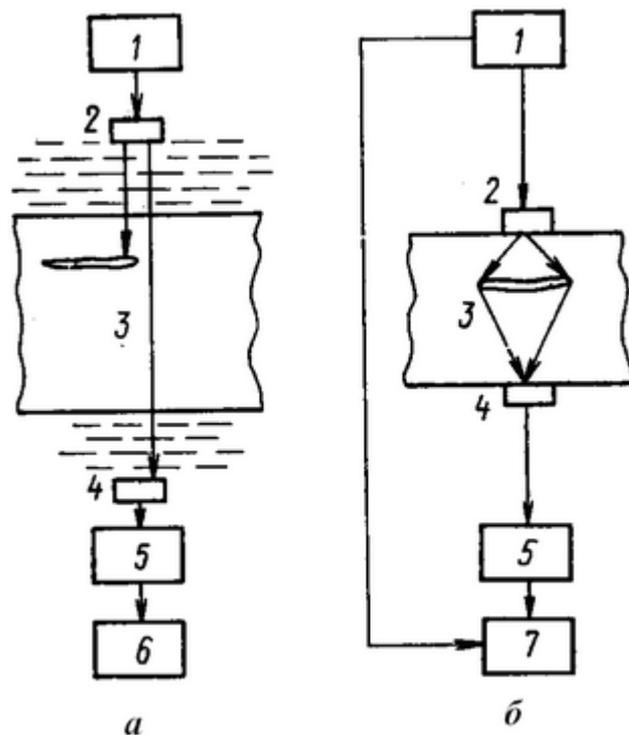


Рис. 2.5. Методы прохождения: *а* – теневой; *б* – временный теневой;  
 1 – генератор; 2 – излучатель; 3 – объект контроля; 4 – приемник;  
 5 – усилитель; 6 – измеритель амплитуды; 7 – измеритель времени пробега

*Методы отражения* используют как один, так и два преобразователя, зачастую применяют импульсное излучение.

К этой подгруппе относят следующие методы:

- *эхо-метод* основан на регистрации эхосигналов от дефектов (рис. 2.6, *а*). Здесь на экране электронно-лучевой трубки обычно наблюдают зондирующий (посланный) импульс I, донный импульс III, отраженный от дна контролируемого изделия, и сигнал от дефекта II. Время прохождения импульсов II и III пропорционально глубине залегания дефекта и толщине изделия;

- в *эхо-зеркальном методе* анализируют сигналы, испытавшие зеркальное отражение от дна контролируемой детали и дефекта (рис. 2.6, *б*). Вариант этого метода, используемый для выявления вертикальных дефектов (плоскость *EF*), называют *тандем-методом*;

- при *реверберационном методе* анализируют время объемной реверберации – процесса постепенного затухания звука в некотором объеме контролируемой детали (рис. 2.6, *в*).

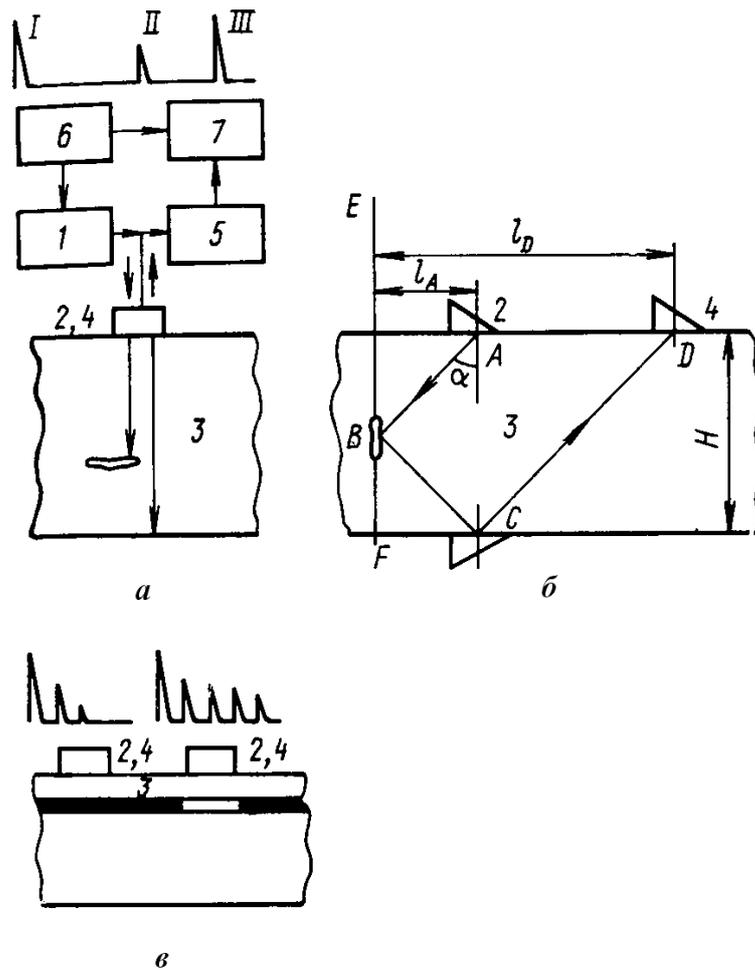


Рис. 2.6. Методы отражения: а – эхо;  
 б – зеркальный эхо-метод; в – реверберационный;  
 1 – генератор; 2 – излучатель; 3 – объект контроля; 4 – приемник;  
 5 – усилитель; 6 – синхронизатор; 7 – генератор развертки

В комбинированных методах применяют как отражение, так и прохождение акустических волн. К этим методам относят:

- *зеркально-теневой метод*; основан на измерении амплитуды донного сигнала. По технике выполнения – это метод отражения, а по своей сущности он близок к теневому методу, так как в процессе контроля измеряют ослабление сигнала, дважды прошедшего изделие в зоне дефекта (рис. 2.7, а);
- *эхо-теневой метод*; применяют и анализируют прошедшие и отраженные волны (рис. 2.7, б);
- *импедансный метод*; существенно отличается от ранее рассмотренных методов и основан на анализе изменения механического или входного акустического импеданса участка контроли-

руемой поверхности, с которым взаимодействует преобразователь, и чем больше импеданс, тем труднее раскачать контролируемый участок (рис. 2.8).

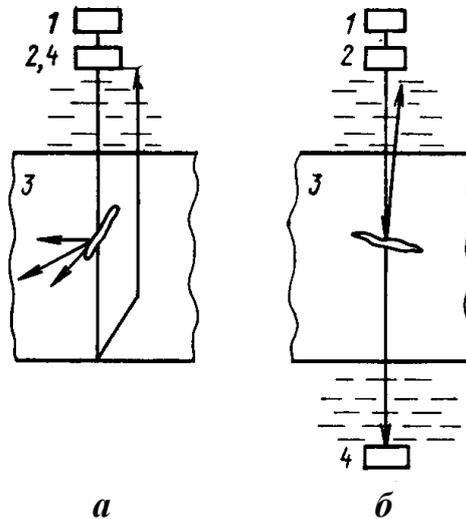


Рис. 2.7. Комбинированные методы:  
*а* – зеркально-теневого; *б* – эхо-теневого;

*1* – генератор; *2* – излучатель; *3* – объект контроля; *4* – приемник

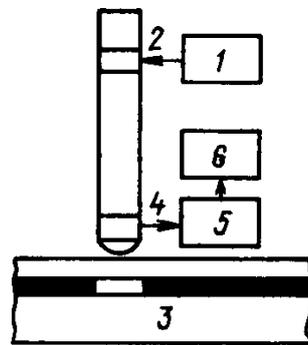


Рис. 2.8. Импедансный метод: *1* – генератор; *2* – излучатель;  
*3* – объект контроля; *4* – приемник; *5* – усилитель; *6* – индикатор

В низкочастотном импедансном методе преобразователем является колеблющийся стержень, прижатый к поверхности детали.

При наличии подповерхностных дефектов в виде расслоений уменьшается механический импеданс, в участке над дефектом легко возбуждаются изгибные колебания.

В результате чего изменяется режим колебаний стержня, в том числе уменьшаются механические напряжения на приемном элементе *4*, что и является признаком дефекта. В высокочастот-

ном методе преобразователь излучает продольную волну. Условия этого возбуждения зависят от акустического импеданса поверхности, а акустический импеданс в свою очередь зависит от наличия или отсутствия несплошности.

В России в настоящее время разработан и изготавливается целый класс малогабаритных ультразвуковых приборов (дефектоскопов и толщиномеров). Это дефектоскопы УД2-70, А121М, А1220 и др., толщиномеры – А1207С, А1208, ТУЗ-1, ТДМ-1 и др.

### 2.2.2. Спектрально-акустический метод

В конце прошлого века для тонких прецизионных измерений акустических характеристик различных типов волн была разработана специализированная система «АСТРОН» [23–26].

Система акустическая многофункциональная «АСТРОН» предназначена для прецизионного измерения времени распространения (задержек) и отношения размахов ультразвуковых импульсов, распространяющихся в основном металле и сварных соединениях исследуемого объекта.

Основная область применения – исследование структурных особенностей материалов технических объектов, оценка их физико-механических характеристик, напряженно-деформированного состояния с целью принятия решения о возможности безопасной эксплуатации объектов.

#### *Технические характеристики:*

- Частотный диапазон 2,5–10 МГц;
- Диапазон измеряемых временных интервалов между первым и вторым отраженными импульсами от 2 до 200 мкс;
- Пределы допускаемой абсолютной погрешности системы при измерении временных интервалов составляют  $\pm 1$  нс во всем диапазоне;
- Диапазон измерения отношений размахов импульсов – от 1,0 до 10,0;
- Пределы допускаемой относительной погрешности системы при измерении отношений размахов импульсов составляют  $\pm 3$  % во всем диапазоне.

***В состав системы входят:***

- измерительный модуль;
- процессорный модуль, в качестве которого используется портативный компьютер типа «Notebook» (измерительный и процессорный модули выполнены в едином конструктиве);
- комплект датчиков:
  - датчик продольных волн – 3 шт.;
  - датчик поперечных волн – 2 шт.;
  - датчик поверхностных волн – 3 шт.;
  - трехкомпонентный датчик – 1 шт.;
  - термодатчик – 1 шт.;
- программное обеспечение:
  - операционная система Windows XP;
  - программа «astron.exe»;
  - буферная папка «BUF0»;
  - папка тарировочных коэффициентов «SET»;
- диагностический модуль.

Программное обеспечение системы позволяет выполнять целый ряд исследований, необходимых для оценки напряженного состояния и степени поврежденности как основного металла, так и сварных соединений (рис. 2.9).

В основу работы аппаратной части системы положен способ подробной регистрации всей серии отраженных акустических импульсов для ее последующей обработки средствами программной части системы.

Для передачи первичной акустической информации в обрабатывающую часть системы (компьютер типа «Notebook») производится последовательное преобразование осциллограммы отраженных импульсов с определенным шагом дискретизации с момента зондирования материала и до прихода  $n$ -го отраженного импульса.

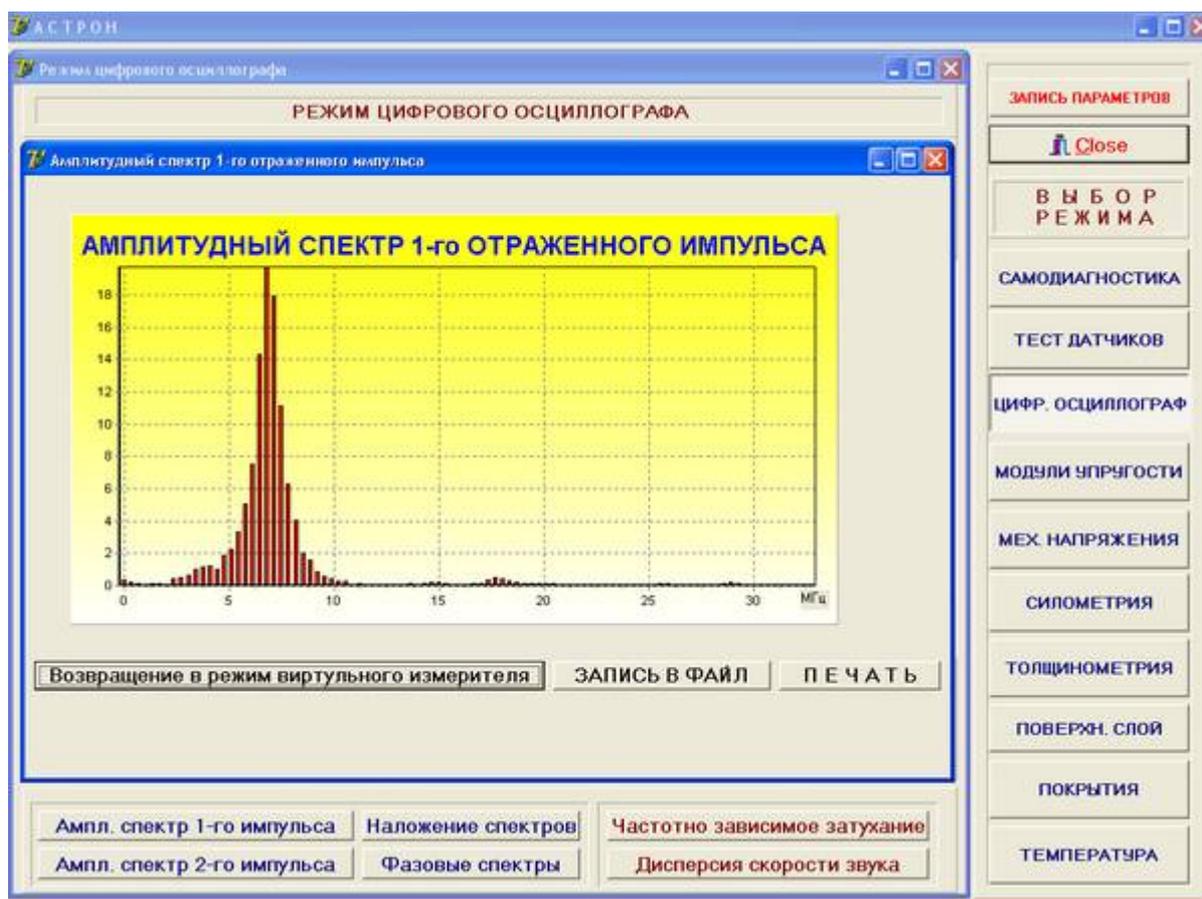


Рис. 2.9. Режимы функционирования системы

### 2.2.3. Исследование поврежденного сварного соединения с применением спектрально-акустического метода

В процессе длительной эксплуатации в основном металле и в сварных соединениях паропроводов тепловых электростанций происходят сложные физико-химические процессы, которые и приводят при определенных условиях к зарождению и развитию дефектов [27]. В сварных соединениях наиболее вероятна концентрация напряжений из-за резкого изменения формы в районе стыка. Для них характерен повышенный уровень рабочих и компенсационных напряжений изгиба из-за расположения вблизи участков повышенной жесткости, какими являются фасонные элементы, корпуса и т. д.

Определение стадии предразрушения сварных соединений (оценка предельного состояния) является актуальнейшей задачей. Неразрушающие физические методы исследований в задачах про-

гнозирования работоспособности и оценки предельного состояния металлоконструкций ориентированы, главным образом, на выявление уже существующих и развивающихся очагов разрушения, они не дают возможности выявлять стадии зарождения микроповреждений и оценивать характер изменения микроструктуры.

В настоящее время оценить микроструктуру, определить физико-механические характеристики можно лишь с применением разрушающих методов исследования. Среди множества неразрушающих физических методов контроля состояния сварных соединений одним из наиболее перспективных следует признать спектрально-акустический метод [28].

Акустические методы испытаний имеют ряд преимуществ, заключающихся в уникальных свойствах ультразвуковых волн выявлять множество рассеянных микроповреждений, размеры каждого из которых меньше порога чувствительности многих других методов испытаний.

В металле сварных соединений накопление микроповрежденности, образование микро- и макротрещин происходит, преимущественно, в поверхностных слоях изделий и применение акустических методов может привести к выявлению таких зон. Одним из важнейших достоинств акустических методов является возможность исследовать поверхностные микроструктурные несовершенства в материалах с применением поверхностных акустических волн Рэлея (ПАВ) [29].

*В качестве примера в настоящей работе авторами приведено исследование влияния параметров микроструктуры поврежденного сварного соединения на акустические характеристики металла спектрально-акустическим методом.*

Объектом исследования явилось разрушенное сварное соединение главного паропровода блока № 7 Томь-Усинской ГРЭС.

Типоразмер 325×43 мм, давление пара – 14,0 МПа, температура – 545 °С, материал – сталь 12Х1МФ, время эксплуатации – 178 040 ч (рис 2.10).

Внешний осмотр и измерения. Кольцевая трещина расположена со стороны трубы по зоне термического влияния. Протяженность трещины 1/3 периметра сварного шва, максимальное раскрытие – 2 мм. Диаметр трубы со стороны трещины достигает

327,5 мм, толщина стенки – 42,5 мм. Диаметр трубы с противоположной стороны (гиб) 327 мм, толщина стенки – 41,5 мм.

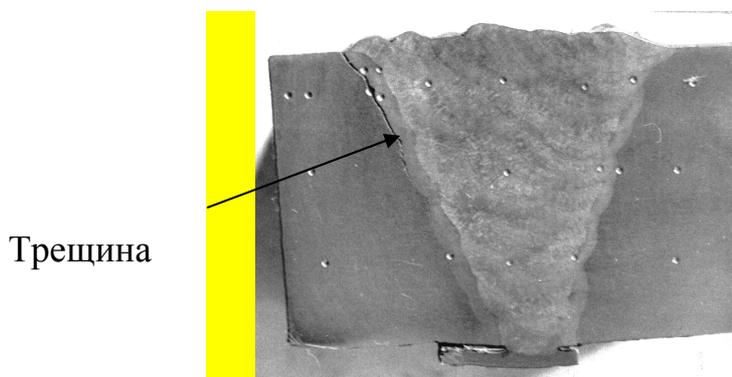


Рис. 2.10. Внешний вид фрагмента поврежденного паропровода

Металлографическое исследование проведено на микроскопах МИМ-8М и МИМ-10 при увеличении  $\times 100$ ,  $\times 500$ . Образец для исследования вырезан на конце раскрытия трещины. Трещина расположена в зоне термического влияния на расстоянии 2–3 мм от линии сплавления по зоне мелкого зерна.

Фронт распространения трещины от наружной поверхности к внутренней. Трещина идет по границам зерен, что отчетливо видно на конце раскрытия трещины (рис. 2.11, *а*, *б*), края магистральной трещины окислены, наблюдаются множественные сопутствующие микронадрывы.

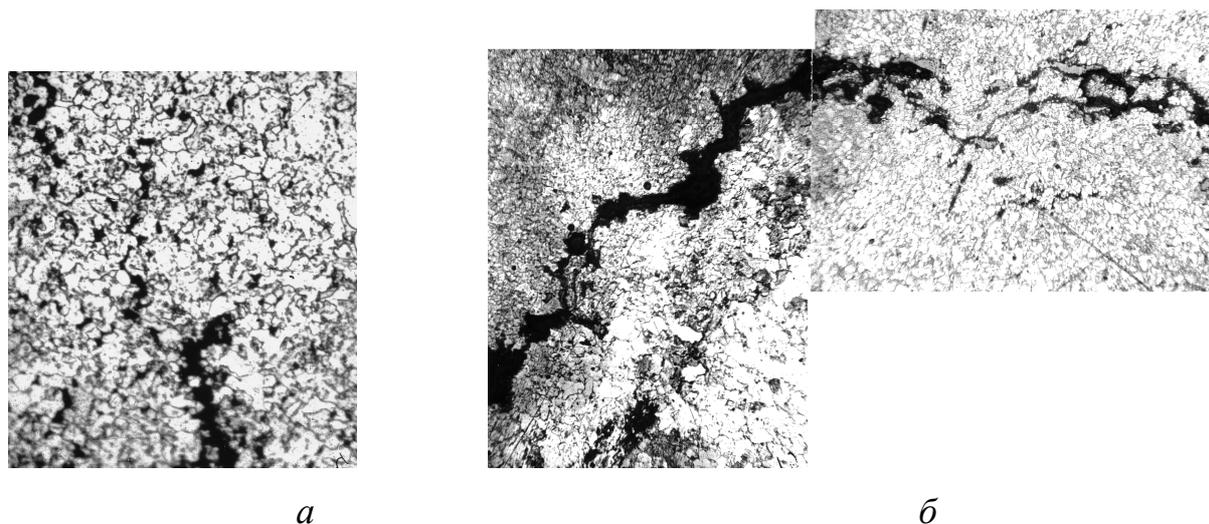


Рис. 2.11. Микроструктура в зоне трещины: *а* –  $\times 100$ , конец трещины; *б* –  $\times 100$ , характер распространения трещины

На противоположной стороне исследуемого темплета, т. е. со стороны гйба, на расстоянии 2–3 мм от линии сплавления в зоне термовлияния межзеренное растрескивание (рис. 2.12, *a*) на глубину 1,5–2 мм.

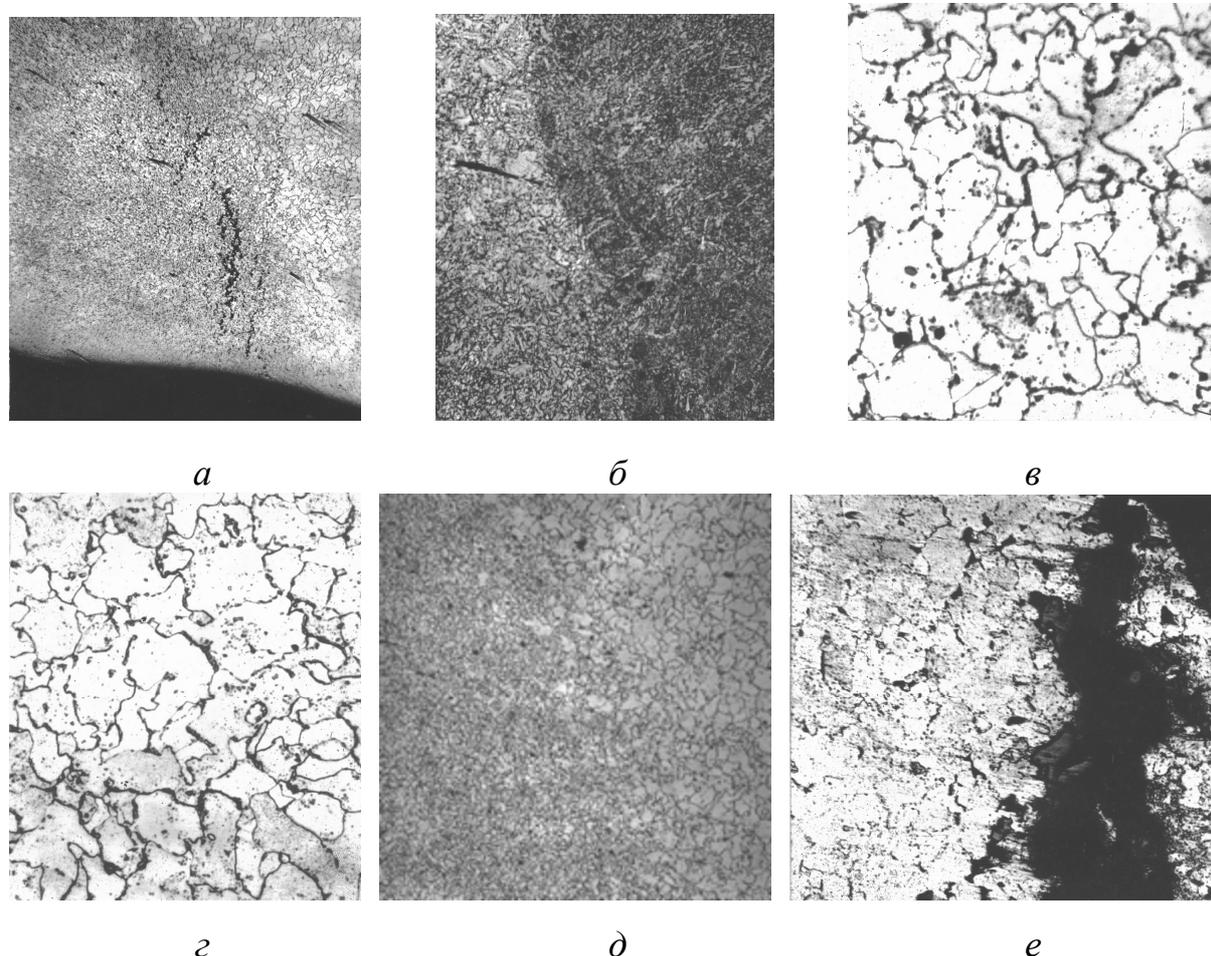


Рис. 2.12. Микроструктура металла в околошовной зоне:  
*a* –  $\times 100$ , растрескивание в зоне термовлияния; *б* –  $\times 100$ , микроструктура металла шва и зоны перегрева; *в* –  $\times 500$ , микроструктура трубы; *г* –  $\times 500$ , микроструктура гйба; *д* –  $\times 100$ , микроструктура зоны мелкого зерна; *е* –  $\times 500$ , микроструктура вдоль фронта трещины

Микроструктура основного металла со стороны трубы ферритно-карбидная. Карбиды в виде скопления расположены преимущественно по границам зерен. На участках распавшегося бейнита повышенная травимость феррита и множество точечных карбидов (рис. 2.12, *в*).

Микроструктура основного металла со стороны гйба ферритно-карбидная. Карбиды расположены преимущественно по

границам зерен (рис. 2.12, *з*). Микроструктура металла шва ферритно-бейнитная, ширина бейнитных оторочек 20–25 микрон (рис. 2.12, *б*). Микроструктура зоны перегрева – бейнит. Микроструктура участка неполной перекресталлизации ферритно-карбидная (рис. 2.12, *д*), вдоль фронта распространения трещины в этой зоне большое количество микропор, расположенных по границам зерен (рис. 2.12, *е*).

На внутренней поверхности трубы обнаружены коррозионно-усталостные трещины (рис. 2.13, *а, б*).

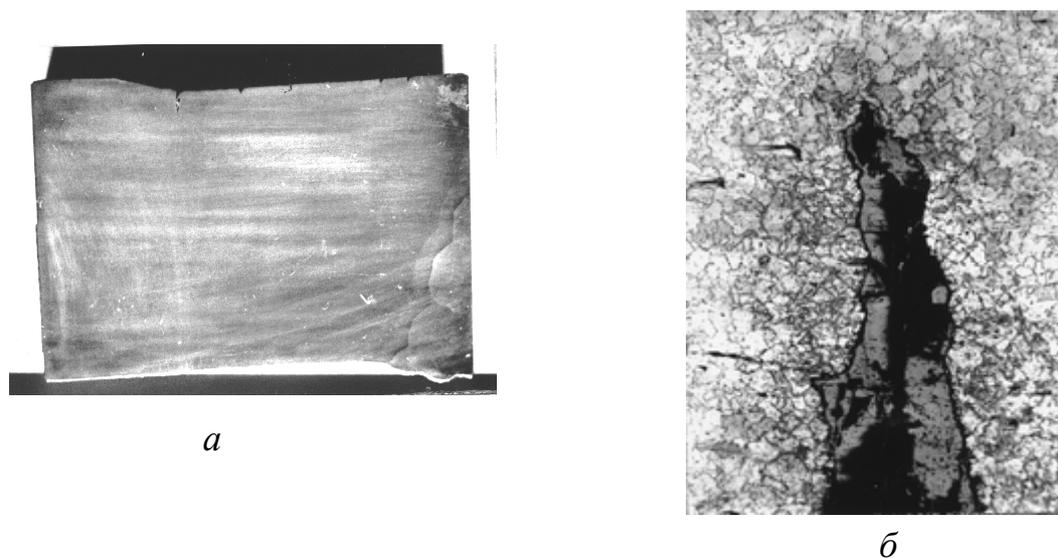


Рис. 2.13. Микроструктура в зоне расточки:

*а* – усталостные трещины на внутренней поверхности в районе расточки под подкладное кольцо; *б* –  $\times 500$ , конец усталостной трещины

Кроме того, данное сварное соединение было исследовано методами электронной микроскопии с оценкой параметров микроструктуры и внутренних дальнедействующих полей напряжений.

Электронной микроскопией выявлены участки материала, содержащие микротрещины. Такие участки были обнаружены в зоне термического влияния сварки. Схематическое изображение участка материала, содержащего микротрещины, приведено на рис. 2.14, *б*, а участка, содержащего дефектный феррит, – на рис. 2.14, *а*.

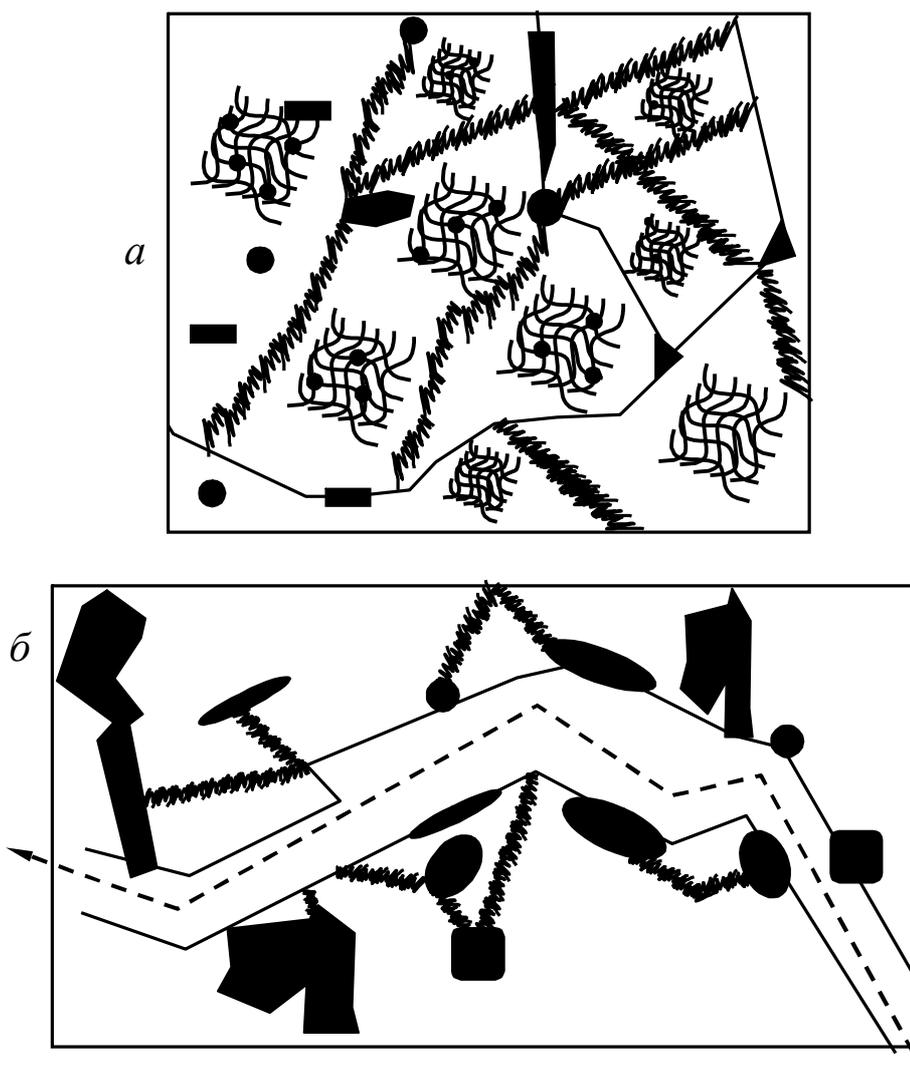


Рис. 2.14. Схематическое изображение участков материала, содержащих дефектный феррит (*а*) и микротрещины (*б*), присутствующие в исследуемой стали 12Х1МФ

Микротрещины образуются либо в местах скопления крупных карбидов, либо в тех местах, где карбиды расположены цепочкой, и тогда трещины идут между карбидами (рис. 2.15). Напряжения в таких местах не релаксированы, на это указывает наличие тонких экстинкционных контуров, отходящих от краев трещин. Местами зарождения микротрещин могут являться и отдельно отстоящие упруго-напряженные крупные карбиды. Дислокации в карбиде отсутствуют, зато присутствуют бездислокационные экстинкционные контуры [30]. Такие напряжения могут привести к растрескиванию частицы (рис. 2.16, *а*). Образовавшаяся микротрещина приводит к растрескиванию материала вблизи нее (рис. 2.16, *б*).

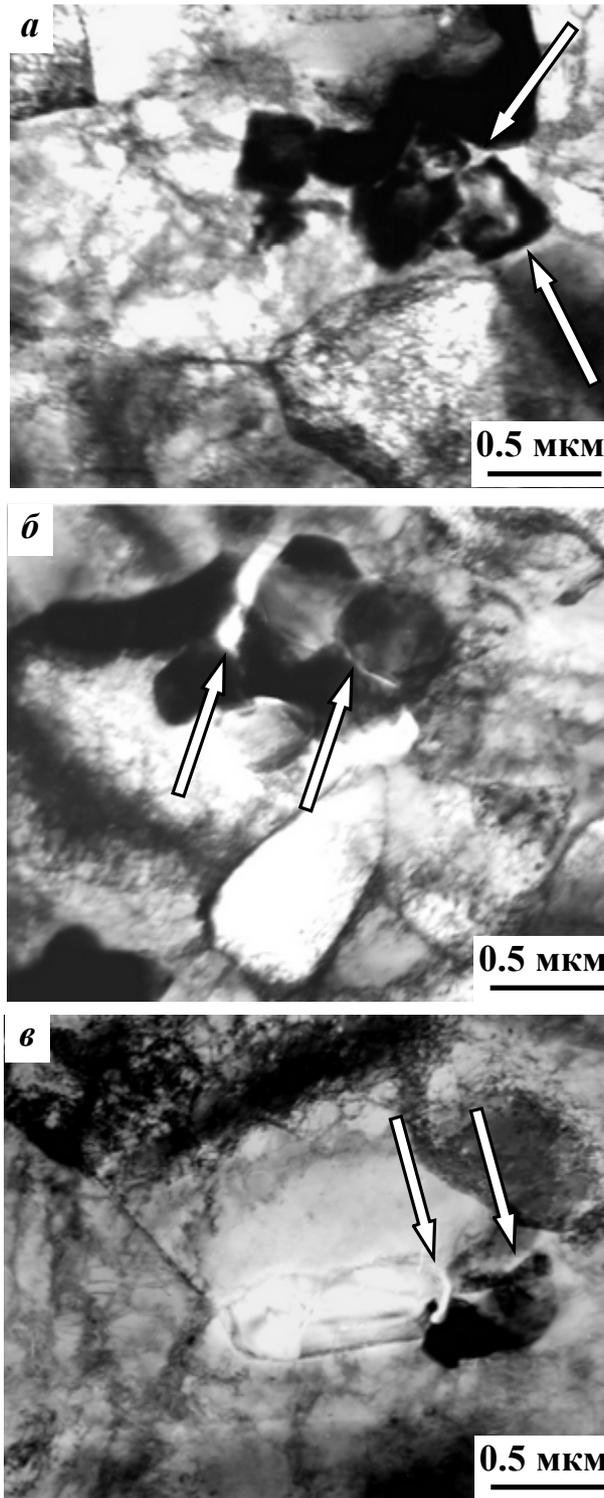


Рис. 2.15. Электронно-микроскопическое изображение тонкой структуры стали 12Х1МФ. Участки материала, содержащие микротрещины (отмечены стрелками)

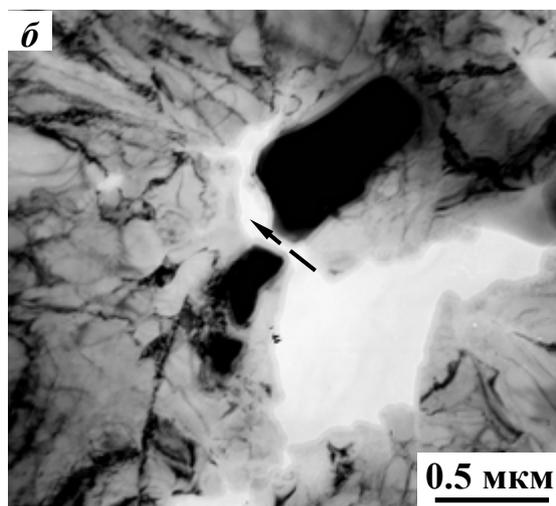
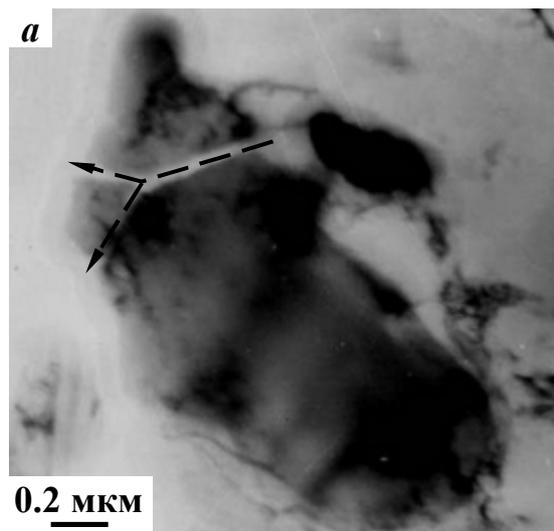


Рис. 2.16. Электронно-микроскопическое изображение тонкой структуры стали 12X1МФ. Растрескивания частиц карбида  $M_{23}C_6$  (отмечены пунктирными стрелками)

Изучение характера микроструктуры, измерение полей внутренних напряжений проводили в тех же участках, где выполняли измерение времени задержки поверхностных акустических волн (ПАВ) спектрально-акустическим методом с применением многофункциональной установки «АСТРОН».

В качестве датчика использовали оригинальный малогазовый релеевский преобразователь для оценки скорости распространения импульсов релеевских волн, коррелирующей со степенью повреждаемости поверхностного слоя металла.

Интересно сопоставить результаты, полученные методом электронной микроскопии, примененным в настоящей работе, с результатами акустического метода с использованием ПАВ (волн Рэлея), который только начинает использоваться на практике в качестве неразрушающего метода контроля [31]. Подчеркнем, что исследования обоими методами были выполнены на одном и том же образце разрушенного сварного соединения паропровода из стали 12Х1МФ.

Методом электронной микроскопии была изучена структура при перемещении по образцу от основного металла к зоне разрушения. Было установлено, что наиболее серьезные изменения происходят в зоне термического влияния и по линии сплавления. Именно там появляются микротрещины и резко возрастают внутренние напряжения (рис. 2.17, *а*). Таким образом, вышеуказанные участки образца являются зоной концентрации напряжений и именно здесь должно произойти разрушение образца.

Акустический метод позволил получить, в частности, данные времени задержек импульсов волн Релея при таком же перемещении по этому же образцу (рис. 2.17, *б*). Видно, что наибольшая задержка импульсов релеевских волн также происходит на участке образца между точками 2 и 3. Это означает, что данные обоих методов хорошо согласуются. Подтверждением этому служит рис. 2.18. Как следует из рис. 2.18, *а*, рост средних внутренних напряжений приводит к увеличению объемной доли опасной для разрушения структуры материала (участков дефектной  $\alpha$ -фазы и микротрещин). С другой стороны, рост внутренних напряжений приводит к задержке импульсов релеевских волн (рис. 2.18, *б*).

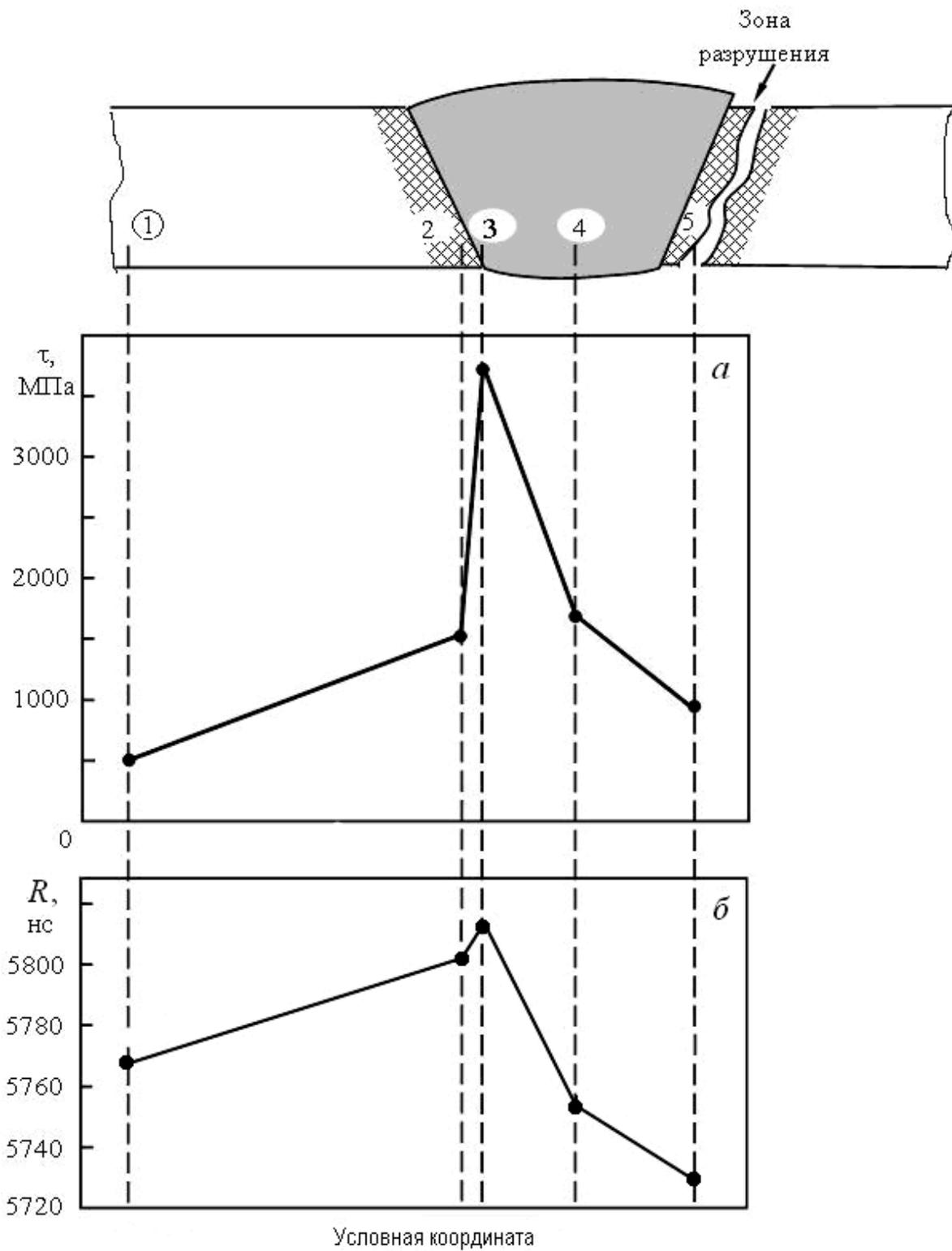


Рис. 2.17. Изменение средней амплитуды локальных напряжений (а) и задержки импульсов релеевских волн (б) при перемещении по образцу от основного металла к зоне разрушения

Таким образом, спектрально-акустический метод хорошо подтверждается результатами настоящей работы, и величина задержки импульсов ПАВ является очень чувствительной характеристикой выявления структурных дефектов в поверхностных слоях металла.

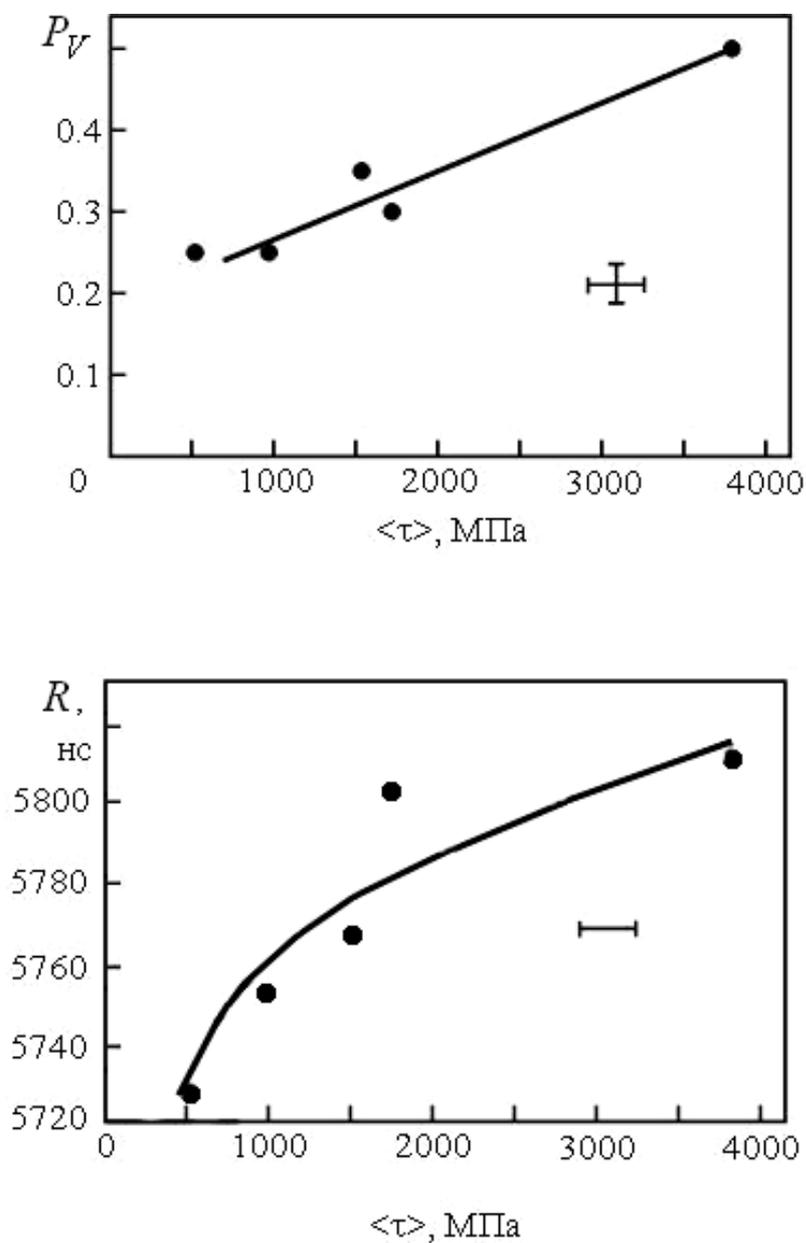


Рис. 2.18. Связь средних внутренних напряжений  $\langle \tau \rangle$  с объемной долей структуры  $P_V$ , содержащей дефектную  $\alpha$ -фазу и микротрещины (а), и задержкой импульсов релеевских волн (б)

## 2.3. Пассивные акустические методы НК

К пассивным методам относят *акустико-эмиссионный метод, вибрационно-диагностический и шумо-диагностический.*

### 2.3.1. Акустико-эмиссионный метод

Явление акустической эмиссии состоит в излучении упругих волн материалом в результате внутренней динамической локальной перестройки его структуры (рис. 2.19). Движение дислокаций, зарождение и развитие микротрещин, рост макротрещин, полиморфные превращения и др. сопровождаются акустической эмиссией. Преобразователи, установленные на поверхности контролируемого изделия, принимают упругие колебания и позволяют установить источник эмиссии, а при наличии нескольких преобразователей и при обработке полученных от них сигналов можно определить расположение источника.

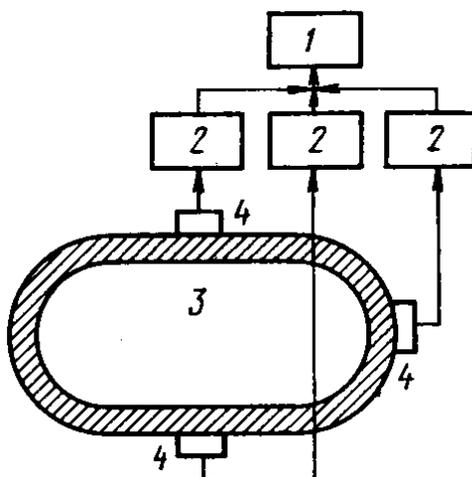


Рис. 2.19. Метод акустической эмиссии: 1 – блок обработки результатов; 2 – усилитель; 3 – объект контроля; 4 – приемник

В последнее время метод акустической эмиссии (АЭ) является одним из наиболее перспективных в части оценки реального состояния технических устройств, оценки работоспособности основного металла и сварных соединений, определения ресурса.

Кроме того метод АЭ обладает весьма существенными преимуществами перед другими методами при анализе состояния материалов сварных конструкций. К таким преимуществам отно-

сятся прежде всего возможность стопроцентного контроля всего объема материала конструкции, диагностирования конструкций без остановки производства, исключения громоздких гидроиспытаний с заменой их пневмоиспытаниями. Большое значение приобретает возможность использования диагностической аппаратуры на основе АЭ для управления процессом производства в предаварийной и аварийной ситуациях, что позволяет своевременно принимать меры по предупреждению аварий, обеспечивая эксплуатацию конструкций по фактическому состоянию.

**Технология обеспечения безопасной эксплуатации конструкций на основе АЭ.** Проблема обеспечения безопасности эксплуатации конструкций в настоящее время успешно решается учеными и специалистами в разных странах. Основными направлениями этих работ можно считать следующие:

теоретические и экспериментальные исследования разрушения материалов конструкций и сопутствующих ему явлений – носителей информации о процессах, протекающих в материалах при разрушении;

теория и технология контроля, распознающие критические этапы разрушения материалов на основе расчета или дискриминации характерных ситуаций процесса разрушения;

программное обеспечение и аппаратура, реализующие технологию контроля и включающие рабочие программы организации движения, обработки и сжатия поступающей информации, алгоритмы распознавания протекающих в материале при его разрушении процессов на основе математической статистики, теории вероятности, теории прогнозирования и принятия решений;

сертификация создаваемых методик и контрольного оборудования, обучение персонала, выполняющего работы по контролю состояния материалов конструкций;

разработка и выпуск стандартов, методик, инструкций и других нормативных и методических материалов, необходимых для технологии и аппаратуры на промышленных объектах.

На рис. 2.20 представлена схема технологии обеспечения безопасности эксплуатации конструкций на основе вектора состояния материала (ВСМ), указанного в качестве основного блока данной схемы. В состав схемы технологии входит не только

измерительная аппаратура с необходимым программным обеспечением, но и блоки метрологии метода и аппаратуры, блок нормативной документации, необходимой для работы контрольного оборудования на производстве, блок подготовки персонала и блок сервисного обслуживания и консультаций по применению.



Рис. 2.20. Блок-схема технологии контроля на основе ВСМ

Работы по каждому из представленных пяти направлений должны быть увязаны друг с другом. Это достаточно очевидно, так как следует предлагать теорию и алгоритмы прогноза разрушения, которые могут быть реализованы современной измерительной и вычислительной техникой. Зная это, следует увязывать взаимные возможности теории и аппаратуры с тем, чтобы теоретики не требовали невозможного от аппаратуры и вычислительной математики, а конструкторы аппаратуры не требовали того же от теоретиков. Таким образом, требуется гибкая система работы в указанных направлениях.

Остановимся более подробно на проблемах АЭ диагностики.

**Проблемы и подходы к обеспечению эффективности АЭ диагностики.** Одним из основных вопросов АЭ диагностики является вопрос анализа упругих волн, возникающих при деформировании материалов конструкций. Эта задача решалась многими специалистами в течение длительного периода времени.

Прежде всего следует отметить Yih-Hsing Pao и Ralph R. Gajewski, которые предложили так называемую обобщенную лучевую теорию расчета распространения упругой волны в твердых телах [32]. Согласно этой теории, упругие волны, распространяющиеся по различным траекториям вследствие многократных отражений и преломлений, представляются в виде интегралов по лучу, каждый из которых может быть точно вычислен методом Каньярда, разработанным в 1939 г. Авторы анализируют основные уравнения и применяют их для решения конкретных задач. Решение не удалось получить в замкнутой аналитической форме, поэтому оно представлено в виде численного алгоритма, описывающего распространение выбранного луча при действии точечного источника.

Как отмечают Yih-Hsing Pao и Ralph R. Gajewski, предложенная теория ранее применялась для геофизических задач и приспособлена ими для металлических пластин. В частности, они отмечали, что акустические сигналы, возникающие в процессе **роста** дефектов в твердых телах, незначительно отличаются от сейсмических волн или волн, распространяющихся под водой в результате взрыва. Прослеживая траектории отраженных и преломленных лучей, теория обобщенного луча дает возможность анализа сигналов, возникших в пластине от действия точечного источника излучения.

В качестве существенного недостатка следует отметить сложность теории и громоздкость алгоритма решения. При выполнении расчетов необходимо выбирать необходимый путь распространения волны и путем суммирования отдельных составляющих движения волны с учетом отражений и переотражений от стенок пластины получить окончательное решение. Интересные работы по изучению распространения акустических волн применительно к методологии АЭ были проделаны группой специалистов Физико-механического института им. Г. В. Карпенко НАН Украины во главе с проф. А. Е. Андрейкивым [33]. Аналитические исследования и испытания, выполненные А. Е. Андрейкивым и Н. В. Лысаком, касались образования трещины. Авторы, в частности, показали, что в этот момент излучение АЭ колебаний осуществляется направленно.

Появление современной мощной вычислительной техники позволило по-новому рассмотреть проблему анализа процессов, возникающих при излучении источника в любой локальной области пластины [34]. Оказалось возможным привязать точечный источник излучения упругих колебаний не только к процессам разрушения, когда двигаются и сосредотачиваются в определенной микроне зоне скопления дислокаций, но и к процессам распространения трещины, привязав точечный источник излучения к вершине движущейся трещины [34]. Момент же образования микротрещины может быть зафиксирован на основании разработок, представленных в работе [33]. В этом случае решение можно получить аналитически для всего объема пластины без ограничений [33, 34].

Полученные результаты позволили достаточно простым способом проанализировать волновые процессы, протекающие на поверхности пластин при действии точечного возбудителя, расположенного на различной глубине по толщине пластины. Результаты расчета дали возможность проследить амплитудно-частотные спектры, зарегистрированные контролирующим оборудованием после прохождения акустического сигнала через приемник, имеющий определенный пропускающий спектр. Другими словами, благодаря расчетам, проделанным на основании разработанной теории, появилась возможность обратного перехода к исходному сигналу, а значит, и возможность энергетической оценки происходящего изменения в структуре материала в местах возникновения этого сигнала.

*В настоящее время существует большое количество российских и зарубежных фирм, выпускающих АЭ-системы.*

*Рассмотрим одну из них – систему, разработанную в ИЭС им. Патона.*

На рис. 2.21 представлены спектры АЭ сигналов, полученные аналитическим путем в трубе большого диаметра с толщиной стенки 10 мм. Видно, что в зависимости от спектральной характеристики преобразователя на поверхности пластины в прибор поступают сигналы (правый график), существенно отличающиеся от тех, которые были генерированы источником излучения (левый график).

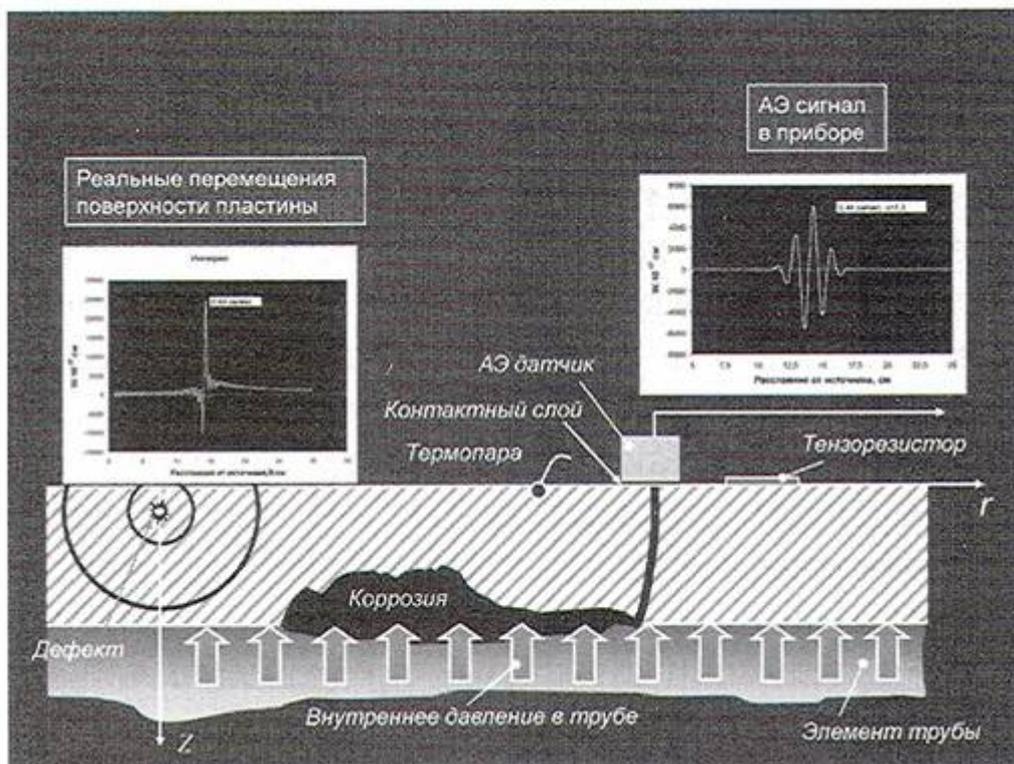


Рис. 2.21. Распространение упругой волны в трубе большого диаметра от источника на глубине 0,2 см от поверхности

На рисунке показаны дополнительные источники информации (температура, деформации, внутреннее давление в трубе), необходимые для прогнозирования разрушающей нагрузки и остаточного ресурса трубы на основе ВСМ технологии.

Данную работу выполняли с использованием АЭ диагностической системы ЕМА-3У, прогнозирующей разрушающую нагрузку и остаточный ресурс материала (рис. 2.22).

На рисунке показан основной 32-канальный блок (16 акустических каналов и 16 низкочастотных для измерения дополнительных параметров анализа), ноутбук и персональный компьютер с разной мощностью обработки всей поступающей информации, АЭ датчики и промежуточные усилители. Кабельное хозяйство размещается в специальных катушках. Отличительной особенностью и преимуществом данной АЭ системы является удаление измерительных АЭ датчиков от промежуточных усилителей на расстояние до 100 м. Разработан и реализован в промышленности стационарный вариант системы технической диагностики ЕМА-3С (рис. 2.23).

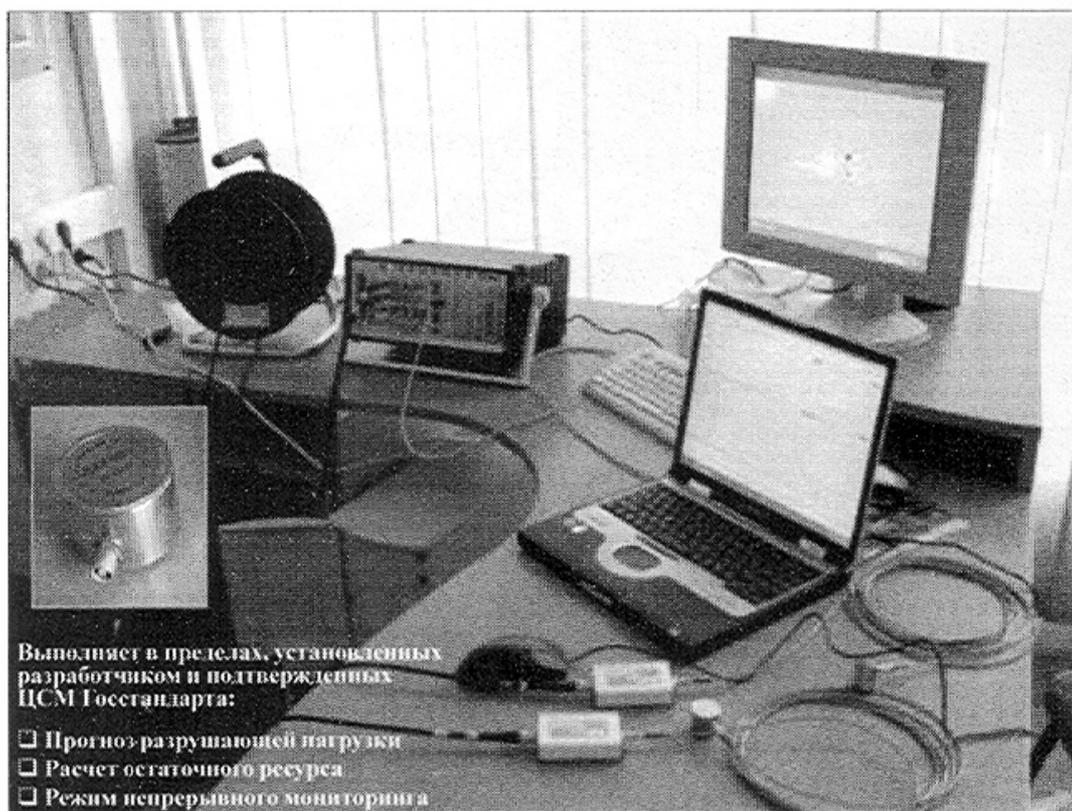


Рис. 2.22. Система АЭ диагностики ЕМА-3У

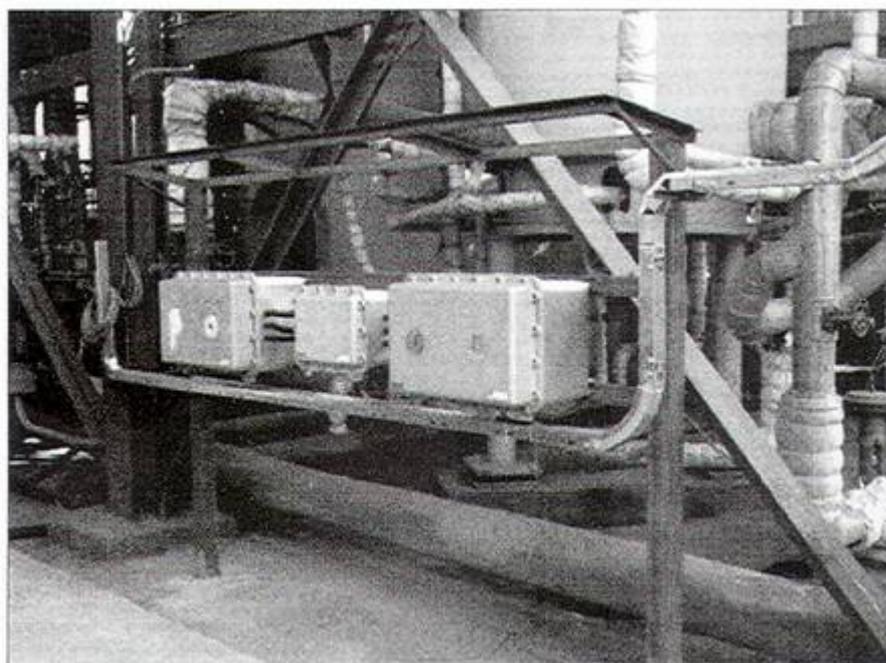


Рис. 2.23. Стационарный вариант системы непрерывного мониторинга ЕМА-3С

Так же, как и ЕМА-ЗУ, стационарная система прогнозирует разрушающую нагрузку и остаточный ресурс. С целью реализации разработанной на основе проведенных исследований технологии оценки состояния материалов конструкций, прогнозирования их остаточного ресурса разработаны необходимые нормативные документы, последний из которых регламентирует применение технологии к трубопроводам и оборудованию химических и нефтехимических производств.

*Отметим, что, начиная с середины 1990-х годов, все большее внимание уделяется непрерывному мониторингу ответственных объектов, разрушение которых может привести к серьезным экологическим потерям.*

При этом рекомендуемый мониторинг предполагает прогнозирование надежности оборудования с определением остаточного ресурса его работы в текущий период эксплуатации (краткосрочный) и вероятность безотказной работы в течение заданного периода его последующей эксплуатации (долгосрочный прогноз).

Построение таких систем представляет собой сложную научно-техническую и инженерную задачу, требующую сочетания последних достижений в области технической диагностики, измерительной техники, компьютерных технологий и науки о прочности материалов с требованиями к технологии оценки состояния конструкций и его прогнозирования на заданный расчетный промежуток времени.

Необходимо отметить, что, используя результаты проведенных исследований [34], создана система непрерывного мониторинга материалов конструкций на основе АЭ. Первая часть этой системы ЕМА-ЗС (стационарная система непрерывного мониторинга) изготовлена по заказу Одесского припортового завода и введена в штатную эксплуатацию в марте 2003 г. для непрерывного контроля хранилищ жидкого аммиака объемом 34 тыс. м (диаметр хранилища 52 м, высота 21 м). Сейчас на заводе постоянно функционируют 6 таких систем. Контроль состояния материала из трудоемкой и кропотливой процедуры постепенно превращается в автоматизированный процесс, когда из единого центра нажатием кнопки можно в любой момент времени узнать, в каком состоянии находится та или иная конструкция. Необходи-

мо отметить, что применение АЭ при контроле конструкций может быть также эффективным, если использовать только одну составляющую метода – определять только координаты АЭ активности материала в процессе его нагружения. Это позволит сократить объемы контроля за счет сосредоточения дополнительной контрольной аппаратуры лишь в тех местах, которые указаны АЭ измерениями. Конечно, здесь будут показаны и участки, где дефектов нет, но все равно использование АЭ аппаратуры в таком режиме целесообразно в связи с сокращением объема контрольных работ.

*Поэтому необходимо подчеркнуть, что метод АЭ может применяться в двух режимах:*

*в режиме целеуказания мест активных дефектов. Эта процедура существенно уменьшает объем работы дефектоскопистов, указывая места необходимого контроля. При этом оставшаяся часть объекта рассматривается как бездефектная;*

*в режиме диагностирования состояния материала конструкции. В этом случае объединяются две функции оборудования – целеуказание мест, в которых дефекты начинают себя проявлять, и анализ активности дефектов в этих местах, определение степени их опасности, прогнозирование разрушающей нагрузки и остаточного ресурса материала. При этом используется как АЭ информация, так и другая информация, полученная при контроле и необходимая для принятия решения.*

Как видно, задача оценки состояния конструкций и прогнозирование этого состояния на необходимый для принятия решения период времени – многоплановая. Наилучшим способом ее решения будет тот, который применяет многопараметрический подход, воплощением которого является диагностическая аппаратура семейства ЕМА, работающая с ВСМ. Методика и аппаратура, основанные на многопараметрической оценке состояния конструкций, должны включать контроль и анализ акустической активности материалов, сопровождающей и характеризующей различные этапы его деформирования вплоть до разрушения.

### 2.3.2. Вибрационный и шумо-диагностический методы

При использовании *вибрационно-диагностического* метода анализируют параметры вибраций контролируемой детали с помощью приемников контактного типа.

В *шумо-диагностическом* методе изучают спектр шумов работающего механизма в целом на слух или с помощью микрофонных и других приемников – анализаторов спектра.

По частотам все рассмотренные акустические методы делят на *низкочастотные* и *высокочастотные*. К первым относят методы с частотами до 100 кГц, ко второму – методы, использующие частотный спектр от нескольких сотен кГц до 50 МГц, эти методы называют *ультразвуковыми*.

Вышеназванные методы диагностики широко не используются при контроле качества сварных соединений, поэтому они подробно не рассмотрены в данном учебном пособии.

### 2.4. Контрольные вопросы

1. Какие колебания называют акустическими?
2. Что такое *мода*?
3. На каких принципах основана ультразвуковая дефектоскопия?
4. За счет какого эффекта получают ультразвук?
5. Что такое ЭАП, какие они бывают?
6. Что такое реверберация, дифракция, интерференция?
7. Опишите закон Снеллиуса.
8. Какая существует классификация акустических методов контроля?
9. Какие методы контроля относятся к активным?
10. Какие методы контроля относятся к пассивным?
11. Опишите принцип контроля эхо-теневым методом.
12. Что такое спектрально-акустический метод контроля?
13. Какие методы относят к методам отражения, их сущность?

14. Какие виды дефектов можно выявить спектрально-акустическим методом?
15. Опишите сущность акустико-эмиссионного контроля.
16. Назовите основные преимущества метода АЭ.

### **3. МАКРО- И МИКРОАНАЛИЗ, ФРАКТОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

В настоящей главе мы приступаем к изучению разрушающих методов испытаний, основное отличие которых заключается в необходимости вырезки из реальной конструкции заготовок для изготовления специальных образцов для исследований, что не всегда технически и экономически возможно, целесообразно и допустимо, либо изготовление образцов-свидетелей (в литейном производстве) и заварка контрольных образцов (в сварочном производстве).

В общем виде разрушающие испытания подразделяются на следующие виды:

- методы исследования макро- и микроструктуры;
- просвечивающая и растровая электронная микроскопия;
- стереология (количественная металлография);
- рентгеноструктурный и рентгеноспектральный анализ, радиоспектроскопия;
- ядерный гамма-резонанс (эффект Мессбауэра);
- методы исследования поверхностей в металлах;
- физические методы исследования (тепловые, объемные, электрические, магнитные);
- статические, циклические, динамические испытания металлов;
- определение сопротивления разрушению;
- методы определения модулей упругости и специальные испытания.

Для контроля качества сварных соединений такие методы, как рентгеноструктурный и рентгеноспектральный анализ, радиоспектроскопия, исследования поверхностей в металлах, различные физические методы и специальные испытания в производственных условиях практически не используются, поэтому в данном учебном пособии они не описываются.

В этой главе рассматриваются методы анализа состояния металлов с использованием световых приборов и микроскопов.

### 3.1. Макроскопические исследования (макроанализ)

Макроскопический метод исследования применяют для изучения макроструктуры путем просмотра поверхности специально подготовленных образцов или изломов невооруженным глазом или при увеличении до 30 раз. Макроанализ дает представление об общем строении металла и позволяет оценить его качество после различных видов обработки.

Этот метод не определяет тонкостей строения металлов и часто является предварительным видом исследования, который позволяет выбрать участки для дальнейшего более детального микроструктурного исследования. С помощью макроанализа обычно определяют:

- нарушения сплошности металла – раковины, рыхлоты, трещины, дефекты сварки (непровары, газовые пузыри, шлаковые включения), флокены;
- размеры и ориентацию зерен в литом металле, дендритное строение, зону транскристаллизации;
- ликвации и присутствие в них грубых инородных включений;
- волокнистую структуру деформированного металла;
- структурную или химическую неоднородность металла, созданную термомеханической или химико-термической обработкой;
- анализ видов изломов;
- прокаливаемость (для инструментальных сталей, для которых требуется сохранение вязкой сердцевины).

Поверхность металла, подлежащую макроисследованию, шлифуют и подвергают травлению специальными реактивами. Травление позволяет выявить мелкие дефекты, невидимые до травления. Поверхность шлифа должна быть очищена от различных загрязнений, следов масла и т. д., поэтому ее до исследования протирают спиртом.

Макроанализ проводят как на шлифах, так и непосредственно на деталях оборудования. Так, например, при диагностировании был выявлен дефект в литье, макротравлению подвергают зону его расположения для определения границ дефекта. После

травления всю пораженную дефектом часть металла полностью удаляют вырубкой или воздушно-дуговой строжкой при значительном объеме выборки.

После подготовки металла к ремонту с применением сварки проводят макротравление для того, чтобы убедиться, что весь дефектный металл выбран. После заварки весь дефектный участок подвергается макротравлению и ВИКу, для выявления поверхностных дефектов, возможно, образованных при сварке.

### **3.2. Микроскопические исследования (микроанализ)**

Микроанализ проводят с целью определения микроструктуры и фазового состава сталей, оценки количества, размеров, форм и распределения различных фаз. Этот анализ позволяет выявить структуру, характерную для некоторых видов обработки, обнаружить мельчайшие пороки металла (наличие микроповрежденности, микротрещин, неметаллических включений и т. д.).

Для выполнения металлографического анализа из исследуемого металла изготавливают микрошлиф (небольшой образец), одну из плоскостей которого тщательно шлифуют и полируют, далее подвергают травлению специальными реактивами. В некоторых случаях исследованию подвергаются нетравленные образцы, например для оценки загрязненности стали неметаллическими включениями.

Обычно для выявления микроструктуры низколегированных сталей применяют четырехпроцентный раствор азотной кислоты в спирте. Под влиянием реактива происходит избирательное растворение металлических или других фаз, а также их пограничных участков, вследствие различных физико-химических свойств. В результате чего образуется рельеф. При наблюдении под микроскопом значительно растворившиеся участки из-за тени или более низкого коэффициента отражения будут более темными, а нерастворившиеся – более светлыми. При травлении металла, состоящего из однородных зерен, выявляются их границы в виде темной тонкой сетки.

В некоторых случаях применяют травление реактивами, образующими на поверхности шлифа осадки, благодаря реакции

между компонентами реактива. При травлении толщина осадка на разных фазах неодинакова.

Микроструктуру изучают с помощью оптических микроскопов (ГОСТ 10243). Современные оптические микроскопы позволяют исследовать микроструктуру металла при увеличениях до 1200–1800 раз. Разрешающая способность светового микроскопа не превышает 0,2 мкм.

Большинство металлографических исследований проводят с применением светопольного (вертикального) освещения. Для дополнительного повышения контрастности применяют другие виды освещения, такие как исследования в поляризованном свете, метод косоого освещения, метод темнопольного освещения.

Металлографические микроскопы позволяют также наблюдать и фотографировать микроструктуру в различных полях и при различных освещенностях. Современные исследовательские микроскопы могут быть оснащены приспособлениями для измерения микротвердости, приставками для нагрева образцов и т. д.

Отечественной промышленностью выпускаются металлографические микроскопы типа ММР-2, ММР-4, МИМ-7, горизонтальный микроскоп МИМ-8 с различными модификациями, более современная модель МИМ-9, упрощенные модели типа ММУ-1, ММУ-3. Наряду с отечественными в исследовательских лабораториях широко применяют микроскопы «Неофот-21», «Эпиквант» и др.

В последние годы все большее внимание при исследовании и контроле качества материалов уделяется установлению связи между их свойствами и количественными характеристиками микроструктуры, такими как размер зерна, содержание различных фаз, карбидов, включений, микропор и т. д., их распределение по размерам и форме. В металловедении применяют точечный метод, линейный (метод секущих) и количественный анализ по площадям.

Все эти методы просты по своей сути, но требуют больших временных затрат. В связи с вышеизложенным, широкому применению этих методов в значительной мере способствовали разработки специальных автоматических приборов для количественного анализа.

Одним из первых таких анализаторов, который нашел применение в металлургической практике, является прибор типа «Квантиметр». Здесь используется принцип линейного анализа. Получаемое в обычном вертикальном микроскопе с автоматическим перемещением предметного столика изображение структуры вводится в телевизионную камеру, сигналы с которой подаются на детектор и экран контрольного телевизора. Детектор выделяет и оценивает импульсы, далее передает их на регистрирующее устройство.

Количественные анализаторы предназначены в основном для контроля качества металлопродукции в производственных условиях.

Во многих металлургических лабораториях эксплуатируются автоматические установки типа «Эпиквант», которые работают на принципе линейного анализа. Данный прибор позволяет оценивать одновременно до трех структурных составляющих, установить величину зерна.

Методы количественной металлографии полезно использовать при техническом диагностировании для оценки характера изменения микроструктуры длительно работающего металла в процессе эксплуатации.

При исследовании микроструктуры металла непосредственно на оборудовании хорошо зарекомендовали себя переносные микроскопы, сконструированные на базе биологического микроскопа МБИ-1 и металлографического микроскопа ММУ-1 или ММУ-3. Микроскоп крепят к детали с помощью специального устройства и проводят исследование микроструктуры и ее фотографирование с помощью микронасадки типа МФН. Переносные микроскопы не дают возможности исследовать микроструктуру при больших увеличениях и в труднодоступных местах.

Широкое распространение получил метод исследования оттисков под микроскопом в лабораторных условиях. Оттиски (слепки) снимают с микрошлифов, приготовленных непосредственно на объекте, при этом микрошлиф подвергают более глубокому травлению, чем для наблюдения под микроскопом. Для получения слепка на микрошлиф накладывают кубик полистирола или кубик колоксилиновой основы рентгеновской пленки, раз-

мягченной в бензоле или в ацетоне и заполняющей все неровности протравленного шлифа, при этом исследованная поверхность воспроизводится довольно точно.

Иногда для исследования микроструктуры применяют метод сколов. Специально заточенным зубилом с поверхности детали снимают пробу в виде скола толщиной 1,5–2,0 мм и шириной 3,0–4,0 мм. Скол заливают в легкоплавкий сплав и исследуют под микроскопом. Высокая производительность метода и возможность исследования микроструктуры при больших увеличениях позволяют широко применять этот метод как при входном, так и при эксплуатационном контроле микроструктуры.

### **3.3. Анализатор изображений для световой микроскопии**

Анализатор изображений (АИ) представляет собой программно-аппаратный комплекс, предназначенный для получения, преобразования, количественной обработки изображений и хранения полученной информации.

Состав и свойства комплекса определяются теми задачами, которые он призван решить. Соединение в единую систему отдельных приборов позволяет получить новые возможности, которыми не обладает ни одна из составляющих сама по себе [36].

Универсальный АИ – понятие условное, так же как условны понятия «автомобиль» или «компьютер». Невозможно создать АИ на «все случаи жизни», поэтому в практике наибольшее распространение получили специализированные приборы. АИ для световой микроскопии представляет собой специализированный комплекс для работы с объектами в световой области 360–770 нм, т. е. в области видимого света.

АИ для световой микроскопии, как правило, имеет модульное строение и состоит из систем ввода изображений (микроскоп, камера), компьютера, принтера. Для документирования полученных результатов модульное строение обеспечивает гибкость системы анализа изображений, которая с легкостью может быть адаптирована к потребностям пользователя в зависимости от задачи, которую он собирается решать.

В рамках одного направления (медицина, материаловедение, биология и др.) используются модульные системы, где уни-

версальность достигается многофункциональностью отдельных блоков.

**Система ввода** изображений состоит из светового микроскопа и камеры.

Микроскоп и камера – это единый модуль, в котором отдельные части подбираются по совместимости оптических свойств и соединяются специальным адаптером, который устанавливается на видеовыход бинокулярной насадки микроскопа.

Адаптер служит не только для механической установки камеры, но и обеспечивает передачу изображений без искажений.

Компьютер – самая сложная часть АИ, определяющая быстродействие выполнения поставленной задачи. Иногда в состав системы ввода АИ может входить микроскоп с дистанционным управлением от ПК (рис. 3.1).

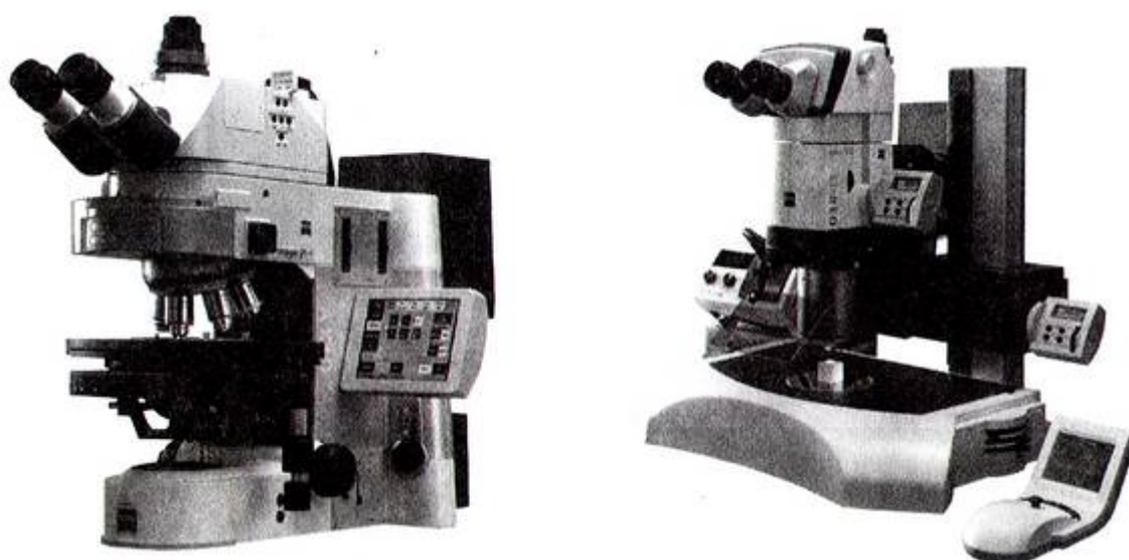


Рис. 3.1. Два типа автоматических анализаторов

Программное обеспечение (ПО), входящее в состав АИ, определяет технологию его работы. В зависимости от специализации анализатора набор имеющихся функций ПО может сильно варьироваться, но в общем виде наиболее часто используемая блок-схема ПО выглядит так, как представлена на рис. 3.2.



Рис. 3.2. Блок-схема программного обеспечения

По функциональному назначению различают два основных типа АИ – *исследовательский* и *специализированный*.

*Исследовательские АИ* представляют широкие возможности разностороннего изучения структуры и текстуры изображения в какой-либо широкой области, например в материаловедении. Система ввода такого анализатора изображений – многофункциональная и, как правило, дорогостоящая. Она состоит из микроскопа по классу сложности не ниже лабораторного, например Axiosop 40, Axiovent 40MAT (Carl Zeiss), способного работать в проходящем и отраженном свете, в поляризованном или свете люминесценции. Более сложные и тонкие исследования проводят на микроскопах, по классу сложности соответствующих исследовательским (Axiosop 2 plus, Axiosop 2 MAT).

Камера, установленная на микроскопе, имеет высокое разрешение и чувствительность, отличается хорошим качеством ввода цветных изображений.

ПО исследовательского АИ включает большой набор функций, так как заранее не известно, какая обработка потребуется для одного или другого типа изображений. Использование подобного ПО предполагает, что исследователь потратит какое-то

время на изучение функций системы и в дальнейшем сам сможет определять, что нужно для решения своих задач; после того как пользователь подберет последовательность функций, необходимых для получения нужного результата, он может записать ее в виде методики.

Как правило, чтобы обучить пользователя формировать свои методики, АИ предлагает список предустановленных методик, которые можно видоизменять или дополнять.

Для обработки результатов анализа исследовательские АИ включают в себя статистику, аппарат построения зависимостей и сравнения параметров структуры. Большое значение придается возможности передачи данных в другое ПО для дополнительной обработки (Statistica, Excel), а также другим пользовательским сетям.

*Специализированные АИ* работают на одном типе препаратов, приготовленных по одной технологии, и решают узкий круг задач, относящихся к данной области. Система ввода подобных АИ приспособлена работать с препаратами, специально приготовленными для проведения автоматического анализа. ПО содержит только специализированные методики, которые пользователь не может видоизменять.

### **3.4. Фрактографические исследования**

При контроле качества сварных соединений, при техническом диагностировании основной целью применения *фрактографии* является анализ эксплуатационных повреждений металла объектов повышенной опасности – определение причины или причин, вызвавших повреждение узла или детали, для того чтобы можно было провести соответствующую корректировку обработки других узлов или деталей во избежание подобного рода повреждений.

Поскольку вид излома в определенной мере представляет собой своеобразную фотографию процессов, которые происходили при разрушении объекта, фрактография является одним из основных источников информации о причинах и характере разрушения детали.

При изучении поверхности излома можно получить следующую информацию о процессе разрушения:

- оценить уровень разрушающего усилия;
- определить степень деформации при разрушении;
- установить причины, вызывающие ослабление материала на пути распространения разрушения.

Пути разрушения изучаются двумя способами. Первый – исследование поверхности излома при различных увеличениях с использованием различных фрактографических приемов и исследованием возможно большей площади. Второй способ – изучение поперечных сечений, перпендикулярных к направлению остановок трещины или ко всей поверхности разрушения. Хотя второй способ дает информацию лишь об ограниченном участке поверхности излома, он имеет большое значение при исследовании взаимосвязи микроструктуры и направления развития трещины.

***Основы анализа эксплуатационных повреждений и рекомендации по методике диагностирования разрушенных деталей.*** Основной причиной любого разрушения являются напряжения, величина которых превышает предельную несущую способность детали [39, 40]. Эти напряжения могут возникать из-за большого числа разнообразных факторов, каждый из которых необходимо учитывать для однозначной оценки и установления причины повреждения. Поэтому при анализе разрушения рекомендуется выполнять ряд последовательных операций, приведенных ниже.

*Исследование разрушенных деталей* необходимо начинать с тщательного осмотра всей детали, особенно поверхностей, примыкающих к излому, и изучению вида излома (визуально, на оптическом либо при необходимости на растровом микроскопе). При этом устанавливаются наличие механических повреждений, коррозии, деформации детали, вторичного разрушения. Определяют фокус излома и очаг разрушения, направление распространения трещины. Эти данные позволяют сделать вывод относительно существующих условий эксплуатации до и в процессе разрушения.

*Анализ напряженного состояния.* Необходимо определить соответствие характера, скорости и величины приложенной нагрузки расчетным характеристикам для данной детали. Оценить направление главного напряжения по отношению к общей конфигурации детали, оценить зоны наибольшей опасности остаточных напряжений.

*Материал.* Определить соответствие примененного материала требованиям НТД. Оценить прочностные характеристики и наличие поверхностных либо внутренних несплошностей, способствующих разрушению. При обнаружении отклонений в качестве материала от заданных ГОСТом или ТУ норм необходимо определить степень влияния обнаруженной аномалии с учетом свойств материала и характера разрушения данной детали. Большое внимание следует уделять очагу разрушения, проверив наличие вблизи него металлургических пороков, старых трещин, конструктивных и технологических концентраторов. По контактированию начального очага с выявленными дефектами определяется их роль в разрушении. Оценивают характер микроструктуры и микротвердость вблизи очага разрушения.

*Форма.* Проверяют соответствие детали требованиям технической документации и рабочим чертежам, а также достаточность поперечного сечения для противостояния локальным перегрузкам. Определяют и измеряют радиусы галтелей, оценивают их достаточность. Выявляют наличие деформации каких-либо контуров детали, полученной в процессе эксплуатации, особенно следует обратить внимание на механические повреждения поверхности. Оценивают достаточность зазора между взаимодействующими деталями.

*Рабочая среда.* Выясняют возможность эксплуатации детали в агрессивных средах, при пониженных либо повышенных температурах, оценивают наличие необходимой защиты поверхности детали. Выявляют возможность взаимодействия (например, гальванического) между материалом детали и материалом соседних узлов конструкции.

Изучение поверхностей изломов породило свою терминологическую систему для описания рельефов, которые образуются при различных условиях нагружения. Рассмотрим характерные

детали строения изломов гладких образцов, испытанных на растяжение.

Для таких образцов характерны три зоны [40, 41]:

- а) волокнистая;
- б) радиальная;
- в) зона среза (рис. 3.3).

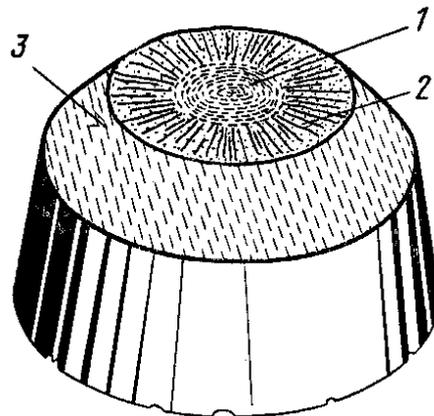


Рис. 3.3. Схематическое изображение зон типичного излома, образующегося при растяжении цилиндрического гладкого образца. Поверхности волокнистой и радиальной зон обычно перпендикулярны к оси растяжения. Поверхность зоны среза всегда находится под углом  $\sim 45^\circ$  к оси растяжения:  
1 – волокнистая зона; 2 – радиальная зона; 3 – зона среза

Изломы, имеющие только одну зону, образуются только при условии либо большой вязкости, либо большой хрупкости. На большинстве изломов различают две или три зоны в следующих последовательностях:

1. Волокнистая зона и зона среза.
2. Волокнистая и радиальная зона и зона среза.
3. Радиальная зона и зона среза (рис. 3.4).

*Волокнистая зона.* Эта зона соответствует области медленного роста трещины. Расположена она в центре излома и окружает очаг разрушения, который обычно находится на оси растяжения. Волокнистая зона состоит из области случайно расположенных волокон или серий тонких круговых борозд. Борозды перпендикулярны к направлению распространения трещины и развиваются от очага к периферии образца. Области случайно расположенных волокон типичны для углеродистых сталей.

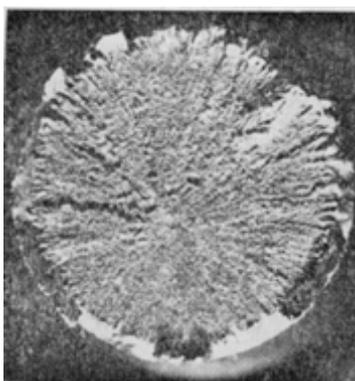


Рис. 3.4. Излом гладкого образца из высокоуглеродистой стали после испытания на растяжение при  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Состоит из радиальной зоны и зоны среза. Структура стали – отпущенный мартенсит, твердость HRC 35. Волокнистая зона отсутствует. Радиальные рубцы занимают почти всю площадь излома, за исключением узкой зоны среза,  $\times 12$

*Радиальная зона.* При переходе трещины от медленного роста к быстрому или нестабильному ее распространению образуются радиальные рубцы, которые совпадают с общим направлением развития трещины. Эти рубцы начинаются либо от периферии волокнистой зоны (см. рис. 3.4), либо от самого очага разрушения. Точка, в которой сходятся рубцы, является *очагом* излома. Рубцы, в зависимости от характера микроструктуры, могут быть тонкими или грубыми. Изломы сталей средней прочности со структурой мартенсита отпуска имеют грубые радиальные рубцы, высокопрочные стали имеют тонкие радиальные рубцы.

В ряде случаев радиальная зона составляет полную поверхность излома, такой вид указывает на чрезвычайную хрупкость материала.

*Зона среза.* Эта зона состоит из ровного кольцеобразного участка, смежного со свободной поверхностью детали или образца. Зона среза зависит от напряженного состояния и свойств материала. Возможны четыре типа образования зон среза, три из которых переходные:

1. Зона среза.
2. Волокнистая зона, переходящая в зону среза.
3. Волокнистая зона, переходящая в радиальную, которая, в свою очередь, переходит в зону среза.
4. Радиальная зона, переходящая в зону среза.

Размеры и форма образцов для испытаний или деталей оказывают большое влияние на вид поверхности излома. Так как от формы детали или образца зависит напряженное состояние, соотношение зон излома у квадратных и прямоугольных образцов отличное от образцов с круглым поперечным сечением.

*Шевронные узоры.* Радиальная зона изломов прямоугольных деталей или образцов, ширина которых значительно больше толщины, имеет вид шеврона или «елочки», как показано на рис. 3.5. Эти узоры часто связаны с нестабильным, относительно быстрым развитием трещины, и их появление связано с несовпадением общего направления распространения трещины и кратчайшего направления от фронта трещины до свободной поверхности.

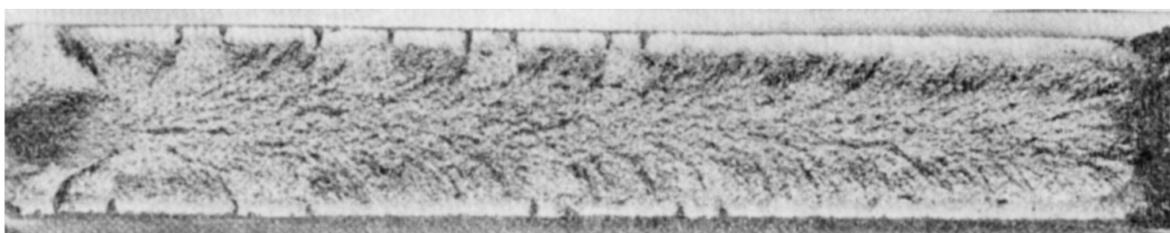


Рис. 3.5. Шевронный узор на поверхности разрушения плоского стального образца, происшедшего с высокой скоростью. Очаг разрушения расположен на левом конце образца и граничит с небольшой волокнистой зоной. Остальная поверхность излома – шевронные узоры, или «елочка». Вершины V-образных шевронов направлены от очага разрушения

В прямоугольных образцах либо деталях, ширина которых больше толщины, достаточно более короткого расстояния до свободных поверхностей в направлении толщины для изменения направления распространения фронта трещины. Очевидно, имеется критическое отношение ширины к толщине деталей или образцов, необходимое для образования шевронных узоров. Рубцы и шевронные узоры развиваются от предварительно нанесенной усталостной трещины – очага разрушения (рис. 3.6).

*Древовидные изломы.* На характер излома, кроме размеров и формы образцов, значительное влияние оказывает микроструктура металла. Особенно это относится к металлам, обладающим анизотропией. Кроме того, на характер поверхностей изломов влияет пористость, включения, вторичные фазы или сегрегации

легирующих элементов, которые располагаются в виде прожилок, полосок или строчек, вытянутых при прокатке либо ковке. Такие изломы называют *древовидными, полосчатыми или слоистыми* из-за грубого рельефа.

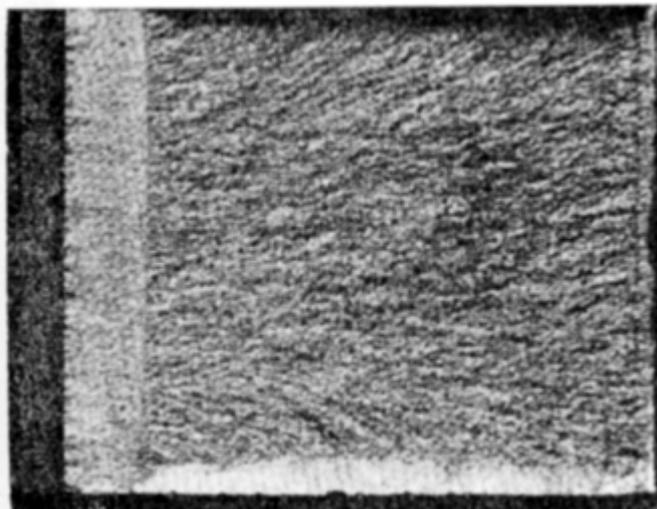


Рис. 3.6. Радиальные рубцы, идущие от предварительно нанесенной усталостной трещины, расположенные на поверхности излома образца для определения вязкости разрушения при испытании на изгиб.

Сталь 3 % Ni-Cr-Mo. Структура – отпущенный мартенсит, твердость HRC 52,5. Слева на световой фрактограмме виден надрез, который наносили на образец сначала режущим инструментом, а затем увеличивали его остроту электроэрозионной обработкой.

От этого надреза была выращена усталостная трещина.

Температура испытаний  $-73\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\times 3(1/3)$

*Усталостные изломы.* Для зоны усталости в усталостных изломах характерно несколько типов деталей рельефа. К ним относят *линии остановки фронта трещины – линии усталости, бороздки и храповый узор.*

*Линии остановки фронта трещины* используют для описания макроскопических особенностей усталостных изломов, которые представлены на рис. 3.7, 3.8. Рассматриваемые линии наиболее часто связаны с распространением усталостных трещин, отсутствие линий усталости еще не свидетельствует о том, что излом не является усталостным.



Рис. 3.7. Линии усталости на усталостном изломе поковки из алюминиевого сплава 7075-T73. Светлые, отражающие свет полосы – зоны медленного распространения трещины. При больших увеличениях внутри каждой полосы могут быть выявлены тысячи усталостных бороздок. Тусклые волокнистые полосы представляют собой зоны распространения трещины, образовавшиеся путем слияния микропор

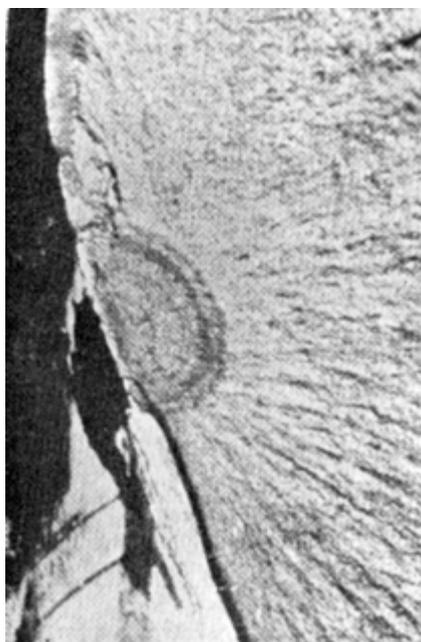


Рис. 3.8. Линии остановки фронта трещины на детали из стали 09Г2С, вызванные коррозией под напряжением. Эти линии обусловлены различной скоростью коррозии на поверхности трещины. Они не должны быть отнесены к линиям усталости,  $\times 4$

Отдельные линии характеризуют последовательное расположение фронта трещины, где происходят задержки при ее развитии в металле.

Линии остановки фронта трещины могут образоваться в результате:

- а) изменения величины циклических нагрузок;
- б) избирательного окисления или коррозии отдельных зон поверхности излома;
- в) небольшой местной пластической деформации в области высокой концентрации напряжений у вершины трещины.

По расположению линий усталости и величине промежутков между ними можно качественно оценить скорость распространения трещины и установить предысторию циклического нагружения детали. Тонкие линии усталости, расположенные с одинаковыми интервалами, свидетельствуют об относительно низкой скорости роста трещины; линии усталости, пересекающие основную часть излома, свидетельствуют о низких циклических нагрузках либо о перераспределении напряжений, если существует другой путь развития трещины.

*Бороздки.* Данный термин применяют обычно только для специфических рельефов, которые являются результатом распространения усталостных трещин. Бороздки могут быть как макроскопические, так и микроскопические, вторые встречаются чаще и могут быть обнаружены в тонкой структуре отдельных линий усталости. Наличие бороздок – подтверждение усталостного характера развития трещин, но отсутствие их не является достаточным доказательством противоположного. Установлено, что одна бороздка образуется за один цикл изменения нагрузки и по числу бороздок можно ориентировочно оценить долговечность деталей в части распространения усталостной трещины. Однако при сложных условиях нагружения бороздка может не образоваться за один цикл. Различают хрупкие и вязкие бороздки, которые можно наблюдать даже в соседних областях одного и того же сплава (рис. 3.9).



Рис. 3.9. Хрупкие (А) и вязкие (В) бороздки в изломе образца из высокопрочного алюминиевого сплава 7178-Т6. Хрупкие бороздки всегда лидируют, а вязкие бороздки тянутся вслед, как в кильватере корабля,  $\times 2000$

*Храповый узор.* Данный узор – макроскопическая особенность усталостных изломов. Он наблюдается преимущественно на усталостных изломах валов и плоских пружин, а также встречается в вязких изломах, образующихся в деталях при однократном нагружении при кручении. Показано, что при соединении двух соседних трещин образуется маленькая ступенька. Серия таких ступенек на наружной поверхности дает *храповый узор*.

Отсюда, для возникновения храпового узора требуется одновременное зарождение нескольких усталостных трещин, чему способствуют высокие напряжения, а также наличие концентраторов напряжений, таких как коррозионные питтинги или шлифовочные прижоги.

*Фасетки межзеренного разрушения и ямки.* Фасетки представляют собой поверхности отдельных зерен на поверхности разрушения, часто наблюдаемые на фрактограммах, полученных с помощью различных световых микроскопов при любых увеличениях. В большинстве случаев из-за случайной ориентации зерен и шероховатости излома довольно трудно найти достаточную поверхность зерна, перпендикулярную оптической оси микроскопа. На фрактограммах межзеренных изломов крупнозернистых материалов при достаточно низком увеличении, обеспечивающем хорошую глубину резкости, можно наблюдать фасетки межзеренного разрушения (рис. 3.10).

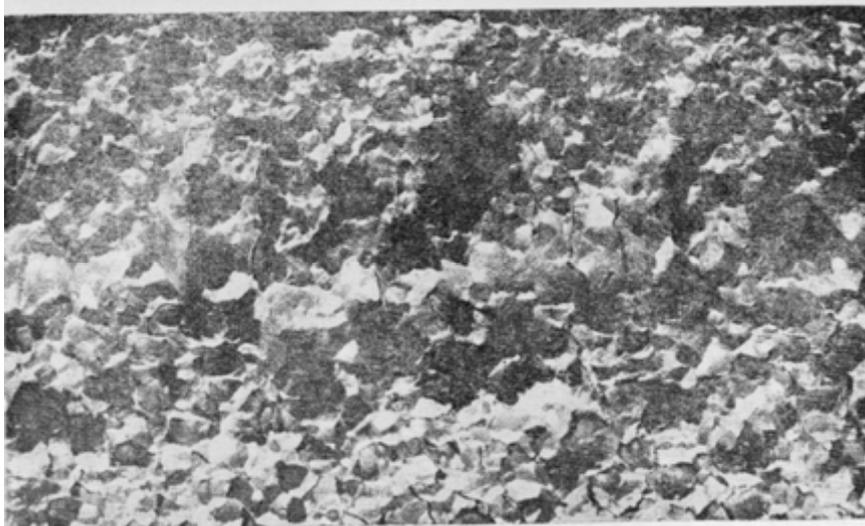


Рис. 3.10. Излом при большем увеличении. Блюм разрушился во время прокатки, при этом он раскололся на части и закрутился вокруг вала.

Деформация зерен отсутствует  
(очистка  $H_2SO_4$ , осветление  $HNO_3/HF$ ),  $\times 1(1/2)$

Одним из основных элементов вязкого разрушения являются *ямки*. Их образование вызвано слиянием микропор. Поскольку ямки очень малы и требуют для своего обнаружения большого увеличения, их трудно выявить методами световой микроскопии.

В прямой связи с первоначальным разрушением находится *вторичное растрескивание*, которое может быть трех типов: к первому относят те трещины, которые не отличаются от магистральной и развиваются по тому же механизму, этот тип растрескивания рассматривается как ветвление трещины; второй тип – результат действия того же механизма разрушения, но трещины развиваются от отдельных центров; третий тип связан с первичным разрушением, но трещины являются поперечными по отношению к плоскости первичного излома, эти трещины возникают при большой поперечной пластической деформации, сопутствующей первичному разрушению.

Довольно часто разрушение начинается от различных нарушений сплошности металла. К таким нарушениям относят: *закаты, волосовины, питтинги, усадочные раковины и газовые пузыри, горячие трещины, дефекты сварки, неметаллические включения и ликвации*. Эти дефекты преимущественно и становятся очагами разрушений объектов в процессе эксплуатации.

Поскольку в большинстве исследовательских лабораторий при анализе разрушенных деталей применяют в основном методы световой микроскопии, то и в настоящей работе рассмотрены характерные элементы разрушения, которые четко наблюдаются лишь при небольших увеличениях.

Первоначальное исследование изломов направлено главным образом на выявление всех особенностей рельефа, которые могут указать на месторасположение *очага разрушения*. Некоторые данные о направлении развития трещины можно получить при внешнем осмотре сломанной детали, а также можно восстановить и последовательность разрушения, при этом учитывается следующее:

- *направление, в котором расположено начало трещины, всегда противоположно направлению ее разветвления;*

- *если трещина встречается с другой трещиной под углом примерно  $90^\circ$ , то это свидетельствует о том, что она возникла позже и очаг разрушения следует искать не на ней, а на образовавшейся ранее трещине.*

Обычно область очага разрушения плоская, без боковых скосов, которые появляются лишь на некотором расстоянии от очага разрушения и становятся больше при увеличении этого расстояния.

Как правило, очаги разрушения находятся на свободных поверхностях детали, чему способствует наличие концентраторов напряжений, изгибающие или крутящие нагрузки, а также агрессивная среда.

Характерный пример разрушения при *ударном нагружении* приведен на рис. 3.11.

Здесь показан излом надрезанного прутка из хромистой стали, по которому наносили удары молотком. Для полного разрушения потребовалось два удара. Рубцы на изломе радиальные. Так как они не пересекают все сечение, то это свидетельствует об остановке трещины на линиях *A* и *B* после первого удара.

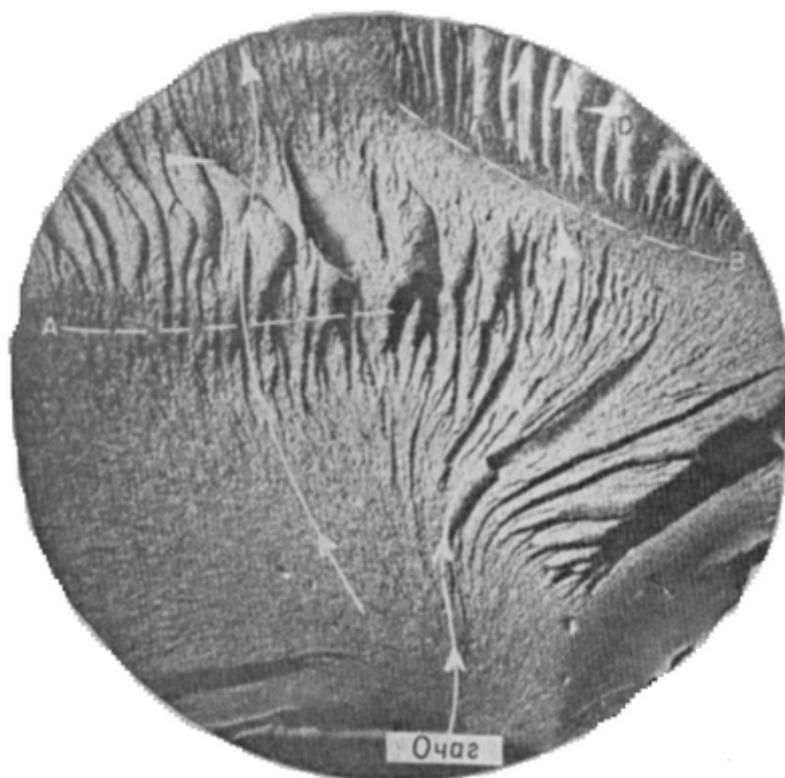


Рис. 3.11. Определение очага разрушения в изломе надрезанного прутка из стали с 12 % Cr. Разрушение произошло в результате двух ударов молотка. Трещина остановилась на линиях *A* и *B* при первом ударе молотка и возобновила движение при втором ударе молотка,  $\times 3$

Линии остановки показывают положение фронта трещины; перпендикуляры, проведенные к ним, должны пересечься в очаге разрушения либо вблизи него. Радиальные рубцы в зоне долома (*C* и *D*) также указывают на положение общего очага разрушения. В сталях различной твердости изломы, образовавшиеся при ударном однократном нагружении, различны. Трещины, распространяющиеся с поверхности в твердых высокопрочных сталях, часто имеют узкие зоны среза, которые начинаются с обеих сторон от очага разрушения.

В низкоуглеродистых сталях шевроны часто сходятся в области чуть ниже зон среза. Рельеф излома в области очага разрушения в среднеуглеродистых и высокоуглеродистых сталях с высокой твердостью обычно мелкофасеточный и может быть преимущественно межзеренным. По мере удаления от очага разрушения фасетки в изломе постепенно сменяются ямками. Обычно переход к темной зоне ямок бывает резким. В иных случаях на-

блюдают смешанные межзеренные и ямочные изломы. Внешний вид радиальных рубцов частично зависит от того, больше или меньше скорость роста трещины на поверхности, чем в подповерхностных областях. Если эта скорость максимальна на поверхности, то радиальные рубцы будут веерообразны, если максимальна в подповерхностных областях, то выявляются шевронные узоры. Узоры обоих видов радиально расходятся от очага разрушения.

Большинство эксплуатационных изломов образуются в результате разрушения, протекающего в следующей последовательности: зарождение трещины, субкритическое ее подрастание и быстрый долом, когда несущая способность оставшегося поперечного сечения перестает соответствовать приложенной нагрузке. Как уже отмечалось, всегда на изломе определяют число очагов разрушения. Многоочаговое разрушение, выявляемое по храповому узору, свидетельствует о высоком уровне напряжений или наличии нескольких отдельных концентраторов напряжений в области очага разрушения. Развитие трещины от одного очага разрушения говорит о более низком уровне приложенных напряжений и слабой концентрации напряжений. Далее оценивают форму и расположение фронта растущей трещины и определяют тип нагружения и концентрацию напряжений по факту опережения или отставания продвижения фронта трещины вблизи поверхности по сравнению с центром детали. И, наконец, по расположению и величине зоны долома судят об уровне номинальных напряжений.

На развитие трещины влияет несколько факторов, вызывающих изменение механизма ее распространения. К ним можно отнести: местные различия в микроструктуре; изменение коэффициента интенсивности напряжений; изменение температуры или химического состава окружающей среды; изменение напряженного состояния. Тип нагружения – один из главных факторов, влияющий на характер разрушения. При разработке конструкции детали заранее предвидят конкретный тип нагружения в процессе эксплуатации. Поэтому в первую очередь при анализе разрушения необходимо определить соответствие фактического нагружения расчетному. Из результатов фрактографического исследова-

ния можно получить информацию о характере и величине приложенного напряжения.

**В качестве примера рассмотрим выявление причины разрушения крана, установленного на территории Беловской ГРЭС (Кемеровская область).**

29 декабря 1997 года на Беловской ГРЭС ОАО «Кузбассэнерго» в 21 час 50 минут произошло обрушение консоли трубчатого моста крана-перегрузжателя вместе с грейферной тележкой и кабиной управления при температуре  $-26^{\circ}\text{C}$ , смертельно травмирован машинист крана.

Кран мостовой трубчато-балочного типа изготовлен Красноярским заводом «Сибтяжмаш» в 1971 г., смонтирован в 1977 г., начало эксплуатации с июля 1980 г. Кран установлен на угольном складе цеха топливоподачи и перемещает уголь на склад между путями крана. По мере необходимости уголь подается в бункер-питатель крана, а через него на транспортер. Грузоподъемность крана с 1986 г. – 28 т, емкость грейфера с 1986 г. –  $12\text{ м}^3$ , пролет – 76,2 м, консоль ремонтная – 25,6 м, консоль свободная – 30,6 м, высота подъема грейфера – 35 м, режим работы – весьма тяжелый (8К ГОСТ 25546), масса крана полная – 916,5 т, в том числе: масса металлоконструкций моста – 510,9 т, масса тележки с механизмами – 72,7 т, масса грейфера – 16 т (рис. 3.12).

Несущие металлоконструкции представляют собой однопролетную пространственную раму с двумя консолями и двумя пространственными жесткими опорами. Конструкции сварные, изготовлены из стали 10Г2С1 ГОСТ 19281. С 1991 г. кран обследовался специалистами завода «Сибтяжмаш». При обнаружении дефектов (трещин) проводился ремонт с применением сварки.

К выявлению причин обрушения крана были привлечены специалисты Кузбасского государственного технического университета и ряда специализированных организаций. Проведено детальное обследование упавшей консоли. *Разрушение произошло по монтажному сварному шву. При внешнем осмотре сварного соединения обнаружены следующие дефекты:*

1) подрезы в корне шва и с наружной поверхности глубиной до 2,0 мм;

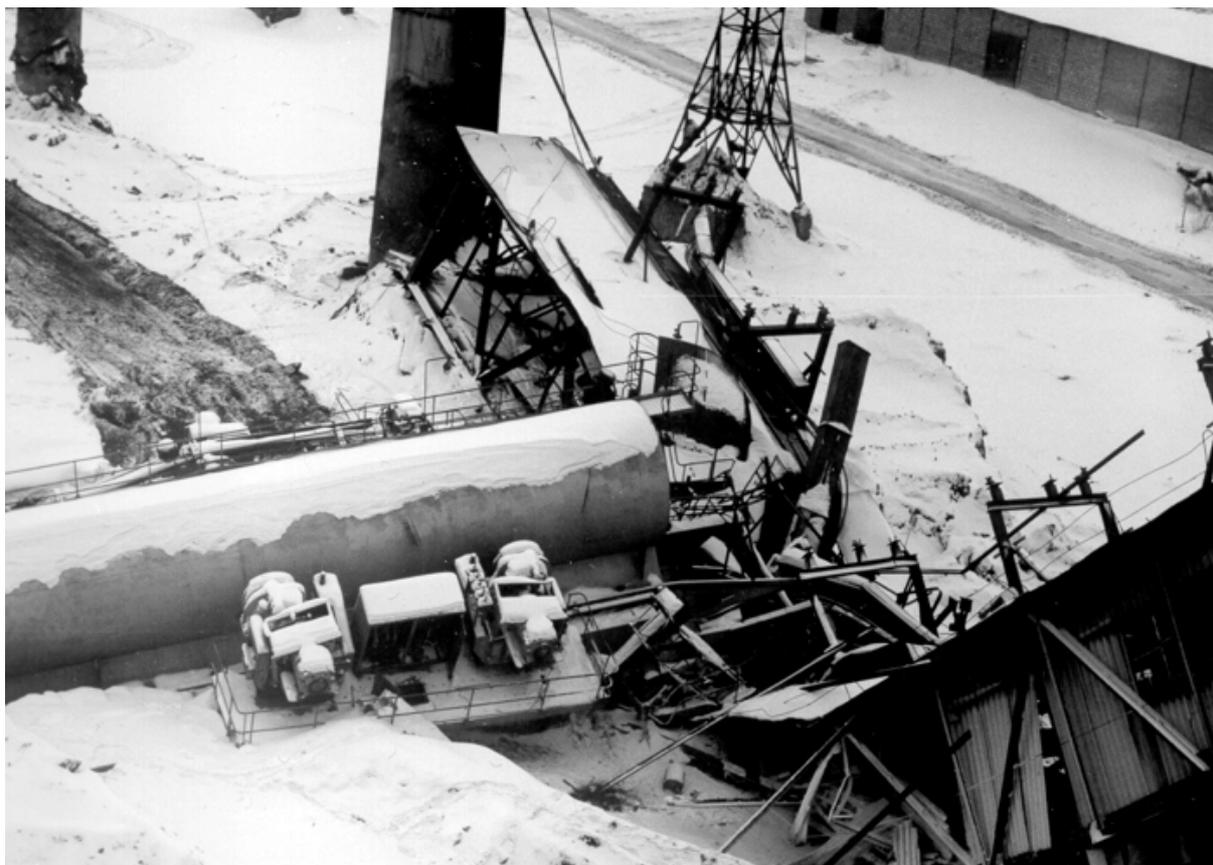


Рис. 3.12. Общий вид разрушенного крана

2) подварочный валик на потолочном участке с внутренней поверхности имеет вогнутую форму;

3) грубая чешуйчатость шва, западания до 1,5 мм;

4) смещение кромок шва до 2,0 мм;

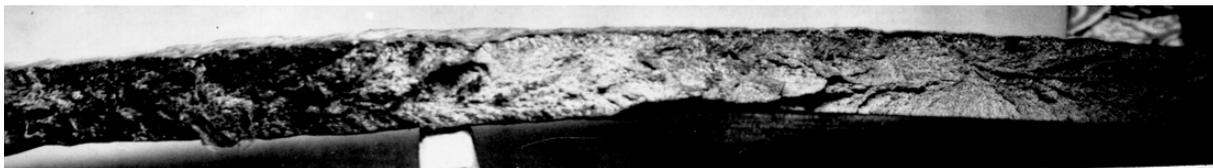
5) чрезмерная ширина шва.

Проведен металлографический анализ сварного соединения и фрактографическое исследование (рис. 3.13).

На поверхности излома сварного шва выявлено три зоны:

- в *первой зоне* (рис. 3.13, *в*) обнаружена старая трещина, фокус излома расположен в корне шва, трещина распространялась от внутренней поверхности к наружной, характер трещины – усталостный, на рис. 3.13, *в* четко видны линии фронта развития трещины;

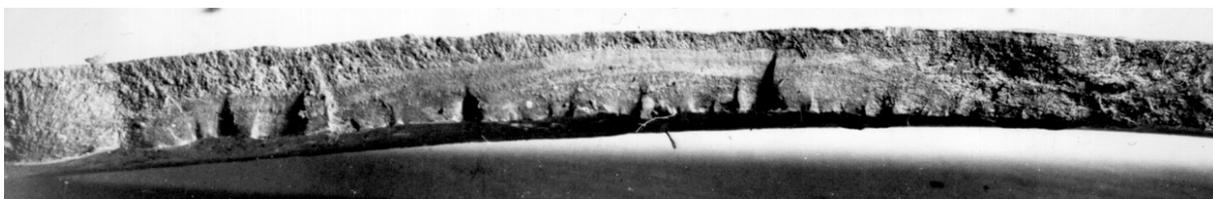
- *вторая и третья зоны* (рис. 3.13, *а, б*) являются зонами долома.



*a*



*б*



*в*

Рис. 3.13. Поверхность излома сварного шва: *a* – «шевронный узор», ориентированный к очагу разрушения; *б* – зона долома в металле шва; *в* – старая трещина и фронт развития разрушения

Во *второй* зоне разрушение произошло по металлу шва, а в *третьей* – по участку перехода от ЗТВ (зоны термического влияния сварки) к основному металлу (зона мелкого зерна). Характер излома в третьей зоне – «шевронный узор» имеет рисунок «елочки», ориентированной к очагу разрушения (см. рис. 3.13, *a*).

Микроструктура основного металла феррито-перлитная, перлит смешанного строения, величина зерна соответствует баллу 4-5 по ГОСТ 5639. Загрязненность включениями сульфидного типа соответствует баллу 1 по ГОСТ 1778. На шлифе, вырезанном из *первой* зоны, в корне шва выявлена микротрещина. Характер развития трещины смешанный – транс- и интеркристаллитный, трещина на участке наибольшего раскрытия заполнена окислами. Глубина распространения трещины – 1,5 мм. Во *второй* зоне излома обнаружено несплавление в корне шва, в *третьей* зоне на участке мелкого зерна выявлено межзеренное растрес-

кивание. Фрактографический анализ проведен с применением растрового электронного микроскопа (РЭМ). На рис. 3.14, *а* приведены фрактограммы, соответствующие *первой зоне* поверхности излома. Поверхность имеет рыхлый рельеф с продуктами коррозии.

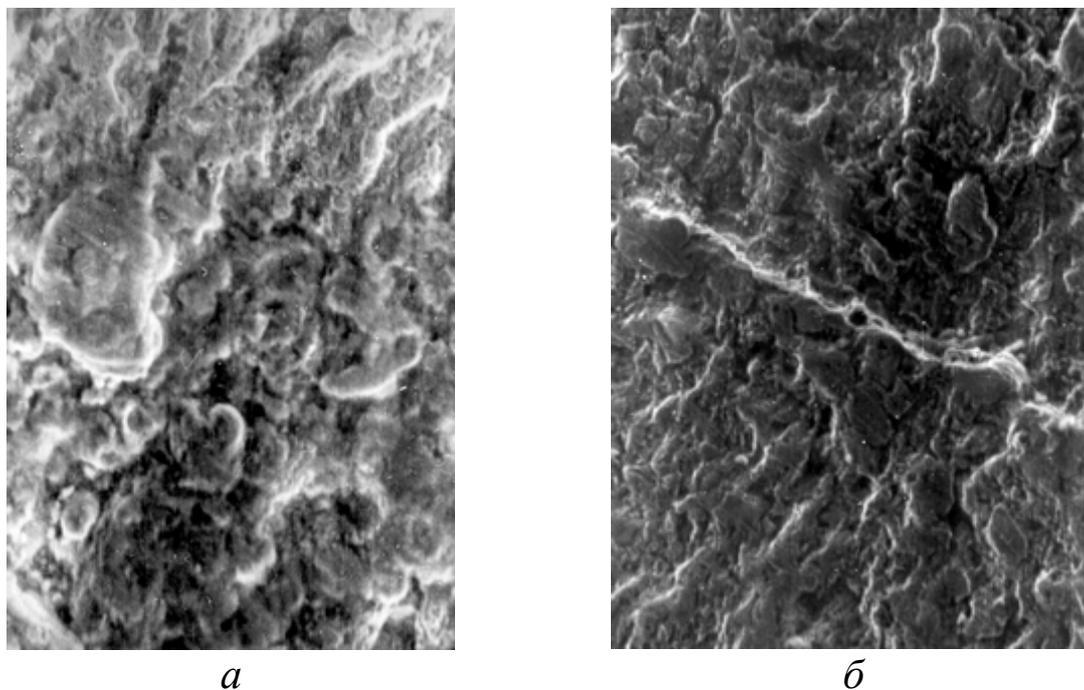


Рис. 3.14. Характер излома ( $\times 400$ ): *а* – рыхлый рельеф с продуктами коррозии; *б* – временная граница трещины

На фрактограмме (рис. 3.14, *б*) иллюстрируется временная граница трещины, возникшая в результате динамического или ненормированного статического нагружения. Наблюдаются затертые участки, со следами усталостных бороздок в них. Затертость свидетельствует о знакопеременном длительном нагружении. Излом произошел вследствие однократного воздействия нагрузки. По механическим характеристикам исследованный металл имеет достаточно высокие характеристики прочности и пластичности, хорошие показатели ударной вязкости при температуре  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  от 11,9 до 23,6 кгс·м/см<sup>2</sup> (достаточно 3,5 кгс·м/см<sup>2</sup>).

На основании результатов проведенных исследований были сделаны следующие выводы:

1. После монтажа крана были допущены к эксплуатации сварные соединения с видимыми дефектами. Подрезы основного

металла и несплавления подварочного шва в верхней части монтажного соединения трубы у опоры, со стороны свободной консоли, при эксплуатации крана инициировали трещину. Внешний вид сварных монтажных соединений не отвечает требованиям НТД и проекта. Имеются внутренние дефекты в швах, не выявленные физическими методами контроля. При монтаже не выполнено требование по строительному подъему, что приводило при эксплуатации к скатыванию тележки к концу консоли и даже к буферной балке.

2. При обследованиях крана видимые дефекты сварных соединений в опасных местах не были отмечены и не были устранены.

3. Трещина в зоне разлома металлоконструкции появилась и распространялась значительное время (не менее 3–6 месяцев). Трещина развивалась поэтапно – от циклического постепенного распространения до ускоренного лавинообразного. Развитию трещины способствовали динамические воздействия типа рывков, ударов о тупик, резких остановок тележки на консоли, ускоренных подъемов грейфера.

4. Ресурс безопасной работы крана по фактически отработанным циклам нагружения обеспечен заданным в проектной документации качеством сварки в сечении по разлому. При наличии дефектов в сварном монтажном соединении по месту разлома гарантированная безопасность загрузки консоли по выносливости была исчерпана.

Основной причиной разрушения крана-перегрузателя явилось развитие дефектов в сварном монтажном соединении у опоры со стороны свободной консоли в результате повторяющихся динамических воздействий при эксплуатации крана.

### **3.5. Контрольные вопросы**

1. На какие виды подразделяются разрушающие испытания?
2. Для каких видов исследований применяют макроанализ?
3. Для каких видов исследований применяют микроанализ?
4. В чем разница между макроанализом и микроанализом?
5. Какими приборами проводят микроанализ?

6. Что такое количественная металлография?
7. Что такое анализатор изображений для световой микроскопии?
8. Назовите разницу между исследовательским анализатором изображений и специализированным.
9. Что такое фрактография?
10. Какими способами изучают разрушение?
11. С чего необходимо начинать исследование разрушенных деталей?
12. С какой целью проводится анализ напряженного состояния разрушенных деталей?
13. Назовите характерные зоны строения излома гладких разрушенных образцов.
14. Что такое шевронный узор?
15. Что такое древовидные изломы?
16. Опишите усталостный излом.
17. Что такое храповый узор?
18. Назовите характерные признаки очага разрушения.

## **4. ЭЛЕКТРОННО-МИКРОСКОПИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Электронно-микроскопические методы исследования структурного состояния металлов довольно редко используются при контроле качества сварных соединений в основном из-за сложности и большой трудоемкости выполнения этих работ.

### **4.1. Просвечивающая электронная и растровая микроскопия**

Просвечивающая электронная микроскопия – один из наиболее информативных методов исследования структуры металлов и сплавов, в котором сочетаются возможности получения в одном эксперименте изображений с высоким разрешением и дифракционных картин одного и того же участка образца. Применение дифракционной микроскопии (метода тонких фольг) имело большое значение в формировании взглядов на механизмы фазовых превращений, распада пересыщенных твердых растворов, на строении границ зерен, разрушение и пластическую деформацию.

Электронная микроскопия при техническом диагностировании применяется в основном при решении принципиальных вопросов надежности и долговечности оборудования, а также при разработке новых методов и методик диагностирования, при установлении закономерностей между параметрами микроструктуры и взаимодействующими с материалом заданными физическими полями.

Наибольшее распространение получили просвечивающие электронные микроскопы, в которых поток электронов проходит через изучаемый объект. Получаемое изображение является результатом неодинакового рассеяния электронов на объекте. Схема просвечивающего электронного микроскопа принципиально сходна со схемой светового микроскопа. Электронный пучок здесь формирует система специальных линз. Общее увеличение микроскопа может варьироваться от нескольких тысяч до 500 000 и более раз в микроскопах лучших современных конструкций. При исследовании структуры применяют прямой и косвенный методы.

Косвенный метод. Металлографические шлифы «непрозрачны» для электронов, поэтому в просвечивающих электронных микроскопах изучают не металл, а лаковый, кварцевый или более часто угольный слепок, полученный с поверхности образца. Так как микрорельеф протравленного шлифа отражает микроструктуру и его химическую неоднородность, изучение такого рельефа дает определенную информацию о тонких деталях микроструктуры. Косвенный метод применяют ограниченно из-за трудностей однозначной трактовки эффектов контрастности на изображении и идентификации различных структурных составляющих.

Прямой метод электронно-микроскопического исследования дает наибольшую информацию о микроструктуре объекта, которым служит тонкая металлическая фольга, прозрачная или полупрозрачная для электронов. Получают ее либо путем осаждения паров в вакууме, либо путем утонения (растворения) массивных образцов до 100–200 ангстрем. Дифракционный контраст изображения возникает вследствие различия в интенсивности неотклоненного и дифрагированного пучков электронов. Подробно о электронно-микроскопических методах исследования микроструктуры изложено в специальной литературе [42, 43, 44].

Растровая электронная микроскопия. Растровый электронный микроскоп (РЭМ) формирует изображение объекта при сканировании его поверхности электронным зондом. РЭМ является одним из наиболее перспективных и универсальных приборов для исследования микроструктурных характеристик металла. По темпам развития и количеству моделей РЭМ опережает просвечивающую микроскопию.

В РЭМ поверхность исследуемого массивного образца облучается стабильным во времени тонко сфокусированным электронным зондом, совершающим обратнопоступательное движение по линии или развертывающимся в растр. При взаимодействии зонда с веществом образца в каждой точке поверхности происходит ряд эффектов, которые регистрируются соответствующими датчиками (рис. 4.1).

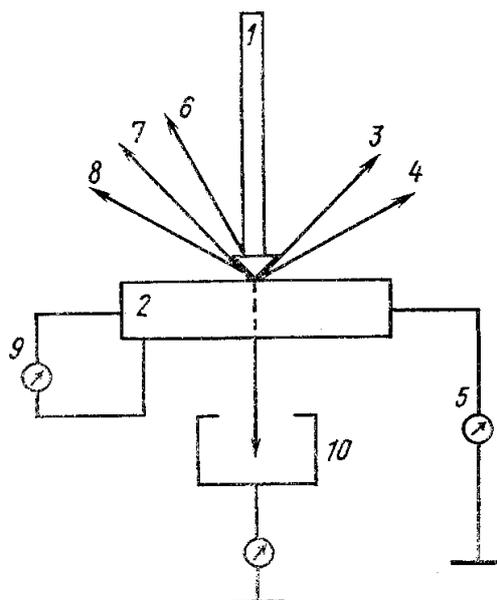


Рис. 4.1. Эффекты, возникающие при взаимодействии электронного пучка с веществом и используемые для формирования изображения в РЭМ:

- 1 – электронный пучок; 2 – образец; 3 – отраженные электроны;  
 4 – вторичные электроны; 5 – ток поглощенных электронов;  
 6 – катодолуминесценция; 7 – рентгеновское излучение;  
 8 – Оже-электроны; 9 – наведенный ток; 10 – прошедшие электроны

Этот эффект служит основой для получения разнообразной информации исследуемых объектов. Сигналы от датчика после усиления моделируют локальную яркость электронно-лучевой трубки (ЭЛТ), развертка которой синхронна со смещением электронного пучка. Каждой точке на поверхности образца соответствует определенная точка на экране ЭЛТ, а ее яркость определяется интенсивностью сигнала из соответствующей точки образца. Увеличение РЭМ определяется соотношением амплитуд развертки луча на экране ЭЛТ и зонда по поверхности образца.

Вторичные, отраженные и Оже-электроны, а также рентгеновское излучение, генерирующееся в определенных объемах внутри образца, несут разнообразную информацию о рельефе, химическом составе и кристаллографической ориентации объемов, прилегающих к поверхности. Зона выхода вторичных электронов, с помощью которых формируется изображение в РЭМ, ограничена малой областью вокруг места падения зонда. Это позволяет достичь довольно большой разрешающей способности.

РЭМ обладают рядом преимуществ, определяющих их бурное развитие:

- высокая разрешающая способность;
- большая глубина фокуса в сочетании с наглядностью изображения, которая дает возможность исследовать объекты с ярко выраженным рельефом;
- простота подготовки объекта исследования;
- простота изменения увеличений от больших до малых;
- возможность проведения рентгеноспектрального и катодолюминесцентного анализов, электронной спектрометрии, а также исследований в статическом и динамическом режимах позволяет изучать непосредственно в РЭМ процессы, протекающие при механическом нагружении металлов, нагреве, охлаждении, воздействии среды и т. д.

Из потока информации, получаемой с помощью РЭМ, большое значение имеют сведения о локальных изменениях топографии и химического состава поверхности. РЭМ успешно применяют при изучении послойной структуры окислов вплоть до границы раздела металл-окисел, изменений поверхности в результате износа, кавитации, эрозии, контактной усталости схватывания и других внешних воздействий.

РЭМ оказывает неоценимую помощь при исследовании и анализе разрушений объектов повышенной опасности. РЭМ позволяет выявить место зарождения трещины, характер излома, характер распределения и уровень действующих напряжений в процессе разрушения, установить причину аварии и решать многие другие прикладные задачи технического диагностирования.

Основная область применения РЭМ в металловедении – фрактография. Этот метод предусматривает получение качественной или количественной информации о строении изломов при визуальном их рассмотрении.

Именно в области фрактографии преимущества РЭМ перед другими микроскопами проявляются особенно ярко. Основные области применения РЭМ во фрактографии: контроль качества металлов; изучение механизма разрушения при различных видах нагружения; анализ изломов и т. д.

Фрактографический метод – основной при определении критических температур вязко-хрупкого перехода.

## 4.2. Микроскопы для нанотехнологий

**Сканирующая туннельная микроскопия.** Нанотехнологией называется междисциплинарная область науки, в которой изучаются закономерности физико-химических процессов в пространственных областях нанометровых размеров с целью управления отдельными атомами, молекулами, молекулярными системами при создании новых молекул, наноструктур, наноустройств и материалов со специальными физическими, химическими и биологическими свойствами [36, 37, 38].

Значительную роль в неудержимом исследовании наномира (наноструктур, нанотехнологий) сыграли, по крайней мере, два события:

- создание сканирующего туннельного микроскопа (G. Binnig, G Rohrer, 1982 г.) и сканирующего атомно-силового микроскопа (G. Binnig, K. Kuatt, K. Gerber, 1986 г., Нобелевская премия 1992 г.);

- открытие новой формы существования углерода в природе – фуллеренов (H. Kroto, J. Heath, R. Curt, Нобелевская премия 1996 г.).

Новые микроскопы позволяют наблюдать атомно-молекулярную структуру поверхности монокристаллов в нанометровом диапазоне размеров. Наилучшее пространственное разрешение приборов составляет сотую долю нанометра по нормали к поверхности. Действие сканирующего туннельного микроскопа (STM) основано на туннелировании электронов через вакуумный барьер. Высокая разрешающая способность обусловлена тем, что туннельный ток изменяется на три порядка при изменении ширины барьера на размеры атома. Теория квантового эффекта туннелирования заложена Г. А. Гамовым в начале прошлого века в работах по  $\alpha$ -распаду.

С помощью различных сканирующих микроскопов в настоящее время наблюдают за атомной структурой поверхностей монокристаллов и поликристаллов металлов, полупроводников,

высокотемпературных сверхпроводников, органических молекул и др.

Новые микроскопы полезны не только при изучении атомно-молекулярной структуры вещества. Они оказались пригодными для конструирования наноструктур. С помощью определенных движений острием микроскопа удастся создавать атомные структуры. На рис. 4.2 представлены этапы создания надписи «IBM» из отдельных атомов ксенона на грани (110) монокристалла никеля. Движение острия при создании наноструктур из отдельных атомов напоминает приемы хоккеиста при продвижении шайбы клюшкой. Представляет интерес создание компьютерных алгоритмов, устанавливающих нетривиальную связь между движениями острия и перемещениями манипулируемых атомов на основе соответствующих математических моделей. Модели и алгоритмы необходимы для разработки автоматических сборщиков наноконструкций.

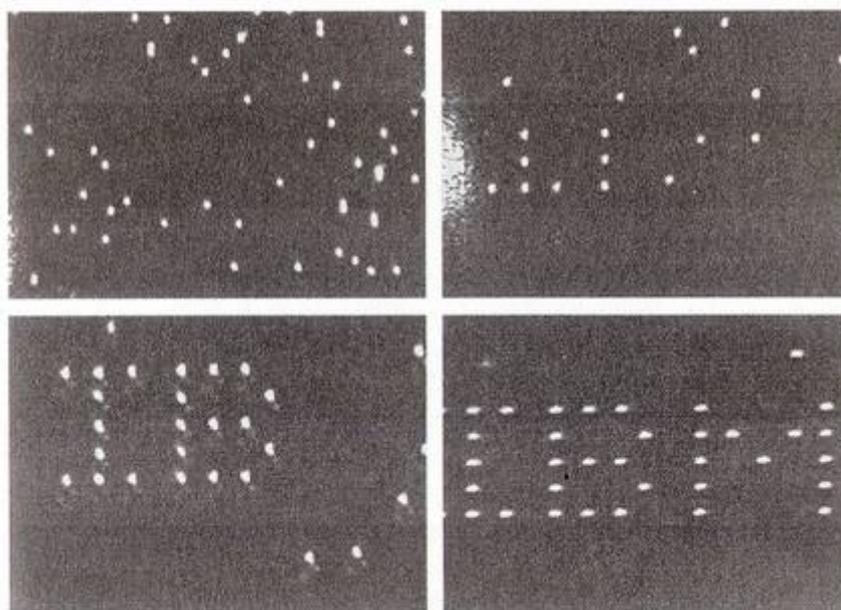


Рис. 4.2. Этапы формирования надписи из отдельных атомов

### ***Ионно-полевая микроскопия***

Техника, дающая разрешение, приближающееся к межатомным расстояниям, называется ионно-полевой микроскопией (ИОМ). В микроскопе на металлическую иглу с острым кончиком, находящуюся в камере с высоким вакуумом, подается поло-

жительный потенциал. И электрическое поле, и его градиент вблизи острия весьма велики, так что остаточные молекулы газа при приближении к нему ионизируются, передавая электроны игле, а сами заряжаясь положительно. Эти газообразные катионы отталкиваются иглой и летят от нее вдоль линии электростатического поля на расположенную вблизи фотопластинку, на которой при соударении создаются засвеченные точки.

Каждая точка на пластинке соответствует атому на кончике зонда, так что распределение точек на фотопластинке представляет собой сильно увеличенное изображение распределения атомов на вершине иглы (рис. 4.3).

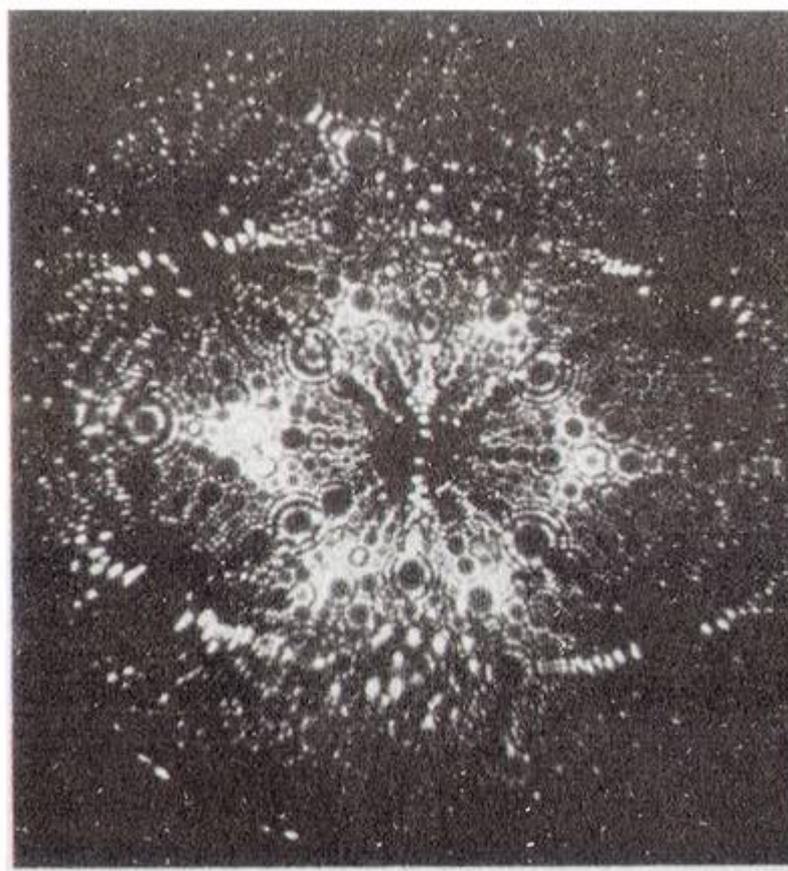


Рис. 4.3. Распределение атомов на вершине вольфрамовой иглы

### *Сканирующая микроскопия*

Сканирующий туннельный микроскоп в качестве зонда использует иглу с исключительно тонким кончиком, который подключают к положительному полюсу источника питания и при-

ближают к изучаемой поверхности на расстояние порядка 1 нм. Электроны, принадлежащие конкретным атомам на поверхности образца, притягиваются положительно заряженным кончиком и перепрыгивают (туннелируют) на него, образуя тем самым слабый электрический ток. Зонд перемещается по поверхности образца для получения растра, так же как и электронный луч. В режиме постоянной высоты расстояние от зонда до поверхности все время меняется, что отражается в изменении измеряемого туннельного тока при сканировании. Принципиальное отличие **атомно-силовой** микроскопии (AFM) от туннельной (STM) состоит в том, что второй измеряет туннельный ток между зондом и поверхностью, а первый (рис. 4.4) – силу взаимодействия между ними.

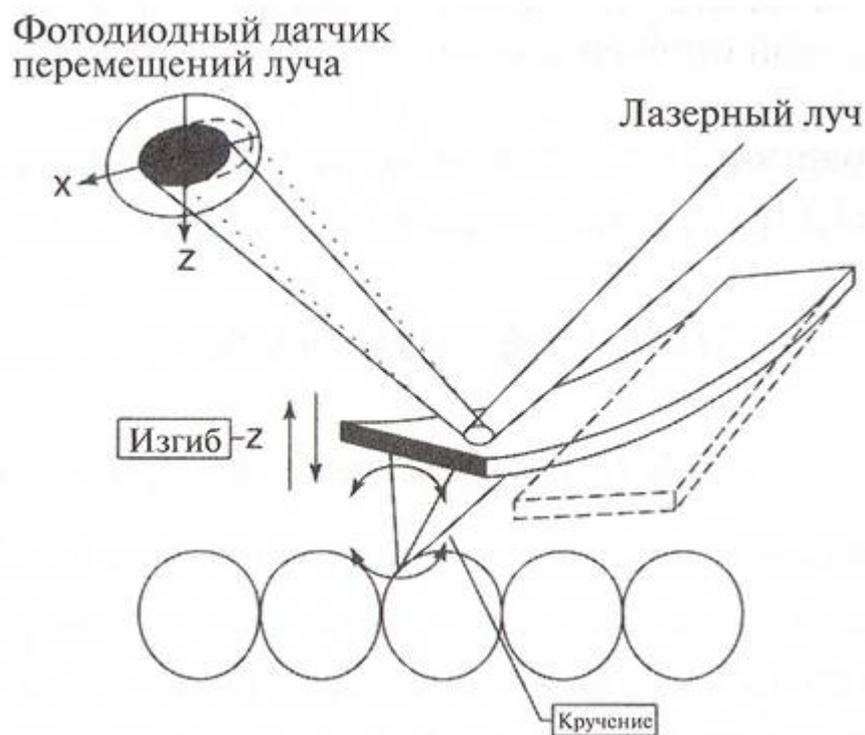


Рис. 4.4. Схема работы атомно-силового микроскопа

### 4.3. Контрольные вопросы

1. Назовите области применения электронной микроскопии.
2. В чем сущность электронной микроскопии?
3. Чем отличается прямой метод электронной микроскопии от косвенного?
4. Что такое растровая электронная микроскопия?

5. Основные преимущества растровой электронной микроскопии.

6. Опишите принцип работы сканирующего туннельного микроскопа.

7. Для каких целей разработан туннельный микроскоп?

8. Что представляет собой ионно-полевая микроскопия?

9. Что такое нанотехнологии?

## 5. МЕТОДЫ РАЗРУШАЮЩИХ ИСПЫТАНИЙ

При выполнении работ по контролю качества сварных соединений, при проведении технического диагностирования потенциально-опасного оборудования на различных этапах его жизненного цикла довольно часто кроме результатов неразрушающего контроля необходимо иметь информацию о механических характеристиках материала, которые практически невозможно определить существующими методами без исследования вырезки металла непосредственно из объекта (сварного соединения).

Для исследования существует большое разнообразие различных методов и средств разрушающих испытаний. Рассмотрим лишь те, которые нашли наиболее широкое применение при контроле качества сварных соединений и техническом диагностировании.

В общем виде разрушающие испытания подразделяются:

- на статические, циклические и динамические испытания металлов;
- определение сопротивления разрушению;
- методы определения модулей упругости и специальные испытания.

В настоящей главе рассмотрены методы испытаний основного металла и более подробно методы испытаний сварных соединений согласно требованиям нормативных документов.

### 5.1. Статические механические испытания

При статических испытаниях определяют свойства, характеризующие: упругость; сопротивление начальным пластическим деформациям; сопротивление значительным пластическим деформациям; пластичность. Для полного выявления механических свойств испытания проводят при различных способах нагружения (растяжение, кручение, сжатие, изгиб и т. п.).

Испытания на растяжение являются основным и наиболее распространенным методом исследования и контроля механических свойств металлов. Использование этого метода для арбитражных и контрольных испытаний регламентируется государственным стандартом.

Испытания на растяжение проводят на разрывных или универсальных машинах либо на прессах с применением реверсоров. ГОСТ 1497 регламентирует основные требования к испытательным машинам, содержит необходимые указания о форме и размерах образцов, определения понятий условного предела пропорциональности  $\sigma_{пр}$ , условного предела упругости  $\sigma_{0,05}$ , пределов текучести (условного  $\sigma_{0,2}$  и физического  $\sigma_T$ ), временного сопротивления (предела прочности)  $\sigma_B$ , истинного сопротивления разрыву  $S_k$ , относительного удлинения  $\delta$  и относительного сужения  $\psi$  и, наконец, порядок проведения испытаний и расчета перечисленных характеристик.

В исследовательских целях испытания на растяжение применяют значительно шире, чем предусмотрено ГОСТом. Это испытание применяют для оценки однородности свойств металла различных плавок, полуфабрикатов, идентичности режимов термической обработки деталей и др.

Отмечают [56], что самый элементарный контроль по временному сопротивлению и удлинению позволяет получить широкую информацию о свойствах испытываемого материала, оценить его способность к равномерной и сосредоточенной деформации, а также, при условии записи диаграммы деформации, работу деформации и разрушения при статической нагрузке.

Получаемые при растяжении диаграммы чаще всего имеют вид, представленный на рис. 5.1.

Тип I диаграммы (рис. 5.1, а) присущ в основном большинству конструкционных сталей и некоторым магниевым, титановым и алюминиевым сплавам. Некоторые титановые и алюминиевые сплавы деформируются по типу II (рис. 5.1, б).

Диаграмма растяжения с площадкой текучести  $T$  (рис. 5.1, в) свойственна железу, некоторым сортам бронз и углеродистым сталям.

Для хрупких же материалов диаграмма растяжения заканчивается отрывом на начальном прямолинейном участке (рис. 5.1, г).

Из диаграммы видно, что на участке до точки  $n$  существует прямая пропорциональность между приращением напряжения и приращением относительной деформации  $\sigma = E\varepsilon$ .

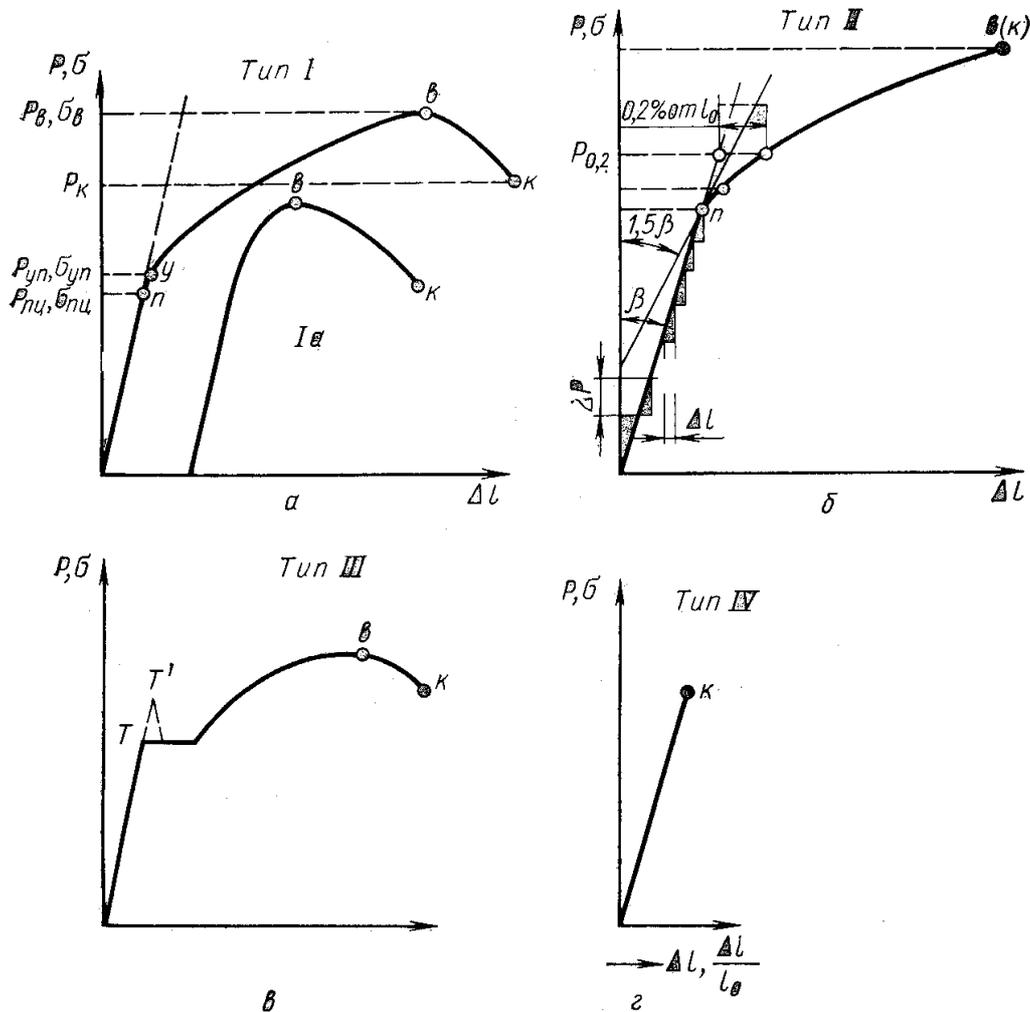


Рис. 5.1. Основные типы диаграмм деформации при растяжении

Коэффициент пропорциональности  $E$  численно равен тангенсу угла наклона прямолинейного участка к оси деформаций и называется модулем нормальной упругости.

При растягивающей нагрузке  $P = P_{\text{пц}}$  разгрузка образца всякий раз приводит к исчезновению деформации, возникающей под действием приложенного усилия. Такая деформация называется упругой. Обычно модуль упругости определяют при нагрузках ниже  $P_{\text{пц}}$  на 20–25 %.

При дальнейшем увеличении нагрузки в интервале между  $P_{\text{пц}}$  и  $P_{\text{в}}$  имеет место уже не пропорциональное увеличение деформации. Нагрузка, при которой происходит отклонение от закона пропорциональности, определяет предел пропорциональности материала

$$\sigma_{\text{пц}} = \frac{P_{\text{пц}}}{F_0}. \quad (5.1)$$

Небольшое возрастание нагрузки относительно  $P_{\text{пц}}$  не изменяет характера деформации, она остается упругой.

Наибольшая нагрузка, которую выдерживает образец без появления остаточной деформации при разгрузке, определяет предел упругости материала.

При нагрузках  $P \geq P_{\text{уп}}$  наряду с ростом упругой деформации происходит накопление пластической деформации, не исчезающей при разгрузке. Напряжение, при котором остаточное относительное удлинение составляет 0,2 %, называется условным пределом текучести.

Необходимо учитывать, что не только условный предел текучести, но и условный предел упругости и условный предел пропорциональности характеризуют сопротивление металла малым пластическим деформациям.

Для материалов с диаграммой типа III определяют физический предел текучести, отвечающий точке  $T$  на диаграмме, когда в определенном интервале наблюдается рост деформации без увеличения внешней нагрузки. Кривая растяжения пластических материалов может иметь максимум (точка в тип I, III) или же обрываться при достижении наибольшей нагрузки (тип II), и временное сопротивление (предел прочности) определяют как

$$\sigma_{\text{пц}} = \frac{P_{\text{в}}}{F_0}. \quad (5.2)$$

Несмотря на то, что рассмотренные характеристики имеют большое практическое значение, они условны, так как подсчет напряжений делением нагрузок на первоначальную площадь не дает истинных напряжений, а относительное удлинение при образовании шейки не характеризует максимальной пластичности материала и зависит от размеров образца.

При исследованиях иногда используют диаграммы истинных напряжений. Истинные напряжения  $S$  определяют делением действующей в определенный момент нагрузки  $P$  на площадь поперечного сечения образца в тот же момент.

Абсциссой диаграммы истинных напряжений часто принимают относительное сужение  $\psi$ , измеряемое и подсчитываемое для каждого момента нагружения (рис. 5.2).

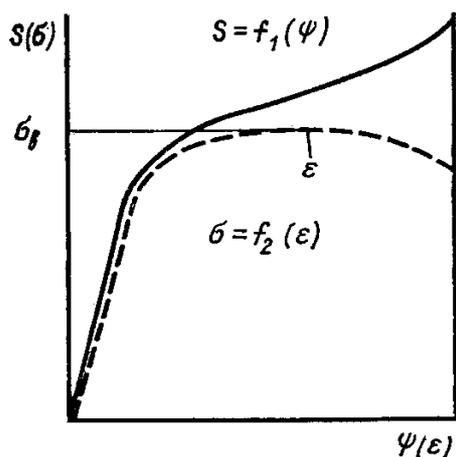


Рис. 5.2. Диаграмма истинных напряжений при растяжении

**Механические свойства при длительных статических нагрузках.** Этот вид испытаний тесно связан с оценкой срока эксплуатации металла энергооборудования, механические свойства, определяемые при длительных нагрузках, зависят как от внутренних превращений, которые ускоряются одновременным влиянием повышенной температуры и нагружения, так и от воздействия внешней среды или диффузионных процессов.

Длительное нагружение металла в условиях высоких температур сопровождается двумя наиболее важными и характерными явлениями: ползучестью и развитием тепловой хрупкости.

Ползучесть – свойство металла медленно и непрерывно пластически деформироваться при статическом нагружении при высоких температурах. Тепловая хрупкость – уменьшение пластичности металла, определяемое по величине деформации в условиях постоянной нагрузки при высоких температурах.

Различают две основные группы механических свойств:

- сопротивление пластической деформации при длительных статических нагрузках (определение пределов ползучести – ГОСТ 3248);

- сопротивление разрушению (длительная прочность) и пластичность при длительных статических нагрузках (ГОСТ 10145).

Обычно испытания на длительное статическое растяжение при повышенных температурах проводят на специальных машинах. В металловедческой практике наиболее широко применяют отечественные испытательные машины типа АИМА-5-2-1, в которых груз прилагается к образцу через рычаги, обеспечивающие увеличение усилия в 10–30 раз.

Для нагрева образцов применяют электрические печи с терморегуляторами. Удлинения измеряют механическими, или более точными оптическими, или электронными приспособлениями.

Типичные кривые ползучести приведены на рис. 5.3.

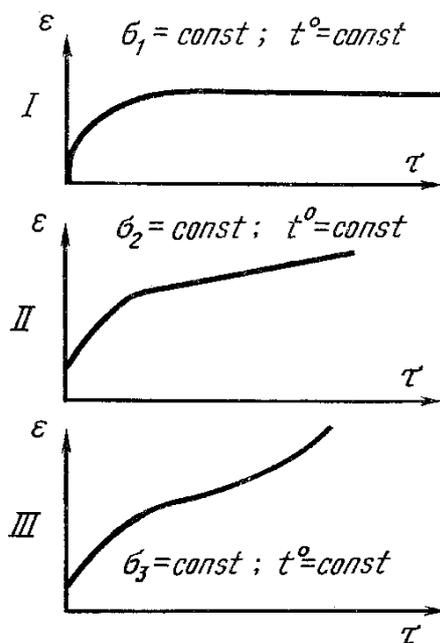


Рис. 5.3. Типичные кривые ползучести

Основной величиной, характеризующей сопротивление пластическому деформированию, является предел ползучести. Пределом ползучести считается то постоянное напряжение, которое вызывает за определенное время при определенной постоянной температуре деформацию заданной величины (например, 1 % за

100 ч или 1 % за 100 000 ч) или определенную скорость деформации в течение заданного промежутка времени.

Испытания на длительную прочность проводят следующими способами:

- определяют число часов до разрушения образца при данном напряжении;
- при различных постоянных напряжениях и данной температуре проводят серию испытаний и затем строят зависимость времени испытания образца до разрушения от напряжения (рис. 5.4).

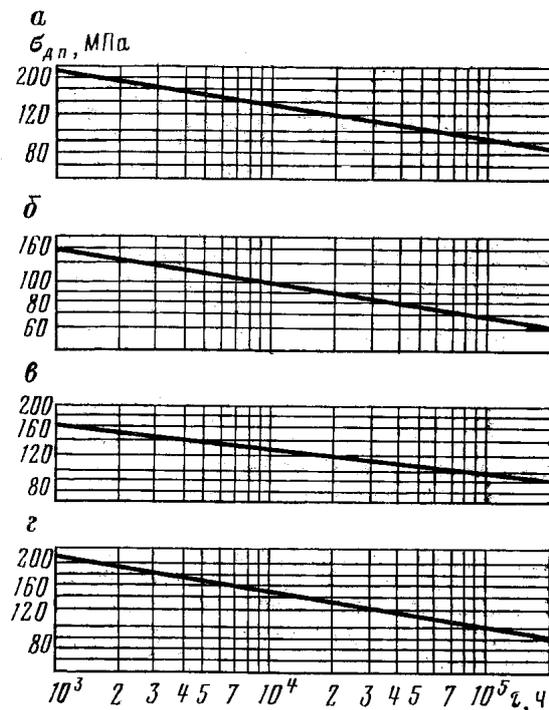


Рис. 5.4. Кривые длительной прочности сталей марок 20 при 450 °С (а), 12X1MФ при 570 °С (б), 15X1M1Ф при 575 °С (в), 12X18H12T при 610 °С (г)

Для каждой температуры испытания и для каждого постоянного напряжения строят зависимость деформации от времени.

Обозначение предела длительной прочности сопровождается двумя индексами: вверху записывается температура испытания, внизу – заданная продолжительность испытания до разрушения, ч. Например,  $\sigma_{100000}^{570}$  – напряжение, вызывающее разрушение при температуре 570 °С за 100 000 ч.

**Испытания на твердость.** Этим видом испытаний определяется сопротивление поверхностных слоев материала местной

пластической деформации, возникающей при внедрении твердого индентора вдавливанием.

Повсеместное использование методов испытания на твердость объясняется простотой и быстротой их проведения, отсутствием необходимости разрушения исследуемого образца и др. При испытаниях на твердость можно косвенно оценить некоторые механические характеристики.

Наибольшее практическое применение имеют статические испытания вдавливанием шарика (по Бринеллю, Роквеллу – шкала *B*), конуса (по Роквеллу – шкала *C*), пирамиды (по Виккерсу), определение микротвердости по Хрущеву, Берковичу. Динамические методы по Шору, Герберту и царапанием применяются значительно реже.

Твердость по Бринеллю (ГОСТ 9012) определяется вдавливанием стального закаленного шарика в испытываемый материал. Значение твердости представляет собой среднее напряжение, приходящееся условно на единицу поверхности шарового отпечатка, и выражается формулой

$$HB = \frac{2P}{\pi D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \quad (5.3)$$

где  $P$  – нагрузка, МПа;  $D$  – диаметр шарика, мм;  $d$  – диаметр отпечатка, мм. Форма отпечатка при различной глубине и соответствующих ей нагрузках не сохраняет геометрического подобия, и значения твердости поэтому зависят от величины приложенной нагрузки, а также от времени ее приложения.

ГОСТ 9012 оговаривает нагрузки, время выдержки, диаметр шарика в зависимости от испытываемого материала. Твердость по Бринеллю определяют по специальным таблицам, прилагаемым к ГОСТ 9012.

Значения твердости  $HB$  могут быть сравнимы при различных диаметрах шариков только в том случае, если отношение нагрузки к квадрату диаметра шарика будет постоянным.

Одним из главных недостатков определения твердости по Бринеллю является необходимость измерения на микроскопе или специальной лупе диаметра отпечатка в двух направлениях.

Как уже было отмечено, твердость по Бринеллю углеродистых и некоторых марок легированных сталей довольно хорошо коррелирует с пределом прочности. Эти зависимости широко используются при производственном контроле деталей и заготовок.

Кроме вышеуказанных зависимостей найдены связи, позволяющие приближенно определять условный предел текучести вдавливанием шарика диаметром 10 мм, при этом выбирают нагрузку, создающую остаточную лунку диаметром 0,9 мм.

Твердость по Роквеллу (ГОСТ 9013) определяют путем внедрения индентора в испытываемый образец под действием двух последовательных нагрузок: предварительной 100 Н и суммарной 600, 1 000 и 1 500 Н.

Разность глубины, на которую проникает индентор под действием двух нагрузок, характеризует твердость по Роквеллу, выражающуюся в условных отвлеченных величинах. Индентором может быть алмазный конус или стальной закаленный шарик. При определении твердости алмазным конусом применяют полные нагрузки 600 или 1 500 Н (шкала *A* и *C*), при определении твердости стальным шариком – полная нагрузка 1 000 Н (шкала *B*). Выбор индентора и нагрузки в основном связан с твердостью испытываемого материала и его толщиной.

Твердость по Роквеллу, определяемая по различным шкалам без подобия в отпечатках, при ее условном и безразмерном численном отсчете, является еще более условной характеристикой, чем твердость по Бринеллю.

Определение твердости по Виккерсу (ГОСТ 2999) проводится вдавливанием в испытываемый объект алмазного наконечника, имеющего форму квадратной пирамиды с углом между противоположными гранями  $136^\circ$ . Обычно применяют нагрузки 50, 100, 200, 300, 500 и 1 000 Н, которые выбирают в зависимости от толщины образца и его твердости. Значения твердости по Виккерсу определяют по величине диагонали отпечатка с помощью таблиц. Как и для других методов, здесь очень важна чистота поверхности образца и отсутствие нагревов и наклепа при его изготовлении.

Определение твердости по Виккерсу является более совершенным методом по сравнению с другими. К числу основных преимуществ стоит отнести полное геометрическое подобие от-

печатков, независимо от величины прилагаемой нагрузки, возможность определения твердости на тонких листовых материалах и на деталях после химико-термической обработки, а также хорошее совпадение значений твердости по Бринеллю и Виккерсу.

Для деталей, работающих при высоких температурах, в ряде случаев необходимо знать твердость при рабочих температурах, обычно ее определяют по методу Бринелля с применением специальной установки с трубчатой печью.

При динамических испытаниях на твердость можно определить удельную работу вдавливания шарика, высоту упругого отскока бойка, которая тем меньше, чем выше сопротивление пластической деформации металла.

Определение твердости склерометрированием отличается от вышеперечисленных методов тем, что кроме нормального к поверхности образца вдавливания индентора производится одновременно перемещение его параллельно плоскости образца. В результате эксперимента на поверхности образца остается царапина определенной ширины и глубины, характеризующая материал по сопротивлению разрушению.

Для определения твердости отдельных структурных составляющих применяют метод микротвердости (ГОСТ 9450). Прибор состоит из механизма для вдавливания алмазной пирамиды под различными небольшими нагрузками и металлографического микроскопа (ПМТ-3). В выбранный под микроскопом участок металла, в определенное зерно вдавливают алмазную пирамиду под нагрузкой 0,05–5 Н. Под микроскопом измеряют диагональ отпечатка и по ней определяют микротвердость заданных структурных составляющих.

## **5.2. Циклические испытания**

Значительная часть объектов повышенной опасности длительное время эксплуатируется в сложных напряженных условиях при знакопеременных нагрузках (грузоподъемные краны, подъемники, вышки, лифты, мосты и др.).

Под действием циклически изменяющихся переменных напряжений (деформаций) происходит процесс постепенного накопления поврежденности, приводящий к критической степени ис-

кажения кристаллической решетки в отдельных зернах, к созданию локальных пиковых напряжений, к образованию зародышевых трещин, их развитию и окончательному разрушению объекта.

Разрушение металла под действием знакопеременных нагрузок называется усталостью; сопротивление этому разрушению – циклической прочностью, или выносливостью. Испытания на усталость проводят при знакопеременных напряжениях. При этом амплитуда циклического изменения напряжений соответствует зависимости

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}. \quad (5.4)$$

Под коэффициентом асимметрии цикла  $r$  понимают отношение минимального напряжения к максимальному с учетом знака напряжений. Среднее напряжение цикла рассчитывается как среднее арифметическое алгебраических величин максимального и минимального напряжений. Алгебраическая разность между максимальным и минимальным напряжениями называется размахом напряжений, который равен удвоенной амплитуде.

При циклических испытаниях на усталость обычно определяют следующие характеристики: предел выносливости, усталостную долговечность, чувствительность к концентрации напряжений, влиянию среды, температуры, частоты, асимметрии цикла и величины среднего напряжения цикла, к перегрузкам, масштабному фактору. Оценивают степень поврежденности металла, скорость роста трещин, длительность инкубационного периода до появления трещин и длительность периода живучести.

По результатам испытаний на усталость проводят:

- построение кривой усталости и определение предела выносливости;
- построение диаграмм предельных напряжений и предельных амплитуд с учетом различных коэффициентов асимметрии цикла;
- определение предела выносливости для заданного уровня вероятности разрушения.

Обычно испытывают 6–10 образцов при симметричном цикле при различных напряжениях.

Первый образец испытывают при напряжении  $\sigma_a = 0,6\sigma_B$ , а каждый последующий – при напряжении несколько ниже предыдущего. Типичный пример диаграммы усталости в координатах  $\sigma_a$  – логарифм числа циклов  $N$  приведен на рис. 5.5. Физическим пределом усталости  $\sigma_1$  называют максимальное напряжение цикла с определенной характеристикой асимметрии, при котором металл выдерживает бесконечное число циклов.

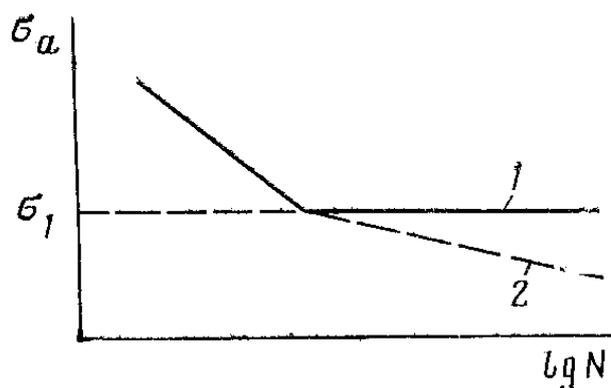


Рис. 5.5. Характер кривой усталости углеродистых сталей:  
1 – при испытаниях на воздухе; 2 – при испытаниях в коррозионной среде

Основными критериями при определении предела выносливости и построении кривых усталости являются полное разрушение либо появление трещин, протяженность которых по поверхности составляет 0,5–1,0 мм. Дополнительными критериями могут быть: резкое падение нагрузки или частоты циклов, значительный рост деформации, резкий подъем температуры. В пределах одной серии испытаний критерии разрушения должны быть одинаковыми.

Испытания на усталость выполняют при следующих схемах нагружения: чистый изгиб при вращении; то же в одной плоскости; поперечный изгиб при вращении; то же в одной плоскости; растяжение-сжатие; переменное кручение; внутреннее давление. Иногда проводят комбинированные виды испытаний. Для испытаний используют машины, установки и стенды с различным возбуждением переменных нагрузок или деформаций. Практически определяют условный предел усталости, или предел ограниченной выносливости, как напряжение, при котором металл вы-

держивает определенное число циклов (ГОСТ 2860). Предел выносливости в значительной степени зависит от концентраторов напряжений: отверстий, надрезов, резких изменений сечения и т. д. Значения предела выносливости могут существенно отличаться в связи с неоднородностью структуры, наличием неметаллических включений, формой, размерами и распределением карбидов. Очень часто неметаллические включения неблагоприятной формы и ориентации, вокруг которых происходит концентрация напряжений, снижают предел выносливости. С уменьшением размеров зерен и упрочнением границ предел выносливости повышается. На предел выносливости оказывает большое влияние качество поверхностной обработки деталей (химико-термическая обработка, ШПД и др.).

### 5.3. Динамические испытания

Довольно часто многие технические устройства объектов повышенной опасности во время длительной эксплуатации испытывают различные динамические нагрузки. Динамический процесс деформации или разрушения может возникнуть как вследствие резкого возрастания внешней нагрузки, так и вследствие резкого понижения сопротивления разрушению, например при хрупком разрушении [41, 45, 46].

Увеличение скорости нагружения изменяет свойства металла. Материалы с близкими характеристиками прочности и пластичности, определенными при статических испытаниях на растяжение, могут резко отличаться своим поведением в условиях динамического нагружения [45]. Динамические испытания на ударный изгиб выявляют склонность металла к хрупкому разрушению. Ударная вязкость  $KC$  представляет собой отношение полной работы, расходуемой на динамическое разрушение образца, к рабочей площади поперечного сечения:

$$KC = \frac{K}{F_0}, \quad (5.5)$$

где  $K$  – работа разрушения образца при ударе;  $F_0$  – площадь образца.

Согласно ГОСТ 9454, ударная вязкость обозначается  $KCU$ ,  $KCV$  и  $KCT$ . Буквы  $KC$  обозначают символ ударной вязкости, буквы  $U$ ,  $V$  и  $T$  – вид концентратора напряжений. При выборе, приемочном или входном контроле металлов обычно применяют образцы с  $U$ -образным надрезом, в случае испытаний металлов для ответственных конструкций и при техническом диагностировании рекомендуется применять образцы с  $V$ - и  $T$ -образными надрезами. Форма и размеры образцов для определения ударной вязкости приведены на рис. 5.6.

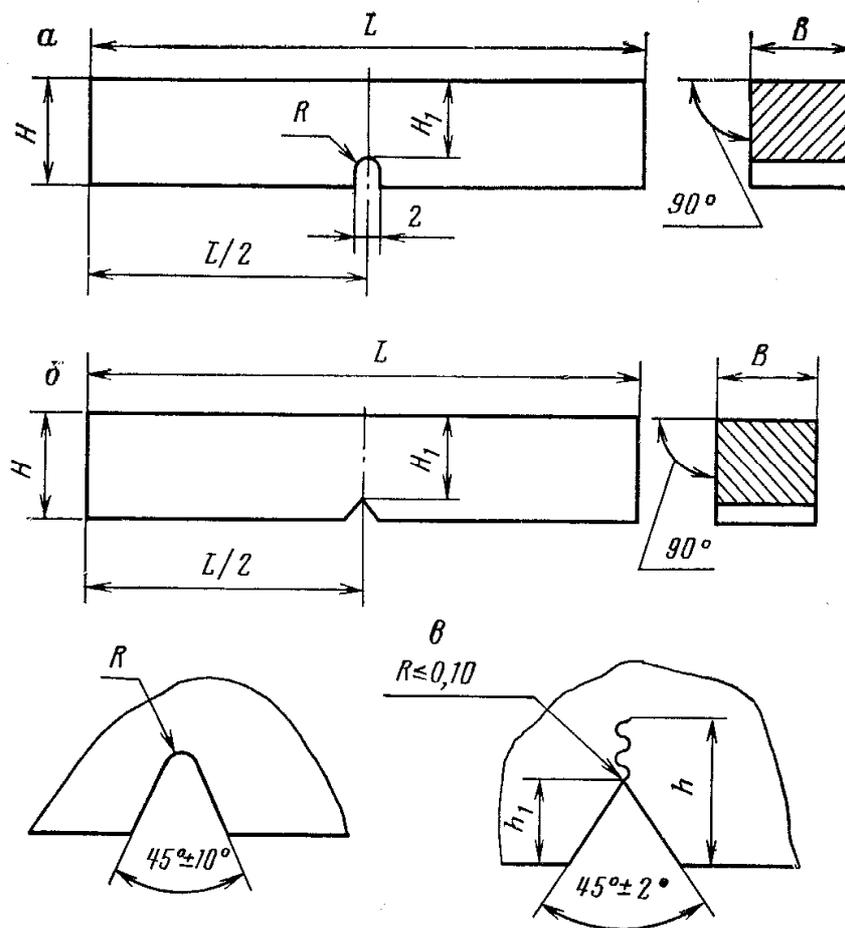


Рис. 5.6. Образцы для испытания на ударную вязкость с  $U$ -образным (а),  $V$ -образным (б) надрезами и с трещиной (в)

При испытании вследствие концентрации деформации в малом объеме возникает высокая локальная скорость деформации. Образцы разрушают ударом маятника, падающего на грань, противоположную надрезу, со скоростью 4–7 м/с. Испытания прово-

дят на специальных маятниковых копрах (ГОСТ 10708), принцип работы которых понятен из схемы, изображенной на рис. 5.7.

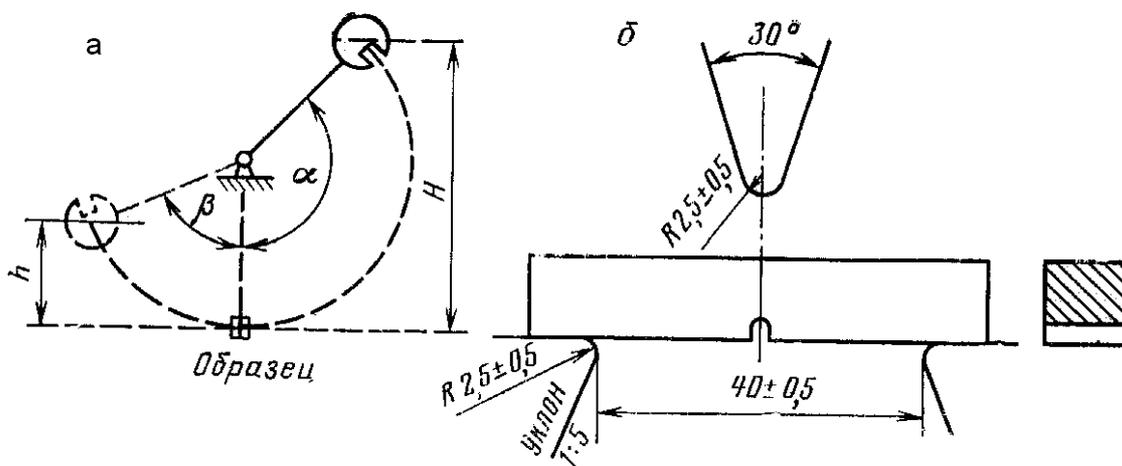


Рис. 5.7. Схема испытания на ударную вязкость (а) и схема установки образца на опоры при испытании (б)

Работу  $K$ , затраченную на деформацию и разрушение образца, определяют с точностью до 1 Дж по заранее отградуированной шкале либо расчетом – по значениям угла подъема маятника до и после удара. Определенная часть работы затрачивается на пластическую деформацию некоторого объема металла, который трудно установить.

Ударная вязкость является интегральной характеристикой механических свойств, зависящей одновременно и от прочности, и от пластичности. Между характеристиками прочности и ударной вязкости не существует, строго говоря, определенной связи.

Однако наблюдается некоторая согласованность между  $KС$  и относительным сужением  $\psi$ . Низкие значения  $\psi$  всегда соответствуют низкой ударной вязкости, но ее высокие значения не всегда гарантируют высокую  $KС$ .

В ряде случаев необходимо иметь информацию об ударной вязкости при повышенных либо пониженных температурах. При определении ударной вязкости при повышенных (пониженных) температурах применяют те же образцы и оборудование, что и в испытаниях при комнатной температуре. Нагрев образцов проводят в муфельных печах либо в масляных ваннах. Охлаждение вы-

полняют с помощью специальных сосудов в среде сжиженных газов.

За время с момента извлечения образца из печи либо из охлаждающего сосуда до момента удара (которое не должно превышать пять градусов в секунду) температура образца несколько снижается (повышается), поэтому образцы должны несколько перегреться (переохладиться) от 5 до 12 °С в зависимости от температуры испытаний.

### ***Определение критической температуры хрупкости.***

Многие металлы в зависимости от температуры могут разрушаться как вязко, так и хрупко. Понижение температуры обуславливает переход от вязкого к хрупкому разрушению. Это явление получило название хладноломкости, а температуру перехода металла от вязкого разрушения к хрупкому и наоборот назвали критической температурой хрупкости – КТХ или порогом хладноломкости. Для выявления склонности сталей к переходу в хрупкое состояние используют сериальные испытания на ударный изгиб надрезанных образцов. По результатам экспериментов строят температурную зависимость ударной вязкости КСТ. Испытания при различных температурах начинают с одной из крайних, постепенно переходя от одной температуры к другой. При понижении температуры испытания наблюдается переход от вязкого разрушения к хрупкому, выражающийся в резком падении ударной вязкости и изменении характера излома (рис. 5.8). В зависимости от структурного состояния стали переход к хрупкому разрушению может быть резким либо довольно плавным. Изменение характера разрушения происходит в некотором температурном интервале, который характеризуется двумя температурами:  $T_v$  – верхняя критическая температура хрупкости, выше которой излом полностью (> 95 %) – вязкий и  $T_n$  – нижняя критическая температура хрупкости, ниже которой излом (> 95 %) – хрупкий.

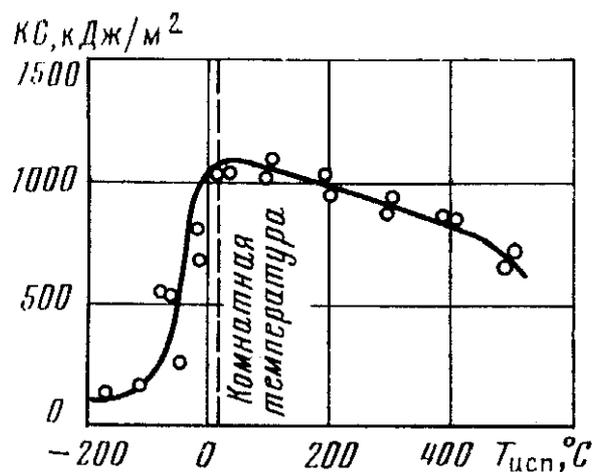


Рис. 5.8. Температурная зависимость ударной вязкости низкоуглеродистой стали

В случае дискретного перехода от вязкого разрушения к хрупкому, особенно в узком температурном интервале в пределах  $10\text{ }^\circ\text{C}$ , за КТХ принимают середину температурного интервала резкого изменения вида излома и обозначают  $T_{50}$ .

Всегда следует учитывать, что уровень критической температуры, определенный на малых образцах, дает лишь сравнительную оценку и не может дать количественного представления о поведении реальных объектов. Несмотря на условность определения КТХ, эта характеристика с достаточной для инженерных целей точностью разделяет шкалу температур на две области.

При температурах ниже критических оборудование не может надежно работать при воздействии ударных нагрузок. При температурах выше критических надежность эксплуатации оборудования резко возрастает, причем, чем больше рабочая температура превышает критическую, тем ниже опасность хрупкого разрушения. Требования надежности предусматривают температурный запас вязкости не менее  $30\text{ }^\circ\text{C}$ , т. е. рабочая температура эксплуатации оборудования должна быть на  $30$  градусов выше КТХ.

**Определение сопротивления разрушению.** При длительной эксплуатации объектов повышенной опасности во многих случаях необходимо считаться с возможностью работы оборудования в течение некоторого времени при наличии трещин. Кроме того, несмотря на совершенствование методов дефектоскопии, в ряде

случаев остаются невыявленными некоторые технологические дефекты, например, типа трещин в сварных соединениях.

Если учесть растущее применение высокопрочных материалов, чувствительных даже к малым трещинам, становится ясной необходимость проведения испытаний в условиях начавшегося разрушения. Испытания на вязкость разрушения (кратковременную трещиностойкость) принадлежат к наиболее апробированным и теоретически обоснованным методам в практике технического металловедения и диагностирования. Эти испытания базируются на линейной механике разрушения, которая берет свое начало от работ Гриффитса. Обычно испытания проводят на образцах, показанных на рис. 5.9.

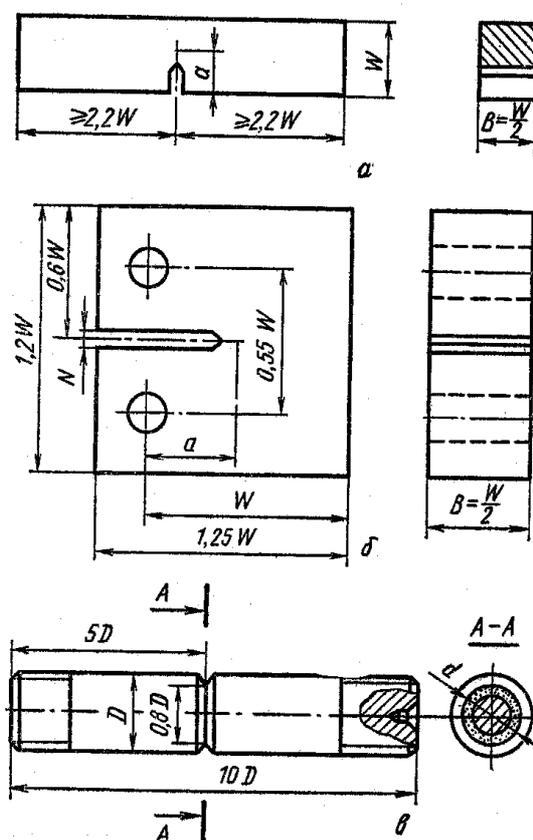


Рис. 5.9. Типы образцов для определения  $K_{Ic}$

и соотношения их размеров: *a* – для испытаний на изгиб;  
*б* – для испытаний на внецентренное растяжение; *в* – цилиндрический образец для испытаний на растяжение

Так как плоскодеформированное состояние является наиболее опасным для хрупкого разрушения, вязкость разрушения при

плоской деформации  $K_{Ic}$  рассматривают в заданных температурно-скоростных условиях нагружения в качестве одного из важнейших параметров при оценке способности материалов сопротивляться хрупкому разрушению.

Усталостные трещины в образцах наводят на специальных вибраторах или усталостных машинах типа пульсаров.

Показано [41, 45, 46], что достоверность оценки  $K_{Ic}$  регламентирована размерами образца, которые зависят от искомой величины  $K_{Ic}$ , подчиняясь условию  $B \geq 2,5^{(K_{Ic}/\sigma_{0,2})^2}$ . Существуют ориентировочные соотношения параметров вязкости разрушения и предела текучести для конструкционных сталей.

Образцы с наведенной трещиной подвергают разрушающим испытаниям на стандартных машинах с различными скоростями, равными  $0,6-2,5 \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{м/с}}$ .

При испытании регистрируют диаграмму разрушения в координатах: прилагаемая нагрузка  $P$  – смещение берегов трещины  $V$ . Запись осуществляется с помощью установленного на образце датчика раскрытия трещины. Весьма жесткие геометрические условия, регламентирующие реализацию плоскодеформированного состояния, при разрушении создают существенные трудности оценки вязкости разрушения конструкционных сталей. Кроме того, необходимо значительно увеличить размеры образцов, по сравнению с испытательными образцами из высокопрочных сталей, а также мощность испытательных машин.

В итоге оценка трещиностойкости конструкционных сталей, применяемых для изготовления объектов повышенной опасности, становится либо невозможной из-за отсутствия образцов необходимой толщины, либо затруднительной в связи с испытанием образцов больших размеров. В таких случаях необходимо ориентироваться на возможность сравнительной оценки различных материалов равной толщины.

Для преодоления указанных трудностей рядом ученых и специалистов [39–41] была предложена в качестве меры трещиностойкости материалов величина критического раскрытия трещины (КРТ), соответствующего раскрытию трещины в момент ее спонтанного роста; проводится с помощью специального устрой-

ства. Метод КРТ позволяет сопоставлять низкопрочные стали после испытаний идентичных образцов в одинаковых условиях. КРТ менее информативный параметр, чем  $K_{Ic}$ .

В последние годы разрабатывается новый критерий оценки вязкости разрушения как низко-, так и высокопрочных материалов по величине так называемого  $J$ -интеграла. Эта характеристика представляет собой изменение потенциальной энергии в упруго-пластической системе при распространении трещины. Методики вычисления этого интеграла отличаются значительной трудоемкостью, кроме того пока отсутствует единый методический подход, приемлемый для инженерных расчетов, и поэтому данный критерий не получил широкого применения.

#### **5.4. Испытания сварных соединений**

**Виды испытаний и их область применения.** Согласно ГОСТ 6996, механические свойства сварных соединений определяют при следующих видах испытаний: а) испытании металла различных участков сварного соединения и наплавленного металла на статическое (кратковременное) растяжение; б) испытании металла различных участков сварного соединения и наплавленного металла на ударный изгиб; в) испытании металла различных участков сварного соединения на стойкость против механического старения; г) измерении твердости металла различных участков сварного соединения и наплавленного металла; д) испытании сварного соединения на статическое растяжение; е) испытании сварного соединения на статический изгиб (загиб); ж) испытании сварного соединения на ударный разрыв.

Испытания проводятся при определении качества продукции и сварочных материалов, пригодности способов и режимов сварки, при установлении квалификации сварщиков и показателей свариваемости металлов и сплавов.

Виды испытаний и типы образцов предусматриваются в стандартах и технических условиях на продукцию. Допускается применять образцы и методы испытаний по международным стандартам ИСО 4136, ИСО 5173, ИСО 5177.

**Отбор образцов.** Образцы для испытаний отбирают из проб, вырезанных непосредственно из контролируемой конст-

рукции или от специально сваренных для проведения испытаний 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, режим сварки и термической обработки должны полностью отвечать условиям изготовления контролируемого изделия или особому назначению испытания.

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.

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 к шву. Если нет иных указаний в стандартах или другой технической документации, то стрела прогиба  $f$  на длине 200 мм (рис. 5.10) не должна превышать 10 % от толщины металла, но не более 4 мм.

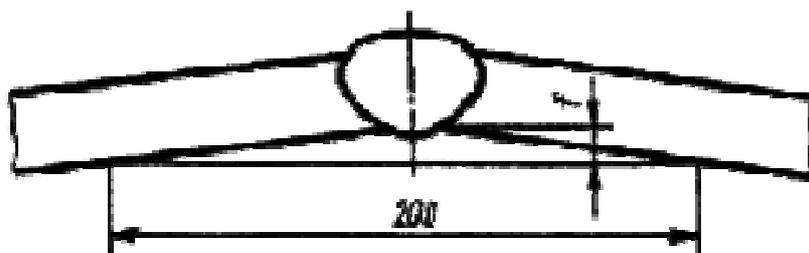


Рис. 5.10. Определение стрелы прогиба

Несовпадение плоскости листов  $h$  в стыковых соединениях (рис. 5.11) не должно превышать 15 % от толщины листа, но не более 4 мм.

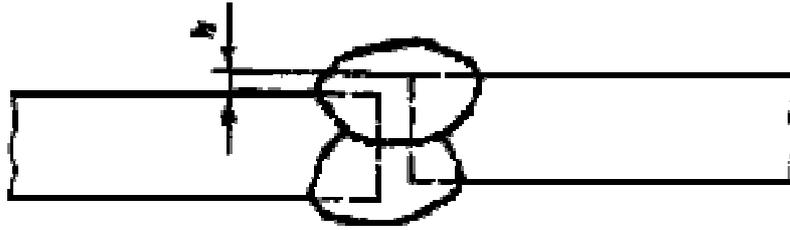


Рис. 5.11. Несовпадение плоскости листов

***Условия проведения испытаний и оценка их результатов.***

При отсутствии других указаний в стандартах или другой технической документации, испытания на статическое кратковременное растяжение, на статический изгиб проводят не менее чем на двух образцах; на ударный изгиб, стойкость против механического старения, ударный разрыв – не менее чем на трех образцах; измерение твердости – не менее чем на четырех точках для каждого участка сварного соединения. Если размеры сварного соединения исключают возможность размещения четырех точек, то допускается уменьшить их количество в соответствии с реальными возможностями.

Результаты по всем видам испытаний определяют как среднее арифметическое результатов, полученных при испытании всех образцов. Если нет указаний в соответствующих стандартах или другой технической документации, то для всех видов испытаний, кроме испытаний на статический изгиб и измерения твердости, допускается снижение результатов испытаний для одного образца на 10 % ниже нормативного требования, если средний арифметический результат отвечает нормативным требованиям. Допускаемое снижение результатов испытания образцов на статический изгиб и при измерении твердости должно оговариваться в соответствующих стандартах или другой технической документации. При испытании на ударный изгиб допускаемое снижение ниже нормативных требований не более  $5 \text{ Дж/см}^2$  ( $0,5 \text{ кгс}\cdot\text{м/см}^2$ ).

Результаты испытаний считают неудовлетворительными, если в изломе образца или на его поверхности выявлены кристаллизационные или холодные трещины (кроме случаев, когда наличие трещин допускается соответствующей НТД). При неудовлетворительных результатах испытания повторяют на удвоенном количестве образцов. Если в изломе образца, результаты

испытания которого считают неудовлетворительными, обнаружены дефекты основного металла или сварного соединения (кроме трещин), его исключают из оценки и заменяют одним новым образцом.

Общие результаты испытаний определяют по показаниям, полученным при повторных испытаниях. Результаты повторных испытаний являются окончательными.

Методика определения размеров образцов, требования, предъявляемые к оборудованию для испытаний, условия проведения испытаний и подсчет результатов должны соответствовать требованиям действующих стандартов (испытания на растяжение – ГОСТ 1497, при пониженных температурах – ГОСТ 11150, при повышенных температурах – ГОСТ 9651, при испытании на ударный изгиб при пониженной, комнатной и повышенной температурах – ГОСТ 9454; при измерении твердости – ГОСТ 2999, ГОСТ 9013 и ГОСТ 9012).

#### **5.4.1. Испытание металла различных участков сварного соединения и наплавленного металла на статическое растяжение**

При испытании металла на статическое (кратковременное) растяжение определяют следующие характеристики механических свойств:

- предел текучести физический  $\sigma_T$ , МПа (кгс/мм<sup>2</sup>), или предел текучести условный  $\sigma_{0,2}$ , МПа (кгс/мм<sup>2</sup>);
- временное сопротивление  $\sigma_B$ , МПа (кгс/мм<sup>2</sup>);
- относительное удлинение после разрыва  $\delta_5$ , %;
- относительное сужение после разрыва  $\psi$ , %.

Испытания проводят для металла шва, металла различных участков зоны термического влияния наплавленного металла при всех видах сварки плавлением.

Форма и размеры образцов, применяемых для испытания, должны соответствовать рис. 5.12, 5.13.

Допускается увеличение размера диаметра образца и его высоты.

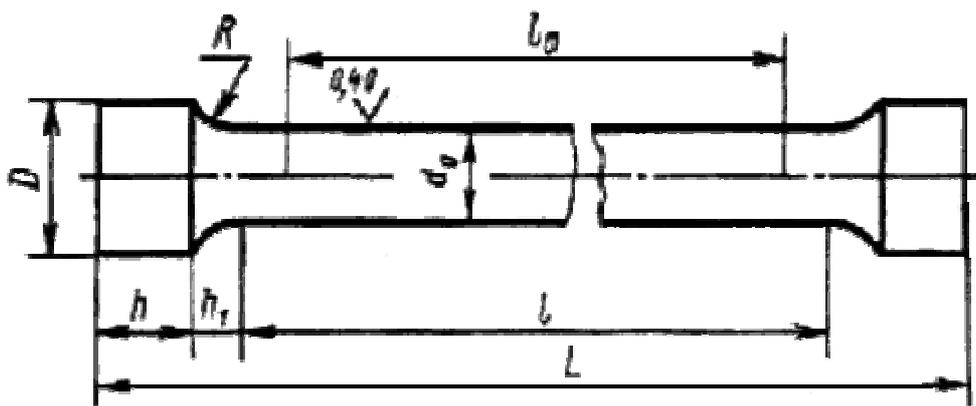


Рис. 5.12. Форма образца (тип I, II, III)

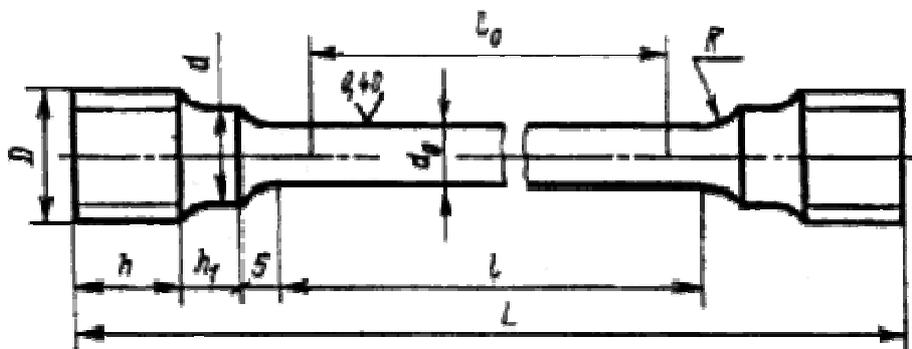


Рис. 5.13. Форма образца (тип IV, V)

Для испытаний, проводимых при нормальной или пониженной температуре, применяют образцы всех типов.

Рабочее сечение образцов всех типов должно полностью состоять из металла испытываемого участка. В головках образца допускается наличие металла других участков сварного соединения. На поверхности головки допускается наличие одной или двух (параллельных) лысок, а также наличие необработанной поверхности шва или основного металла.

При однопроходных швах образцы, вырезаемые из различных участков шва, имеют практически одинаковые механические свойства. При многопроходных швах характеристики механических свойств в различных участках шва различны. Место вырезки образцов из многопроходных швов оговаривается стандартами или другой технической документацией. При отсутствии специальных указаний образцы вырезают у поверхности шва.

### 5.4.2. Испытание металла различных участков сварного соединения и наплавленного металла на ударный изгиб

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

Ударную вязкость определяют в Дж/см<sup>2</sup> (кгс·м/см<sup>2</sup>), если нет указаний в соответствующих стандартах или другой НТД. Для испытания применяют образцы, форма, размер и качество поверхности которых соответствуют указанным на рис. 5.6 (образцы с *U*-образным надрезом и образцы с *V*-образным надрезом). Предпочтительными являются образцы с *V*-образным надрезом.

Условное обозначение ударной вязкости или работы удара включает: символ ударной вязкости (*КС*) или работы удара (*К*); вид надреза (концентратора) (*U*, *V*); температуру испытания (температуру 20 °С не проставляют); максимальную энергию удара маятника (максимальную энергию 300 Дж не проставляют); тип образца (типы образцов VI и IX не проставляют); место расположения надреза (*Ш* – шов, *ЗС* – зона сплавления, *ЗТВ* – зона термического влияния, *t* – расстояние от границы сплавления до оси надреза). Значение *t* оговаривают в стандартах или другой технической документации. При расположении надреза поперек металла шва, зоны сплавления или зоны термического влияния в конце обозначения ставят букву *П*.

#### ***Примеры условных обозначений:***

1. Ударная вязкость, определяемая при температуре 100 °С, при максимальной энергии удара маятника 150 Дж, с надрезом вида *U*, расположенным по зоне сплавления:

$$КСU^{+100} 150 \text{ УПЗС.}$$

2. Ударная вязкость, определяемая при отрицательной температуре –40 °С, при максимальной энергии удара маятника копра 50 Дж, с надрезом вида *V*, расположенным по зоне термиче-

ского влияния на расстоянии ( $t$ , мм) от границы сплавления до оси надреза:

$$KCV^{-40} 50 \text{ XI ЗТВ}_t.$$

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:

$$KCUШ.$$

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

$$KCVШ П.$$

В зависимости от цели испытания надрез располагают по металлу шва, по зоне сплавления и в различных участках металла околошовной зоны на расстоянии  $t$  от границы сплавления. Место расположения надреза и расстояние  $t$  от границы сплавления до оси надреза оговаривают в НТД.

#### **5.4.3. Испытание металла различных участков сварного соединения на стойкость против механического старения**

Стойкость против механического старения характеризуется изменением ударной вязкости металла, подвергнутого старению, по сравнению с ударной вязкостью металла 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  $(10 \pm 0,5)\%$  остаточного удлинения в пределах расчетной длины, ограниченной кернами или рисками. Рекомендуются на поверхности образ-

цов 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 (523 К) с последующим охлаждением на воздухе. Из рабочей части заготовок отбирают образцы (рис. 5.14). Ось надреза должна совпадать с осью симметрии шва. Схему отбора образцов при расположении надреза в других участках сварного соединения оговаривают стандартами или другой технической документацией.

Предусмотренную данным пунктом методику старения применяют для сварных соединений из сталей. Методику старения для других металлов и сплавов, а также иную температуру нагрева или величину деформации для соединений из стали оговаривают стандартами или другой технической документацией.

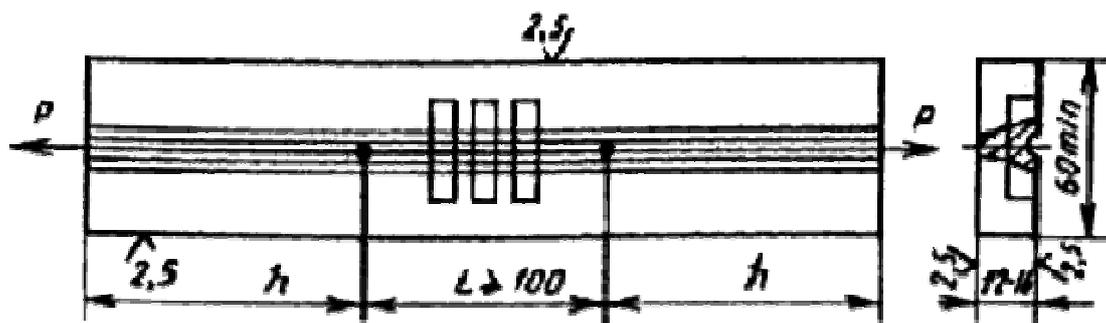


Рис. 5.14. Место отбора образцов

#### 5.4.4. Измерение твердости металла различных участков сварного соединения и наплавленного металла

Твердость измеряют в поперечном сечении сварного соединения в соответствии с требованиями НТД (пример схемы рис. 5.15, 5.16).

Твердость измеряют по Виккерсу ( $HV$ ), Бринеллю ( $HB$ ) и по Роквеллу – шкалам  $A$ ,  $B$  и  $C$  ( $HRA$ ,  $HRB$  и  $HRC$ ), отдавая предпочтение замеру по Виккерсу.

Твердость по Виккерсу определяют по ГОСТ 2999. Нагрузка на индентор в зависимости от прочности металла участков сварного соединения и ширины зоны термического влияния должна составлять 98 Н ( $HV10$ ) или 49 Н ( $HV50$ ). При наличии в стандартах или другой технической документации соответствующих ука-

заний измеряют твердость по Виккерсу. Нагрузка на индентор при таких замерах может меняться от 0,04 до 4,9 Н (рис. 5.15).

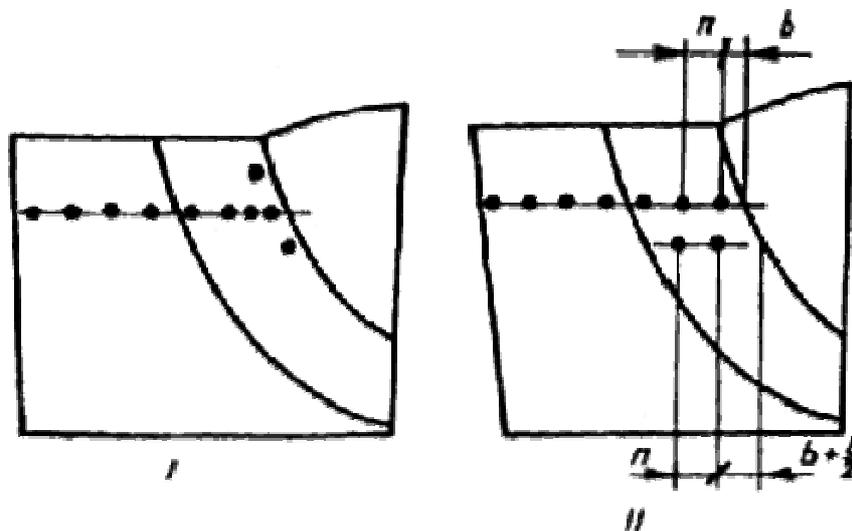


Рис. 5.15. Схема измерения твердости по Виккерсу

При измерениях, выполняемых в непосредственной близости от границы сплавления, рекомендуется проводить 2-3 измерения. Допускается проведение измерений на участках сварного соединения, указанных на рис. 5.16.

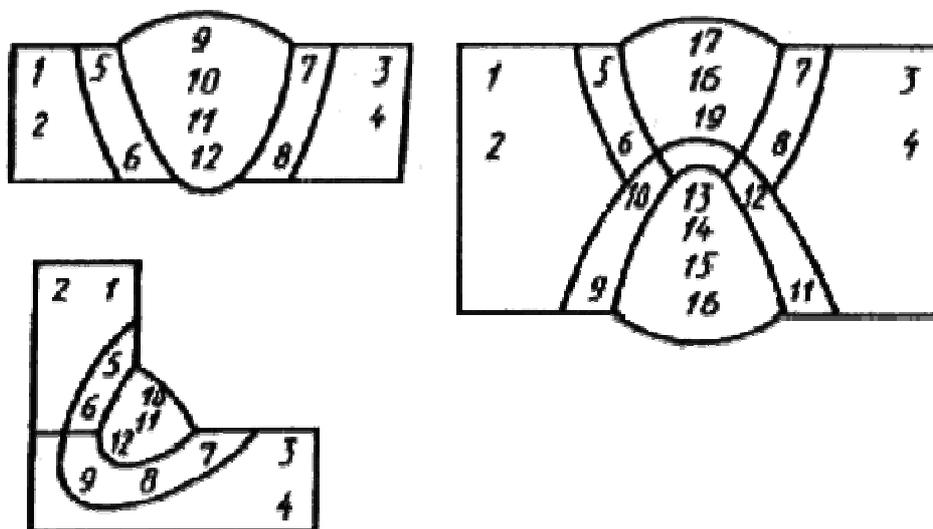


Рис. 5.16. Один из вариантов схем измерения твердости

Схему измерения твердости при толщине основного металла или углового шва более 60 мм оговаривают в стандартах или другой технической документации.

#### 5.4.5. Испытание сварного соединения на статическое

## растяжение

При данном испытании определяют прочность наиболее слабого участка стыкового или нахлесточного соединения или прочность металла шва в стыковом соединении.

*Определение прочности наиболее слабого участка стыкового и нахлесточного соединения.* Испытания проводят, как правило, на образцах, толщина или диаметр которых равны 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.

В качестве примера на рис. 5.17 изображена форма и размер плоского образца для испытания стыковых соединений.

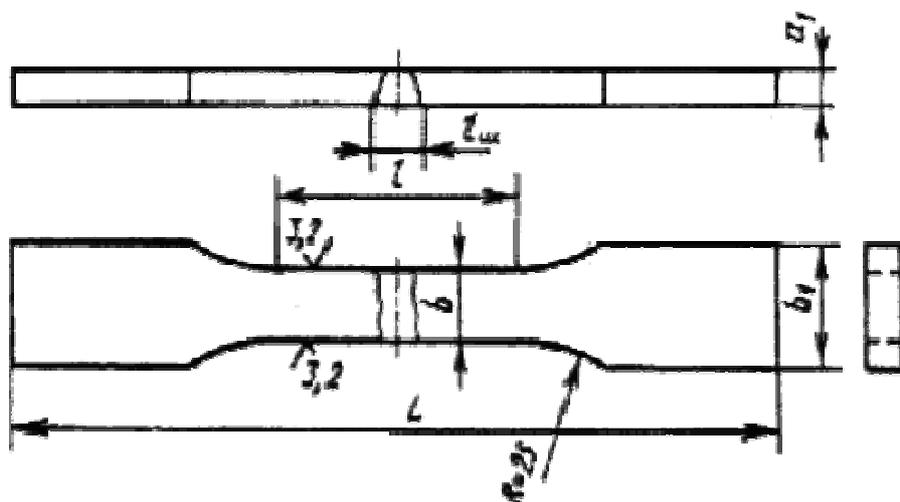


Рис. 5.17. Форма образца для испытания на статическое растяжение

Утолщение шва должно быть снято механическим способом до уровня основного металла. При удалении утолщения разрешается снимать основной металл по всей поверхности образца на глубину до 15 % от толщины металла или диаметра стержня, но не более 4 мм. Основной металл с поверхности образца удаляют только с той стороны, с которой снимают утолщение шва или имеется уступ. Строгать утолщение следует поперек шва. Острые кромки плоских образцов в пределах рабочей части должны быть закруглены радиусом не более 1,0 мм путем сглаживания напильником вдоль кромки. Разрешается строгать утолщение вдоль шва с последующим удалением рисок.

Для контроля прочности сварных соединений труб применяют сегментные образцы, а также цилиндрические образцы в виде отрезков труб. Сегментные образцы вырезают при диаметре трубы более 20 мм. Цилиндрические образцы вырезают при диаметре трубы до 100 мм.

#### 5.4.6. Испытание сварного соединения на статический изгиб

Испытания проводят для стыковых соединений. При испытании определяют способность соединения принимать заданный по размеру и форме изгиб. Эта способность характеризуется углом изгиба  $\alpha$  (рис. 5.18), 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. Определяют также место образования трещины или разрушения (по металлу шва, металлу околошовной зоны или основному металлу).

В зависимости от требований, установленных соответствующей НТД, испытания проводят до достижения нормируемого угла изгиба или угла изгиба, при котором образуется первая, являющаяся браковочным признаком трещина, до параллельности или соприкосновения сторон образца. Угол изгиба при испытании до образования первой трещины измеряют в ненапряженном состоянии с погрешностью до  $\pm 2^\circ$ .

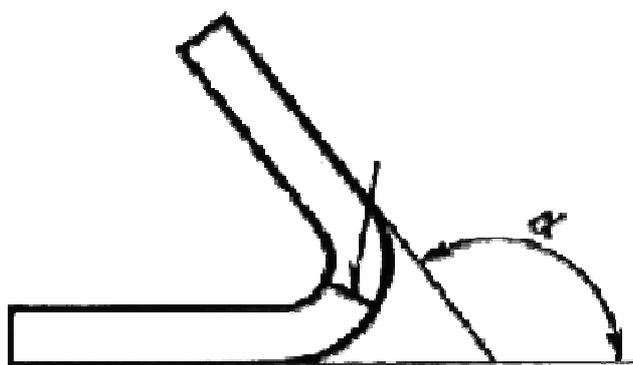


Рис. 5.18. Измерение угла загиба

Обязательным условием проведения испытаний является плавность возрастания нагрузки на образец. Испытания проводят

со скоростью не более 15 мм/мин на испытательных машинах или прессах с использованием опорных роликов (рис. 5.19). Диаметр оправки  $D$  может изменяться в зависимости от марки стали, толщины листов, способа термообработки и должен оговариваться в соответствующей НТД. При отсутствии специальных указаний диаметр оправки принимают равным двум толщинам основного металла.

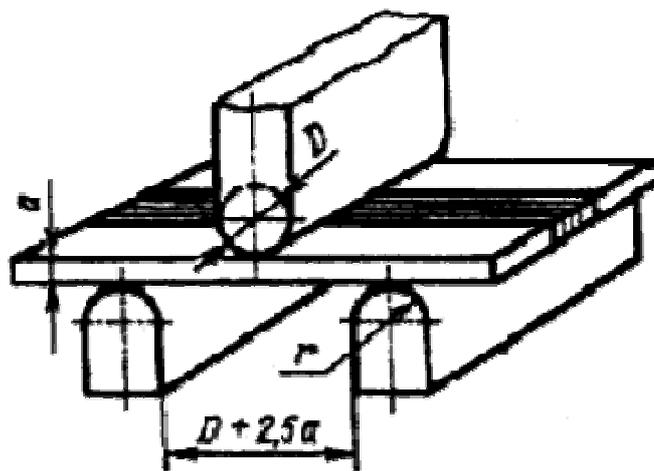


Рис. 5.19. Один из вариантов испытаний на изгиб

Если заданный угол изгиба превышает  $150^\circ$ , то после изгиба по схеме, приведенной на рис. 5.19, изгиб можно продолжать между двумя параллельными нажимными плитами. Между концами образца устанавливают прокладку толщиной  $d$ , равной диаметру оправки. После удаления прокладки испытание проводят до соприкосновения сторон.

При диаметре исследованной трубы от 20 до 45 мм применяют образцы в виде отрезков труб или плоские (сегментные) образцы. При диаметре трубы свыше 45 мм применяют плоские (сегментные) образцы. Испытание труб диаметром 60 мм и менее с поперечным (круговым) и продольным швами можно проводить на образцах, приведенных на рис. 5.20. Утолщение шва с наружной стороны трубы механическим путем снимают до уровня основного металла.

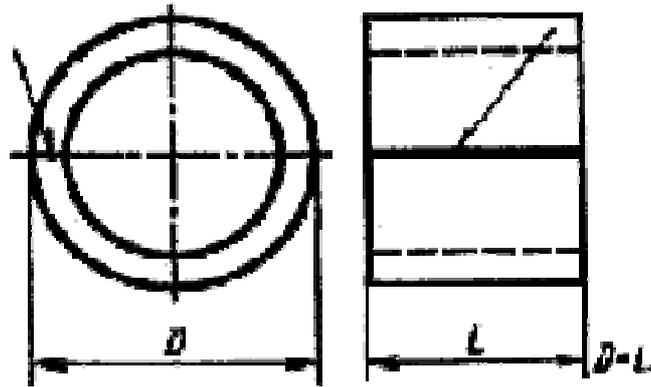


Рис. 5.20. Схема испытания образца на сплющивание

Результаты испытания образцов определяют величиной  $b$  (рис. 5.21) до появления на поверхности образца трещины. Если трещина не образуется, то испытание проводят до соприкосновения сторон.

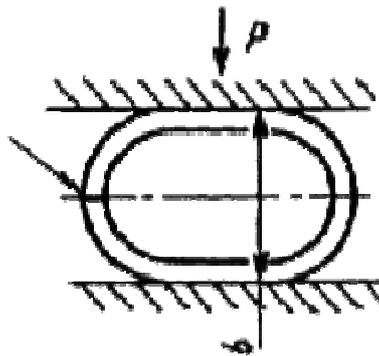


Рис. 5.21. Схема измерения величины сплющивания

Испытание проводят путем деформации образца под прессом сжимающей нагрузкой. Обязательным условием проведения испытания является плавность нарастания усилия на образец.

### 5.5. Контрольные вопросы

1. Назовите основные виды разрушающих механических испытаний.
2. Какие характеристики металла определяются при статических испытаниях?
3. Какие существуют типы диаграмм деформации при растяжении?
4. Какие характеристики металла определяют при длительных статических испытаниях?

5. Назовите существующие методы испытания на твердость.
6. С какими механическими характеристиками металла коррелирует твердость?
7. Какие характеристики металла определяются при циклических испытаниях?
8. Что такое физический предел усталости?
9. Какие характеристики металла определяются при динамических испытаниях?
10. Каким образом определяют ударную вязкость при повышенных и пониженных температурах?
11. Какое явление называют хладноломкостью?
12. Как определяют температурный порог хладноломкости?
13. Что такое вязкость разрушения?
14. Каким образом проводят испытания на кратковременную трещиностойкость?
15. Каковы условия проведения испытаний сварных соединений на статический изгиб и статическое кратковременное растяжение?
16. Как проводят испытания сварных соединений на стойкость против механического старения?
17. Покажите схемы измерения твердости сварных соединений различными методами.
18. Как проводят испытания сварных соединений на статический изгиб?

## 6. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЙ, МЕТОДОВ СОЕДИНЕНИЯ ЗАГОТОВОК, ИХ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ

В настоящее время ведущие ученые и специалисты России, ближнего и дальнего зарубежья уверены, что в ближайшие десятилетия развитие **нанотехнологий** станет основой грядущей промышленной **революции**. Нанотехнология позволяет нам осуществлять манипуляции с веществом на уровне точности одного нанометра (одна миллиардная часть метра), что означает возможность управления процессами в атомарном и молекулярном масштабе. На этом уровне размеров стираются границы не только между привычными основными направлениями науки (физика, химия, биология), но и даже между их прикладными или смежными разделами (типа материаловедения, механики, электроники, генетики и нейробиологии).

Анализ состояния бурно развивающейся областей нанонауки (нанотехнологий, наноматериалов, наноструктур) позволяет выделить ряд важнейших направлений [36, 37, 38].

- **Молекулярный дизайн.** Препарирование имеющихся молекул и синтез новых молекул в сильно неоднородных электромагнитных полях.

- **Материаловедение.** Создание бездефектных высокопрочных материалов с высокой проводимостью.

- **Приборостроение.** Создание сканирующих туннельных микроскопов, атомно-силовых микроскопов, магнитных силовых микроскопов, многоострийных систем для молекулярного дизайна, миниатюрных сверхчувствительных датчиков, нанороботов.

- **Электроника.** Конструирование нанометровой элементной базы для ЭВМ следующего поколения, нанопроводов, транзисторов, выпрямителей, дисплеев, акустических систем.

- **Оптика.** Создание нанолазеров. Синтез многоострийных систем с нанолазерами.

- **Гетерогенный катализ.** Разработка катализаторов с наноструктурами для классов реакций селективного катализа.

- **Медицина.** Проектирование наноинструментария для уничтожения вирусов, локального «ремонта» органов, высокоточной доставки доз лекарств в определенные места живого организма.

- **Трибология.** Определение связи наноструктуры материалов и сил трения и использование этих знаний для изготовления перспективных пар трения.

- **Управляемые ядерные реакции.** Наноускорители частиц, нестатические ядерные реакции.

Нанотехнологии относят к междисциплинарным исследованиям, а междисциплинарной наукой является **синергетика** [47, 48, 49].

### 6.1. Наноматериалы, нанотехнологии

Идеи наноматериалов делают реальным создание нового класса интеллектуальных материалов с адаптационными свойствами, подобными биосистемам.

*Нанонауку, возникшую на стыке физики, химии, биологии, кибернетики и синергетики, определяют как совокупность знаний о свойствах вещества в наномасштабе, а нанотехнологию – как умение целенаправленно создавать нанобъекты с заранее заданными размерами, формой, структурой и свойствами.*

**Фуллерены.** Среди большого числа различных наноматериалов обращают на себя внимание различные формы существования углерода. Это фуллерены, фуллериты, углеродные нанотрубки, графен. Фуллерены, как новая форма существования углерода, были открыты в 1985 г. при попытке астрофизиков объяснить спектры межзвездной пыли. Оказалось, что атомы углерода могут образовывать высокосимметричную молекулу  $C_{60}$ , которая состоит из 60 атомов углерода, расположенных на сфере с диаметром около 1 нм (рис. 6.1).

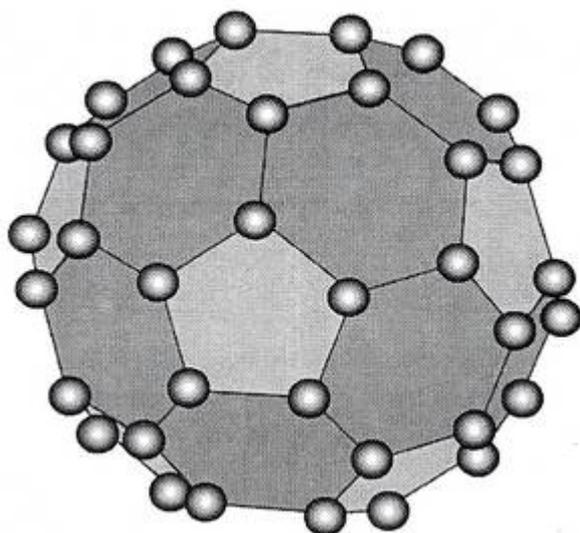


Рис. 6.1. Схема фуллерена

Молекула названа в честь архитектора Р. Фуллера, построившего дом из пятиугольников и шестиугольников.

Молекулы  $C_{60}$  могут образовывать кристалл **фуллерит** с ГЦК решеткой и достаточно слабыми межмолекулярными связями. В этих кристаллах имеются полости, в которых могут находиться посторонние атомы. Фуллериты могут обладать сверхпроводящими, ферромагнитными и различными другими свойствами.

**Углеродные нанотрубки.** Из углерода можно получить молекулы с гигантским числом атомов. Такая молекула может представлять собой однослойную трубку с диаметром около нанометра и длиной в несколько десятков микрон (рис. 6.2, трубка с металлическими свойствами).

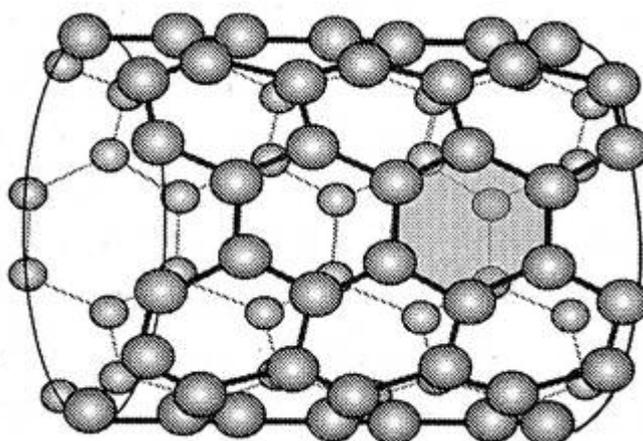


Рис. 6.2. Углеродная нанотрубка с металлическими свойствами

На поверхности трубки атомы расположены в вершинах правильных шестиугольников. Концы трубки закрыты с помощью шести правильных пятиугольников. Комбинации правильных пяти-, шести- и семиугольников позволяют получать разнообразные формы углеродных поверхностей в трехмерном пространстве (рис. 6.3).

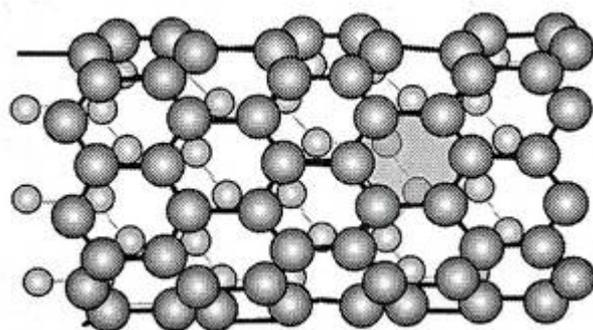


Рис. 6.3. Модификация нанотрубки

Геометрия этих наноконструкций определяет их уникальные физические и химические свойства и, следовательно, возможность существования принципиально новых уникальных материалов и технологий их производства. В чем же эта уникальность?

***Сверхпрочные материалы.*** Связи между атомами углерода в графитовом листе являются самыми сильными среди известных. Поэтому бездефектные углеродные трубки *на два порядка прочнее стали и приблизительно в четыре раза легче ее!*

Из таких трубок можно изготавливать легкие композиционные материалы предельной прочности для нужд техники нового века. Это силовые элементы мостов, несущие конструкции компактных летательных аппаратов, элементы турбин, силовые блоки двигателей с предельно малым удельным потреблением топлива и т. д.

***Высокопроводящие материалы.*** Известно, что в кристаллическом графите проводимость вдоль плоскости слоя наиболее высокая среди известных материалов и, напротив, в направлении, перпендикулярном листу, мала. Поэтому электрические кабели, сделанные из нанотрубок, при комнатной температуре будут иметь электропроводность **на два порядка выше, чем медные кабели.**

**Нанокластеры.** К множеству нанообъектов относятся сверхмалые частицы, состоящие из десятков, сотен или тысяч атомов. Свойства кластеров кардинально отличаются от свойств макроскопических объемов материала того же состава. Из различных нанокластеров, как из крупных строительных блоков, можно целенаправленно конструировать новые материалы с заранее заданными свойствами и использовать их в каталитических реакциях, для разделения газовых смесей и хранения газов.

**Наноустройства.** Нанотрубки могут составлять основу для новых конструкций плоских акустических систем и плоских дисплеев, т. е. привычных макроскопических приборов. Из наноматериалов могут быть созданы определенные наноустройства, например: нанодвигатели, наноманипуляторы, молекулярные насосы и другие конструкции.

**Сварка для наноматериалов.** Серьезным препятствием на пути широкого внедрения конструкционных материалов с наноструктурным состоянием является отсутствие эффективных методов сварки, что не позволяет в полной мере реализовать уникальные свойства наноматериалов в реальных конструкциях.

В связи с этим актуальной задачей современного материаловедения является разработка таких технологий создания неразъемных соединений наноструктурных материалов, которые обеспечили бы сохранение в зоне соединения исходной наноструктуры.

ЦНИИ КМ «Прометей» обладает большим опытом работ по изучению и разработке технологических процессов интенсивной пластической деформации (ИПД) и сварки различных конструкционных металлических материалов, а ученые «Прометея» являются основоположниками в разработке научных основ создания ультрадисперсных фрагментированных структур методами ИПД.

В институте разрабатываются технологии и режимы сварки металлических материалов с нанокристаллическими структурами, полученными методами ИПД, создается опытный участок со специализированным оборудованием для получения опытно-промышленных партий равнопрочных соединений, сохраняющих наноструктурное состояние и соответствующие механические свойства свариваемых материалов.

Полученные результаты лягут в основу их применения в судостроении, авиастроении, автомобилестроении, энергомашиностроении и в медицинской технике.

Будут созданы основы для промышленного освоения в РФ прорывных и конкурентоспособных на мировом рынке технологий производства узлов и конструкций из нанокристаллических металлов и сплавов, обладающих уникальным комплексом механических и физических свойств.

Российскими учеными разработан оригинальный способ нанесения тончайшего (от 10 до 150 нм) гидроксидного покрытия титана (железа, кобальта и т. д.), которое закрепляется путем термической обработки с формированием наноразмерной кристаллической структуры оксидной оболочки, обеспечивающей возможность регулировать функциональные характеристики конечного продукта и соответственно расширять спектр областей его применения. Использование наноматериалов в составе компонентов обмазки сварочных электродов, включающих полученные золь-гель методами нанопродукты – гидро- и ксерогели оксигидроксидов кремния, титана, железа, марганца и др., способствует формированию электродных покрытий с улучшенными сварочно-технологическими характеристиками. Выполненные совместно с ЦНИИ КМ «Прометей» поисковые исследования показывают возможность применения наноматериалов вместо жидкого стекла.

Важным этапом работы является изучение физико-химических свойств синтезированных нанопродуктов (удельной поверхности, заряда поверхности, пористости и т. д.) и их влияния на технические свойства, а также разработка методов применения синтезированных материалов [50].

## 6.2. Методы контроля и исследования

*Новые суперлинзы.* Ученые из Калифорнийского университета Беркли создали суперлинзы, которые могут преодолеть ограничивающий дифракционный диапазон микроскопов, **работающих на обычной световой оптике.**

С помощью тонкой серебряной фольги и ультрафиолетового света исследователи получили изображения с разрешением около

60 нм матрицы нанопроводников и начертание слова «NANO», нанесенное на органическом полимере (рис 6.4), в то время как дифракционный предел разрешения обычных оптических микроскопов – 400 нм.

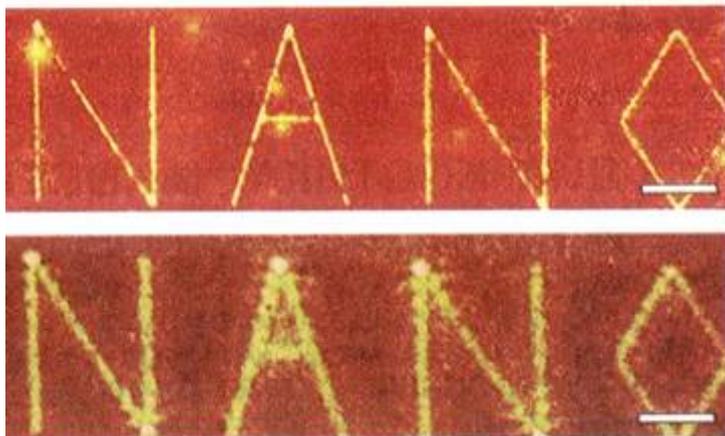


Рис. 6.4. Изображение, полученное с применением суперлинзы (верх)

Благодаря этому открытию исследования в области нанотехнологий и конструирование наномашин станут более легкими, а главное – более дешевыми. Открытие суперлинз положило конец дебатам физиков и инженеров о том, как можно обойти дифракционный барьер.

Весьма заметный скачок в методах микроскопии был сделан физиками, которые стали использовать инфракрасное, ультрафиолетовое и другие невидимые глазу излучения.

Все приборы, использующие невидимые глазом излучения, состоят из осветителя, оптических элементов (линз, зеркал, призм и т. д.), пригодных к использованию в данном участке спектра, и элементов, преобразующих невидимое изображение в видимое. Прорыв ученых Беркли состоит в том, что они смогли ввести в конструкцию таких микроскопов новый элемент – **суперлинзу из пленки серебра**.

**Перспективные методы контроля.** В последнее время активизируются работы по разработке, совершенствованию и внедрению различных средств НК, что вызвано необходимостью выявления не только макродефектов, но и, главным образом, оценки накопления микроповрежденности в металле, определению физико-механических характеристик потенциально опасного оборуд-

дования, эксплуатирующегося длительное время в сложных нагруженных условиях, зачастую в агрессивных средах, с достаточным уровнем достоверности и надежности без проведения разрушающих испытаний.

Методы НК должны не только выявлять реальные дефекты и неоднородности в металле, но и оценивать влияние этих дефектов на поведение материала или элемента конструкции при эксплуатации. Решение проблемы следует искать в изучении связи микроструктуры и свойств материалов с разнообразными, взаимодействующими с материалами физическими полями, в применении последних достижений в областях микроэлектроники и материаловедения.

В ближайшие годы ожидается разработка и совершенствование средств НК в трех основных направлениях:

- расширение функциональных возможностей приборов;
- разработка комплексов НК с применением робототехнических средств и систем дистанционного контроля;
- разработка приборов НК на основе новых физических принципов.

Наиболее перспективным является последнее направление. Создание приборов на основе новых физических принципов, использование последних достижений электронной техники, в первую очередь микропроцессоров и интегральных схем, позволит резко повысить технический уровень средств НК, степень достоверности контроля и выявляемость дефектов. Рассмотрим некоторые перспективные методы НК, которые уже находят применение в промышленности.

*Тепловой метод.* Основной принцип теплового метода состоит в том, что испытываемый образец нагревают и определенным способом оценивают распределение температур на его поверхности.

Развитие получил *активный* контроль, где изучается изменение излучательной способности поверхности изделий различных материалов. Поверхность нагревается источником тепла, обеспечивающим равномерное распределение температур на исследуемой площади. Обычно применяют излучатели с галогенными и импульсными ксеноновыми лампами. Используют лазерные и электромагнитные источники тепла. Экспериментально ус-

тановлено, что различные дефекты, размеры которых в 1,5–2 раза больше глубины залегания, выявляются при активном тепловом контроле.

Развиваются теоретические исследования. В настоящее время используются решения прямых задач, заключающиеся в исследовании процесса нагрева объекта контроля и искажений в распределении температур при наличии дефекта.

Практически не изучены вопросы тепловой толщинометрии и дефектометрии.

Одним из перспективных методов теплового контроля является *вибротепловизионный*.

Сущность метода заключается в изучении тепловых полей изделий и материалов, возникающих при воздействии на них вибраций. Данный метод эффективен при контроле композитов. Метод позволяет обнаружить трещины в металлических листах, их рост во времени при приложении периодических нагрузок.

Важнейшими направлениями развития тепловых методов следует считать [51]:

- создание различных математических моделей объектов контроля с различными типами дефектов, позволяющих более точно количественно оценивать ожидаемый температурный контраст;
- сравнительный анализ возможностей теплового контроля и других методов;
- разработку методов и средств анализа тепловых изображений;
- разработку методов и средств определения размеров и глубины залегания дефектов;
- теоретические и экспериментальные исследования вибротепловизионных методов контроля;
- развитие методов и средств тепловой дефектометрии.

Тепловизоры находят все большее применение в технике. Некоторые последние разработки позволяют фиксировать изменение температуры до 0,001 °С, что соответствует изменению напряжения 1,0 Н/мм<sup>2</sup>. Тепловизор серии 600 (США) обеспечивает обработку теплового изображения в реальном масштабе времени, позволяет получать количественные значения температур в любой точке изображения, оценивать средние температуры по

площади, осуществляет автоматическую коррекцию фона и излучательной способности поверхности объекта.

Тепловыми методами оценивают степень развития коррозионных повреждений в теплотрассах крупных промышленных городов, определяют утечки тепла в зданиях, осуществляют контроль расположения арматуры в железобетонных конструкциях. В электротехнике проверяют статоры турбогенераторов, линии электропередач, мощные трансформаторы, теплообменники и другое ответственное оборудование.

В последние годы в дефектоскопии все более широкое распространение получают *инфракрасные (термографические)* методы, обладающие определенными преимуществами:

- возможностью бесконтактной дефектоскопии и размещением источника возбуждения и детектора с одной стороны изучаемого объекта;

- возможностью контроля высокотемпературных и труднодоступных объектов, а также объектов нестандартной формы;

- отсутствием необходимости использования громоздкой аппаратуры и специальных защитных приспособлений для обеспечения безопасности персонала, что характерно для рентгеновского и радиографического контроля;

- возможностью контроля крупных объектов в малый временной промежуток.

Разработанная в последние годы методология позволяет проводить уникальные исследования, в частности определение расположения и ориентацию волокон в армированных материалах.

Существует два основных метода инфракрасной дефектоскопии: первый – детектирование инфракрасного излучения высокотемпературных объектов и на основе полученных термограмм выделение дефектных участков; второй – термическое возбуждение исследуемого объекта и выделение нарушений распространения в нем тепловой энергии, обусловленных наличием подповерхностных дефектов. Второй метод в определенном смысле подобен ультразвуковому эхо-импульсному методу, причем искажение распространения сигнала с задержкой, обусловленной наличием дефекта, может рассматриваться как отражение дефектом термической волны. Наиболее важное отличие термо-

графического метода от ультразвукового заключается в том, что распространение термической волны описывается не волновым уравнением, а уравнением диффузии, и, как следствие этого, термографическая аппаратура оказывается сравнительно нечувствительной к подповерхностным дефектам, диаметр которых значительно меньше глубины их залегания.

Номенклатура развиваемых средств инфракрасной дефектоскопии очень широка и варьируется от довольно простых переносных камер до сложных промышленных и лабораторных установок [52].

Большая работа ведется по созданию приборов перспективного направления *рентгеновской дефектоскопии* импульсно-рентгеновской аппаратуры. Такие аппараты отличает высокая просвечивающая способность, возможность как направленного, так и панорамного просвечивания, простота эксплуатации, небольшие габаритные размеры и масса. Не требуется принудительного охлаждения рентгеновской трубки. Аппараты могут использоваться для контроля изделий из металлов и пластмасс, магистральных нефтегазопроводов, теплотрасс, а также качества сварки в полевых условиях и на монтажных площадках.

Наиболее экономичной является дефектоскопия без применения рентгеновской пленки. К этой группе приборов можно отнести электрорадиографические комплексы и рентгенотелевизионную аппаратуру. Существует довольно много различных моделей рентгено-телевизионных интроскопов. Наиболее широко интроскопы могут применяться как на отдельных участках, так и в составе комплексных автоматизированных линий на предприятиях различных отраслей промышленности.

Новым направлением рентгеновской дефектоскопии является *рентгеновская томография*. Информационные возможности этого метода чрезвычайно велики [53, 54]. Рентгеновская томография – единственный метод детального исследования структуры сложных многослойных конструкций и композиционных материалов с обнаружением и оценкой локальных дефектов и малых отклонений геометрии внутренней структуры. Современные томографы обладают рядом особенностей: обратным проецированием с фильтрацией двойным дифференцированием; возможностью сканирования и реконструкции детальной структуры ло-

кальных зон контролируемого изделия, высокой чувствительностью к локальным дефектам; высоким пространственным разрешением и геометрической чувствительностью контроля; высокой энергией рентгеновского излучения и др.

Интерес представляют разработки в области *магнитных методов* контроля. Наряду с совершенствованием магнитных дефектоскопов, позволяющих осуществлять контроль сплошности, толщиномеров, с помощью которых определяются геометрические размеры, развивается направление по оценке микроструктуры и физико-механических свойств различных материалов.

В России разработан новый метод, названный *методом магнитной памяти металла* (ММП). Основные преимущества ММП по сравнению с известными методами следующие:

- не требуется применение специальных намагничивающих устройств, так как используется явление намагничивания узлов оборудования в процессе их эксплуатации;

- места концентрации напряжений заранее не известны и определяются в процессе контроля;

- не требуется зачистка металла и другая какая-либо подготовка контролируемой поверхности;

- для выполнения контроля используются приборы, имеющие малые габариты, автономное питание и регистрирующие устройства.

Метод основан на измерении поля остаточной намагниченности на поверхности контролируемого оборудования и позволяет проводить оценку его напряженно-деформированного состояния с учетом микроструктурных изменений. При контроле используется эффект магнитной памяти металла к зонам действия максимальных рабочих нагрузок. ММП не дает количественной оценки уровня действующих напряжений, однако он позволяет отличать области упругой деформации от пластической и выявлять зоны зарождения усталостных трещин [55].

Одним из наиболее распространенных методов неразрушающего контроля является метод *вихревых токов*. Основные его преимущества – высокая скорость измерения, позволяющая получать результат практически в доли секунды, высокая чувствительность, хорошая повторяемость, низкая стоимость анализа.

Одна из особенностей этого метода состоит в том, что на сигналы преобразователя не влияют влажность, давление и загрязненность газовой среды, радиоактивные излучения, загрязнения поверхности объекта контроля непроводящими веществами. Дефекты, выявляемые с помощью данного метода, представляют собой несплошности, выходящие на поверхность или залегающие на небольшой глубине, разнообразные трещины, расслоения, закаты, плены, раковины, неметаллические включения и т. д.

Вихретоковая дефектоскопия является уникальным методом проверки качества металлов, предназначенных для использования в тяжелых условиях работы: в высокотемпературных средах и средах высокого давления, в судостроении, аэрокосмической технике, в ядерной энергетике и т. д.

Большие перспективы открывает применение в вихретоковых системах компьютерной техники, обеспечивающей как автоматическое управление всем циклом измерения, так и интерпретацию полученных результатов. В системе, разработанной фирмой Oak Ridge (США), в значительной мере реализованы эти возможности. Система контроля сварных швов металлических кожухов сверхпроводящих магнитов, предназначенная для цеховых условий, проводит анализ одновременно на трех частотах, что позволяет сразу определять положение и размеры дефектов и производить отстройку от «зазоров» [56].

Одной из наиболее трудноразрешимых проблем является первоначальная обработка сигналов, полученных при вихретоковом контроле, в целях выделения из общей массы годографов информационно наполненных, т. е. таких, которые содержат информацию о каких-либо дефектах в отличие от сигналов от нормальных неповрежденных частей контролируемого объекта. Например, при контроле парогенераторов атомных электростанций необходимо, как правило, просмотреть 142 тыс. годографов, чтобы выделить из них 3 тыс., требующих анализа. Сортировка данных вручную очень трудоемкая операция, порождающая большое количество ошибок.

В центре по исследованию проблем НК фирмы Westinghouse Elektrik (США) была разработана методика автоматической сортировки сигналов [57]. Все сигналы делили на три класса: ожидаемые нормальные сигналы, которые имели идентичную

форму и одинаковую частоту появления, источник – стенки труб или опорная плита; искаженные ожидаемые сигналы, т. е. нормальные сигналы, форма которых искажена наложением сигналов от дефектов или деформированных стенок; неожиданные сигналы, источниками которых являются дефекты в стенках труб и других конструктивных элементах.

Разбиение сигналов на классы осуществляется автоматически на основе шаблонов. Анализ сигналов проводят по специальным компьютерным программам.

В настоящее время намечаются следующие пути совершенствования вихретоковых методов контроля [58]:

1. Модернизация формы катушки индуктивности. Конечной целью является создание эластичных, легко изменяющих свою форму обмоток индуктивности, представляющих собой многожильные проводники, установленные в листы или трубчатые конструкции из резинообразных материалов.

2. Модернизация детектора. В идеальном случае серия датчиков будет полностью покрывать исследуемый объект внутри катушки или даже площадь, значительно превышающую ее размеры, что позволит получать информацию со всей зоны, подвергнутой электромагнитному воздействию. Последовательный опрос датчиков создаст возможность многоканального анализа данных и их индикацию в любой форме, включая двух- и трехмерное изображение на экране.

3. Увеличение проникающей способности. Большинство вихретоковых систем может использоваться лишь для контроля поверхностных и подповерхностных дефектов. Толщина анализируемого слоя – величина обратно пропорциональная корню квадратному из рабочей частоты, удельной проводимости и магнитной проницаемости материала, поэтому основными способами ее увеличения являются снижение рабочей частоты и специальная обработка материалов для уменьшения ее магнитной проницаемости. Применение специальных детекторов позволяет довести рабочую частоту до 1 Гц и тем самым повысить проникающую способность в 100 раз.

4. Создание микроволновых электромагнитных систем контроля. Высокочастотные электромагнитные колебания распространяются в пространстве подобно световому лучу и при попа-

дании на металл отражаются от него, возвращаясь в виде эхосигнала. Отражение микроволнового луча обусловлено возникновением вихревых токов в поверхностных слоях. Теория распространения микроволн в металлических структурах, их отражение и преломление на границах дефектов и слоев диэлектрика открывает большие перспективы их использования для НК. Эти системы во многом похожи на ультразвуковые эхо-импульсные приборы.

Перспективными являются электромагнитные приборы контроля физико-механических свойств материалов (структуроскопы), которые позволяют оценивать степень химической чистоты электропроводящих материалов, сортировать полуфабрикаты и изделия по маркам материала, твердости, прочности и т. д. Структуроскопами можно выявлять неоднородные зоны по структуре, оценивать глубину и качество механической, термической и химико-термической обработки, выявлять усталостные зоны, контролировать качество поверхностных слоев и решать многие другие задачи НК.

Определенный интерес представляет новый *резисторный метод* дефектоскопии. Здесь при контроле используют четыре электрических контакта, расположенных в один ряд [59]. Постоянный ток подается от двух внешних электродов. Вывод результатов на дисплей осуществляется в мкОм·см. Этот метод существует давно, но из-за отсутствия высокоточной аппаратуры не получил широкого распространения. Фирма АТ&Т (Великобритания) разработала необходимую аппаратуру для контроля резисторным методом. При испытании резисторным методом возможности контроля и рабочие характеристики определяются конфигурацией датчика. Оператор может установить наиболее эффективную глубину проникновения тока и, таким образом, осуществлять исследование либо поверхностного, либо внутренних слоев проверяемых материалов. Полученные результаты являются абсолютными и поэтому передаются на дальнейшую обработку в вычислительные системы, что позволяет автоматизировать регистрацию данных и управление процессом.

Метод можно использовать для определения толщины науглероженного слоя, усиления сварного шва, наличия трещин. Ме-

тод удобен для контроля однородных, выпускаемых большими сериями изделий и применим для контроля изделий сложной геометрической формы, где невозможно использовать другие средства.

С помощью резисторного метода можно оценивать качество сварного шва и осуществлять управление сварочными работами. При сплавлении стыкуемых элементов в месте сварки индуцируется электрический ток. По мере наращивания сварного шва в месте сварки проводят измерения. По измерениям величины напряжения можно судить о площади сварного шва, которая является косвенным показателем меры его прочности, что позволяет с достаточной точностью определить размеры наплавленного металла, так как существует зависимость между соотношением напряжений, измеряемых на сварном шве и в зоне вне сварного шва. Разработанные устройства преобразуют измеряемые напряжения в удельное электросопротивление. Установив определенные зависимости между прочностью сварного шва, его размерами и удельным электросопротивлением, можно разработать определенные показатели, позволяющие использовать резисторный дефектоскоп непосредственно в технологической сварочной линии. В настоящее время накапливается библиотека калибровочных кривых для отдельных областей применения, в результате чего резисторный метод может найти широкое распространение [60].

Россия является ведущей страной в области создания *акустических средств НК*, которые по сравнению с другими имеют ряд преимуществ: универсальность, технологичность, низкую стоимость и безопасность эксплуатации. Кроме того, они обеспечивают контроль изделий широкой номенклатуры, большой диапазон проверяемых параметров и высокую точность. Все это способствовало тому, что в настоящее время акустическая аппаратура составляет более 50 % всех выпускаемых средств НК.

Кроме разработки и совершенствования *УЗ-дефектоскопов, твердомеров, толщиномеров* в России и за рубежом, развивается направление по *лазерному генерированию ультразвуковых волн*, которое имеет следующие преимущества: не требуется контакта датчика с исследуемой поверхностью, нет необходимости погружения изделия в контактную среду [61].

Новый способ генерирования поверхностных акустических волн больших амплитуд при ограниченном нагревании облучаемого лазером участка поверхности был разработан Институтом исследований промышленных материалов (США).

Облучение поверхности через систему конических и сферических линз создает на исследуемой поверхности узор, обеспечивающий тепловую рециркуляцию. Генерируемые конвергирующие поверхностные акустические волны детектируются интерферометрическим датчиком в центре узора, где сошедшиеся поверхностные акустические волны дают импульс с большой амплитудой. Данный метод с лазерным возбуждением, благодаря обеспечиваемой им хорошей фокусировке, низкой поверхностной температуре освещенного лазером участка и отсутствию контактной жидкости, оказался очень удобным для обнаружения небольших поверхностных и подповерхностных дефектов. Возможно также определение характера расслоений в металлоэпоксидных слоистых материалах и т. д.

Перспективным направлением является разработка бесконтактных акустических средств контроля ферромагнитных материалов, основанных на электромагнитно-акустическом методе. Такие средства предназначены в основном для обнаружения дефектов типа расслоений, пузырей, трещин, неметаллических включений и др. в металлических листах, полосах, во внутренних нахлесточных швах многослойных обечаек.

Дальнейшее развитие этих средств – создание высокоскоростных установок для контроля металлопроката. В области технической диагностики такие приборы необходимы для контроля подземных магистральных трубопроводов, теплотрасс и других объектов; запуская самодвижущиеся приборы вовнутрь объектов, можно проводить бесконтактный контроль состояния основного металла и сварных соединений.

Широким фронтом развиваются средства *акустической структурометрии и структуроскопии* (Система «Астрон»).

Большой интерес представляют *акустико-эмиссионные* приборы нового поколения. Общий анализ имеющихся в настоящее время разработок в области АЭ показал [62], что в Англии, Японии, США, Германии имеются системы, работающие в реальном масштабе времени и определяющие координаты дефек-

тов. Такие системы также выявляют скрытые дефекты типа раковин, непроваров и оценивают остаточный ресурс конструкций. Отечественные разработки таких фирм, как «Глобалтест», «Алькор» и др. по ряду характеристик не уступают современным зарубежным разработкам. Следует подчеркнуть, что зарубежные системы являются сложными в эксплуатации, дорогими, а главное – избыточными, т. е. выполняют много функций, которые при практической диагностике выполнять нет необходимости.

### **6.3. Контрольные вопросы**

1. Назовите важнейшие направления развития нанонауки.
2. Какие материалы называют фуллеренами?
3. Назовите основные преимущества новых суперлинз для световых микроскопов.
4. Назовите основные направления развития средств НК.
5. Назовите основные направления развития теплового контроля.
6. Что такое инфракрасные методы контроля?
7. Назовите преимущества рентгеновской томографии.
8. Опишите преимущества метода магнитной памяти металла.
9. Назовите основные проблемы, возникающие при сварке наноматериалов.

## **ПРИЛОЖЕНИЕ**

### **Выписка из «Инструкции по визуальному и измерительному контролю»**

Визуальный и измерительный контроль (ВИК) сварных соединений (наплавки) выполняют до проведения неразрушающего контроля (НК) другими методами. С 2003 года для технических устройств опасных производственных объектов в России действует Инструкция по визуальному и измерительному контролю (РД 03-606-03). Визуальный и измерительный контроль материала (полуфабрикатов, заготовок, деталей) и сварных соединений проводят на следующих стадиях:

- входного контроля;
- изготовления деталей, сборочных единиц и изделий;
- подготовки деталей и сборочных единиц к сборке;
- подготовки деталей и сборочных единиц к сварке;
- сборки деталей и сборочных единиц под сварку;
- процесса сварки;
- контроля готовых сварных соединений и наплавки;
- исправления дефектных участков в материале и сварных соединениях (наплавках);
- оценки состояния материала и сварных соединений в процессе эксплуатации технических устройств и сооружений, в том числе по истечении установленного срока их эксплуатации.

#### **П.1. Общие требования к проведению ВИК**

Визуальный и измерительный контроль качества сварных соединений (наплавки) в процессе сварки (наплавки) и готового сварного соединения (наплавки) выполняют с целью подтверждения их соответствия требованиям конструкторской документации, НТД, а также для выявления деформаций, поверхностных трещин, подрезов, прожогов, наплывов, кратеров, свищей, пор, раковин и других несплошностей и дефектов формы швов; проверки геометрических размеров сварных швов и допустимости деформаций, поверхностных несплошностей и дефектов формы сварных швов.

Визуальный и измерительный контроль проводят невооруженным глазом и (или) с применением визуально-оптических приборов до 20-кратного увеличения (луп, микроскопов, эндоскопов, зеркал и др.). При контроле материала и сварных соединений (наплавки) при изготовлении (строительстве, монтаже, ремонте и реконструкции) технических устройств и сооружений используют лупы с 2–7-кратным увеличением, а при оценке состояния технических устройств и сооружений в процессе их эксплуатации – лупы до 20-кратного увеличения.

Измерения проводят после визуального контроля или одновременно с ним. Измерения деталей, подготовленных под сварку, проводятся до их сборки.

Визуальный и измерительный контроль материалов и сварных соединений, подлежащих механической обработке, в том числе с удалением валика усиления шва, или деформированию, проводят до и после указанных операций.

При визуальном и измерительном контроле сварных соединений контролируемая зона должна включать в себя поверхность металла шва, а также примыкающие к нему участки материала в обе стороны от шва шириной:

не менее 5 мм – для стыковых соединений, выполненных дуговой и электронно-лучевой сваркой, электроконтактной сваркой оплавлением, сваркой встык нагретым элементом при номинальной толщине сваренных деталей до 5 мм включительно;

не менее номинальной толщины стенки детали – для стыковых соединений, выполненных дуговой и электронно-лучевой сваркой, электроконтактной сваркой оплавлением, сваркой встык нагретым элементом при номинальной толщине сваренных деталей свыше 5 до 20 мм;

не менее 20 мм – для стыковых соединений, выполненных дуговой и электронно-лучевой сваркой, электроконтактной сваркой оплавлением, сваркой встык нагретым элементом при номинальной толщине сваренных деталей свыше 20 мм, а также для стыковых и угловых соединений, выполненных газовой сваркой, независимо от номинальной толщины стенки сваренных деталей и при ремонте дефектных участков в сварных соединениях;

не менее 5 мм (независимо от номинальной толщины сваренных деталей) – для угловых, тавровых, торцовых и нахле-

сточных сварных соединений и соединений вварки труб в трубные доски, выполненных дуговой и электронно-лучевой сваркой; не менее 50 мм (независимо от номинальной толщины сваренных деталей) – для сварных соединений, выполненных электрошлаковой сваркой.

Дефекты, выявленные при визуальном и измерительном контроле, должны быть устранены до выполнения последующей технологической операции или до приемки объекта контроля. Устранение выявленных дефектов должно выполняться в соответствии с требованиями НТД. Если дефекты, выявленные при визуальном и измерительном контроле, не препятствуют дальнейшему применению других видов (методов) неразрушающего контроля, эти дефекты могут быть устранены после завершения контроля другими видами (методами) контроля.

## **П.2. Квалификация персонала**

Специалисты, осуществляющие визуальный и измерительный контроль, должны быть аттестованы в соответствии с Правилами аттестации персонала в области неразрушающего контроля (ПБ 03-440-02), утвержденными постановлением Госгортехнадзора России от 23.01.2002 № 3, зарегистрированным Минюстом России 17.04.2002, регистрационный № 3378.

## **П.3. Требования к средствам визуального и измерительного контроля**

При визуальном и измерительном контроле применяют: лупы, в том числе измерительные; линейки измерительные металлические; угольники поверочные 90° лекальные; штангенциркули, штангенрейсмасы и штангенглубиномеры; щупы; различные угломеры с нониусом; стенкомеры и толщиномеры индикаторные; микрометры; нутромеры микрометрические и индикаторные; калибры; эндоскопы; шаблоны, в том числе специальные, универсальные (например, типа УШС), радиусные, резьбовые; поверочные плиты; плоскопараллельные концевые меры длины с набором специальных принадлежностей; штриховые меры длины (стальные измерительные линейки, рулетки).

Допускается применение других средств визуального и измерительного контроля при условии наличия соответствующих инструкций, методик их применения.

Погрешность измерений при измерительном контроле не должна превышать величин, указанных в табл. П.1, если в рабочих чертежах не предусмотрены другие требования.

Таблица П.1

Допустимая погрешность измерения при измерительном контроле

Диапазон измеряемой величины, мм	Погрешность измерений, мм
До 0,5 вкл.	0,1
Свыше 0,5 до 1,0 вкл.	0,2
» 1,0 » 1,5 »	0,3
» 1,5 » 2,5 »	0,4
» 2,5 » 4,0 »	0,5
» 4,0 » 6,0 »	0,6
» 6,0 » 10,0 »	0,8
» 10,0	1,0

Для определения шероховатости и волнистости поверхности следует применять профилографы-профилометры, аттестованные образцы шероховатости (сравнения), а также другие средства измерения.

#### П.4. Подготовка мест производства работ

Участки контроля, особенно стационарные, рекомендуется располагать в наиболее освещенных местах цеха, имеющих естественное освещение. Для создания оптимального контраста дефекта с фоном в зоне контроля необходимо применять дополнительный переносной источник света, то есть использовать комбинированное освещение. Освещенность контролируемых поверхностей должна быть достаточной для надежного выявления дефектов, но не менее 500 лк.

Для выполнения контроля должен быть обеспечен достаточный обзор для глаз специалиста. Подлежащая контролю по-

верхность должна рассматриваться под углом более  $30^\circ$  к плоскости объекта контроля и с расстояния до 600 мм (рис. П.1).

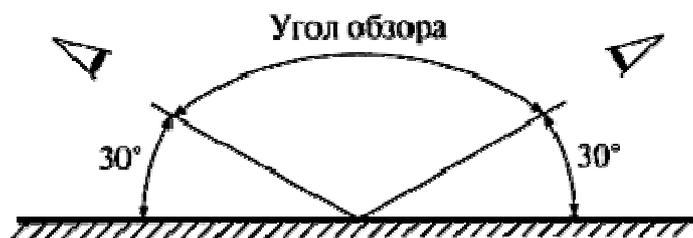


Рис. П.1. Условия визуального контроля

## П.5. Подготовка к контролю

Подготовка контролируемых поверхностей проводится подразделениями организации, выполняющей работы по визуальному и измерительному контролю, а в процессе эксплуатации технических устройств и сооружений службами организации, которой принадлежит контролируемый объект.

Подготовка контролируемых поверхностей в обязанности специалиста по контролю не входит.

Перед проведением визуального и измерительного контроля поверхность объекта в зоне контроля подлежит зачистке до чистого металла от ржавчины, окалины, грязи, краски, масла, влаги, шлака, брызг расплавленного металла, продуктов коррозии и других загрязнений, препятствующих проведению контроля (на контролируемых поверхностях допускается наличие цветов побежалости, в случаях, когда это оговорено в производственно-технической документации (ПТД)). Зона зачистки должна определяться НД на вид работ или на изготовление изделия. Шероховатость зачищенных под контроль поверхностей деталей, сварных соединений, а также поверхность разделки кромок деталей (сборочных единиц, изделий), подготовленных под сварку, должна быть не более  $Ra\ 12,5$  ( $Rz\ 80$ ).

Шероховатость поверхностей изделий и сварных соединений для проведения последующих методов неразрушающего контроля зависит от метода контроля и должна быть не более:

$Ra\ 3,2$  ( $Rz\ 20$ ) – при капиллярном контроле;

$Ra\ 10$  ( $Rz\ 63$ ) – при магнитопорошковом контроле;

$Ra\ 6,3$  ( $Rz\ 40$ ) – при ультразвуковом контроле.

## II.6. Порядок ВИК на стадии входного контроля

При входном визуальном контроле сварных труб с прямолинейным или спиральным швом контролю подлежит не менее 10 % длины каждого шва. Контроль рекомендуется выполнять на участках, равномерно распределенных по длине шва трубы. Задачей контроля является выявление поверхностных трещин, пор, шлаковых и металлических включений, прожогов, свищей, наплывов металла, усадочных раковин, подрезов, грубой чешуйчатости шва, брызг расплавленного металла, непроваров, оплавление металла в результате зажигания сварочной дуги и прочих дефектов.

Измерительный контроль сварных швов выполняется на участках, проконтролированных визуально. Измерение размеров сварного шва выполняется на каждом участке, проконтролированном визуально, но не менее чем в трех сечениях по длине шва. Измерение размеров поверхностных дефектов выполняется в местах, отмеченных при визуальном контроле.

При входном контроле изделий, в том числе сварных и литых, визуально необходимо контролировать: поверхности изделий снаружи и изнутри (при наличии доступа); кромки элементов, подлежащие сварке; сварные соединения.

Кромки литых деталей, поковок и штамповок, подлежащие сварке, визуально следует контролировать на участке шириной не менее 100 мм по всей длине.

Кромки элементов изделий (деталей), имеющих наплавку, должны подвергаться визуальному контролю по всему периметру. Ширина контролируемой зоны должна составлять  $L + 20$  мм, где  $L$  – ширина зоны наплавки. Контролю подлежит каждая кромка с наплавкой.

Визуальному контролю подлежит не менее 10 % длины сварных соединений, если другие требования не указаны в НД, ПТД или ПКД. Визуальный контроль материала, кромок свариваемых элементов и сварных швов проводится с целью выявления коррозии на поверхности и поверхностных дефектов (трещин, расслоений, забоин, вмятин, раковин, пор, подрезов, грубой чешуйчатости, западаний между валиками шва, раковин, свищей, шлаковых включений и других несплошностей), вызванных тех-

нологией изготовления (условиями хранения) или транспортировкой. Измерительный контроль проводится с целью измерения размеров сварных швов и поверхностных дефектов, выявленных при визуальном контроле, а также подтверждения соответствия основных размеров изделий (деталей, сборочных единиц) требованиям стандартов, ТУ и паспортов изделий. Измерительный контроль сварных швов выполняют через один метр по длине каждого контролируемого шва, но не менее чем в трех сечениях сварного шва.

## **П.7. Порядок выполнения ВИК, подготовки и сборки деталей под сварку**

При подготовке деталей под сварку необходимо контролировать: наличие маркировки и (или) документации, подтверждающей приемку полуфабрикатов, деталей, сборочных единиц и изделий при входном контроле; наличие маркировки изготовителя материала на деталях, подготовленных под сварку; наличие удаления механическим путем зоны термического влияния в месте термической (огневой) резки заготовок (необходимость должна быть указана в конструкторской или технологической документации); геометрическую форму обработанных кромок, в том числе при подготовке деталей с различной номинальной толщиной стенки; геометрическую форму обработанных внутренних поверхностей кольцевых деталей; форму подкладных пластин (колец) и расплавляемых вставок; наличие заварки разъема подкладной пластины (кольца), качество шва заварки подкладной пластины (кольца), а также наличие зачистки шва заварки разъема подкладной пластины (кольца); чистоту (отсутствие визуально наблюдаемых загрязнений, пыли, продуктов коррозии, влаги, масла и т. п.) подлежащих сварке (наплавке) кромок и прилегающих к ним поверхностей, а также подлежащих неразрушающему контролю участков материала.

При сборке деталей под сварку визуально необходимо контролировать: правильность установки подкладных пластин (колец); правильность установки временных технологических креплений; правильность сборки и крепления деталей в сборочных приспособлениях; правильность расположения и количество

прихваток и их качество; правильность установки приспособлений для поддува защитного газа; правильность нанесения активирующего флюса и защитной флюс-пасты; наличие защитного покрытия от брызг расплавленного металла на поверхности деталей из аустенитных сталей, свариваемых ручной дуговой и полуавтоматической (автоматической) сваркой плавящимся электродом в среде защитного газа; чистоту кромок и прилегающих к ним поверхностей деталей.

Измерительный контроль соединений, собранных под сварку, включает проверку: размеров швов приварки временных технологических креплений; расстояния технологического крепления от кромки разделки и расположения креплений по длине (периметру) соединения (при необходимости, в случае если в технической документации оговорено расстояние между соседними креплениями); величины зазора в соединении, в том числе между деталью и подкладной пластиной (кольцом); размера смещения кромок (внутренних и наружных) собранных деталей; размера перекрытия деталей в нахлесточном соединении; расстояния между соседними прихватками; размера зазора в замке расплавляемой проволочной вставки; размера перелома осей цилиндрических деталей трубы и плоскостей плоских деталей (листов); размера несоосности осей штуцера и отверстия в корпусе (трубе); размера несовпадения (отклонения) осей в угловых соединениях труб; размеров ширины зоны нанесения защитного покрытия на поверхностях деталей; геометрических (линейных) размеров узла, собранного под сварку (рис. П.2).

Визуальному и измерительному контролю подготовки и сборки деталей под сварку подлежат не менее 20 % деталей и соединений из числа представленных к приемке. При выявлении отклонений от требований рабочих чертежей и (или) ПТД, которые могут привести к ухудшению качества сварных соединений, объем выборочного контроля должен быть увеличен вдвое для группы однотипных деталей (соединений). Если при дополнительном контроле вторично будут выявлены отклонения от требований конструкторской документации и (или) ПТД, то объем контроля для группы деталей, подготовленных к приемке, должен быть увеличен до 100 %.

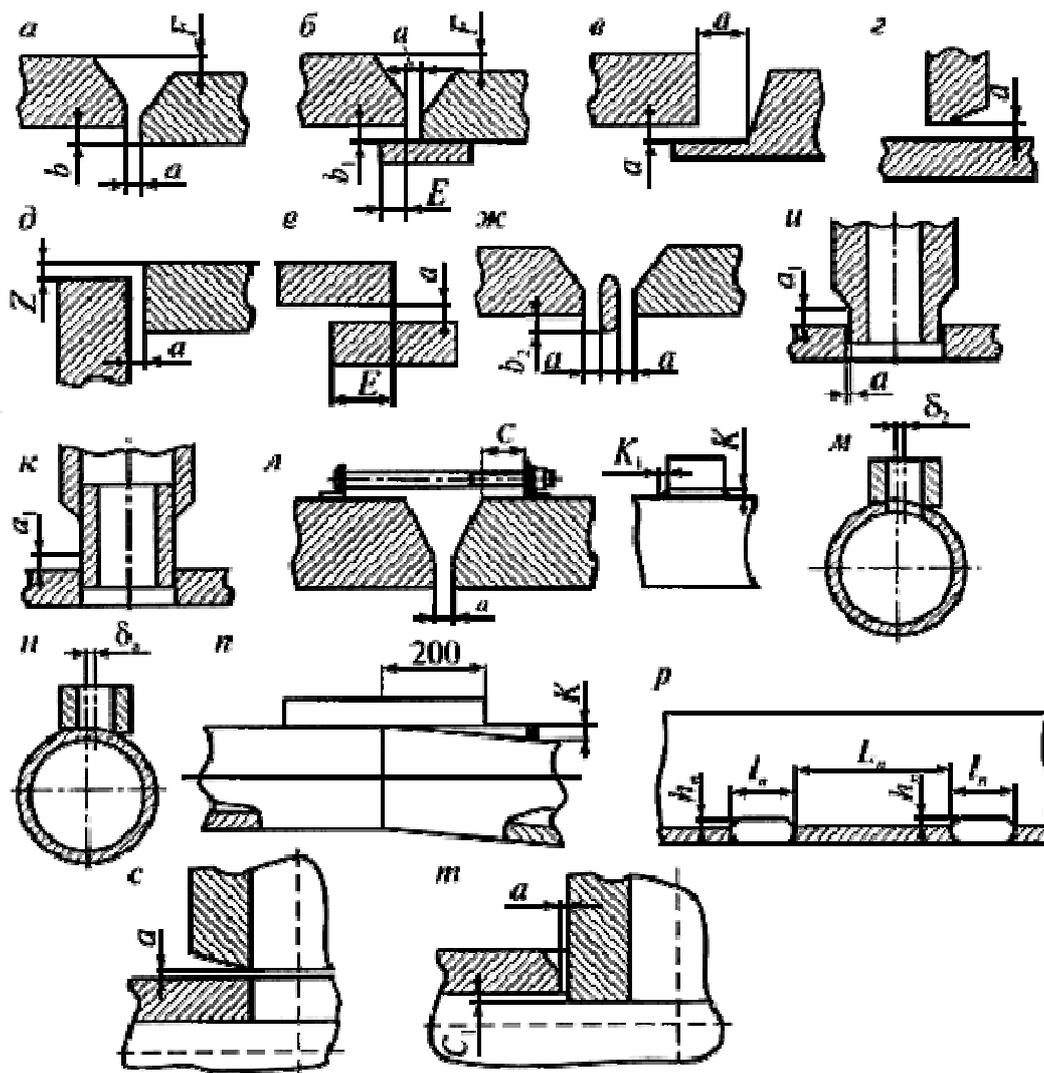


Рис. П.2. Размеры, контролируемые при сборке соединения под сварку:  
 а – стыковое соединение; б – стыковое соединение с остающейся подкладной пластиной (кольцом); в – стыковое замковое соединение; г – тавровое соединение; д – угловое соединение; е – нахлесточное соединение; ж – стыковое соединение с расплавляемой вставкой; и, к – угловые соединения штуцеров; л – соединение с приварными элементами временных креплений; м – соединение с несоосностью осей штуцера и корпуса; н – соединение с несоосностью осей в угловых соединениях труб; п – соединение с переломом осей цилиндрических деталей; р – прихватки соединения; с, т – тройниковое (угловое) соединение

Измерения швов приварки временных технологических креплений и расстояния от приварного элемента крепления до кромки разделки выполняют в одном месте. Контролю подлежит каждое крепление.

Перелом осей, собранных под сварку кольцевых соединений цилиндрических элементов, измеряется в 2-3 сечениях (в зоне максимального излома, выявленного при визуальном контроле) на расстоянии 200 мм от центра соединения (рис. П.3).

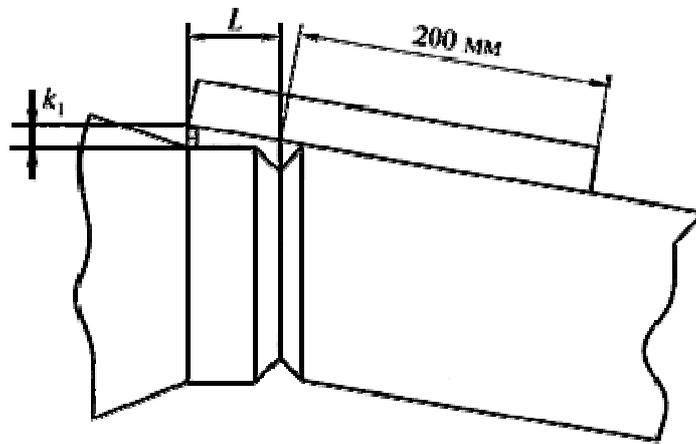


Рис. П.3. Измерение перелома осей цилиндрических элементов

При отсутствии прямолинейного участка детали длиной 200 мм разрешается измерение размера проводить на участке меньшей длины с последующим пересчетом к длине 200 мм по формуле

$$k = \frac{200k_1}{L},$$

где  $k_1$  и  $L$  – размер перелома осей и расстояние от соединения, на котором выполнено измерение. В случае, когда измерения по данной методике не обеспечивают требуемой точности, измерения следует проводить по специальной методике.

Схемы измерения отдельных размеров подготовки деталей под сборку и сборки соединений под сварку с помощью шаблона универсального типа УШС приведены на рис. П.4.

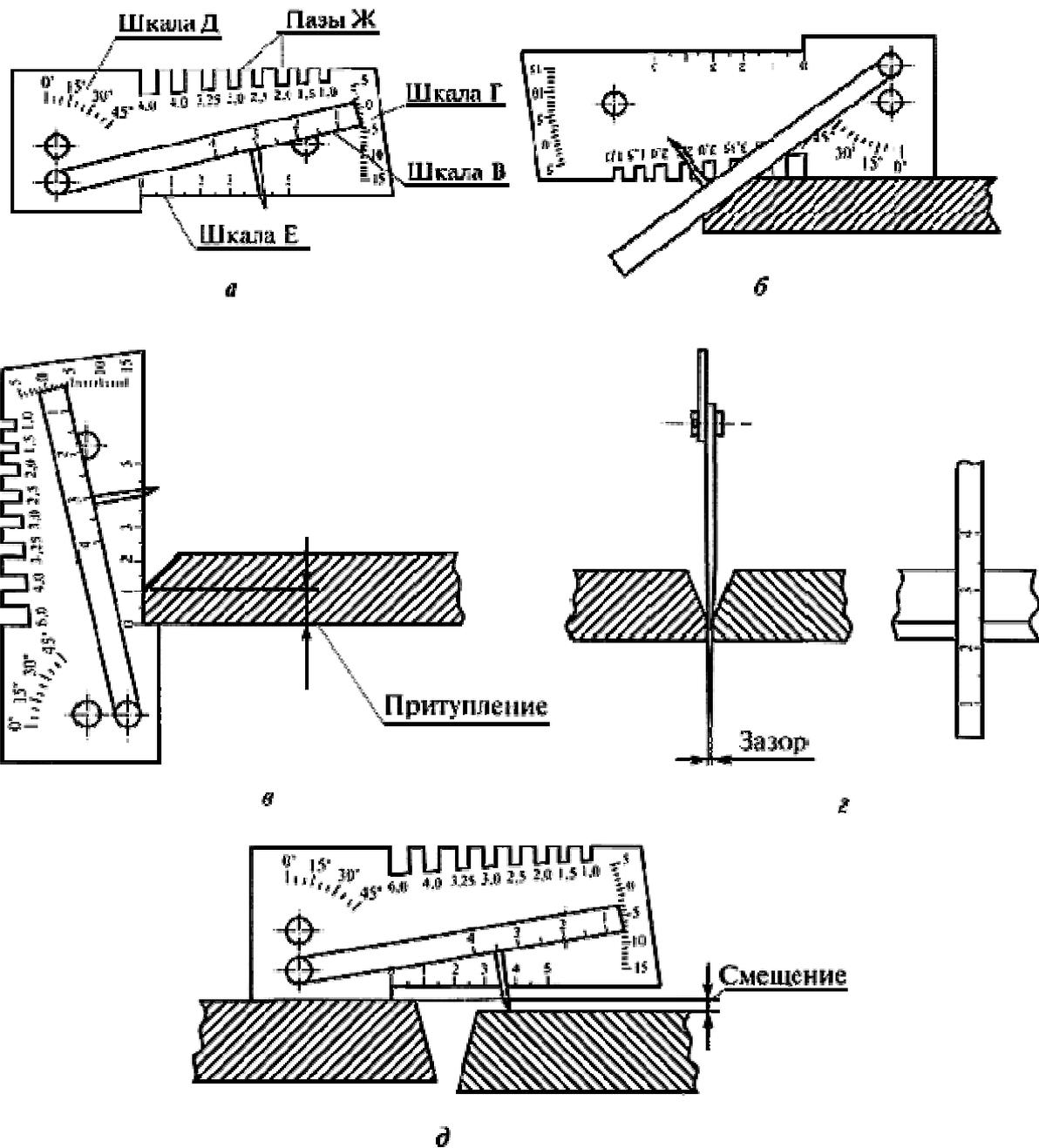


Рис. П.4. Контроль универсальным шаблоном сварщика УШС (начало):  
*а* – общий вид шаблона УШС; *б* – измерение угла скоса разделки  $\alpha$  ;  
*в* – измерение размера притупления кромки  $p$  ; *г* – измерение зазора  
в соединении  $z$  ; *д* – измерение смещения наружных кромок деталей  $F$

Допускается применение шаблонов конструкций В. Э. Ушера-Маршака (рис. П.5).

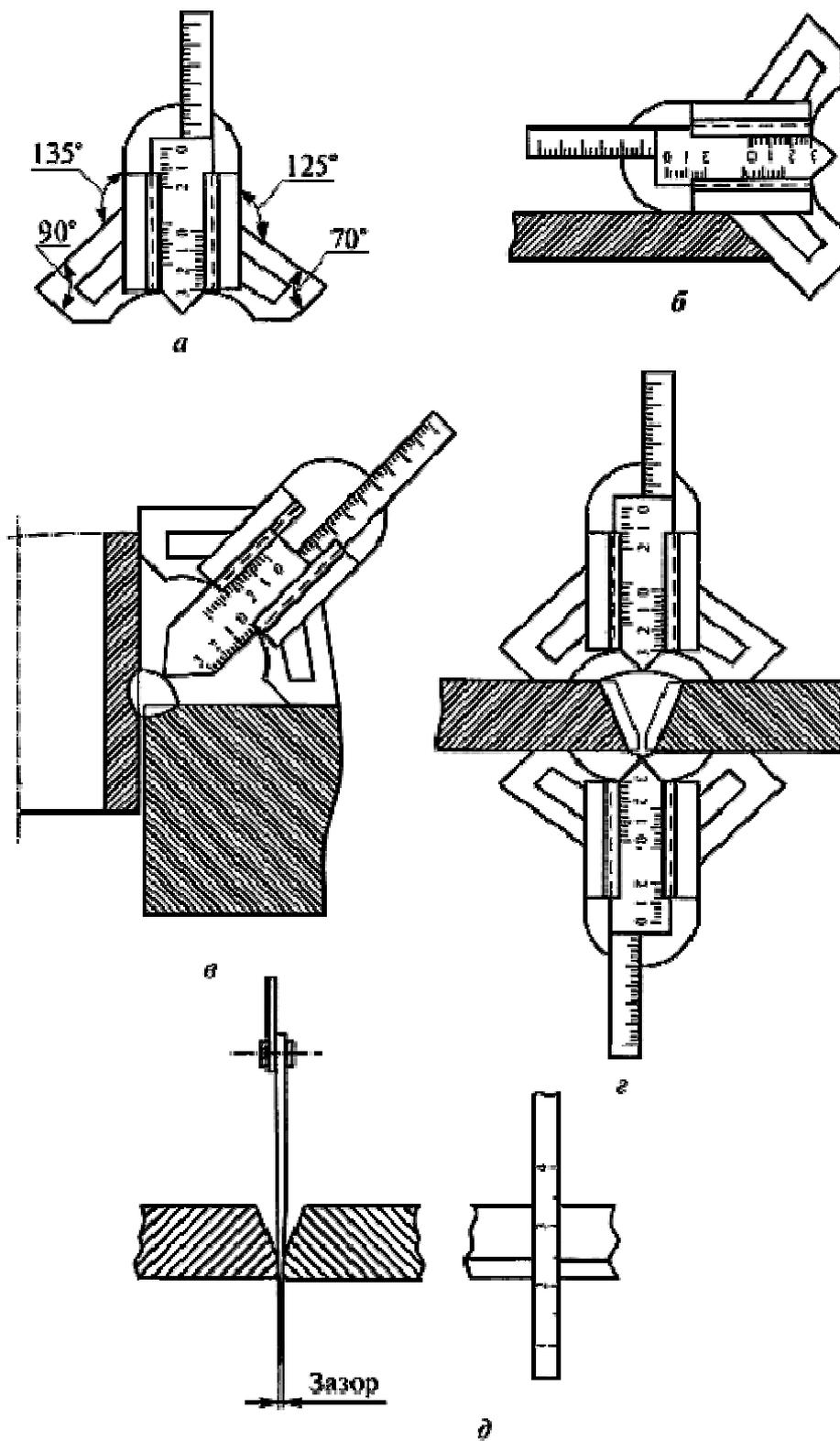


Рис. П.5. Контроль шаблоном конструкции В. Э. Ушерова-Маршака:  
*a* – общий вид шаблона; *б* – измерение угла скоса разделки  $\alpha$  ;  
*в* – измерение высоты катета углового шва; *г* – измерение высоты валика  
усиления  $g$  и выпуклости корня шва  $g_1$  стыкового сварного соединения;  
*д* – измерение зазора  $a$  в соединении при подготовке деталей к сварке

## **П.8. Порядок выполнения ВИК сварных соединений (наплавов)**

Визуальный и измерительный контроль сварных соединений (наплавов) выполняется при производстве сварочных (наплавочных) работ и на стадии приемосдаточного контроля готовых сварных соединений. В случае если контролируется многослойное сварное соединение, визуальный контроль и регистрация его результатов могут проводиться после выполнения каждого слоя (послойный визуальный контроль в процессе сварки).

Послойный визуальный контроль в процессе сварки выполняется с целью выявления недопустимых поверхностных дефектов (трещин, пор, включений, прожогов, свищей, усадочных раковин, несплавлений, грубой чешуйчатости, западаний между валиками, наплывов) в каждом слое (валике) шва. Выявленные при контроле дефекты подлежат исправлению перед началом сварки последующего слоя (валика) шва. По требованию заказчика или в соответствии с ПТД сварные соединения, выполненные с послойным визуальным контролем, подлежат дополнительно контролю капиллярной или магнитопорошковой дефектоскопией на доступных участках.

В выполненном сварном соединении визуально следует контролировать:

- отсутствие (наличие) поверхностных трещин всех видов и направлений;

- отсутствие (наличие) на поверхности сварных соединений дефектов (пор, включений, скоплений пор и включений, отслоений, прожогов, свищей, наплывов, усадочных раковин, подрезов, непроваров, брызг расплавленного металла, западаний между валиками, грубой чешуйчатости, а также мест касания сварочной дугой поверхности основного материала);

- качество зачистки металла в местах приварки временных технологических креплений, гребенок индуктора и бобышек крепления термоэлектрических преобразователей (термопар), а также отсутствие поверхностных дефектов в местах зачистки;

- качество зачистки поверхности сварного соединения изделия (сварного шва и прилегающих участков основного металла)

под последующий контроль неразрушающими методами (в случае, если такой контроль предусмотрен ПТД);

наличие маркировки (клеймения) шва и правильность ее выполнения.

В выполненном сварном соединении измерениями необходимо контролировать: размеры поверхностных дефектов (поры, включения и др.), выявленных при визуальном контроле; высоту и ширину шва, а также вогнутость и выпуклость обратной стороны шва в случае доступности обратной стороны шва для контроля; высоту (глубину) углублений между валиками (западания межваликовые) и чешуйчатости поверхности шва; подрезы (глубину и длину) основного металла; отсутствие непроваров (за исключением конструктивных непроваров) с наружной и внутренней стороны шва; размеры катета углового шва; отсутствие переломов осей сваренных цилиндрических элементов.

Измеряемые параметры и требования к выполнению измерительного контроля сварных швов приведены на рис. П.6.

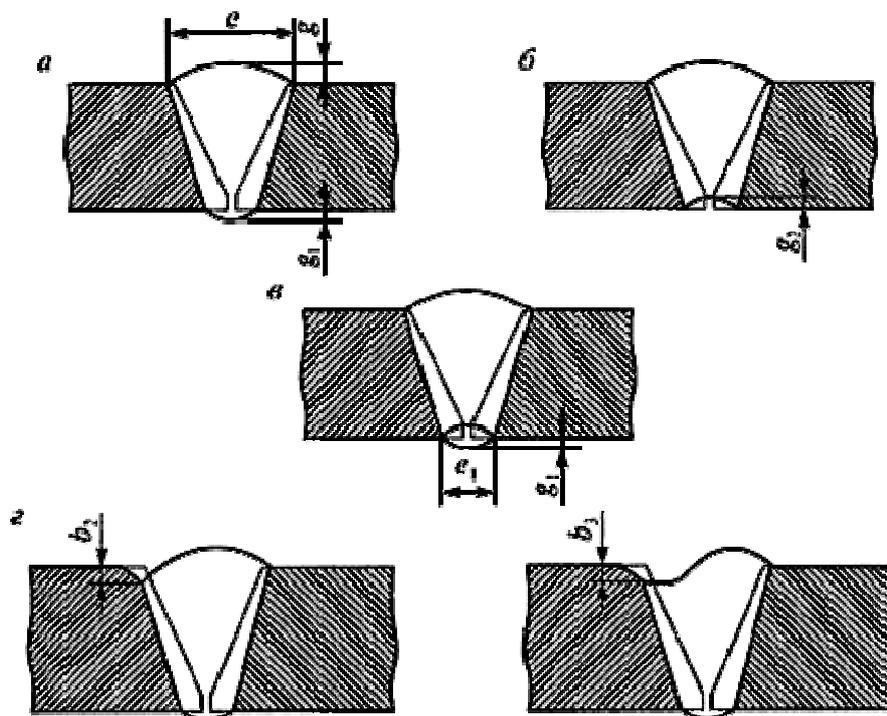


Рис. П.6. Конструктивные элементы и дефекты сварного шва, подлежащие измерительному контролю: *а, б* – размеры (ширина, высота) стыкового одностороннего шва с наружной и внутренней стороны; *в* – то же двухстороннего сварного шва; *г* – подрез и неполное заполнение разделки кромок

Измерительный контроль геометрических размеров сварного соединения (конструктивных элементов сварных швов, геометрического положения осей или поверхностей сваренных деталей, углублений между валиками и чешуйчатости поверхности шва, выпуклости и вогнутости корня односторонних швов и т. д.) следует проводить в местах, указанных в рабочих чертежах, НД, ПТД или ПДК, а также в местах, где допустимость указанных показателей вызывает сомнения по результатам визуального контроля.

При контроле стыковых сварных соединений труб наружным диаметром до 89 мм включительно с числом однотипных соединений более 50 на одном изделии допускается определение размеров шва выполнять на 10–20 % соединений в одном-двух сечениях, при условии, что при визуальном контроле, которому подвергают все соединения, нет сомнений в части отклонения размеров (ширина, высота) шва от допуска.

При контроле угловых швов сварных соединений катеты сварного шва измеряют с помощью специальных шаблонов. Определение размеров высоты, выпуклости и вогнутости углового шва выполняется расчетным путем и только в тех случаях, когда это требование предусмотрено конструкторской документацией. Измерение выпуклости, вогнутости и высоты углового шва проводится с помощью шаблонов, например шаблоном В. Э. Ушерова-Маршака (см. рис. П.5).

Выпуклость (вогнутость) стыкового шва оценивается по максимальной высоте расположения поверхности шва от уровня расположения наружной поверхности деталей (рис. П.7).

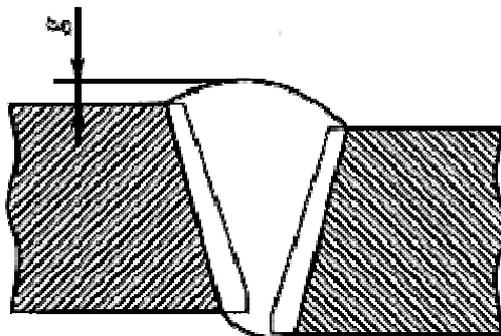


Рис. П.7. Измерение выпуклости (вогнутости) стыкового шва ( $g$ ) при различном уровне наружных поверхностей деталей, вызванном смещением при сборке соединения под сварку

В том случае, когда уровни поверхностей деталей одного типоразмера (диаметр, толщина) отличаются друг от друга, измерения следует проводить относительно уровня поверхности детали, расположенной выше уровня поверхности другой детали.

В том случае, когда выполняется сварка деталей с различной толщиной стенки и уровень поверхности одной детали превышает уровень поверхности второй детали, оценку выпуклости (вогнутости) поверхности шва выполняют относительно линии, соединяющей края поверхности шва в одном сечении (рис. П.8).

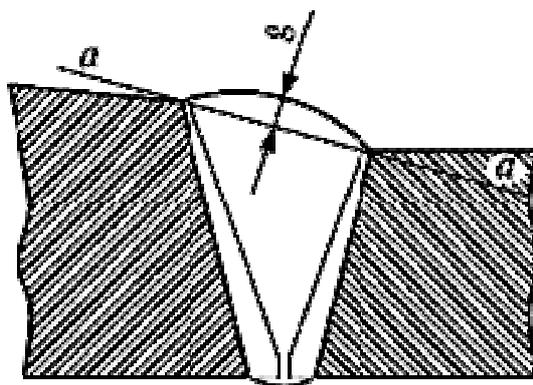


Рис. П.8. Измерение выпуклости (вогнутости) стыкового шва ( $g$ ) при различном уровне наружных поверхностей деталей, вызванном разницей в толщинах стенок

Размеры выпуклости (вогнутости) углового и стыкового швов (рис. П.9, П.10) определяются шаблонами, например, конструкции В. Э. Ушера-Маршака или специально для этой цели предназначенными специализированными шаблонами.

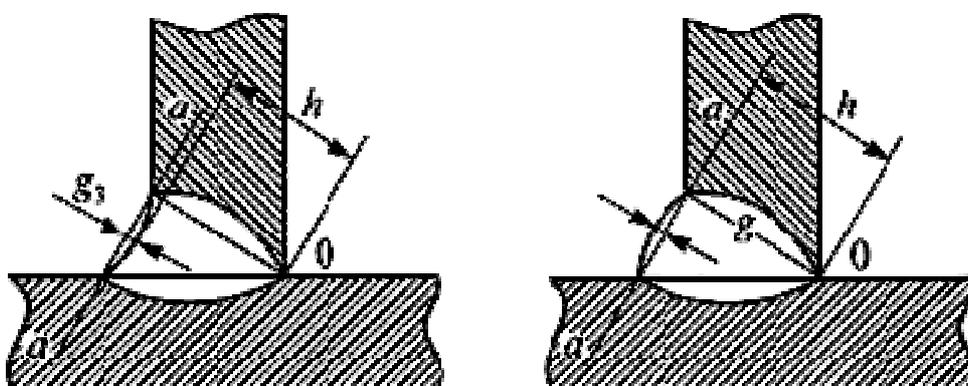


Рис. П.9. Измерение выпуклости ( $g$ ) и вогнутости ( $g_3$ ) наружной поверхности и высоты ( $h$ ) углового шва

Выпуклость (вогнутость) углового шва оценивается по максимальной высоте (глубине) расположения поверхности шва от линии, соединяющей края поверхности шва в одном поперечном сечении (рис. П.9).

Выпуклость (вогнутость) корня шва оценивается по максимальной высоте (глубине) расположения поверхности корня шва от уровня расположения внутренних поверхностей сваренных деталей (рис. П.10).

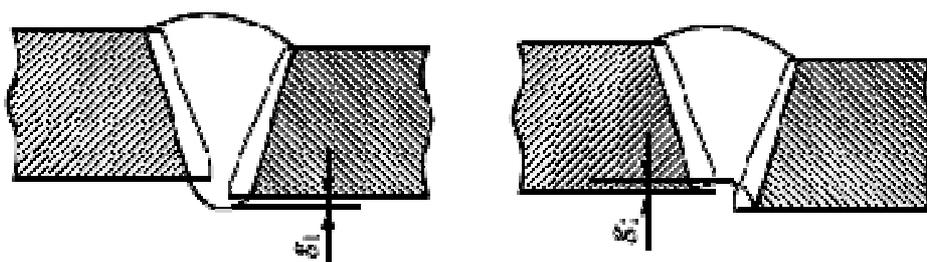


Рис. П.10. Измерение выпуклости ( $g_1$ ) и вогнутости ( $g_3$ ) корня шва стыкового одностороннего шва

Измерения чешуйчатости и западаний между валиками шва, глубины и высоты углублений (выпуклостей) в сварном шве и металле разрешается определять по слепку, снятому с контролируемого участка. Для этого применяют пластилин, воск, гипс и другие материалы. Измерения проводят с помощью измерительной лупы или на микроскопе после разрезки слепка механическим путем.

## **П.9. Порядок выполнения ВИК при устранении дефектов в материале и сварных соединениях (наплавках)**

При ремонте дефектных участков визуально необходимо контролировать:

- полноту удаления дефекта, выявленного при визуальном контроле и контроле другими методами неразрушающего контроля;
- форму выборки дефектного участка;
- форму обработки кромок выборки;
- чистоту (отсутствие визуально наблюдаемых загрязнений, пыли, продуктов коррозии, масла и т. п.) поверхности выборки и прилегающих к ней поверхностей, ширину зоны зачистки меха-

ническим путем поверхностей материала, прилегающих к кромкам выборки;

- отсутствие (наличие) дефектов (трещин, пор, включений, скоплений пор и включений, свищей, прожогов, наплывов, усадочных раковин, подрезов, непроваров, брызг расплавленного металла, западаний между валиками, чешуйчатости и т. п.) на поверхности шва заварки выборки и на прилегающих к выборке участках материала.

При ремонте дефектных участков в материале и сварных соединениях измерением необходимо контролировать:

- размеры выборки дефектного участка, размеры разделки кромок выборки (радиусы начала и окончания выборки, толщину перемычки металла при исправлении трещин и т. п.);

- ширину зоны зачистки механическим путем участков материала, прилегающих к кромкам выборки;

- размеры дефектов на поверхности шва заварки выборки и прилегающих к нему участках материала, выявленных при визуальном контроле;

- шероховатость поверхностей выборки и прилегающих участков материала в зоне их зачистки (перед заваркой), а также поверхностей материала перед проведением последующих методов неразрушающего контроля.

## **П.10. Размерные показатели для норм оценки качества по результатам ВИК**

1. Нормы оценки качества принимают по следующим размерным показателям:

- номинальной толщине сваренных деталей для стыковых соединений деталей одинаковой толщины (при предварительной обработке концов деталей путем расточки, раздачи, калибровки по номинальной толщине деталей в зоне обработки);

- номинальной толщине более тонкой детали (из двух сваренных) для стыковых сварных соединений деталей различной номинальной толщины (при предварительной обработке конца более тонкой детали по ее номинальной толщине в зоне обработки);

- расчетной высоте углового шва для угловых, тавровых и нахлесточных сварных соединений (для угловых и тавровых

сварных соединений с полным проплавлением за размерный показатель допускается принимать номинальную толщину более тонкой детали);

- удвоенной номинальной толщине более тонкой детали (из двух сваренных) для торцевых сварных соединений (кроме соединений вварки труб в трубные доски).

2. Протяженность (длина, периметр) сварных соединений определяется по наружной поверхности сваренных деталей у краев шва (для соединений штуцеров, а также угловых и тавровых соединений по наружной поверхности привариваемой детали у края углового шва).

3. Число одиночных включений, выявляемых при визуальном контроле, не должно превышать значений, указанных в НД на любом участке сварного соединения, длина которого регламентируется в НД. Для сварных соединений меньшей протяженности допустимое число одиночных включений уменьшают пропорционально уменьшению протяженности контролируемого соединения. Если при этом получается дробная величина, то она округляется до ближайшего целого числа.

4. Требования к числу одиночных включений для наплавленных поверхностей определяются согласно требованиям НД.

5. В сварных соединениях при визуальном и измерительном контроле не допускаются дефекты, превышающие установленные размеры.

## **П.11. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. С какой целью выполняется ВИК при контроле качества сварных соединений?

2. Какие приборы и оборудование применяются при проведении ВИК?

3. На каких стадиях работы с металлоизделиями проводится ВИК?

4. Какой контроль называется визуально-оптическим?

5. Что такое эндоскоп?

6. Какими приборами определяют шероховатость поверхности металла?

7. Какая принята максимальная допустимая погрешность измерения при измерительном контроле?
8. Какие существуют требования к подготовке мест производства работ по ВИК?
9. Какие существуют требования к поверхности металлоизделия перед проведением ВИК?
10. Назовите задачи ВИК при входном контроле.
11. С какой целью проводится ВИК кромок стыкуемых элементов под сварку?
12. Что требуется визуально контролировать в сварном соединении?
13. Какие измерения необходимо проводить при контроле сварного соединения?
14. Каким прибором измеряют чешуйчатость сварного соединения?
15. Каким прибором измеряют выпуклость, вогнутость и высоту углового шва?
16. Какие виды дефектов разрешается определять по слепку?
17. Какие работы необходимо выполнять при визуальном контроле ремонтируемых участков сварных соединений?
18. Какие измерения необходимо проводить при ремонте дефектных участков в материале и сварных соединениях измерениями?
19. Каким образом проводится оценка результатов ВИК?
20. Назовите требования техники безопасности при проведении ВИК.
21. По каким показателям принимаются нормы оценки качества ВИК?

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль и диагностика : справочник / В. В. Клюев [и др.] ; под ред. В. В. Клюева. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Машиностроение, 2003. – 656 с.
2. Алешин, Н. П. Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений. – М. : Машиностроение, 2006. – 366 с.
3. Неразрушающие методы контроля сварных соединений / С. В. Румянцев [и др.]. – М. : Машиностроение, 1976. – 327 с.
4. Должанский, П. Р. Контроль надежности металла объектов котлонадзора : справ. пособие. – М. : Недра, 1985. – 263 с.
5. Контроль металла в энергетике / под. ред. В. Г. Борисова [и др.]. – Киев : Техника, 1980. – 134 с.
6. Дорофеев, А. Л. Электроиндукционная дефектоскопия. – М. : Машиностроение, 1967. – 231 с.
7. Марковец, М. П. Исследование связи ударной вязкости стали с характеристиками растяжения / М. П. Марковец, В. М. Матюнин // Докл. АН СССР. Тех. физика. – 1970. – Т. 191. – № 1. – С. 79–81.
8. Марковец, М. П. Построение диаграмм твердости при вдавливании шара / М. П. Марковец, В. М. Матюнин, В. И. Дегтярев // Металл в современных энергоустановках. – М. : Энергия, 1972. – С. 75–76.
9. Дегтярев, В. И. Автоматическая запись диаграмм твердости / В. И. Дегтярев, В. И. Матюнин // Тр. МЭИ. Теплоэнергетика и энергомашиностроение. – 1972. – Вып. 104. – С. 86–89.
10. Матюнин, В. М. Неразрушающий безобразцовый контроль механических свойств металла по характеристикам твердости // Теплоэнергетика и теплотехника. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – С. 332–354.
11. Матюнин, В. М. Деформационные характеристики и константы материалов при испытаниях ступенчатым и непрерывным вдавливанием индентора // Завод. лаб. – 1992. – № 1. – С. 56–58.
12. Матюнин, В. М. Методы и средства оперативной оценки механических свойств материалов элементов конструкций и машин : автореф. дис. ... д-ра наук. – М., 1993. – 36 с.

13. Контроль качества сварки / под ред. В. Н. Волченко. – М. : Машиностроение, 1975. – 328 с.

14. Гурвич, А. К. Развитие систем неразрушающего контроля сварных соединений на базе ультразвуковых методов. – М. : МВТУ им. Баумана, 1978. – 256 с.

15. Райхман, А. З. О выборе оптимальной системы неразрушающего контроля // Дефектоскопия. – 1978. – № 2. – С. 77–84.

16. Гурвич, А. К. Ультразвуковая дефектоскопия сварных швов / А. К. Гурвич, И. Н. Ермолов. – Киев : Техника, 1972. – 460 с.

17. Бугай, Н. В. Неразрушающий контроль металла теплоэнергетических установок / Н. В. Бугай, М. И. Шклярков. – М. : Энергия, 1979. – 117 с.

18. Buckley M. J. The Economic Impact of NDE. – IEEE Transaction on Sonics and Ultrasonics, 1976. – Vol. SU. – 23. – № 5. – P. 287–292.

19. Харкевич, А. А. Теория электроакустических преобразователей. – М. : Наука, 1973. – 398 с.

20. Неразрушающий контроль : в 5 кн. Кн. 2. Акустические методы контроля : практ. пособие / И. Н. Ермолов, Н. П. Алешин, А. И. Потапов ; под. ред. В. В. Сухорукова. – М. : Высш. шк., 1991. – 283 с.

21. Выборнов, Б. И. Ультразвуковая дефектоскопия. – М. : Metallurgy, 1974. – 321 с.

22. Щербинский, В. Г. Ультразвуковой контроль сварных соединений / В. Г. Щербинский, Н. П. Алешин. – М. : Стройиздат, 1989. – 320 с.

23. О новом методе контроля повреждаемости материала оборудования ЯЭУ и аппаратно-программных средствах для ее реализации / Ф. М. Митенков, А. Л. Углов, С. Н. Пичков, В. М. Попцов // Проблемы машиноведения и надежности машин. – 1998. – № 3. – С. 3–9.

24. Измерительно-вычислительный комплекс для индивидуального прогнозирования долговечности и остаточного ресурса высоконагруженных элементов судового оборудования / А. Л. Углов, В. М. Попцов, Н. М. Горбунов // Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. «Проблемы технической диагностики в задачах обеспечения и повышения эксплуатационной надежности судо-

вых технических средств». ВНТО им. акад. Л. Н. Крылова. Центральное правление. – Л. : Судостроение, 1989. – С. 95–96.

25. Углов, А. Л. Новая автоматизированная система неразрушающего контроля прочности и надежности элементов машин и конструкций / А. Л. Углов, В. М. Попцов // *Машиностроитель*. – 1993. – № 11. – С. 2–4.

26. Смирнов, А. Н. Исследование структурного состояния и твердости основного металла и сварных соединений жаропрочных сталей акустическими методами // *Безопасность труда в промышленности*. – 2003. – № 3. – С. 37–41.

27. Смирнов, А. Н. Диагностирование технических устройств опасных производственных объектов / А. Н. Смирнов, Б. Л. Герике, В. В. Муравьев. – Новосибирск : Наука, 2003. – 244 с.

28. Пат. № 2231057 Российская Федерация. Способ неразрушающего контроля степени поврежденности металлов эксплуатируемых элементов теплоэнергетического оборудования / А. Н. Смирнов, Н. А. Хапонен. – 2004.

29. Викторов, А. И. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. – М. : Наука, 1981. – 288 с.

30. Смирнов, А. Н. Субструктура, внутренние поля напряжений и проблема разрушения паропроводов из стали 12Х1МФ / А. Н. Смирнов, Э. В. Козлов. – Кемерово : Кузбассвузиздат, 2004. – 163 с.

31 Смирнов, А. Н. Применение волн Релея для контроля поверхностного слоя сварного шва и основного металла, выполненного из стали 16М / А. Н. Смирнов, С. В. Фольмер // *Контроль. Диагностика. Ресурс*. – Кемерово, 2007. – С. 221–226.

32. Pao Y.-H., Gajewski R. R., Geranoglu A. N. Acoustic emission and transient waves in an elastic plate // *Acoustic Society of America*. – 1979. – Vol. 65. – № 1. – P. 96–105.

33. Андрейкив, А. Е. Метод АЭ в исследовании процессов разрушения / А. Е. Андрейкив, Н. В. Лысак. – Киев : Наук. думка, 1989. – 176 с.

34. Недосека, А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / под ред. Б. Е. Патона. – Киев : Индпром, 2001. – 815 с.

35. Иванов, В. И. Акустико-эмиссионный контроль сварки и сварных соединений / В. И. Иванов, В. М. Белов. – М. : Машиностроение, 1981. – 182 с.
36. Пантелеев, В. Г. Компьютерная микроскопия / В. Г. Пантелеев, О. В. Егорова, Е. И. Клыкова. – М. : Техносфера, 2005. – 304 с.
37. Пул Ч.-мл., Оуэнс Ф. Нанотехнологии. – 2-е изд. – М. : Техносфера, 2006. – 334 с.
38. Мальцев, П. П. Наноматериалы. Нанотехнологии. Наносистемная техника. Мировые достижения за 2005 год. – М. : Техносфера, 2006. – 150 с.
39. Микляев, П. Г. Кинетика разрушения / П. Г. Микляев, Г. С. Нешпор, В. Г. Кудряшов. – М. : Metallurgia, 1979. – 279 с.
40. Иванова, В. С. Разрушение металлов. – М. : Metallurgia, 1979. – 168 с.
41. Металловедение и термическая обработка стали : справ. изд. в 3 т. Т. 1. Методы испытаний и исследования / под ред. М. Л. Бернштейна, А. Г. Рахштадта. – М. : Metallurgia, 1983. – 352 с.
42. Хирш, П. Электронно-микроскопические наблюдения дислокаций в металлах // Новые электронно-микроскопические исследования. – М. : Metallurgizdat, 1961. – С. 63–100.
43. Горелик, С. С. Рентгенографический и электроннографический анализ / С. С. Горелик, Л. Н. Расторгуев, Ю. А. Скаков. – М. : Metallurgia, 1970. – 368 с.
44. Дальнедействующие поля напряжений, кривизна-кручение кристаллической решетки и стадии пластической деформации. Методы измерения и результаты / Н. А. Конева, Э. В. Козлов, Л. И. Тришкина, Д. В. Лычагин // Новые методы в физике и механике деформируемого твердого тела. – 1990. – Терскол. – С. 83–93.
45. Трунин, И. И. Механическое уравнение состояния металлических материалов и прогнозирование характеристик жаропрочности // Проблемы прочности. – 1976. – № 9. – С. 9–14.
46. Физико-химическая механика материалов / О. Н. Романов, Н. А. Деев, Я. Н. Гладкий, А. Г. Студент. – 1975. – Т. 11. – № 5. – С. 23–25.

47. Иванова, В. С. Перспективы использования синергетического подхода в решении проблем наноматериаловедения // МиТОМ. – 2005. – № 7. – С. 55–61.

48. Иванова, В. С. Междисциплинарный анализ диссипативного состояния физико-химических систем при их эволюции // МиТОМ. – 2006. – № 9. – С. 12–17.

49. Панин, В. Е. Поверхностные слои как синергетический активатор пластического течения нагруженного твердого тела // МиТОМ. – 2005. – № 7. – С. 62–68.

50. Белая книга по нанотехнологиям: Исследования в области наночастиц, наноструктур и нанокompозитов в Российской Федерации (по материалам I Всероссийского совещания ученых, инженеров и производителей в области нанотехнологий). – М. : Изд-во ЛКИ, 2008. – 344 с.

51. Бекешко, Н. А. Некоторые вопросы развития методов и средств теплового неразрушающего контроля // Дефектоскопия. – 1996. – № 12. – С. 49–55.

52. Инфракрасная дефектоскопия // Экспресс-информация : Приборы, средства автоматизации и системы управления. – 1997. – Вып. 7.

53. Достижения и перспективы развития промышленной томографии // Экспресс-информация : Приборы, средства автоматизации и системы управления. – 2001. – Вып. 2.

54. Опыт разработки и применения вычислительных томографов для дефектоскопии / Э. И. Вайнберг [и др.] // Дефектоскопия. – 1997. – № 9. – С. 20–22.

55. Методические указания по техническому диагностированию труб поверхностей нагрева паровых и водогрейных котлов с использованием магнитной памяти металлов: РД 34.17.446-97. – М., 1997. – 68 с.

56. Современная вихретоковая дефектоскопия // Экспресс-информация: Приборы, средства автоматизации и системы управления. – 1986. – Вып. 7. – 54 с.

57. Brown S. D. Template matching – an approach for the machine sorting of eddy current data // Materials Evaluation. – 2005. – Vol. 43. – № 12. – S. 1553–1561, 1565.

58. McMaster R. C. The Present and future of eddy current testing // *Materials Evaluation*. – 2005. – Vol. 43. – № 12. – S. 1512–1521.

59. Resistivity Testing for quality control // *Material Evaluation (США)*. – August, 1986. – Vol. 44. – P. 1066–1074.

60. Современная зарубежные приборы и установки неразрушающего контроля // *Экспресс-информация: Приборы, средства автоматизации и системы управления*. – 1997. – Вып. 6. – 46 с.

61. Состояние, номенклатура и перспективы развития оборудования для неразрушающего контроля в НРБ // *Докл. Центр. машиностроит. ин-та*. – Декабрь, 1996. – 20 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	3
ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ (НК) КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ.....	9
1.1. Характерные признаки методов НК.....	9
1.2. Визуально-измерительный контроль (ВИК).....	12
1.3. Радиационный метод.....	14
1.4. Магнитные методы контроля.....	19
1.5. Капиллярные методы.....	21
1.6. Вихретоковые методы.....	25
1.7. Безобразцовые методы испытаний.....	27
1.8. Экономические аспекты неразрушающего контроля.....	31
1.9. Контрольные вопросы.....	33
2. АКУСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ.....	35
2.1. Теоретические основы акустических методов контроля.....	35
2.2. Активные акустические методы НК.....	41
2.2.1. Методы прохождения и отражения волн, комбинированные методы.....	42
2.2.2. Спектрально-акустический метод.....	46
2.2.3. Исследование поврежденного сварного соединения с применением спектрально-акустического метода.....	48
2.3. Пассивные акустические методы НК.....	59
2.3.1. Акустико-эмиссионный метод.....	59
2.3.2. Вибрационный и шумо-диагностический методы.....	68
2.4. Контрольные вопросы.....	68
3. МАКРО- И МИКРОАНАЛИЗ, ФРАКТОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	70
3.1. Макроскопические исследования (макроанализ).....	71
3.2. Микроскопические исследования (микроанализ).....	72
3.3. Анализатор изображений для световой микроскопии.....	75
3.4. Фрактографические исследования.....	78
3.5. Контрольные вопросы.....	96
4. ЭЛЕКТРОННО-МИКРОСКОПИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	98
4.1. Просвечивающая электронная и растровая микроскопия..	98
4.2. Микроскопы для нанотехнологий.....	102

4.3. Контрольные вопросы.....	105
5. МЕТОДЫ РАЗРУШАЮЩИХ ИСПЫТАНИЙ.....	107
5.1. Статические механические испытания .....	107
5.2. Циклические испытания.....	116
5.3. Динамические испытания.....	119
5.4. Испытания сварных соединений.....	126
5.4.1. Испытание металла различных участков сварного соединения и наплавленного металла на статическое растяжение.....	129
5.4.2. Испытание металла различных участков сварного соединения и наплавленного металла на ударный изгиб.....	131
5.4.3. Испытание металла различных участков сварного соединения на стойкость против механического старения.....	132
5.4.4. Измерение твердости металла различных участков сварного соединения и наплавленного металла.....	133
5.4.5. Испытание сварного соединения на статическое растяжение.....	135
5.4.6. Испытание сварного соединения на статический изгиб..	136
5.5. Контрольные вопросы.....	138
6. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЙ, МЕТОДОВ СОЕДИНЕНИЯ ЗАГОТОВОК, ИХ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ.....	140
6.1. Наноматериалы, нанотехнологии.....	141
6.2. Методы контроля и исследования.....	145
6.3. Контрольные вопросы.....	157
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ</b>	
Выписка из «Инструкции по визуальному и измерительному контролю» .....	158
П.1. Общие требования к проведению ВИК.....	158
П.2. Квалификация персонала.....	160
П.3. Требования к средствам визуального и измерительного контроля.....	160
П.4. Подготовка мест производства работ.....	161
П.5. Подготовка к контролю.....	162
П.6. Порядок ВИК на стадии входного контроля.....	163
П.7. Порядок выполнения ВИК, подготовки и сборки деталей под сварку.....	164
П.8. Порядок выполнения ВИК сварных соединений (наплавок).....	170

П.9. Порядок выполнения ВИК при устранении дефектов в материале и сварных соединениях (наплавках).....	174
П.10. Размерные показатели для норм оценки качества по результатам ВИК.....	175
П.11. Контрольные вопросы.....	176
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	178

Смирнов Александр Николаевич

**НЕРАЗРУШАЮЩИЕ И РАЗРУШАЮЩИЕ ИСПЫТАНИЯ  
СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

Учебное пособие

Редактор О. А. Вейс

Подписано в печать 18.05.2009. Формат 60×84/16.

Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе.

Уч.-изд. л. 11,0. Тираж 500 экз. Заказ.....

ГУ КузГТУ. 650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28.

Типография ГУ КузГТУ. 650000, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4а.