

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СВАРКИ

Под редакцией
д-ра техн. наук проф. В. Н. ВОЛЧЕНКО

*Допущено Министерством
высшего и среднего специального образования СССР
в качестве учебного пособия для студентов вузов,
обучающихся по специальностям
«Оборудование и технология сварочного производства»
и «Металлургия и технология сварочного производства»*



Москва «МАШИНОСТРОЕНИЕ» 1975

6П4.3

К64

УДК 621.791 ; 658.562 (075.8)

**К64 Контроль качества сварки. Под ред. В. Н. Волченко.
Учебное пособие для машиностроительных вузов. М.,
«Машиностроение», 1975.**

328 с. с ил.

На обороте тит. л. авт.: В. Н. Волченко, А. К. Гурвич, А. Н. Майоров (и др.).

В учебном пособии изложен теоретический материал по неразрушающим методам контроля качества сварных соединений. Рассмотрены статистические методы управления качеством и организация службы контроля как составные части технологии изготовления сварных конструкций.

К $\frac{31206-083}{038 [01]-75}$ 083-75

6П4.3

Рецензенты

*Кафедра «Оборудования и технологии сварочного
производства» Челябинского политехнического института
и д-р техн. наук И. Н. ЕРМОЛАЕВ*

Авторы:

В. Н. Волченко, А. К. Гурвич, А. Н. Майоров,
Л. А. Кашуба, Э. Л. Макаров, М. Х. Хусанов

ВВЕДЕНИЕ

В решениях XXIV съезда КПСС отмечается, что улучшение качества выпускаемой продукции — одна из важнейших экономических и политических задач на современном этапе развития общественного производства.

Современная технология насчитывает сотни различных способов сварки. Качество сварных соединений проверяют выборочными разрушающими испытаниями на прочность и неразрушающими испытаниями с помощью радиационных, ультразвуковых, магнитных, электромагнитных и других методов контроля. Однако развитие средств, методов и особенно совершенствование организации (системы) контроля пока отстает от развития сварочной технологии.

Проведенные в последние годы исследования показывают, что качество сварных соединений колеблется в широких пределах и по отдельным отраслям промышленности и строительства может быть весьма низким.

Низкое качество обычно — следствие несоблюдения запроектированной технологии, отсутствия системы обратной оперативной связи от контроля к технологии и других, скорее организационных, чем технических недостатков. Указанные организационные недостатки могут быть преодолены с помощью внедрения системы и методов статистического управления качеством. Эти методы в сварочном производстве пока не нашли нужного применения.

Растущие требования к качеству продукции выдвинули задачу подготовки специалистов, владеющих необходимой совокупностью знаний технологии, аппаратуры контроля и вопросов организации управления качеством сварки.

Как научная дисциплина, контроль качества не только опирается на знание технологии производства, но связан также и с работоспособностью сварных соединений, с физикой неразрушающих испытаний, с математико-статистическими методами анализа информации о качестве, вероятностными методами оценки качества продукции и т. д. Данную дисциплину преподают в вузах обычно тогда, когда студентам уже известны особенности разрушающих испытаний материалов и сварных соединений. Соответственно в книге рассмотрены

главным образом только неразрушающие испытания — дефектоскопия.

Первым учебником по контролю качества сварки была книга С. Т. Назарова, последний раз изданная в 1964 г. За истекшее десятилетие техника и технология контроля сварки существенно изменились. Уточнились представления о физических явлениях, лежащих в основе методов контроля, появились принципиально новые и усовершенствованы существовавшие ранее методы и средства. Однако многие из них описаны только в специальной литературе и в многочисленных статьях.

Авторы стремились дать в книге систему основополагающих теоретических понятий, позволяющих осваивать новые достижения науки и техники контроля качества сварки. В отличие от прежних учебников в книге существенно переработаны и дополнены разделы, посвященные отдельным методам контроля. Более полно и подробно изложены физические основы методов дефектоскопии. Даны две новые главы: «Статистические методы управления качеством сварки», «Экономика и организация службы контроля».

Настоящее учебное пособие рассчитано главным образом для использования студентами сварочных специальностей при изучении общего курса контроля качества сварки и дисциплин специализации — «Неразрушающие методы контроля качества сварных соединений» и «Статистические методы управления качеством сварки». Распределение материала между указанными тремя курсами зависит от числа часов, отведенных на их изучение.

Авторы не имели возможности одинаково подробно осветить все методы неразрушающих испытаний, поэтому основное внимание обращено на радиационные, ультразвуковые и магнитные методы, сравнительный объем применения которых в промышленности и строительстве наибольший.

При написании книги использован опыт преподавания соответствующих дисциплин в МВТУ им. Баумана как для студентов, так и на курсах повышения квалификации инженеров и преподавателей вузов. Учтен опыт отраслевых НИИ, ведущих предприятий и ряда других вузов.

Учебное пособие содержит десять глав. Введение, гл. I, II, VI, VII, VIII, X — написаны В. Н. Волченко, гл. IV — А. К. Гурвичем, гл. III — А. Н. Майоровым и В. Н. Волченко, гл. V — Л. А. Кашубой и М. Х. Хусановым, гл. IX — Э. Л. Макаровым и В. Н. Волченко.

КАЧЕСТВО СВАРКИ, СВАРОЧНЫЕ ДЕФЕКТЫ
И КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА

1.1. ФАКТОРЫ КАЧЕСТВА СВАРКИ

1.1.1. Показатели качества

Качество продукции согласно ГОСТ 15467—70 есть совокупность свойств продукции, обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением. Показатели качества сварных соединений определяются той или иной совокупностью следующих свойств: прочностью, надежностью, отсутствием дефектов, структурой металла шва и околошовной зоны, коррозионной стойкостью, числом и характером исправлений и т. п. (см. схему 1.1).

Согласно принятой терминологии (ГОСТ 13377—67) под надежностью понимают свойство изделия выполнять заданные функции, сохраняя свои эксплуатационные показатели в заданных пределах в течение требуемого промежутка времени или требуемой наработки. Это определение относится к так называемой эксплуатационной надежности.

Определение (измерение) надежности широко принято в настоящее время для систем и элементов автоматики. Оно применимо главным образом для таких изделий, где имеется множество мелких однородных элементов, или элементов, работающих в форсированном режиме (сравнительно небольшое время). Для получения характеристик надежности серию сварных изделий следует испытать в эксплуатационных условиях или ускоренно и определить статистику отказов. На ее основе можно рассчитать вероятность безотказной работы $P(t)$ за заданное время, интенсивность отказов $\lambda(t)$ или наработку на отказ $T_{\text{ср}}$ (ГОСТ 13216—67).

В условиях сварочного производства такие натурные испытания не всегда возможны, например из-за малой партии сварных изделий, громоздкости сварной конструкции или большого срока ее эксплуатации. Кроме того, натурные испытания на надежность связаны обычно с необходимостью разрушения (доведения до отказа) значительного количества сварных изделий, обусловлены большими затратами времени, средств и т. п.

Поэтому классическая схема расчета и испытания надежности, связанная главным образом со статистическим ее аспектом, оказывается мало применимой для широкого круга сварных изделий

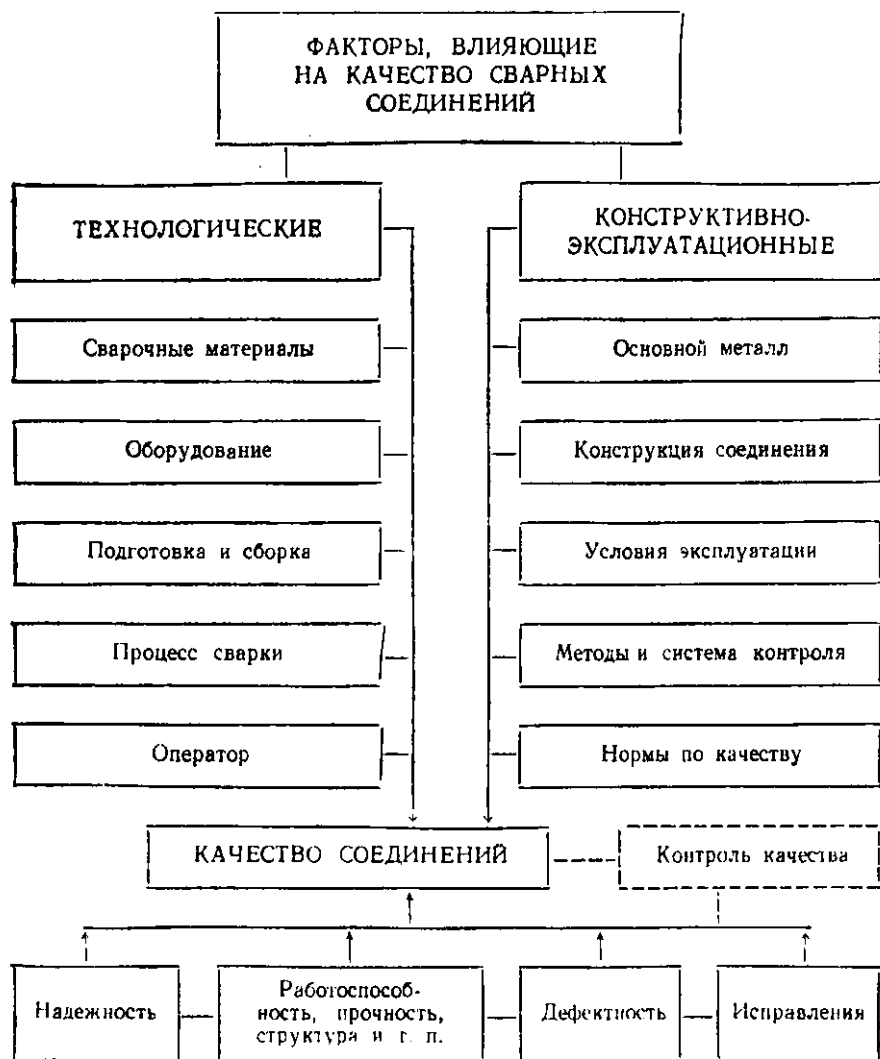
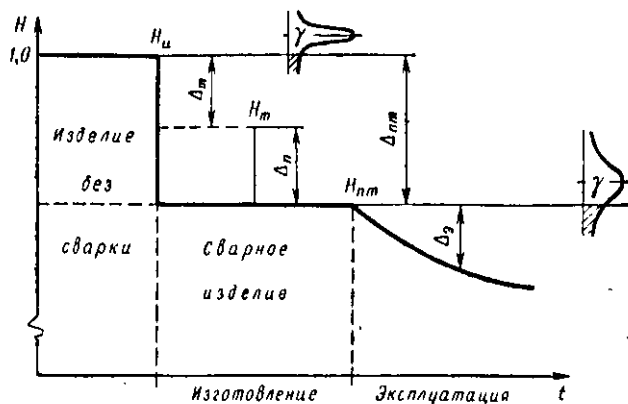


Схема 1.1

общего назначения, работающих значительный срок без заметного износа или старения.

Часто надежность определяют как свойство сохранения работоспособности при эксплуатации. В сварочной технике, так же как и в машиностроении вообще, часто используют этот термин в более широком смысле. Применяют термины технологическая или производственная надежность, однако количественных характеристик для этих понятий пока нет и вкладывают в них порой разный смысл.

Рис. 1.1. Общая схема-модель формирования качества сварных соединений, H_t , $H_{пт}$ — технологический и производственно-технологический уровни качества



Основной материал в процессе сварки обычно не сохраняет свои первоначальные свойства. Поэтому для оценки показателей качества или надежности сварных соединений целесообразно рассматривать особенности его изменения до эксплуатации, в процессе изготовления. Используя далее условно термин надежность, будем считать, что сварное соединение может быть выполнено либо равнонадежным (равнопрочным) основному материалу, надежность которого условно принимается за единицу, либо слабее основного материала.

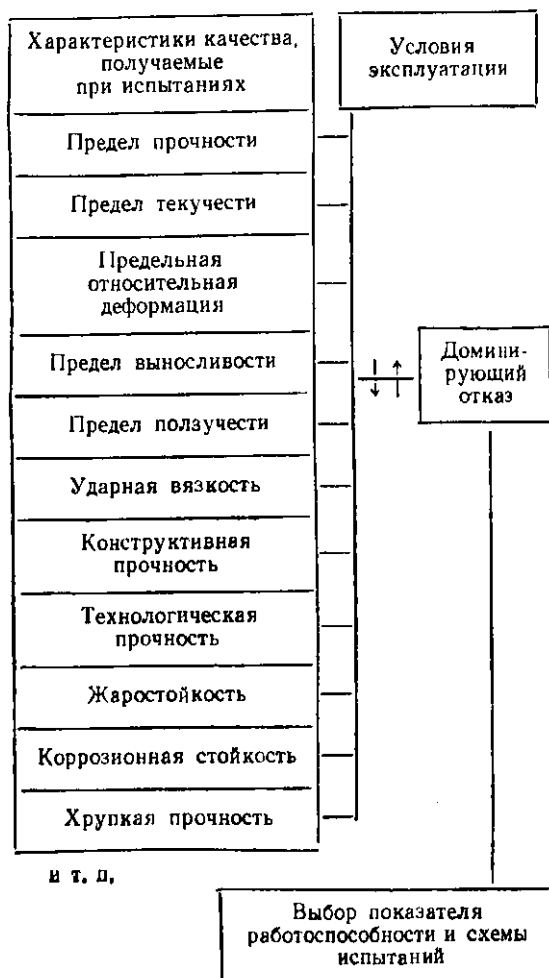
Согласно установленной в ряде работ схеме общую модель формирования качества или надежности H сварных соединений целесообразно представить как серию условных уровней качества (рис. 1.1). Качество основного материала, т. е. условного идеального соединения без сварки, обозначено H_u и принято за единицу. Потери качества обозначены: Δ_t — технологическая, за счет изменения свойств материала при сварке; $\Delta_{п}$ — производственная, за счет сварочных дефектов; $\Delta_{пт}$ — производственно-технологическая; Δ_e — эксплуатационная.

Обычно можно полагать $\Delta_e \approx 0$, что соответствует широкому кругу соединений общего назначения, работающих без заметного износа. Тогда $H_e \approx H_{пт}$ и по значениям $\Delta_{пт}$ можно прогнозировать величину эксплуатационной надежности H_e . Поэтому производственно-технологическую надежность можно назвать потенциальной надежностью.

На схеме формирования условно показаны плотности статистических распределений свойств материала R и сварного соединения W , вероятности γ реализации этих свойств. Эти свойства по существу случайные величины и должны быть описаны с использованием вероятностных характеристик (см. гл. VIII).

Значения потерь Δ_t и $\Delta_{пт}$ могут быть определены в единицах показателей работоспособности по результатам соответствующих разрушающих испытаний (лабораторных или производственных). При назначении вида испытаний необходим учет условий эксплуатации. От этих условий зависит вид доминирующего отказа, соответствующего наибольшей вероятности достижения соединением пре-

дельного состояния. Возможны различные варианты предельных состояний или отказов, ограничивающих возможность нормальной эксплуатации конструкций, например потеря прочности, пластичности, жесткости и т. п. Существует соответственно много способов



и т. п.

Схема 1.2

разрушающих испытаний для оценки несущей способности конструкций или сварных соединений при достижении какого-либо из возможных предельных состояний (схема 1.2). Одновременный учет ряда возможных отказов связан с проведением натурных испытаний, которые в наибольшей степени отражают условия эксплуатации.

Значения производственных потерь Δ_n качества или надежности соединений могут быть оценены на основе результатов неразрушающего контроля двумя путями. Первый и наиболее сложный путь связан с оценкой $\Delta_n = \Delta_{n \text{ раб}}$ в единицах показателей работоспособности. Он может быть реализован только в том случае, если известна связь между дефектами и работоспособностью соединений. Эта связь должна быть установлена на достаточно большом количестве производственных образцов при комбинированных

испытаниях неразрушающими и разрушающими методами. Ее рассчитывают с использованием вероятностных математических моделей. Подобная задача разрешима целиком лишь в отдельных наиболее простых случаях (см. пример в гл. VIII).

Второй путь оценки $\Delta_n = \Delta_{n \text{ тех}}$ связан с определением степени васоренности соединений дефектами. При этом можно учитывать интегрально и влияние дефектов, например, введением тех или иных

коэффициентов их значимости (опасности). Но главным образом оценка Δ_n в этом случае отражает только состояние технологии и мало связана с потерей работоспособности как таковой.

Соответственно описанной общей модели формирования качества сварных соединений можно представить две цели или функции производственного контроля — приемочную и предупредительную (технологическую). В зависимости от назначения контроля следует выбирать метод испытаний и систему отбора контролируемых образцов или соединений.

1.1.2. Технологические и конструктивные факторы качества

Управление качеством сварки должно предусматривать контроль всех факторов, от которых зависит качество продукции. На качество получаемых при сварке соединений оказывают влияние многие факторы. Основные из них можно условно сгруппировать как технологические и конструктивные (см. схему 1.1). Последние более правильно назвать конструктивно-эксплуатационными. Но для краткости их будем называть просто конструктивными, поскольку их следует учитывать и контролировать в первую очередь на стадии конструирования изделий и проектной подготовки производства.

Служба и система контроля непосредственно в сварочном производстве должна предусматривать проверку основных технологических факторов — исходных материалов, оборудования, квалификации операторов, технологического процесса и т. п. Весь этот комплекс проверок можно назвать контролем технологической подготовки производства (см. гл. II). Значение этого этапа контроля исключительно велико, но его часто недооценивают на практике.

Пока для отделов и лабораторий неразрушающего контроля основным объектом служат готовые сварные соединения, их главная цель — обнаружение дефектов. Однако важно отметить, что высокое качество соединений зависит в первую очередь от уровня и состояния технологического процесса производства. Поэтому обнаружение дефектов должно служить сигналом не столько к отбраковке продукции, сколько к оперативному улучшению технологии. Основное воздействие контроль должен оказывать именно на технологию производства, обеспечивая за счет оперативной обратной связи предупреждение дефектов и брака продукции.

Оптимальная схема контроля в сварочном производстве показана на схеме 1.3, на которой отражены следующие этапы контроля:

- 1) контроль документации на стадии проекта — выбор конструкции и технологии сборки-сварки; выбор основного металла, обоснование норм допустимых дефектов и плана контроля; выбор метода контроля и обеспечение дефектоскопичности конструкций и т. п.;
- 2) контроль технологической подготовки производства — проверка условий и качества заготовки-сборки, проверка подготовки и хранения исходных материалов, проверка паспортизации и дисциплины сварщиков и т. п.;

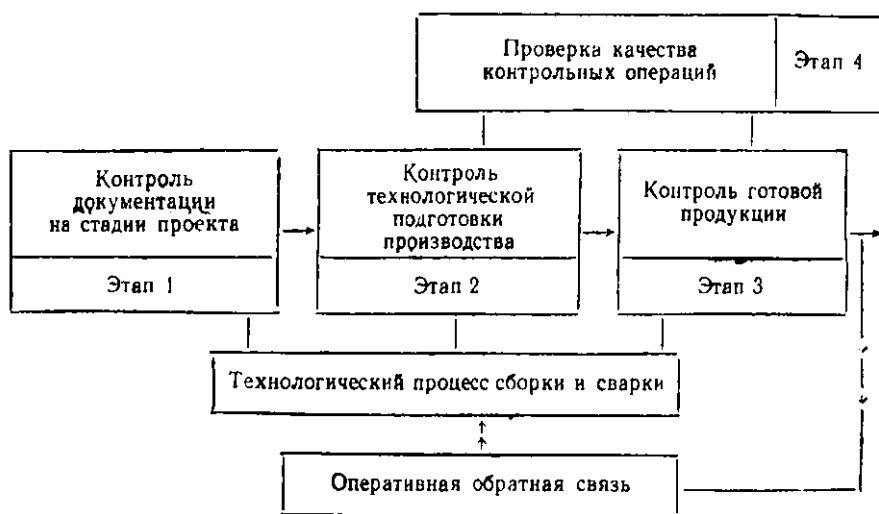


Схема 1.3

3) контроль готовой продукции — рациональное использование существующих методов и средств контроля;

4) проверка качества контрольных операций — проверка соблюдения режимов и чувствительности дефектоскопии, контроль дефектоскопических материалов, квалификации и состояния операторов и т. п.

1.2. ДЕФЕКТЫ И УРОВЕНЬ ДЕФЕКТНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

1.2.1. Типы и виды дефектов

В соответствии с ГОСТ 17102—71 термин «дефект» определяют как каждое отдельное несоответствие продукции требованиям, установленным нормативной документацией.

В сварочном производстве принято разделять дефекты подготовки и сборки изделий под сварку и сварочные дефекты. Последние могут быть наружными (дефекты формы швов) или поверхностными и внутренними. Внутренние дефекты, в свою очередь, могут представлять собой либо несплошности (макроскопические дефекты), либо дефекты структуры. В данной книге основное внимание уделено именно контролю несплошностей, т. е. внутренних макроскопических дефектов сварных соединений. Однако следует иметь в виду, что дефекты подготовки и сборки часто приводят к появлению собственно сварочных дефектов, поэтому подготовку изделий к сварке необходимо тщательно контролировать.

Дефекты подготовки и сборки. Наиболее характерные дефекты этого вида при сварке плавлением: неправильный угол скоса кромок в швах с V-, U- и X-образной разделкой; слишком большое или малое

притупление по длине стыкуемых кромок; непостоянство зазора между кромками; несовпадение стыкуемых плоскостей кромок; расслоения и загрязнения на кромках и т. п.

Причинами подобных дефектов могут быть неисправности станков для изготовления заготовок и приспособлений для сборки; недоброкачественность исходных материалов; ошибки в чертежах, а также низкая квалификация и культура труда работников.

Правильность сборки контролируют внешним осмотром и промерами при помощи шаблонов и инструментов (см. гл. II).

Классификация дефектов по их типам и видам. Наиболее общая классификация сварочных дефектов — по их типам, которые будем связывать в дальнейшем с геометрическими признаками и массовостью дефектов (схема 1.4).

Важна также классификация по природе дефектов, относящихся к тому или иному способу сварки. Будем считать, что природа дефекта определяет его вид и род. Для стыковых стальных соединений, выполненных сваркой плавлением, обычно устанавливают шесть видов дефектов. В табл. 1.1 приведены их классификация и обозначения согласно рекомендации СЭВ по стандартизации РС2192—72 и по ГОСТ 7512—69. Согласно указанной рекомендации дефекты, определяемые с помощью радиографических испытаний, обозначают

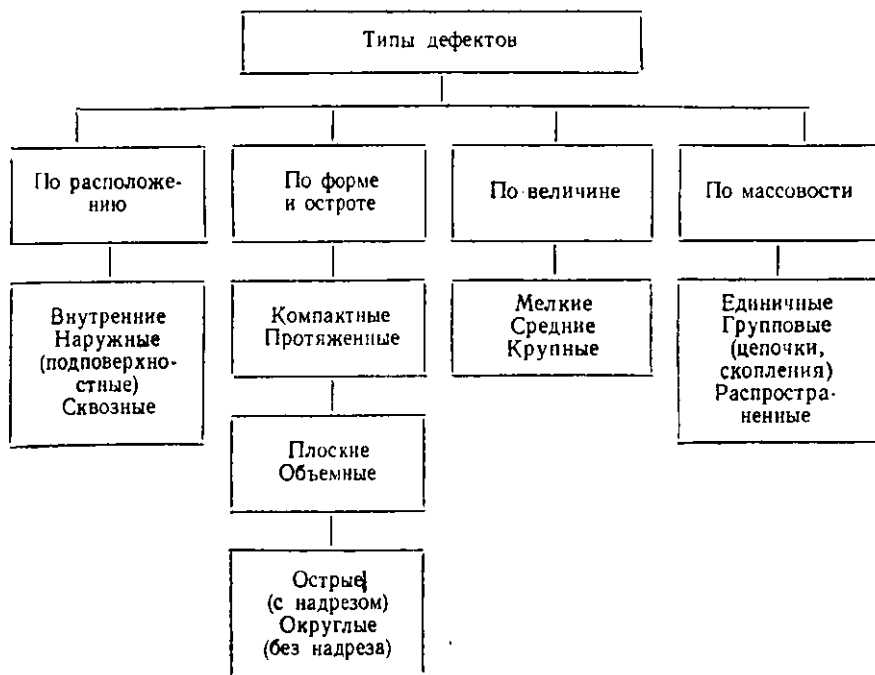


Схема 1.4

Классификация видов дефектов по технологическому признаку

Наименование вида дефектов	Обозначения		Наименование вида дефектов	Обозначения	
	по РС СЭВ	по ГОСТ		по РС СЭВ	по ГОСТ
Газовые включения (поры)	А	П	Непровары	Д	Н
Твердые включения (шлаки, металлы)	В	Ш	Трещины	Е	Т
Несплавления	С	Н	Неправильная форма и прочие дефекты	Ф	—

двумя буквами. Первая буква обозначает вид дефекта, вторая — подробный род дефекта, устанавливаемый согласно табл. 1.2. Подобные обозначения дефектов (табл. 1.3) приняты в документах стран СЭВ, а также в документах Международного института сварки (МИС).

В последние годы начинают применять цифровую индексацию дефектов. Например, в документах МИСа рекомендуется четырех-цифровое обозначение дефектов. Однако пока цифровая индексация не является общепринятой и поэтому в данной книге она не приведена. Кроме того, многоцифровая индексация, удобная для обработки информации на ЭЦВМ, не обладает наглядностью при ручной обработке результатов контроля.

Наружные дефекты. Форма и размеры швов обычно зависят от толщины свариваемого материала. Их задают техническими условиями и указывают на чертежах. При сварке плавлением, как правило, регламентируют: ширину шва b ; высоту усиления шва h и

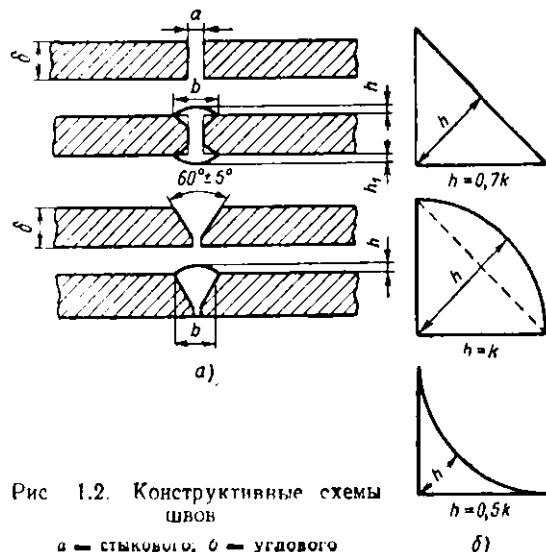


Рис. 1.2. Конструктивные схемы швов

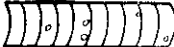
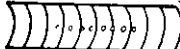
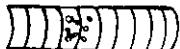
а — стыкового, б — углового

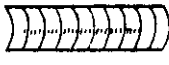
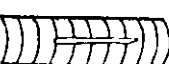
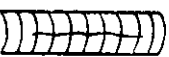
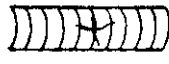
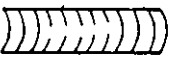
проплава h_1 (рис. 1.2, а). Для тавровых и нахлесточных соединений регламентируют катет шва k и высоту рабочего сечения h (рис. 1.2, б).

Швы могут иметь неравномерную ширину по длине, неравномерную высоту, бугры, наплывы (рис. 1.3, а—д), седловины, неравномерную величину катетов в угловых швах и соединениях. Дефекты формы швов получаются из-за отступлений в технологии при автоматической сварке (нарушение скорости подачи прово-

Таблица 1.2

Обозначение и наименование дефектов по РС 2192—72

Обозначение дефекта	Наименование дефекта	Схематическое изображение дефекта		Примечание
		по сечению соединения	по радиограмме	
Aa	Группа А — поры (газовые включения) Пора сферическая			—
Ab	Пора канальная			Длина больше трехкратной максимальной ширины. Главный размер направлен в глубину шва
Ac	Цепь пор			Минимум четыре поры в ряду или в группе на расстоянии, не превышающем трехкратного диаметра наибольшей поры
Ad	Группа пор			
Ae	Пора линейная (протяженная)			Длина больше трехкратной максимальной ширины. Главный размер вдоль оси шва
Ba	Группа В — твердые включения Шлак компактный			—
Bb	Шлак линейный (протяженный)			Длина больше трехкратной максимальной ширины
Bc	Включение металлическое			—
	Группа С — несплавления			R — направление облучения
C	Несплавление			

Обозначение дефекта	Наименование дефекта	Схематическое изображение дефекта		Примечание
		по сечению соединения	по радиограмме	
Da	Группа D — непровары Непровар в корне одностороннего шва без подреза			—
Db	Непровар в корне одностороннего шва с подрезом			—
				—
Dc	Непровар двустороннего шва			—
Ea	Группа E — трещины Трещина продольная			—
Eb	Трещина поперечная			—
Ec	Трещина радиальная			—
Fa	Группа F — неправильная форма и прочие дефекты Чрезмерный провар корня			—
Fb	Неровности шва			—
Fc	Подрезы			—

Сопоставление обозначений дефектов по национальным стандартам стран-членов СЭВ
и по документам Международного института сварки

Т а б л и ц а 1.3

Обозначение дефекта по РС 2192—72	Наименование группы дефектов по РС 2192—72	Обозначения дефектов					по документам МИС	
		по национальным стандартам				ЧССР CSN—051305	ИСО 340—89	Каталог ИИВ
		ВНР MSZ—4310/4—63	ГДР TGL—10646 лист 1	ПНР PN—60 M—69771 PN—62 M—69703				
Aa Ab Ac Ad Ae	Поры (газовые включения)	Aa Ab Ac — —	Aa Ab Ac — —	Aa Ab Ac Ad Ab	Aa Ab Ac — —	2011 2016 2014 2013 2015	Aa Ab — — —	
Ba Bb Bc	Твердые включения	Ba Bb Bc	Ba Bb, Bc Bd	Ba Bb Bc	Ba Bb Bd	3012—3022 3011—3021 304	Ba Bb H	
C	Несплавления	C	C	C, Ca, Cc	C	4011—4012	C	
Da Db Dc	Непровары	Da Db Dd	Da Db Dc	Da Db Dd	Da Db Dc	515—5013 402 402	— D D	
Ea Eb Ec	Трещины	Ea Eb Ec	Ea Eb Ec	Ea Eb Ec	Ea Eb Ec	101 102 103	Ea Eb —	
Fa Fb Fc	Неправильная форма и прочие дефекты	Fa Fb Fc	Fa Fb Fc	Fa Fb Fc	Fa Fb Fc	504—5041 514 5011, 5012	— — F	

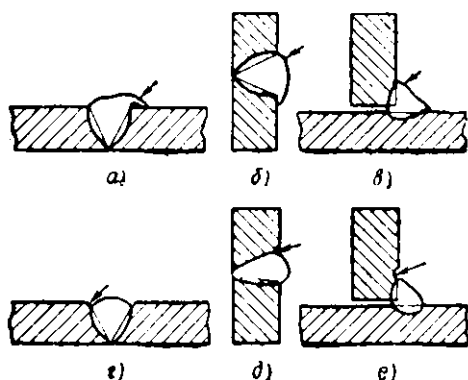


Рис. 1.3. Наплывы (а—б) и подрезы (в—е) в сварных швах, выполненных в горизонтальном положении и на вертикальной плоскости

локи, скорости сварки и т. п.) и низкой квалификации или культуры сварщика при ручной сварке.

Неправильная форма швов, в частности чрезмерное усиление, резкие переходы от шва к основному металлу, бугристость и т. п. могут существенно снижать работоспособность соединений, особенно при динамических или вибрационных нагрузках, а также в хрупких материалах.

Некоторые наружные дефекты часто рассматривают как поверхностные несплошности швов (что более характерно

для внутренних дефектов). К ним относятся подрезы, незаваренные кратеры, прожоги, свищи и т. п.

П о д р е з ы представляют собой углубления в основном металле, расположенные по краям шва. Они образуются при сварке на повышенных токах и напряжениях дуги (рис. 1.3, в—е). Подрезы уменьшают рабочее сечение, вызывают концентрацию напряжений и могут стать причиной разрушения швов из-за появления трещин у края подреза.

К р а т е р ы образуются при обрывах дуги и остаются в виде углублений. Они уменьшают рабочее сечение шва, снижают его прочность и коррозионную стойкость. Незаваренный кратер часто служит очагом появления трещин.

П р о ж о г и образуются от чрезмерно высокой погонной энергии, неравномерной скорости сварки и т. д.

С в и щ и обычно развиваются из канальных пор. Свищи — сквозные, выходящие на поверхность дефекты.

Все указанные поверхностные несплошности хорошо выявляют внешним осмотром и могут быть исправлены подваркой, если исправление не принесет большего вреда, чем сам дефект. Значительное количество поверхностных дефектов обычно сигнализирует также о наличии и внутренних дефектов.

Внутренние дефекты. Газовые включения (поры) образуются при перенасыщении сварочной ванны газами вследствие загрязненности кромок изделия, длинной дуги, влажности обмазки и флюсов, вредных примесей и влаги в защитных газах и т. п. Размеры пор колеблются от микроскопических до 2—3 мм в диаметре. Поры снижают прочность и плотность швов. В малом количестве поры могут и не влиять на работоспособность соединений.

Ш л а к о в ы е в к л ю ч е н и я (шлаки) появляются обычно вследствие плохой зачистки кромок от окалины и ржавчины, а чаще от плохой зачистки шлака при многослойной сварке (рис. 1.4). Зна-

чительные по величине и острые включения могут вызывать местную концентрацию напряжений, а также снижать прочность соединений. Микроскопические шлаковые включения — загрязнения в виде нитридов, фосфидов, сульфидов, легкоплавких эвтектик, окиси железа снижают пластичность швов. Небольшие округлые включения обычно не опасны.

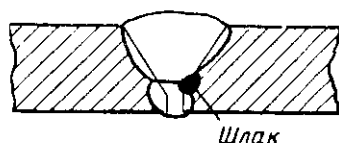


Рис. 1.4. Шлаковое включение на кромке в многослойном шве

Металлические включения имеют место при аргоно-дуговой сварке неплавящимся электродом и обычно состоят из частичек вольфрама.

Непровары представляют собой несплошности значительной величины (раскрытия) на границах между основным и наплавленным металлом или незаполненные металлом полости в сечении шва. Встречаются непровары по кромкам (рис. 1.5, а), по сечению и в корне шва (рис. 1.5, б, в, г). Непровары образуются при загрязнении кромок, неправильной подготовке кромок, неправильном или неустойчивом режиме сварки и т. п. Непровары могут снизить работоспособность соединения за счет ослабления рабочего сечения шва и, кроме того, острые непровары могут создать концентрацию напряжений в шве.

Трещины считают самым опасным дефектом сварки. Они могут быть микро- и макроскопическими, а в зависимости от происхождения — горячими и холодными.

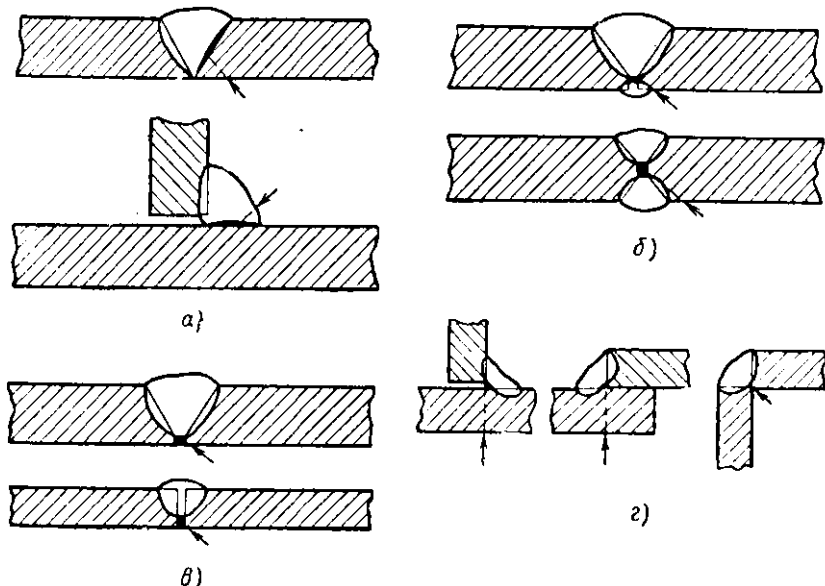


Рис. 1.5. Непровары в стыковых швах

а — по кромке; б — в середине шва, в — в корне шва, г — в угловых швах

Горячие трещины при сварке образуются в процессе затвердевания металла, вследствие резкого снижения пластических свойств металла в этом интервале температур и развития растягивающих деформаций.

Холодные трещины образуются в результате протекания фазовых превращений, приводящих к снижению прочностных свойств металла, и воздействия сварочных напряжений. Холодные трещины могут образовываться как на этапе завершения охлаждения, так и во время вылеживания сварных конструкций в течение некоторого периода времени после сварки.

Иногда трещины развиваются в процессе эксплуатации вследствие раскрытия сварочных микротрещин, а также зарождения разрушения металла от надразов, вызванных непроваром, шлаковыми включениями и прочими дефектами.

Трещины могут быть продольными и поперечными и располагаться в металле шва или в зоне термического влияния.

Трещины вследствие своей чрезвычайной опасности — недопустимый дефект. Сварные соединения с трещинами, как правило, подлежат исправлению. Однако в связи с развитием науки о прочности появились воззрения о допустимости некоторых трещин в тех случаях, когда имеются условия к прекращению их роста. Критические размеры таких трещин рассчитывают на основе уравнений линейной механики разрушения и специальных экспериментов.

Н е с п л а в л е н и я (слипания) представляют собой несплошности малого раскрытия на свариваемых поверхностях или кромках материала. Несплавления — очень опасные дефекты, плохо выявляемые современными средствами дефектоскопии. Наибольшее распространение этот дефект имеет при аргоно-дуговой сварке алюминиевомагниевого сплава, а также при контактной стыковой сварке.

Все вышеуказанные дефекты встречаются главным образом при сварке плавлением. При сварке с давлением и пайке возникают дефекты, которые по своему характеру отличаются от перечисленных выше. В то же время шлаки, подрезы, наплывы и кратеры обычно отсутствуют. Наиболее часты и опасны несплавления, которые при сварке с давлением и пайке действительно носят характер слипания или склеивания.

При стыковой, точечной и шовной контактной сварке типичные дефекты: пережог металла, непровары, несплавления, пористость, кольцевые и продольные трещины. Эти дефекты вызываются нарушением технологии сварки (слишком большой или малый ток, неправильное давление и скорость осадки, неоптимальная продолжительность выдержки под током и т. д.). Все эти дефекты могут значительно снижать работоспособность соединений. Выявлять дефекты сварки с давлением обычно значительно сложнее, чем дефекты сварки плавлением.

Подробный анализ дефектов сварки с давлением и пайки с рассмотрением причин дефектности дан в соответствующих технологических курсах и учебниках.

1.2.2. Влияние дефектов

Наличие тех или иных дефектов в сварных соединениях само по себе еще не определяет потерю работоспособности этих соединений. Опасность дефектов, наряду с влиянием собственных характеристик (типы, виды, размеры и т. п.), зависит от большого количества конструктивных и эксплуатационных факторов (схема 1.5). Разделить принадлежность отдельных факторов к конструктивным или эксплуатационным трудно, поэтому в дальнейшем мы их будем иногда называть конструктивно-эксплуатационными. Анализ и исследование влияния дефектов на работоспособность соединений — главным образом задача исследователей-прочнистов. Поэтому без детального

Свойства материала	Пластичность или хрупкость. Склонность к трещинообразованию. Способность к релаксации напряжений. Торможение трещин и т. п.
Конструкция соединений	Стыковые или угловые швы. Масштабный фактор и т. п.
Схема нагружения	Рабочие или нерабочие швы, одноосное или двух-трехосное напряженное состояние. Остаточные напряжения.
Концентраторы напряжений	Конструктивные (вырезы, разнородность и т. п.). Технологические (перекосы, несовпадения кромок, чешуйчатость и т. п.)
Вид нагрузки	Статика, динамика, вибрация, малоцикловая нагрузка и т. п.
Агрессивность среды	Нейтральная, слабо или сильно агрессивная
Температурные воздействия	Высокие или низкие температуры, циклические воздействия
Вероятность и опасность отказа	Характер перегрузок. Опасность аварийной ситуации и тяжелых последствий отказа

Схема 1.5

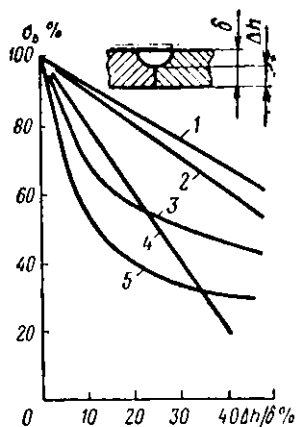


Рис. 1.6. Влияние относительной глубины $\Delta h/\delta$ непровара корня шва на статическую прочность стыковых соединений (без усиления):

1 — сталь Ст3; 2 — сталь 12Х18Н9Т; 3 — сталь 25ХГФА; 4 — сплав Д16Т; 5 — сталь 30ХГСА

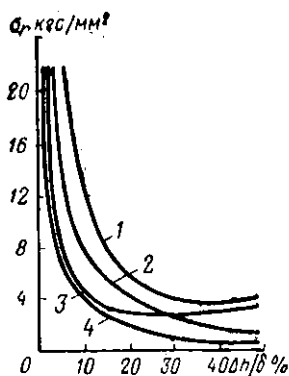


Рис. 1.7. Влияние относительной величины $\Delta h/\delta$ дефектов на усталостную прочность стыковых сварных соединений низкоуглеродистой стали. Швы без усиления:

1 — подрезы; 2 — поры; 3 — непровар корня шва; 4 — шлаки. Число циклов $3,2 \cdot 10^5$; $r = 0$ (симметричный цикл)

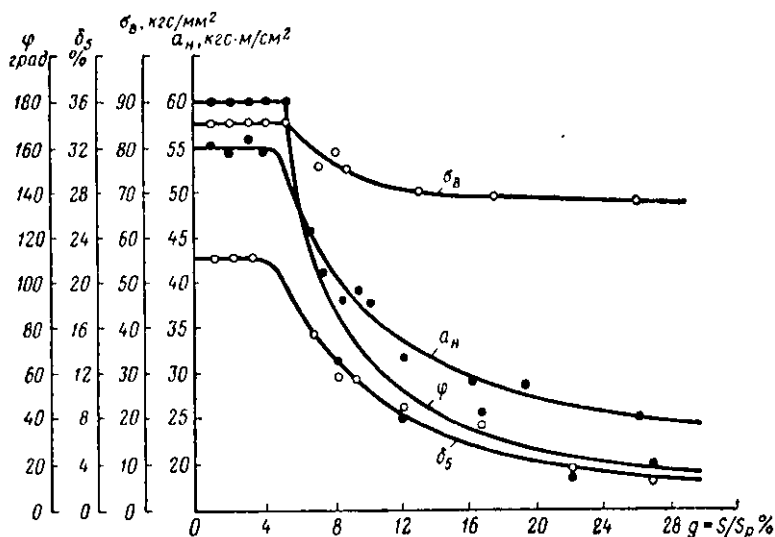
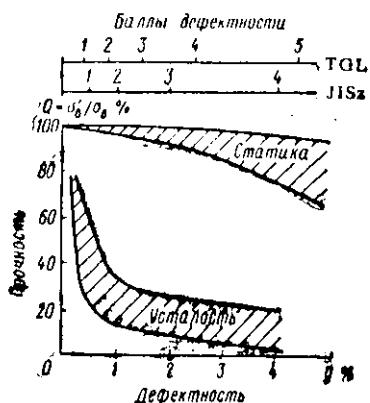


Рис. 1.8. Влияние относительной площади дефектов — пор на механические свойства стыковых соединений легированной стали ($\sigma_b = 85$ кгс/мм², после закалки и отпуска):

Швы с усилением; σ_b — статическая прочность; δ_5 — относительное удлинение на базе 5 см; a_n — ударная вязкость; φ — угол изгиба

Рис. 1.9. Зависимость относительной прочности сварных стыковых швов от пористости и шкала стандартов Японии (JISz) и ГДР (TGL) по баллам дефектности:

г. — относительная суммарная площадь дефектов



обсуждения приведем только некоторые типовые примеры оценки влияния дефектов.

Результаты многочисленных отечественных и зарубежных исследований показывают, что при статической нагрузке и пластичном материале (рис. 1.6, кривые 1, 2, 4) влияние величины непровара на потерю прочности примерно пропорционально относительной величине этого непровара или его площади.

При малопластичном материале (рис. 1.6, кривые 3, 5), а также при динамической или вибрационной нагрузке (рис. 1.7; 1.8) линейная пропорциональность между потерей работоспособности и величиной дефекта нарушается: сравнительно небольшие дефекты могут существенно влиять на прочность.

По результатам отечественных и зарубежных исследований многих авторов установлено, что дефекты включения (поры, шлаки) при их относительной суммарной площади в сечении шва до 5—10% практически мало влияют на статическую прочность соединений (рис. 1.8; 1.9). По отдельным видам соединений безопасная величина ослабления стыкового шва дефектами при статической нагрузке может достигать 10, 20 и даже 30%. Однако последнее относится только к пластичным сталям и сравнительно малонагруженным соединениям.

Если швы имеют концентраторы в виде резкого усиления или несовпадения кромок, то дефекты-включения площадью 5—10% сечения шва не оказывают влияния также и на усталостную прочность стыковых соединений. В то же время остаточные напряжения могут существенно повышать опасность дефектов-включений при усталостных нагрузках. Таким образом, влияние дефектов зависит от большого числа конкретных факторов, указанных на схеме 1.5.

1.2.3. Оценка уровня дефектности

Анализ влияния дефектов на работоспособность соединений показывает, что опасность дефектов зависит от их типа, определяемого геометрическими признаками, их природы или вида, определяемого технологическими признаками (см. схему 1.1, табл. 1.1 и 1.2), а также от внешних конструктивно-эксплуатационных факторов. Указанные признаки и факторы являются сугубо детерминированными, т. е. относящимися к определенным дефектам, конкретным конструкциям и технологическим процессам. Эти детерминированные характеристики необходимы для оценки опасности дефектов только с одной

стороны — в эксплуатационном аспекте (который иногда, не совсем удачно, называют дефектологическим).

С другой стороны, засоренность соединений сварочными дефектами отражает качество технологического процесса. Технологический аспект оценки дефектов, наряду с эксплуатационным, также весьма важен, поскольку активное управление качеством возможно только на основе оценки и регулирования уровня засоренности продукции дефектами.

При установившемся стабильном технологическом процессе появления дефектов, как правило, можно считать случайными событиями. Поэтому для оценки засоренности сварных соединений дефектами вводят статистические показатели: дефектность g в контролируемом элементе и долю q дефектных элементов в партии. Используют понятие доли брака B , как показателя доли элементов, имеющих недопустимые дефекты.

Статистические признаки и показатели дефектности указаны в табл. 1.4 и более подробно рассмотрены в гл. VIII.

Таблица 1.4

Основные параметры оценки размеров дефектов
и уровня дефектности по статистическим признакам

Параметры	Обозначения и формулы
Размеры единичных дефектов	$\Delta_x (\Delta l)$ — по оси x ; $\Delta_y (\Delta b)$ — по оси y ; $\Delta_z (\Delta h)$ — по оси z ; Δ — наибольший характеристический; ΔS — площадь
Дефектность g в контролируемом элементе	$g = \frac{\sum \Delta S}{S_p} = \frac{S}{S_p} \%,$ где S_p — расчетное сечение контролируемого элемента
Доля q дефектных элементов и доля брака B в партии	$q = \frac{D}{N} \%, \quad B = \frac{M}{N} \%,$ где D, M — число дефектных и бракованных элементов в партии объемом N
Примечание. Размеры дефектов по их глубине $\Delta = \Delta h$ или (для протяженных) по длине $\Delta = \Delta l$ называют характеристическими. Значения Δ и g используют как классификационный параметр при построении многобалльной системы оценки качества швов.	

1.3. ВЫБОР МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СВАРКИ

1.3.1. Разрушающие и неразрушающие методы

При контроле качества сварных соединений и изделий применяют разные методы испытаний. Обычно по воздействию на материал или изделие эти методы группируют по двум классам: методы разрушающего контроля (РК) и методы неразрушающего контроля (НРК).

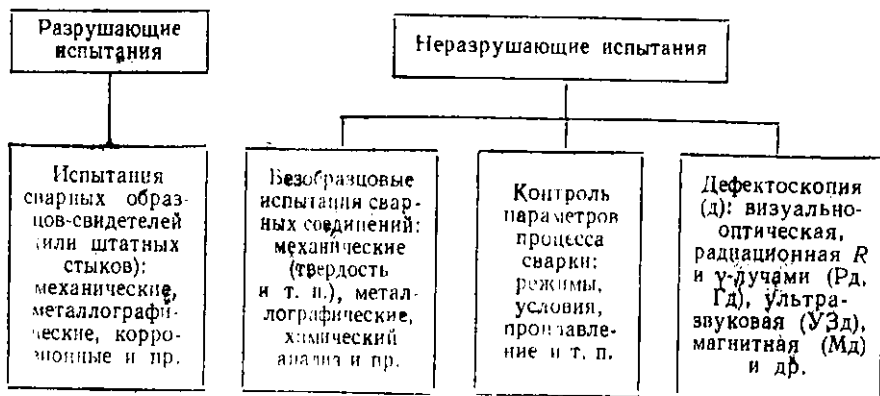


Схема 1.6

Разрушающие испытания проводят обычно на образцах-свидетелях, на моделях и реже на самих изделиях (на «штатных» стыках). Образцы-свидетели сваривают из того же материала и по той же технологии, что и сварные соединения изделий. Эти испытания, как правило, позволяют получить числовые данные, прямо характеризующие прочность, качество или надежность соединений. Если сварка и разрушающие испытания образцов проведены в лабораторных, а не производственных условиях, то эти испытания характеризуют качество образцов, выполненных без производственных дефектов. Согласно ГОСТ 6996—66 механические испытания соединений и металла шва проводят на растяжение, изгиб, сплющивание и т. п. По характеру нагрузки предусматривают статические, динамические и усталостные испытания. Подробное рассмотрение конкретных особенностей тех или иных разрушающих испытаний в задачу настоящего курса не входит, а их краткая характеристика дана в гл. IX.

Методы контроля параметров процесса сварки и методы «безобразцовых» испытаний механических свойств сварных соединений составляют отдельные группы. При выделении этих групп имелось в виду, что контроль параметров технологического процесса не позволяет непосредственно оценить качество сварных соединений. В то же время безобразцовые испытания могут сопровождаться засверливанием изделий и другими небольшими нарушениями целостности материала (но не изделия в целом). Условно и те и другие методы контроля отнесены нами к неразрушающим (схема 1.6).

1.3.2. Особенности применения различных методов

При неразрушающих испытаниях, осуществляемых обычно на самих изделиях, оценивают те или иные физические свойства, лишь косвенно характеризующие прочность или надежность соединения. Эти свойства связаны обычно с наличием дефектов и их влиянием на передачу энергии или движение вещества в материале изделий.

Физические методы контроля дефектов часто называют дефектоскопией.

Все неразрушающие физические методы дефектоскопии можно разделить на две группы по термодинамическому признаку: 1) методы, связанные с использованием передачи энергии; 2) методы, использующие движение вещества.

Следует отметить, что согласно ГОСТ 18353—73 методы неразрушающего контроля в зависимости от физических явлений, положенных в их основу, подразделяют на 10 основных видов: 1) акустический, 2) капиллярный, 3) магнитный, 4) оптический, 5) радиационный, 6) радиоволновой, 7) тепловой, 8) течеискусием, 9) электрический, 10) электромагнитный (вихревыми токами).

Кроме использованного в приложении 6 основного классификационного признака — характера физических полей или движущихся масс, взаимодействующих с контролируемым объектом, все существующие виды неразрушающего контроля согласно стандарту классифицируют по следующим признакам:

- по характеру взаимодействия физических полей или веществ с контролируемым объектом, например методы прошедшего (теневого) и отраженного излучения для акустического, оптического, радиационного, радиоволнового и теплового видов; индукционный метод для магнитного вида контроля и т. п.;

- по первичным информативным параметрам, например амплитудный и фазовый для акустического и электромагнитного вида, цветной и люминесцентный* для капиллярного вида и контроля течеискусием;

- по способам индикации первичной информации (пьезоэлектрический, индукционный, химический и т. п.);

- по способам представления окончательной информации (визуальный, графический, радиографический, звуковой, световой, метрический и др.).

Из приведенного видно, что дать единую классификацию по всем перечисленным признакам сразу для всех видов контроля невозможно.

Классификация по наиболее важным признакам дана для конкретных методов в соответствующих главах книги.

Из перечисленных десяти видов контроля для сварных соединений находят достаточно широкое промышленное применение только пять: радиационный, акустический (ультразвуковой), магнитный, капиллярный и течеискусием. Остальные пять видов пока применяют на практике незначительно (см. приложение 6).

Обоснование и подробная расшифровка всех данных приложения 6 приведены в соответствующих главах учебного пособия.

* Люминесценция (от лат. *luminas* — свет) — холодное свечение вещества. В зависимости от причины свечения различают фото-, хемо-, электро-, термо-, трибо-, кристаллолюминесценцию. В свою очередь фотолуминесценция, т. е. свечение под действием света, может быть двух видов: флуоресценция и фосфоресценция. Флуоресценция (от лат. *fluor* — течение) — свечение светом большей длины волны, чем свет источника, при коротком времени затухания (10^{-8} — 10^{-6} с). Фосфоресценция характеризуется большим временем затухания.

В настоящее время при контроле сварных соединений и изделий применяют в той или иной мере все описанные выше способы контроля качества. Однако ни один из них не универсален. Поэтому важен не только правильный выбор метода контроля, но и комбинирование ряда методов, сочетание неразрушающих и разрушающих испытаний. В табл. 1.5 приведен примерный перечень основных преимуществ и недостатков разрушающих и неразрушающих методов контроля.

Таблица 1.5

Сравнительные особенности разрушающих
и неразрушающих методов контроля

РК-разрушающие методы контроля	НРК — неразрушающие методы контроля
Преимущества 1. Испытания непосредственно направлены на измерение прочности или эксплуатационной надежности; они имитируют одно или несколько предельных состояний. Корреляция между измерениями и эксплуатационными свойствами материалов обычно тесная и не вызывает разногласий 2. Измеряют разрушающие нагрузки или сроки службы до разрушения (отказа)	Недостатки 1. Косвенно оценивают или измеряют свойства, не имеющие непосредственного значения при эксплуатации. Необходимы специальные исследования для установления корреляционной связи между результатами НРК и эксплуатационной надежностью или прочностью. Там, где связь не доказана, назначение норм для оценки результатов контроля затруднено 2. Испытания обычно только качественные или альтернативные (годен — негоден)
Недостатки 1. Испытания проводят на образцах, а не на объектах, фактически применяемых в эксплуатации 2. Испытания можно проводить только выборочно — на части изделий из партии, а качество от детали к детали может меняться 3. При единичном испытании определяют только одно или несколько свойств, влияющих на надежность изделия 4. Мало применимы в условиях эксплуатации без прекращения работы 5. Влияние эксплуатации может измеряться только при выборочном испытании серий изделий, проработавших определенное время 6. Стоимость большого объема испытаний и расход дорогостоящих материалов высокие 7. Механическая обработка образцов трудоемка, требует большой затраты времени высококвалифицированных рабочих	Преимущества 1. Испытания проводят непосредственно на изделиях и на его опасных участках 2. Испытания можно проводить на любом изделии из партии, даже на всех, если это экономически обоснованно 3. Можно применять комплекс методов, выявляющих различные свойства материала или соединения 4. Применимы в установках без прекращения работы 5. Повторный контроль одних и тех же изделий или стыков позволяет выявлять влияние эксплуатации 6. Изделия из дорогостоящих материалов не разрушают 7. Предварительная обработка изделий, время испытаний и их стоимость обычно значительно меньше, чем при разрушающем контроле

1.3.3. Оценка чувствительности методов

Чувствительность к обнаружению дефектов для каждого метода контроля измеряют по-разному, и она может колебаться в широких пределах в зависимости от ряда факторов: методов, средств и условий контроля; конструкций (типа, размеров, формы) и материалов, используемых в соединении; технико-экономических требований к соединениям.

Целесообразно иметь в виду определения чувствительности, единые для всех неразрушающих методов контроля (примеры см. в приложении 6).

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, обнаруживаемого в контролируемом сварном соединении. Определяется на основании сравнения результатов дефектоскопии и вскрытия реальных соединений с дефектами.

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

Условную чувствительность определяют только при ультразвуковом контроле, где она введена в связи с трудностью выполнения эталонных плоскодонных отверстий, а также в связи с тем, что часть серийно выпускаемой аппаратуры не имеет устройств (аттенюаторов) для измерения амплитуд эхо-сигналов от дефектов.

Для количественной оценки результатов дефектоскопии требуется четкое представление о рациональных границах чувствительности каждого метода. В ряде случаев, особенно для целей приемочного контроля, необходимо также знать достоверность дефектоскопической информации, т. е. связь ее с наличием реальных дефектов в сварных соединениях.

Отнюдь не всегда следует стремиться к самой высокой чувствительности контроля — это связано, как правило, с возрастанием уровня помех.

В то же время для обеспечения требуемой чувствительности важно, чтобы сварное соединение было спроектировано «дефектоскопичным», т. е. пригодным для контролирования. В понятие дефектоскопичности (по аналогии с технологичностью) входит: доступность соединения для контроля, качество поверхности, учет влияния структуры металла, возможность выявления характерных дефектов и т. п. Самые чувствительные приборы и современная техника дефектоскопии бесполезны, если их нельзя рационально использовать из-за специфических недостатков конструкции стыка или несовершенства сварочной технологии. Например, слишком большое усиление, бугристость или чешуйчатость шва сводят на нет или ограничивают возможности магнитографии. Брызги в зоне шва при сварке в среде углекислого газа не дают возможности применять ультразвуковой контроль и т. п.

Изложенные выше основные характеристики и особенности применения различных методов контроля облегчают их выбор для оценки качества сварных соединений. Главными критериями при этом должны быть: выявляемость наиболее опасных дефектов данным методом, стоимость и производительность контроля.

Во многих случаях ни один из имеющихся методов не позволяет оптимизировать все три критерия одновременно. Тогда применяют комплексный контроль — сочетание в том или ином объеме различных методов. Оптимальным будет такое их сочетание, которое обеспечивает достаточно высокое качество соединений при минимальных затратах и высокой производительности контроля.

КОНТРОЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ И ВНЕШНИЙ ОСМОТР СОЕДИНЕНИЙ

2.1. КОНТРОЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

2.1.1. Контроль исходных материалов

Качество сварки можно обеспечить при условии, если качество исходных материалов (основного металла, электродов, сварочной проволоки, флюсов, защитных газов и т. п.) удовлетворяет предъявляемым к ним требованиям. Прежде всего устанавливают соответствие сертификатных данных на все исходные материалы данным, требуемым согласно технологическому процессу сварки конструкций. Затем осматривают материалы и дополнительно проверяют их качество в соответствии с нормативной документацией.

Основной металл в виде литых заготовок проверяют на наличие пор, усадочных раковин и трещин. Особое внимание обращают на зоны, подлежащие сварке. Прокат проверяют на наличие расслоений и на неравномерность распределения примесей, особенно серы, по сечению листов или профилей. Последнее выявляют способом Баумана по отпечатку шлифа, на котором участки с повышенным содержанием серы имеют темный цвет. Возможны и другие пробы, зависящие от марки металла.

Электроды проверяют на равномерность толщины покрытия, на наличие в нем трещин и других механических повреждений. Выполняют пробную сварку с целью установить характер плавления электродного стержня и покрытия, легкость отделения шлака и качество формирования сварного шва (жидкотекучесть расплавленного металла, разбрызгивание и наличие внешних дефектов). Электроды, предназначенные для сварки высокопрочных сталей, проверяют с помощью специальных проб на содержание водорода в наплавленном металле.

Сварочную проволоку проверяют на чистоту поверхности, наличие покрытий, нежелательных для заданного технологического процесса сварки, расслоений и закатов на ее поверхности. Выполняют пробную сварку вместе с соответствующим флюсом или защитным газом для установления качества материалов по показателям, упомянутым выше в отношении электродов.

Флюсы проверяют на величину и равномерность размера, granulацию частиц, на наличие в нем грязи и инородных включений. Проверяют также влажность, стабилизирующие свойства флюсов и т. д.

Защитные газы проверяют на наличие вредных примесей и влаги. Последнюю определяют по температуре точки росы.

Свариваемость существенно влияет на качество изделий. Проверка исходных материалов на свариваемость должна предшествовать принятию решения об использовании тех или иных материалов в сварной конструкции. В соответствии со сказанным свариваемость контролируют в двух случаях: 1) при выборе материалов и разработке технологии сварки, т. е. при подготовке производства на стадии проекта; 2) при запуске материалов в производственный цикл, т. е. при технологической подготовке производства. Вторая проверка связана с возможными отклонениями плавок основного металла, проволоки, а также партий электродов и флюсов от сертификатных значений. Эти отклонения могут резко ухудшить свариваемость.

Методы проверки свариваемости материалов, в том числе на склонность к образованию горячих трещин, обычно связаны с использованием механических испытаний. Поэтому эти методы описаны в гл. IX.

2.1.2. Контроль оборудования

Предупредительный контроль. Получение высококачественного сварного соединения определяется рядом факторов, приведенных на схеме 1.1. Если обеспечить необходимые свойства и высокое качество исходных материалов, то решающими будут надежность оборудования и аппаратуры и квалификация рабочего-оператора. Технический уровень, надежность и состояние оборудования следует поддерживать в заданных пределах. Необходимо соблюдать график технического обслуживания оборудования и требования соответствующих инструкций.

При высокой квалификации сварщика можно обойтись простым, но высоконадежным оборудованием. Контроль качества соединений в этом случае будет завершающей операцией и позволит косвенно влиять на надежность получаемого соединения. Таким образом, мы имеем дело с предупредительным контролем оборудования и качества исходных материалов и в основном с приемочным контролем готовых изделий. Контроль в данном случае может быть главным образом пассивным.

Наряду с приемочным контролем, весьма эффективно применение автоматизированного управления качеством в процессе сварки, что позволяет использовать операторов со сравнительно низкой квалификацией. Тогда обеспечивается активный контроль процесса, предусматривающий: поддержание в оптимальных пределах всех параметров режима (программирование по параметрам); обратную связь от качества получаемого шва к параметрам режима (слежение по качеству).

Эти же функции в простейшем случае осуществляются постоянно самим сварщиком.

Автоматизированное управление качеством. Автоматизированный контроль с обратной связью применяют главным образом в тех случаях, когда значительно возрастают скорости процессов или требо-

вания к качеству соединений резко увеличиваются. Кроме того, в ряде случаев присутствие оператора нежелательно или даже невозможно из-за особых условий производства (высокая температура, вредная среда, радиация и т. д.). Тогда все колебания параметров режима в процессе сварки, а также технологические и конструктивные возмущения должны обрабатываться с помощью систем автоматического программного регулирования и управления — АПУ (схема 2.1). На схеме обозначено: $U_{\text{сети}}$ — напряжение сети; $I_{\text{св}}$ — сварочный ток; $U_{\text{св}}$ — напряжение дуги; $v_{\text{св}}$ — скорость сварки; v_e — скорость подачи электрода; $P_{\text{св}}$ — давление сварки; $A_{\text{колеб}}$ — амплитуда колебаний электрода.

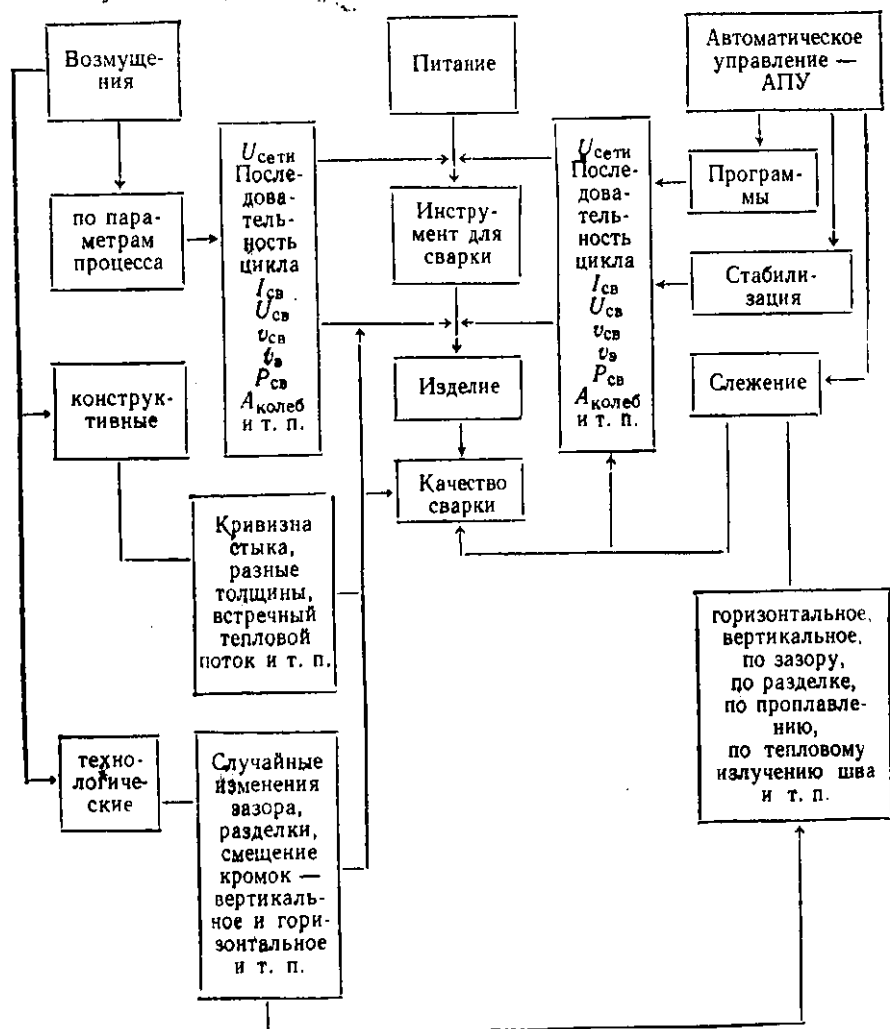


Схема 2.1

Стабилизирующие, программные и следящие системы должны обеспечить не только выполнение соединений высокого качества, но за счет автоматизированных обратных связей гарантировать также его стабильность. При этих условиях приемочный контроль готовых соединений может быть сведен до минимума.

Однако создание сложных сварочных автоматов, снабженных системами АПУ и дорогостоящий контроль, оправдывается только в том случае, если изделие исключительно ответственное или если сумма затрат на разработку и эксплуатацию автоматов мала по сравнению со стоимостью изделия и достаточно быстро окупается. Причем, определяя затраты, необходимо учитывать возможные последствия выхода сварного изделия из строя, т. е. так называемый интегральный ущерб (гл. X).

Автоматизация процессов вызывает усложнение схем управления сварочным оборудованием и уменьшение надежности аппаратуры. Для того чтобы наглядно представить изменение надежности оборудования вследствие его усложнения, ниже дан пример оценки надежности. Пример относится к условиям высококачественной аргоно-дуговой сварки неповоротных стыков труб, когда необходимо программировать режим сварки, применять системы стабилизации и слежения и т. п.

Оценка надежности оборудования. Из теории надежности известно, что в период нормальной эксплуатации оборудования распределение $P(t)$ времени его безотказной работы подчиняется экспоненциальному закону, имеющему вид:

$$P(t) = e^{-\lambda t},$$

причем $\lambda(t) = \text{const} = \Lambda$; $T_{\text{ор}} = 1/\Lambda$,

где $\Lambda = \sum_{i=1}^m n_i \lambda_i$ — суммарная интенсивность отказов; n — число элементов в системе; m — число групп; λ_i — интенсивность отказов отдельных элементов, входящих в сварочный агрегат.

При известной величине интенсивности отказов λ легко определяют основные параметры надежности — вероятность безотказной работы и наработку на отказ (или до первого отказа) рассматриваемого агрегата. Средние значения интенсивности отказов даны в справочниках или их получают на основе статистических наблюдений. Методическая схема расчета ясна из примера.

Пример 2.1. Определим параметры надежности преобразователя, входящего в систему управления электросварочной установкой. Преобразователь представляет собой блок, состав которого и интенсивность отказов показаны ниже.

Группа элементов	Число элементов	Средняя интенсивность отказов, 1/ч
Электровакуумные приборы . . .	25	$9 \cdot 10^{-4}$
Сопротивления	110	$5 \cdot 10^{-5}$
Конденсаторы	135	$2 \cdot 10^{-5}$
Катушки индуктивности	12	$1,2 \cdot 10^{-4}$
Реле	2	$2,8 \cdot 10^{-4}$

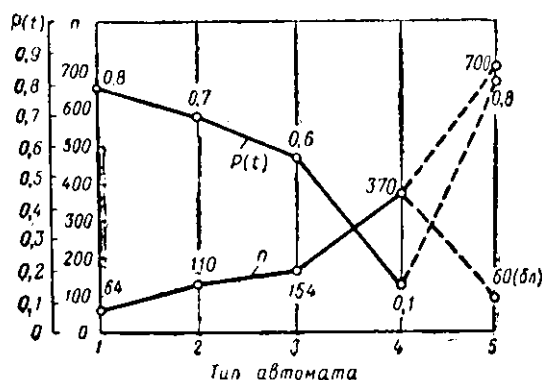


Рис. 2.1. Изменение надежности трубосварочных автоматов в связи с ростом их сложности (числа элементов n). Тип № 5 — блочный вариант с повышенной надежностью (менее 100 блоков)

Определим интенсивность отказов всего блока:

$$\Lambda = \sum_{i=1}^5 n_i \lambda_i = 0,00313 \text{ 1/ч.}$$

Наработка на отказ:

$$T_{\text{ср}} = 1/\Lambda = 1/0,00313 = 320 \text{ ч.}$$

Вероятность безотказной работы:

$$P(t) = \exp(-0,00313t).$$

Задаваясь временем работы преобразователя, можно получить при $t = 10$ ч $P(t) = 0,968$; при $t = 24$ ч $P(t) = 0,926$; при $t = 100$ ч $P(t) = 0,732$; при $t = 1000$ ч $P(t) = 0,043$.



Схема 2.2

По результатам расчетов анализируем число элементов и надежность различных типов трубосварочных автоматов для аргоно-дуговой сварки вольфрамовым электродом, отличающихся разной сложностью (типы 1—5). Можно видеть, что число элементов n растет от десятков до нескольких сотен, а $P(t)$ для типов 1—4 соответственно падает с 0,8 до 0,1 (рис. 2.1). Данные практики подтверждают правильность проведенного расчета. Причем наибольшее влияние на надежность автомата оказывает его аппаратура управления. Повысить ее надежность возможно путем применения высоконадежных унифицированных узлов. Например, применив вместо 700 элементов 60 блоков, как это показано на рис. 2.1. для типа 5, удастся добиться повышения надежности автоматов $P(t)$ до 0,8.

Пути повышения надежности сварочного оборудования при проектировании, изготовлении и эксплуатации приведены на схеме 2.2.

2.1.3. Контроль технологии

Контроль технологии изготовления сварных изделий включает контроль за подготовкой заготовок, исправностью сварочных приспособлений, сборкой узлов под сварку, состоянием сварочных материалов, пригодностью сварочного оборудования и соблюдением установленных режимов при сварке.

Свариваемые заготовки проверяют на правильность их общей формы и размеров и геометрии разделки свариваемых кромок. Последние также контролируют на наличие загрязнений, ржавчины и конденсированной влаги.

У сварочных приспособлений проверяют исправность зажимных устройств, пригодность установочных поверхностей, а также флюсовых, медных или угольных подкладок и теплоотводящих элементов.

В собранных узлах проверяют основные габаритные размеры, величины зазоров в стыках и смещение свариваемых кромок, качество прихваток и наличие выводных планок. При применении предварительного подогрева с помощью термопар и термических карандашей контролируют заданную температуру перед началом и в процессе сварки.

Сварочные материалы проверяют на правильность режимов подготовки (например, для электродов контролируют их прокалку, сушку, время хранения после этой операции и условия хранения).

В сварочных машинах и аппаратах проверяют исправность регулирующих механизмов, наличие приборов, качество и длину токоподводящих проводов, состояние электрических контактов и токоподводящих мундштуков. У контактных машин контролируют форму и состояние поверхности электродов. На установках для сварки в атмосфере защитных газов проверяют исправность газовых редукторов, расходомеров, шлангов, сопел на горелках и газозащитных устройств и т. п.

Режимы сварки контролируют в первую очередь с целью соблюдения параметров процесса (тока, напряжения и скорости сварки в установленных пределах) визуальным наблюдением по приборам

и по внешнему виду сварного шва. При изготовлении ответственных конструкций и при серийном производстве контроль ведут путем непрерывной записи параметров режима с помощью самопишущих приборов.

Каждый технологический вариант изготовления сварных изделий имеет свои конкретные особенности, которые рассмотрены в соответствующих технологических курсах.

2.1.4. Контроль квалификации операторов

Квалификацию операторов необходимо проверять на всех этапах технологического процесса (заготовки, сборки, сварки, контроля). Для этого следует вести периодическую аттестацию и паспортизацию сварщиков, дефектоскопистов и сборщиков. Порядок и сроки паспортизации указаны в соответствующих документах — Правилах испытаний. Крайне необходимо разумное сочетание всех мер, направленных на улучшение качества продукции, а именно: психологическая заинтересованность операторов в качестве их личной работы и работы коллектива; экономическая заинтересованность, основанная на четкой системе поощрений; высокая дисциплина и культура производства и т. п. (гл. VIII и X).

Квалификацию сварщиков проверяют главным образом перед допуском их к выполнению сварочных работ на ответственных конструкциях. Кроме того, в процессе производства сварщики периодически проходят повторные испытания. Для проверки квалификации сварщиков администрация предприятия организует квалификационную комиссию с участием инспектора Госгортехнадзора. Испытания следует проводить по теории и практике сварочных работ.

Проверка практической квалификации обычно включает умение качественно выполнить сварку соответствующего соединения или изделия. Сваренные образцы подвергают после внешнего осмотра механическим испытаниям. Применяют испытания на излом (для оценки степени провара и качества излома), на растяжение, на изгиб и др. Количество сваренных образцов и критерии их оценки регламентированы в Правилах испытаний.

2.2. ВНЕШНИЙ ОСМОТР

Внешним осмотром проверяют качество подготовки и сборки заготовок под сварку, качество выполнения швов в процессе сварки и качество готовых сварных швов. Обычно внешним осмотром контролируют все сварные изделия независимо от применения других видов контроля. Внешний осмотр во многих случаях достаточно информативен, наиболее дешевый и оперативный метод контроля.

Контроль заготовки и сборки. Внешнему осмотру подвергают материал, который может браковаться при наличии вмятин, заусенцев, окалин, окислов, ржавчины и т. п. Определяют качество подготовки кромок под сварку и сборки заготовок: чистоту кромок, соответствие зазоров допускаемым значениям, правильность раз-

делки кромок и т. п. Для этого можно применять специальные шаблоны или универсальный инструмент (рис. 2.2). Строгий контроль заготовки и сборки во многом обеспечивает высокое качество сварки.

Наблюдение за процессом сварки. Наблюдение за процессом сварки позволяет вовремя предотвратить появление дефектов. Визуально контролируют режим сварки, газовую защиту дуги, правильность положения валиков в многослойных швах и т. п. Часто контролер с помощью лупы может проверять первые слои шва, что позволяет предотвратить в дальнейшем появление трещин в шве и околошовной зоне. Качество отдельных слоев шва проверяют также путем сравнения с эталонами. В атомной технике, например, при ремонтной сварке высокоответственных трубопроводов наблюдают за горением дуги с помощью перископов и волоконной оптики. Применяют телевизионные камеры и специальное оборудование для дистанционного наблюдения за дугой.

Осмотр готовых соединений. Прежде всего внешним осмотром невооруженным глазом или в лупу проверяют наличие трещин, подрезов, свищей, прожогов, натеков, непроваров корня и кромок. Некоторые из указанных дефектов недопустимы и подлежат вырубке и повторной заварке. При осмотре также определяют дефекты формы швов, распределение чешуек, характер распределения металла в усиленном шве, величину мениска, проплава и т. п.

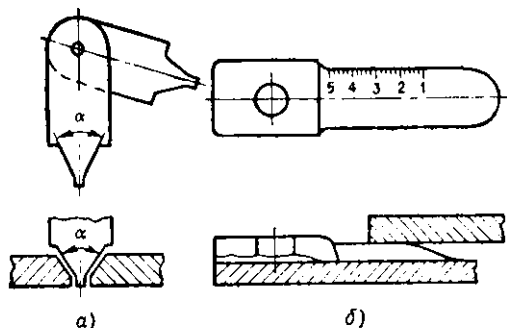


Рис. 2.2. Шаблоны для проверки сборки сварных соединений:

а — стыковых; б — нахлесточных

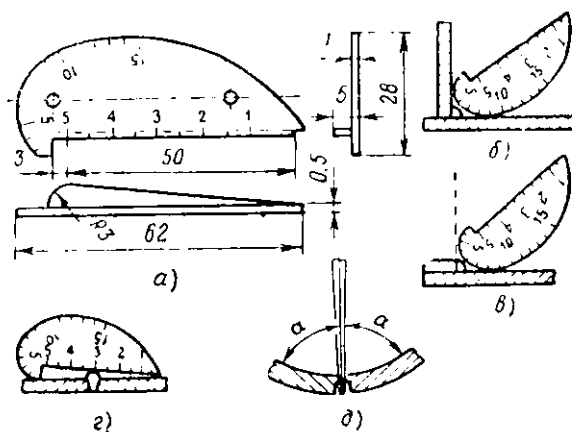


Рис. 2.3. Универсальный шаблон:

а — общий вид; б и в — измерение высоты углового шва; г — измерение высоты стыкового шва; д — измерение зазора

Внешний вид поверхности шва характерен для каждого способа сварки, а также для пространственного положения, в котором производилась сварка. Неравномерная чешуйчатость, разная ширина и высота шва указывают на колебания мощности дуги, частые ее обрывы и неустойчивость горения.

При сварке в защитных газах или вакууме внешняя поверхность швов должна быть гладкая, блестящая, без чешуек и иметь вид плоски расплавленного металла. В сварных швах на титане и других активных материалах контролируют цвет и величину зоны цветов побежалости. Сварные швы принимают по внешнему виду в сравнении с эталонами. Геометрические параметры швов замеряют с помощью шаблонов или измерительных инструментов (рис. 2.3).

Только после внешнего осмотра изделия или соединения подвергают каким-либо физическим методам контроля для определения внутренних дефектов. Тщательный внешний осмотр — обычно весьма простая операция — может, тем не менее, служить высокоэффективным средством предупреждения и обнаружения дефектов.

Глава III

РАДИАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

3.1 КЛАССИФИКАЦИЯ И ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДОВ

3.1.1. Классификация

Любой из известных методов радиационной дефектоскопии предполагает обязательное использование, как минимум, трех основных элементов (рис. 3.1): источника 1 ионизирующего излучения; контролируемого объекта 2 (сварного соединения); детектора 3, регистрирующего дефектоскопическую информацию.

При прохождении через вещество изделия ионизирующего излучения происходит его ослабление — поглощение и рассеяние. Степень ослабления зависит от толщины δ и плотности ρ контролируемого объекта, а также от интенсивности M и энергии E самого излучения. Наличие в веществе внутренних дефектов размером $\Delta\delta$ приводит к резкому изменению интенсивности и энергии выходящего пучка излучения. Иными словами, выходящий пучок несет дефектоскопическую информацию о внутренней структуре контролируемого объекта.

Методы радиационной дефектоскопии различаются в первую очередь применяемыми способами детектирования этой дефектоскопической информации (схема 3.1). Соответственно и различают следующие методы: радиографический, радиоскопический и радиометрический. В то же время сварные соединения и изделия просвечивают с использованием различных видов ионизирующих излучений, классификация которых приведена на схеме 3.2.

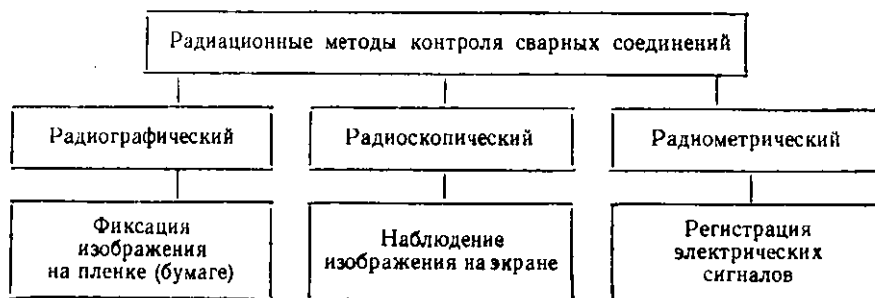


Схема 3.1

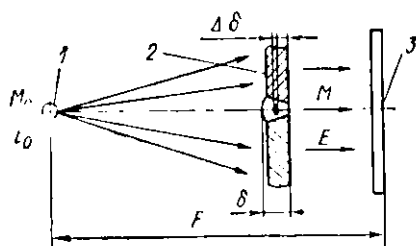


Рис. 3.1. Структурные элементы радиационной дефектоскопии:

1 — источник; 2 — изделие; 3 — детектор

Радиография — метод получения на детекторах статического видимого изображения внутренней структуры изделия, просвечиваемого ионизирующим излучением. На практике этот метод получил наибольшее распространение в связи с его простотой и документальным подтверждением получаемых результатов. В зависимости от используемых детекторов различают пленочную радиографию и ксерорадиографию (электрорадиографию).

В первом случае детектором статического видимого изображения служит фоточувствительная пленка. При ксерорадиографии детектором служат полупроводниковые пластины, а в качестве регистратора используют обычную бумагу.

В зависимости от используемого излучения различают несколько разновидностей радиографии: рентгенографию, гаммаграфию, бетатронную и нейтронную. Каждый из перечисленных методов имеет свою сферу использования, дополняя и обогащая друг друга.

В частности, рентгенографию применяют преимущественно в цеховых и реже в полевых условиях в случаях, когда к контролю качества сварных соединений предъявляются наивысшие требования по чувствительности. Гаммаграфия доминирует при контроле качества сварных соединений, расположенных в труднодоступных местах, в полевых и монтажных условиях. Бетатронную радиографию

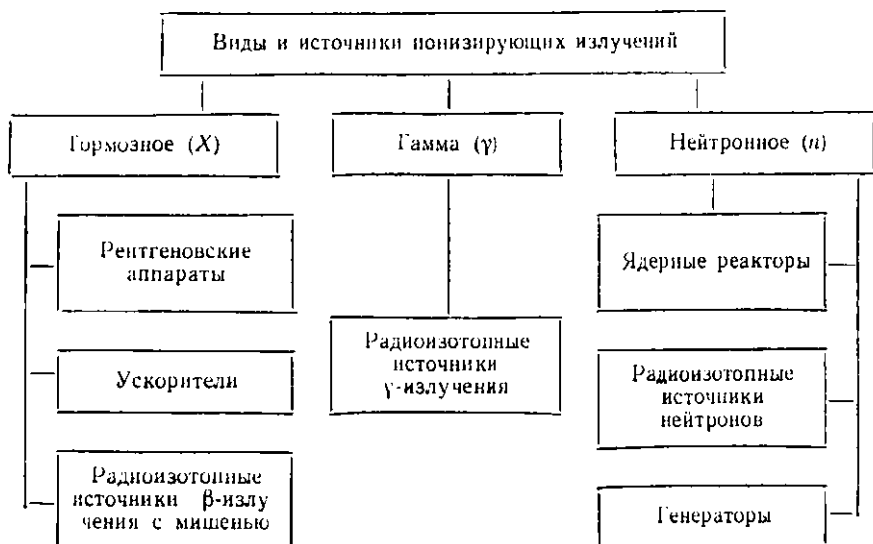


Схема 3.2

используют при дефектоскопии сварных соединений большой толщины преимущественно в цеховых условиях. Нейтронная радиография — единственный метод, обеспечивающий контроль качества сварных соединений тяжелых металлов, водородосодержащих материалов и радиоактивных изделий.

Применяя перечисленные методы, возможно просвечивать стальные сварные соединения толщиной 1—500 мм, обеспечивая при этом чувствительность к выявлению дефектов 1—2%.

Радиоскопия (радиационная интроскопия) — метод получения на экране видимого динамического изображения внутренней структуры изделия, просвечиваемого ионизирующим излучением. Чувствительность этого метода несколько уступает радиографии. К числу его преимуществ относится повышенная достоверность получаемых результатов за счет возможности стереоскопического видения дефектов и рассмотрения сварного соединения под разными углами, «экспрессность» и непрерывность контроля. Применение метода радиационной интроскопии в промышленности непрерывно растет.

Источниками излучения обычно служат рентгеновские аппараты. Значительно реже используют радиоизотопные источники γ -излучения, источники нейтронов и ускорители. Детекторами излучения служат флуороскопические экраны, сцинтилляционные кристаллы, электронно-оптические преобразователи, рентген-видиконы и др. Они обеспечивают преобразование скрытого радиационного изображения изделия в светотеневое или электронное изображение и передачу этих изображений на расстояние посредством оптики или телевидения.

Радиометрическая дефектоскопия — метод получения информации о внутреннем состоянии контролируемого изделия, просвечиваемого ионизирующим излучением, в виде электрических сигналов (различной величины, длительности или количества). Этот метод обеспечивает наибольшие возможности автоматизации процесса контроля и осуществления автоматической обратной связи от контроля к технологическому процессу сварки или изготовления изделия. К числу несомненных преимуществ метода относится возможность проведения непрерывного высокопроизводительного контроля качества изделия, обусловленная высокой быстродействием применяемой аппаратуры. При этом чувствительность метода не уступает радиографии. В практике наибольшее применение для радиометрической дефектоскопии нашли радиоизотопные источники ионизирующих излучений и ускорители, а в качестве детекторов — сцинтилляционные кристаллы и газоразрядные счетчики.

3.1.2. Природа и свойства ионизирующих излучений

При радиационной дефектоскопии сварных соединений в основном применяют тормозное (рентгеновское), нейтронное и γ -излучения.

Тормозное излучение и γ -кванты представляют собой разновидность электромагнитных колебаний, которые по сравнению с видимым светом и ультрафиолетовым излучением имеют как общие волно-

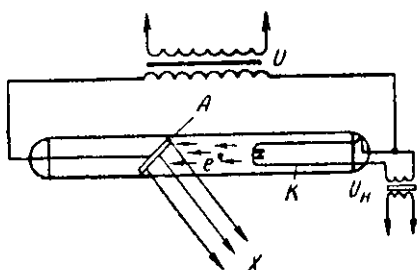


Рис. 3.2. Схема рентгеновской трубки.
 U_H — напряжение накала катода

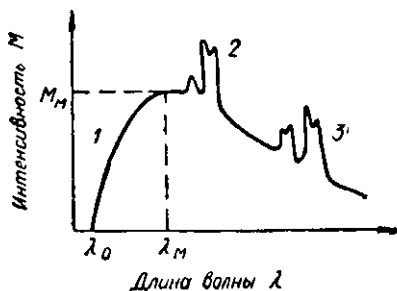


Рис. 3.3. Спектры излучения рентгеновской трубки

1 — непрерывный спектр; 2 — K-серия и 3 — L-серия характеристического излучения

вые свойства, так и специфические особенности, связанные с их корпускулярными (квантовыми) свойствами. В частности, длина волны λ равна: для видимого света $(4+7) \cdot 10^{-7}$ м; ультрафиолетового излучения $10^{-9} + 4 \cdot 10^{-7}$ м; рентгеновского излучения $6 \cdot 10^{-13} + 10^{-9}$ м; γ -квантов $10^{-13} + 4 \cdot 10^{-12}$ м.

Собственная частота колебаний ν , а следовательно, и длина волны λ определяют свойства того или иного вида излучения, распространяющегося в пространстве со скоростью света c ,

$$\lambda = \frac{c}{\nu}.$$

С уменьшением длины волны λ увеличивается энергия E излучения. В связи с этим над волновыми свойствами начинают преобладать корпускулярные свойства частиц, и проникающая способность излучения увеличивается.

Рентгеновское излучение. Источниками рентгеновского излучения служат рентгеновские трубки (рис. 3.2). Трубка представляет собой стеклянный вакуумный баллон с двумя впаянными электродами. Рентгеновское излучение генерируется при торможении на аноде А электронов, испускаемых катодом К. В результате этого возникают характеристическое и тормозное излучения, имеющие соответственно линейчатый и непрерывный спектры (рис. 3.3).

Характеристическое излучение с линейчатым спектром возникает только в том случае, когда быстрые электроны e^+ , взаимодействующие с веществом анода, обладают большой энергией, например, достаточной для обеспечения перехода К-электронов атомов вещества анода на более высокие энергетические уровни. Тогда происходит мгновенный обратный переход электрона, например, с L-оболочки на K-оболочку. Это сопровождается характеристическим излучением с частотой ν , соответствующей ΔE — разности энергий между уровнями E_K и E_L (рис. 3.4):

$$\Delta E = E_K - E_L = h\nu,$$

где h — постоянная Планка ($h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ Дж/с).

Характеристическое излучение используют при рентгеноспектральном и рентгеноструктурном анализе состава вещества. Поскольку каждый элемент периодической системы обладает вполне определенными энергиями связи электронов на оболочках атома, то, следовательно, каждому веществу соответствует вполне определенный линейчатый спектр.

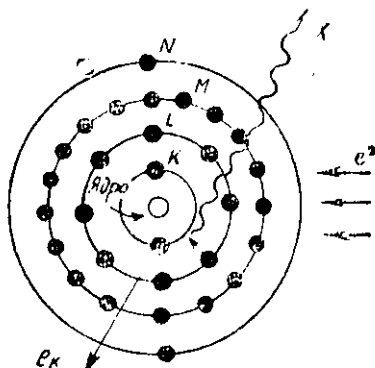


Рис. 3.4. Схема атома

Тормозное излучение с непрерывным (сплошным) спектром возникает в результате «постепенного» торможения в материале анода электронов разных энергий, испускаемых катодом. Кинетическая энергия E электрона у поверхности анода равна

$$E = eU,$$

где e — заряд электрона ($e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл); U — анодное напряжение трубки, В.

В связи с тем, что скорости электронов распределены по закону Максвелла, то эти электроны тормозятся постепенно по толщине анода. Поэтому в рентгеновском спектре излучения, генерируемого трубкой, присутствуют кванты со всевозможными энергиями. Полный переход кинетической энергии электронов E в максимальную энергию рентгеновского излучения $E_{\max}$ происходит при минимальной длине волны, т. е.:

$$E_{\max} = h\nu_0 = h \frac{c}{\lambda_0}.$$

Приравняв E и $E_{\max}$, получим

$$\lambda_0 = \frac{hc}{eU} = \frac{1,24 \cdot 10^{-6}}{U}.$$

Из последнего соотношения следует, что с увеличением анодного напряжения U длина волны λ_0 уменьшается, что соответственно приводит к изменению спектрального состава и повышению максимальной энергии непрерывного спектра (рис. 3.5, а).

Пример 3.1. Анодное напряжение $U = 12,5; 125$ и 1250 кВ. Тогда соответственно минимальная длина волны $\lambda_0 = 10^{-10}, 10^{-11}$ и 10^{-12} м.

Пример 3.2. Средняя скорость электронов v_e , тормозящихся на аноде, определяется в зависимости от напряжения на трубке по формуле

$$\frac{mv_e^2}{2} = eU,$$

где m — масса электрона ($m = 9,108 \cdot 10^{-31}$ кг),

$$\text{откуда } v_e = \sqrt{\frac{2eU}{m}} = 6 \cdot 10^5 \sqrt{U} \text{ м/с.}$$

Если анодное напряжение $U = 10^4$ В, то средняя скорость электронов $v_e = 6 \cdot 10^7$ м/с, что составляет примерно 0,2 скорости света,

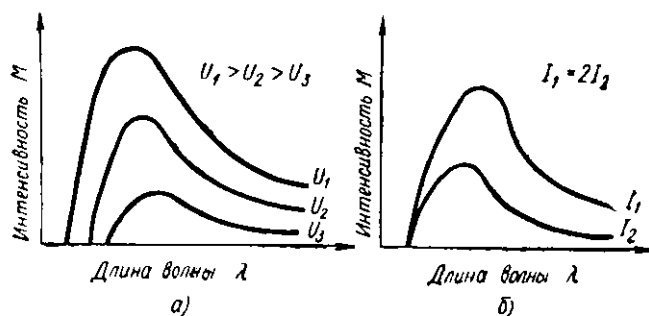


Рис. 3.5. Зависимость интенсивности рентгеновского излучения от длины волны:

а — при изменении напряжения; б — при изменении тока

При изменении тока трубки спектральный состав непрерывного спектра не изменяется, однако его интенсивность уменьшается пропорционально уменьшению значения тока I (рис. 3.5, б). Экспозиционная доза рентгеновского излучения X пропорциональна току трубки и времени просвечивания t :

$$X = It.$$

Для рентгеновской трубки ее к. п. д. пропорционален анодному напряжению U и в зависимости от него составляет 1—2% полной энергии всех электронов, тормозящихся на аноде. Остальная часть энергии превращается в теплоту.

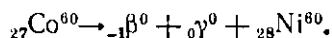
γ -излучение. Это излучение возникает в искусственных или естественных радиоактивных изотопах при их распаде. Одновременно с γ -квантами образуются α -частицы (ядра гелия ${}^4_2\text{He}$) и β -частицы (электроны ${}_{-1}^0\text{e}$).

Пробег α -частиц в веществе мал. В частности, они полностью поглощаются слоем алюминия толщиной 1 мм. Проникающая способность β -частиц несколько больше. Для их полного поглощения необходим слой алюминия толщиной 2—5 мм.

γ -кванты в зависимости от их энергии обладают существенно большей проникающей способностью по сравнению с α - и β -частицами. Вследствие этого они нашли преимущественное использование при контроле качества сварных соединений.

Радиоизотопные источники излучения получают либо при облучении неактивных заготовок в нейтронных потоках ядерного реактора (например, $\text{Co } 60$ и $\text{Ir } 192$) или за счет разделения остаточных продуктов ядерного реактора (например $\text{Cs } 137$ и $\text{Sr } 90$).

Схема распада радиоактивного изотопа может быть показана на примере $\text{Co } 60$:



Цифры слева внизу указывают число электронов в оболочке атома (атомный номер), цифры вверху — массовое число (атомный вес).

Основной закон радиоактивного распада. Отношение числа распавшихся за единицу времени атомов dN/dt к их общему числу N — величина постоянная, называемая вероятностью распада ω :

$$dN/dt \cdot 1/N = -\omega \text{ или } dN/N = -\omega dt.$$

Интегрируя это уравнение по t в пределах от $t = 0$ до $t = t$ получаем экспоненциальную зависимость изменения активности изотопа во времени:

$$\ln N_0 - \ln N(t) = \omega t \text{ или } N(t) = N_0 e^{-\omega t},$$

где $N(t)$ и N_0 — число атомов в данный момент t и при $t = 0$.

Таким образом, постоянная распада является мерой неустойчивости атомов радиоактивного вещества. Характеристикой этого в практике служит период полураспада, т. е. время, в течение которого распадается половина атомов данного изотопа $T_{1/2}$. Если $N = 0,5N_0$, то $N/N_0 = e^{-\omega T_{1/2}} = 0,5$, т. е. $\omega T_{1/2} = \ln 2$, или $T_{1/2} = 0,693/\omega$.

Относительное изменение числа атомов определяется в процессе распада соотношением

$$N/N_0 = e^{-0,693t/T_{1/2}}.$$

Нейтронное излучение. Поток незаряженных элементарных частиц — нейтронов возникает в процессе ядерных реакций при бомбардировке атомных ядер заряженными частицами или γ -квантами, а также в процессе деления ядер.

3.1.3. Взаимодействие ионизирующих излучений с веществом

Взаимодействие β -излучения с веществом. При прохождении β -излучения (электронов) через вещество происходят взаимодействия с атомами поглотителя следующих основных видов:

1) упругое рассеяние электронов на атомных ядрах и электронах ядерных оболочек, в результате которого изменяется лишь направление движения сталкивающихся частиц при сохранении их общей энергии неизменной;

2) неупругое рассеяние электронов на атомных ядрах и электронах атомных оболочек, при котором часть энергии β -частиц передается связанному электрону атома. Вследствие этого, в зависимости от количества переданной энергии, происходит возбуждение или ионизация атомов вещества с испусканием характеристического излучения с линейчатым спектром;

3) торможение электронов в кулоновском поле атомных ядер, в результате которого электроны испускают тормозное (рентгеновское) излучение, имеющее непрерывный спектр.

В радиационной дефектоскопии применяют радиоактивные β -источники с мишенями, в которых преобладает последний из перечисленных процессов взаимодействия.

Взаимодействие рентгеновского и γ -излучения с веществом. При прохождении рентгеновского и γ -излучений через вещество их интенсивность изменяется не только за счет поглощения, но и за счет рассеяния излучения материалом объекта. Этот процесс взаимодействия излучения с веществом сложен и состоит из более чем десятка элементарных процессов взаимодействия. Однако для кван-

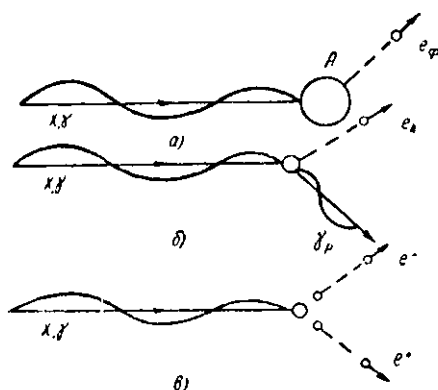


Рис. 3.6. Схемы взаимодействия рентгеновского и γ -излучения с веществом:

а — фотоэффект; б — комптоновское рассеяние; в — процесс образования пар

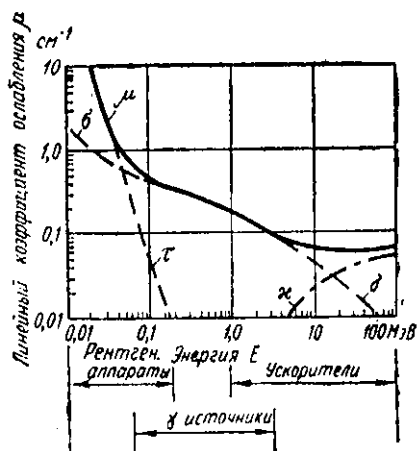


Рис. 3.7. Зависимость линейного коэффициента ослабления от энергии излучения:

μ — общее поглощение; τ — фотоэффект; σ — комптоновское рассеяние; κ — процесс образования пар

тов с энергией 0,01—10 МэВ с достаточной вероятностью происходят три из них: *фотоэлектрическое поглощение (фотоэффект), комптоновское рассеяние и процесс образования пар.*

Количественной характеристикой вероятности взаимодействия рентгеновских и γ -квантов с электронами или атомами вещества служит линейный коэффициент взаимодействия μ . Он характеризуется отношением числа квантов, испытавших акт взаимодействия в единицу времени, к плотности потока падающих квантов. Иными словами, линейный коэффициент взаимодействия определяет изменение интенсивности ионизирующего излучения в результате его прохождения через вещество.

В результате фотоэлектрического взаимодействия (фотоэффекта) с атомом вещества А (рис. 3.6, а) квант исчезает, передавая свою энергию электрону e_{ϕ} . Вследствие этого последний покидает оболочку и вылетает из атома А с энергией, равной разности энергии кванта и энергии связи электрона в атоме. Фотоэффект особенно заметен в тяжелых веществах при облучении их излучением малых энергий. Причем его линейный коэффициент взаимодействия τ растет, как Z^k с ростом заряда ядра Z (где $k = 4 \div 5$), и падает, как $1/E^3$ (при $E \leq 0,2$ МэВ) или $1/E$ при ($E > 0,5$ МэВ) с ростом энергии E (рис. 3.7).

В результате комптоновского рассеяния квант γ_p и электрон атома e_k при взаимодействии отклоняются, а энергия кванта изменяется (рис. 3.6, б). При этом кванты могут рассеяться под углами $0-180^\circ$, а электроны под углами $0-90^\circ$ к направлению движения исходного кванта. Линейный коэффициент взаимодействия σ при комптоновском рассеянии пропорционален Z и обратно пропорционален E (рис. 3.7).

В результате процесса образования пар (рис. 3.6, в) γ -квант, взаимодействуя с атомом, может образовать пару электрон e^- — позитрон e^+ в поле ядра или атомного электрона; при этом сам квант исчезает. Минимальная энергия кванта для образования пары электрон—позитрон должна быть по меньшей мере равна сумме энергий электрона и позитрона, т. е. $\sim 1,022$ МэВ. Именно поэтому для энергии меньше 1 МэВ процесс образования пар не происходит. Он играет существенную роль при больших энергиях только для тяжелых элементов, так как его линейный коэффициент взаимодействия κ растет пропорционально Z^2 и E с ростом заряда ядра Z и энергии E (рис. 3.7).

Для любого вещества можно выделить три энергетические области, в каждой из которых преобладает один из трех рассмотренных процессов (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Энергетические области преобладания процессов взаимодействия рентгеновского и γ -излучений с веществом

Вещество	Диапазон энергий E					
	при фотоэффекте		при комптоновском рассеянии		при образовании пар	
	Дж	кэВ	Дж	кэВ	Дж	кэВ
Воздух	$< 3,2 \times 10^{-16}$	< 20	$3,2 \cdot 10^{-15} + 3,7 \cdot 10^{-12}$	$20 + 23\,000$	$> 3,7 \times 10^{-15}$	$> 23\,000$
Алюминий	$< 8,0 \times 10^{-15}$	< 50	$8,0 \cdot 10^{-15} + 2,4 \cdot 10^{-12}$	$50 + 15\,000$	$> 2,4 \times 10^{-12}$	$> 15\,000$
Железо	$< 1,9 \times 10^{-14}$	< 120	$1,9 \cdot 10^{-14} + 1,5 \cdot 10^{-12}$	$120 + 9500$	$> 1,5 \times 10^{-12}$	> 9500
Свинец	$< 8,0 \times 10^{-14}$	< 500	$8,0 \cdot 10^{-14} + 7,5 \cdot 10^{-12}$	$500 + 4700$	$> 7,5 \times 10^{-12}$	> 4700

Линейный коэффициент ослабления μ (см^{-1}). Этот коэффициент представляет собой сумму линейных коэффициентов взаимодействия, определяемых фотоэффектом, комптоновским рассеянием и процессом образования пар:

$$\mu = \tau + \sigma + \kappa.$$

Таким образом, μ характеризует относительное уменьшение интенсивности излучения после прохождения им поглотителя толщиной 1 см. Величина, обратная μ , называется длиной свободного пробега квантов в веществе.

В области низкоэнергетического рентгеновского и γ -излучений значение μ определяется в основном фотоэффектом и убывает с ростом энергии. В области энергии γ -излучения до 1 МэВ, где основным процессом взаимодействия является комптоновское рассеяние, μ мало зависит от энергии. В диапазоне энергии тормозного излучения ускорителей и γ -излучения свыше 1 МэВ μ увеличивается с ростом энергии (рис. 3.7). Воздействие фотоэффекта и процесса

образования пар на μ сильнее в веществах с большим значением Z . В области энергий, где существенно только комптоновское рассеяние, μ мало зависит от Z (табл. 3.2).

Таблица 3.2

Линейные коэффициенты ослабления μ , см^{-1}

Энергия квантов E		Алю- миний $Z = 13$	Железо $Z = 26$	Воль- фрам $Z = 74$	Свинец $Z = 82$	Уран $Z = 92$
Дж	МэВ					
$1,6 \cdot 10^{-15}$	0,01	69,440	1328,30	1908,60	1406,60	3366,00
$1,6 \cdot 10^{-14}$	0,1	0,421	2,617	80,87	60,35	91,88
$1,06 \cdot 10^{-13}$	0,661 *	0,194	0,573	1,835	1,213	2,850
$1,6 \cdot 10^{-13}$	1,0	0,165	0,467	1,227	0,771	1,709
$2,0 \cdot 10^{-13}$	1,25 **	0,150	0,424	1,087	0,674	1,471
$6,4 \cdot 10^{-13}$	4,0	0,084	0,260	0,748	0,472	0,992
$1,6 \cdot 10^{-12}$	10,0	0,062	0,234	0,897	0,554	1,166

Изоотоп Cs 137. ** Изоотоп Co 60.

Для моноэнергетических источников γ -излучения, таких как Co 60 и Cs 137, μ не зависит от толщины поглотителя (рис. 3.8, а). Для γ -источников со сложным спектром, таких как Ir 192 и Tm 170, а также для радиоизотопных источников тормозного излучения, таких как (Tl 204 + Be) и (Sr 90 + Be), μ зависит от толщины. В этом случае мягкие компоненты спектра, проходя через вещество, поглощаются быстрее жестких (рис. 3.8, б). Аналогичная картина наблюдается для рентгеновского излучения и тормозного излучения ускорителей.

Во всех случаях, чем меньше энергия излучения, тем круче зависимость μ от толщины поглотителя. Так как для ускорителей ве-

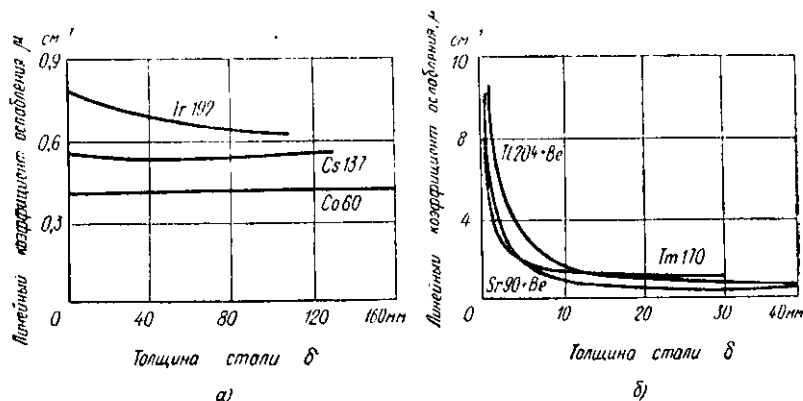


Рис. 3.8. Зависимость линейного коэффициента ослабления от толщины стального поглотителя:

а — для Ir 192, Cs 137, Co 60; б — для Tm 170, Sr 90 + Be, Tl 204 + Be

личина μ с ростом энергии увеличивается (рис. 3.7), то проникающая способность излучения падает. Поэтому целесообразно использовать при контроле тяжелых материалов (медь, сталь и т. д.) тормозное излучение с энергией не выше 30 МэВ, а для просвечивания легких материалов (алюминий, магний, титан и т. д.) — с энергией не выше 50 МэВ. Дальнейшее повышение энергии приводит к незначительному изменению μ , однако масса и размеры ускорителей существенно возрастают.

В практике радиационной дефектоскопии принято рассматривать излучение со сложным или непрерывным спектром в качестве моноэнергетического излучения с некоторой эффективной энергией $E_{эф}$ и эффективным линейным коэффициентом ослабления $\mu_{эф}$. Величины $E_{эф}$ и $\mu_{эф}$ определяют исходя из аналогичного ослабления в поглотителе обоих видов излучения.

Значения $\mu_{эф}$ для немоноэнергетического излучения со сложным или непрерывным спектром могут быть определены экспериментально по схеме, приведенной на рис. 3.9. Результаты измерений для вычисления $\mu_{эф}$ подставляют в уравнение:

$$\mu_{эф} = - \frac{\ln \frac{M_{п}}{M_0}}{\delta}.$$

Пример 3.3. Интенсивность излучения после прохождения через стальной поглотитель толщиной $\delta = 1$ см уменьшилась в 2 раза, т. е. $M_{п}/M_0 = 2$. Тогда $\mu_{эф} = -0,693/1 = 0,693 \text{ см}^{-1}$.

В практике дефектоскопии, особенно в радиометрической дефектоскопии, пользуются понятием массового коэффициента ослабления, в связи с тем, что этот коэффициент характеризует одновременно зависимость как от плотности вещества, т. е. его атомного номера, так и от энергии рентгеновского или γ -излучения.

Массовый коэффициент ослабления $\bar{\mu}$ (см²/г). Этот коэффициент определяют по соотношению

$$\bar{\mu} = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\tau}{\rho} + \frac{\sigma}{\rho} + \frac{\kappa}{\rho},$$

где ρ — плотность вещества, г/см³.

Для рентгеновского излучения справедлива следующая зависимость между массовым коэффициентом ослабления, длиной волны и атомным номером Z материала:

$$\bar{\mu} = a\lambda^3 Z^3,$$

где a — коэффициент пропорциональности.

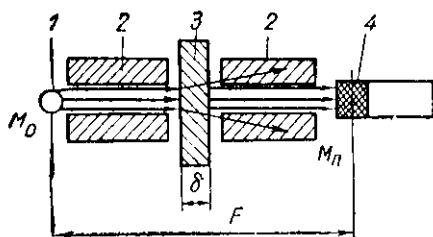


Рис. 3.9. Геометрия «узкого» пучка излучения:

1 — источник; 2 — коллиматор; 3 — поглотитель; 4 — детектор

Закон ослабления узкого пучка рентгеновского и γ -излучения. Поглощенное излучение при его прохождении через тонкий слой вещества пропорционально толщине этого слоя δ и постоянной поглощения, которая характеризуется линейным коэффициентом ослабления излучения μ .

Аналогично закону радиоактивного распада можно записать

$$M_n = M_0 e^{-\mu \delta},$$

где M_0 и M_n — интенсивности узкого пучка излучения, падающего и прошедшего через вещество, соответственно, при M_0 на расстоянии 1 м.

Если точечный источник излучения удаляется от детектора на расстояние F , то интенсивность узкого пучка излучения, прошедшего через вещество, уменьшается обратно пропорционально квадрату этого расстояния так, что

$$M_n = \frac{M_0 e^{-\mu \delta}}{F^2}.$$

Ослабление широкого пучка рентгеновского и γ -излучения. Все приведенные соображения по прохождению излучения через вещество справедливы для геометрии узкого пучка (рис. 3.9). В этом случае можно полагать, что всякий квант, отклонившийся из узкого пучка, полностью объектом поглощается и детектором не регистрируется. Условия геометрии узкого пучка выполняются, если диаметр поля облучения не превышает одной-двух длин свободного пробега квантов в веществе, что для реальных условий контроля явно недостаточно.

В реальных условиях радиационной дефектоскопии используется геометрия широкого пучка. При этом на детектор попадают не только те кванты, направление движения которых совпадает с первичным

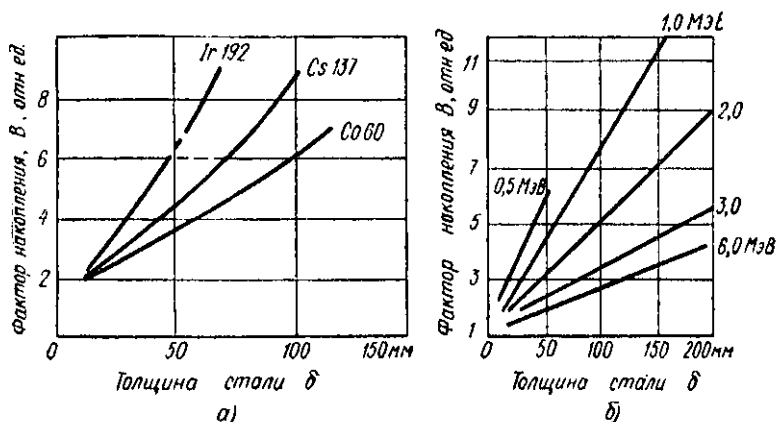


Рис. 3.10. Зависимость фактора накопления от толщины стали:
а — для радиоизотопных источников излучения; б — для тормозного излучения бетатронов

пучком, но и кванты, испытавшие многократное рассеяние в поглотителе.

Вклад рассеянного излучения в общую интенсивность прошедшего излучения можно оценить с помощью дозового фактора накопления B , определяемого отношением суммы интенсивностей нерассеянного M_n и рассеянного M_p излучения к интенсивности нерассеянного излучения:

$$B = \frac{M_n + M_p}{M_n}.$$

На рис. 3.10 приведена зависимость дозового фактора накопления от толщины стальной пластины для различных источников излучения. Из анализа кривых следует, что с ростом энергии излучения при прочих равных условиях величина фактора накопления падает, а с ростом толщины — увеличивается. Значения B для моноэнергетического излучения в настоящее время хорошо известны (табл. 3.3).

Значения $B_{эф}$ для немоноэнергетического излучения могут быть определены экспериментально. При этом выполняют два замера по схеме рис. 3.9: один с коллиматорами для измерения M_n , другой

Таблица 3.3

Дозовые факторы накопления B для точечного изотропного источника в бесконечной среде (δ — толщина материала, см)

Энергия квантов E		Дозовые факторы накопления B					
		для алюминия при $\mu\delta$			для железа при $\mu\delta$		
		1	4	15	1	4	15
Дж	МэВ						
$8,0 \cdot 10^{-14}$	0,5	2,37	9,47	80,8	1,98	5,98	35,4
$1,06 \cdot 10^{-13}$	0,661 *	2,18	8,16	66,4	1,94	5,83	36,4
$1,6 \cdot 10^{-13}$	1,0	2,02	6,57	37,9	1,87	5,39	28,3
$2,0 \cdot 10^{-13}$	1,25 **	1,92	5,90	29,8	1,84	5,05	24,8
$6,4 \cdot 10^{-13}$	4,0	1,53	3,22	10,1	1,45	3,03	11,2
$1,6 \cdot 10^{-12}$	10,0	1,28	2,12	5,63	1,20	1,95	7,54

Энергия квантов E		Дозовые факторы накопления B								
		для вольфрама при $\mu\delta$			для свинца при $\mu\delta$			для урана при $\mu\delta$		
		1	4	15	1	4	15	1	4	15
Дж	МэВ									
$8,0 \cdot 10^{-14}$	0,5	1,28	1,84	3,12	1,24	1,69	2,65	1,17	1,48	2,08
$1,06 \cdot 10^{-13}$	0,661 *	—	—	—	1,33	1,92	3,42	—	—	—
$1,6 \cdot 10^{-13}$	1,0	1,44	2,57	6,25	1,37	2,26	4,81	1,31	1,98	3,67
$2,0 \cdot 10^{-13}$	1,25 **	—	—	—	1,38	2,41	5,40	—	—	—
$6,4 \cdot 10^{-13}$	4,0	1,29	2,41	12,00	1,27	2,25	9,80	1,24	2,09	8,01
$1,6 \cdot 10^{-12}$	10,0	1,11	1,64	14,00	1,11	1,58	12,50	1,09	1,51	10,50

* Изотоп Cs 137; ** Изотоп Co 60.

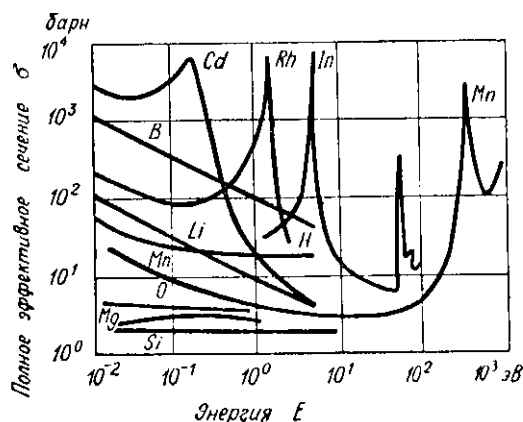
без коллиматоров для измерения ($M_n + M_p$). Затем, используя предыдущую формулу, определяют величину $B_{эф}$.

Пример 3.4. При измерении по схеме 3.9 с коллиматорами $M_n = 10$ делений шкалы интенсиметра; без коллиматоров: $M_n + M_p = 30$ делений. Подставляя эти значения в формулу для определения $B_{эф}$, получим $B_{эф} = 30/10 = 3$.

Обратно рассеянное излучение (альbedo излучения). При многократном рассеянии квантов в контролируемом объекте и поглотителе, расположенном за объектом, часть рассеянного излучения выходит обратно из поглотителя и воздействует на детектор и обслуживающий персонал. С ростом атомного номера вещества отражающей среды величина обратно рассеянного излучения падает примерно пропорционально Z^2 . Она также возрастает при косом падении излучения на объект примерно пропорционально $1/\cos \theta$, где θ — угол падения излучения. Именно поэтому при радиационной дефектоскопии следует избегать просвечивания сварных швов, расположенных на основаниях из легких материалов (бетон, алюминий и т. п.). Это приводит к существенному ухудшению чувствительности контроля и увеличивает интенсивность излучения, воздействующего на персонал. При использовании в цехах защитных камер без дополнительных потолков обратно рассеянное излучение может создать фон на смежных участках. Дозы этого фона могут превышать предельно допустимые для работников, которые по роду своей деятельности не связаны с ионизирующими излучениями.

Взаимодействие нейтронов с веществами. В зависимости от величины кинетической энергии нейтронов их можно укрупненно разделить на следующие группы: холодные с $E_k < 0,01$ эВ; тепловые с $E_k = 0,01 \div 0,3$ эВ; надтепловые с $E_k = 0,3 \div 10^4$ эВ; быстрые с $E_k = 10^4 \div 2 \cdot 10^7$ эВ.

При прохождении нейтронов через вещество в результате их соударения с ядрами возможны следующие взаимодействия в зависимости от энергии нейтронов: нейтроны рассеиваются на ядрах, не



изменяя природы последних; природа ядер и нейтронов изменяется, при этом образуются α -частицы, γ -кванты, протоны и др., а также происходит процесс деления тяжелых атомов.

Ослабление узкого коллимированного пучка нейтронов тонким слоем вещества толщиной δ происходит по экспоненциальному закону

$$J_n = J_0 e^{-\sigma N \delta},$$

Рис. 3.11. Изменение полных эффективных сечений веществ в зависимости от энергии нейтронов

где J_0 и J_n — плотности потока нейтронов до и после прохождения слоя вещества; σ — полное атомное (микроскопическое) эффективное сечение всех взаимодействий нейтронов с ядрами, барн (1 барн $\equiv 10^{-24}$ см²); N — число ядер в 1 см³.

Произведение $\sigma N = \Sigma$ называют макроскопическим поперечным сечением. Это фактически — линейный коэффициент ослабления потока нейтронов в веществе. Величина, обратная Σ , называется длиной свободного пробега нейтрона в веществе. В общем случае можно утверждать, что эффективные сечения взаимодействия нейтронов с ядрами веществ увеличиваются с понижением энергии нейтронов (рис. 3.11). Именно поэтому в радиационной дефектоскопии нашли преимущественное использование тепловые и надтепловые нейтроны. Из анализа кривых на рис. 3.11 следует, что нейтроны вполне целесообразно использовать при дефектоскопии таких веществ как марганец, бор, кадмий, водород и др. В этих веществах наблюдается резкое изменение σ в зависимости от энергии, что позволяет хорошо выявлять дефекты.

3.1.4. Основные единицы измерения ионизирующих излучений

В радиационной дефектоскопии используют фотометрические единицы при расшифровке результатов радиографического и радиоскопического контроля и единицы измерений ионизирующих излучений при просвечивании изделий.

В качестве фотометрических единиц, применяемых при радиационной интроскопии и радиографии, используют основные единицы по ГОСТ 7932—56 (канделла, люмен, люкс, нит и др.).

В качестве единиц измерения ионизирующих излучений широко применяют единицы излучения по Международной системе СИ (и выпущенного на ее основе ГОСТ 8848—63) и внесистемные единицы (табл. 3.4).

Активность изотопа A определяется числом атомов радиоактивного вещества, распадающихся в единицу времени, т. е. скоростью распада данного изотопа.

Экспозиционная доза X рентгеновского и γ -излучений выражает энергию квантового излучения, преобразованную в кинетическую энергию заряженных частиц в единице массы атмосферного воздуха.

Мощность P экспозиционной дозы рентгеновского и γ -излучения определяется экспозиционной дозой, отнесенной ко времени.

В общем виде мощность экспозиционной дозы (МЭД) излучения, прошедшего через поглотитель толщиной δ , расположенный на расстоянии F от источника, определяется соотношением

$$P = \frac{P_0 e^{-\mu \delta} B}{F^2},$$

где P_0 — МЭД γ -излучения в отсутствие поглотителя А/кг, (Р/с) на расстоянии 1 м от источника.

Основные единицы измерения ионизирующих излучений

Величина	Единицы в системе СИ	Внесистемные единицы	Сотношения между единицами
Энергия E	Джоуль (Дж)	Эрг (эрг) Электронвольт (эВ)	$1 \text{ эрг} = 10^{-7} \text{ Дж}$ $1 \text{ эВ} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ Дж}$
Активность A	Распад в секунду (с^{-1})	Кюри (Ки)	$1 \text{ Ки} = 3,7 \times 10^{10} \text{ с}^{-1}$
Экспозиционная доза X	Джоуль на килограмм (Дж/кг)	Рентген (Р)	$1 \text{ Р} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ Дж/кг}$
Мощность экспозиционной дозы (МЭД) P	Ампер на килограмм (А/кг)	Рентген в секунду (Р/с)	$1 \text{ Р/с} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ А/кг}$
Гамма-эквивалент препарата m	—	Грамм-эквивалент радия (г-экв. радия)	—
Интенсивность излучения M	Ватт на квадратный метр (Вт/м^2)	Эрг на квадратный сантиметр в секунду ($\text{эрг/см}^2 \text{ с}$)	$1 \text{ эрг/см}^2 \text{ с} = 10^{-8} \text{ Вт/м}^2$

Гамма-эквивалент препарата m служит мерой сравнения изотопов по ионизирующему действию их γ -излучений. В качестве эталона выбрано γ -излучение радия, при этом экспериментально установлено, что 1 г радия в равновесии со всеми продуктами распада при платиновом фильтре толщиной 0,5 мм создает на расстоянии 1 см, экспозиционную дозу $2,13 \cdot 10^{-3}$ Кл/кг (8,25 Р). Радиационный выход любого радиоактивного изотопа, создающего такую же мощность экспозиционной дозы γ -излучения, как и 1 г радия при равных условиях измерения называется грамм-эквивалентом радия.

Интенсивностью излучения M называется отношение потока энергии частиц или квантов ионизирующего излучения за некоторый промежуток времени к этому времени.

3.2. ИСТОЧНИКИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ ДЛЯ РАДИАЦИОННОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ

3.2.1. Источники тормозного излучения

Рентгеновские аппараты. Широкое применение в практике радиационной дефектоскопии нашли рентгеновские аппараты двух видов: с постоянной нагрузкой и импульсные. В свою очередь, аппараты с постоянной нагрузкой выпускают двух типов:

1) аппараты-моноблоки, у которых рентгеновская трубка и трансформатор смонтированы в единые блок-трансформаторы, залитые маслом или заполненные газом; они предназначены как для фронтального просвечивания направленным пучком излучения, так и для панорамного просвечивания кольцевым пучком излучения;

2) аппараты кабельного типа, состоящие из самостоятельного генераторного устройства, рентгеновской трубки и пульта управле-

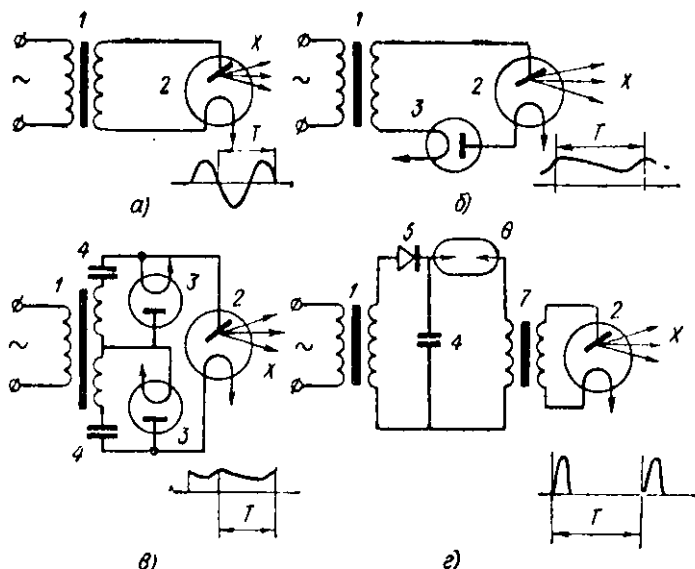


Рис. 3.12. Типовые схемы рентгеновских аппаратов:

1 — трансформатор; 2 — рентгеновская трубка; 3 — диод; 4 — конденсатор; 5 — электронный ключ; 6 — разрядник; 7 — импульсный трансформатор

ния; они предназначены для фронтального и панорамного просвечивания.

К аппаратам 1-го типа относят портативные аппараты для работы в полевых и монтажных условиях (например РУП-60—20—1 и РУП-120—5—1) и стационарные высоковольтные аппараты (например РУП-400—5—1). Аппараты 2-го типа выпускают, как правило, передвижными, они предназначены для цеховых и лабораторных условий (например РУП 150/300—10). Импульсные аппараты в основном используют для работы в условиях стапеля и монтажа в связи с их малой массой и габаритными размерами (например ИРА-1Д, РИНА-2Д). Основные характеристики перечисленных аппаратов приведены в табл. 3.5. В портативных аппаратах-моноблоках используют рентгеновские трубки с неподвижным анодом (см. рис. 3.3) и полуволновую схему без выпрямителя (рис. 3.12, а).

В аппаратах высоковольтных стационарного исполнения используют секционированные рентгеновские трубки, состоящие из катода, промежуточных электродов и полого анода. Применяют также полуволновые схемы без выпрямителя с ваземленным анодом (рис. 3.12, а).

В этих аппаратах на трубку подается ток непосредственно от трансформатора высокого напряжения. Рентгеновская трубка пропускает ток только в одном направлении в течение первого полупериода, а затем в процессе второго полупериода она запирает ток, работая как выпрямитель. Применение подобной схемы сокращает срок службы трубки, но простота устройства аппарата компенсирует этот недостаток.

Основные характеристики некоторых рентгеновских аппаратов и трубок

Аппарат	Рентгеновская трубка	Напря- жение на аноде, кВ	Макс. малый ток на аноде, мА	Размер фокуса, мм	Масса, кг	Напряже- ние сети, В × число фаз	Потреб- ляемая мощ- ность, кВт	Ресурс трубки, ч
РУП-60-20-1	1БПВ-60	10-60	20	3×3	280	~127×1 ~220×1 ~380×1	2,5	400
РУП-120-5-1 (рис. 3.13)	0,4БПМ2-120	50-120	5	2×2	Блок — 45 Пульс — 30	~220×1 ~380×1	2,0	500
РУП-150/300-10	1,5БПВ-7-150 с вынесенным анодом 0,3БПВ-6-150 2,5БПМ-4-250	35-150 70-300	10 2 10	5 0,3-1,4 2,5×2,5	1000	~220×3 ~380×3	5,0	400 300 300
РУП-400-5-1	1,5БПВ-400	250-400	5	5-8	500	~220×1 ~380×1	4,0	400
ИРА-1Д (рис. 3.14)	—	220-280	200 А	2 мм ²	30	—12 ~220×1	40 Вт	20 000 имп
РИНА-2Д	—	До 300	200 А	3	10	~220×1	20 Вт	200 000 имп

Примечание. Буквы в сокращенных названиях обозначают следующие: РУП — рентгеновская установка промышленная; БПВ, БПМ — безопасная промышленная с водяным (или масляным) охлаждением; ИРА — импульсный рентгеновский аппарат; РИНА — рентгеновский импульсный наносекундный аппарат.

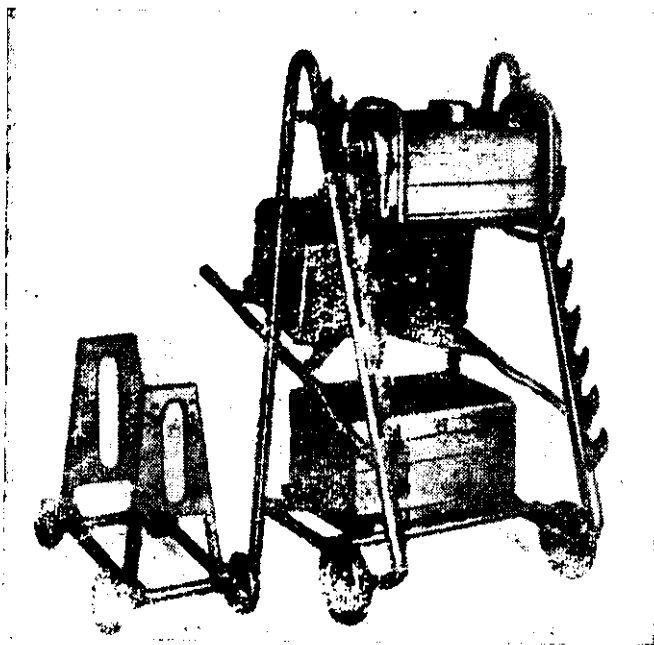


Рис. 3.13. Рентгеновский аппарат РУП-120—5—1

В аппаратах кабельного типа применяют рентгеновские трубки с обычным анодом (см. рис. 3.3) и с вынесенным анодом. Используют полуволновые схемы с выпрямителем (рис. 3.12, б) и схемы удвоения с выпрямителями и конденсаторами (рис. 3.12, в). Применение трубок с вынесенным анодом обеспечивает получение панорамного пучка излучения. Малые размеры фокусного пятна, достигающего диаметра 0,3 мм позволяют увеличить четкость снимков.

В последние годы для радиогрaфии движущихся объектов начали применять рентгеновские трубки с вращающимся анодом, обеспечивающие получение большой кратковременной интенсивности пучка излучения при длительности выдержки не более 5 с.

Использование выпрямителей-кенотронов в схемах питания кабельных рентгеновских аппаратов

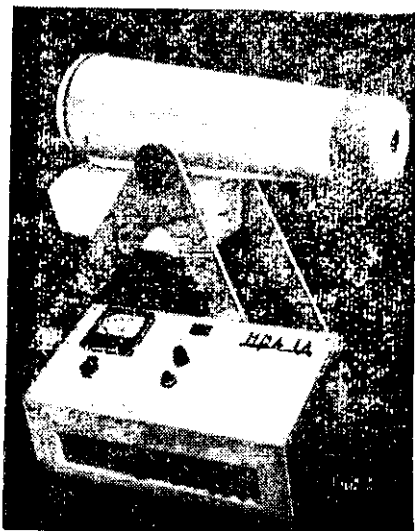


Рис. 3.14. Импульсный рентгеновский аппарат ИРА 1Д

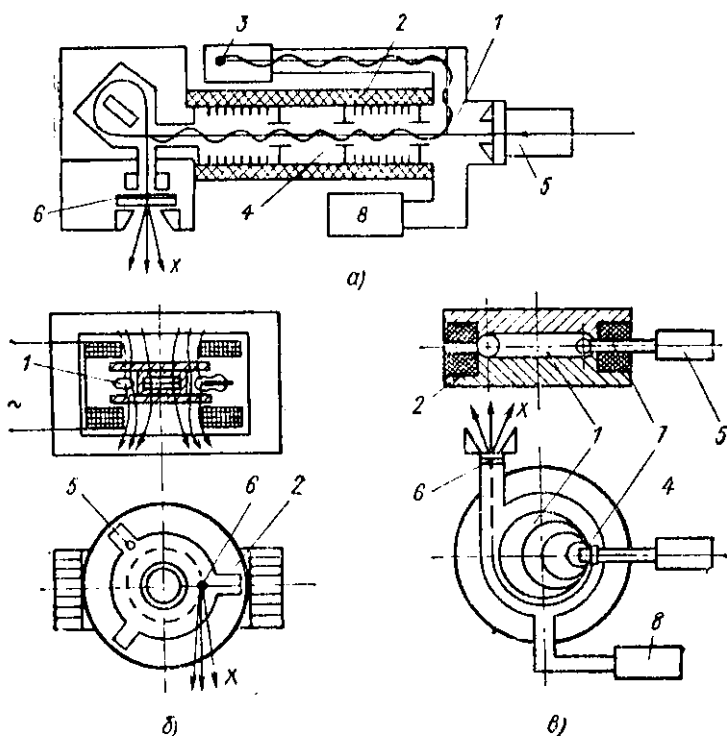


Рис. 3.15. Схемы ускорителей:

1 — камера; 2 — электромагнит; 3 — генератор; 4 — волновод; 5 — электронная пушка; 6 — мишень; 7 — резонатор; 8 — вакуумный насос

позволяет подавать на трубку сглаженное выпрямленное напряжение. Это способствует получению максимальной выходной мощности излучения. Применение схем удваивания (рис. 3.12, в) с двумя кенотронами и двумя конденсаторами позволяет в 2 раза увеличить напряжение на рентгеновской трубке по сравнению с полуволновой схемой, снабженной одним выпрямителем (рис. 3.12, б).

В импульсных аппаратах применяют специальные рентгеновские трубки, выполненные в виде конусного анода и двухдискового катода с отверстиями, concentрично расположенными относительно оси анода. Используют импульсные схемы с разрядником и пик-трансформатором (рис. 3.12, г). Вспышка рентгеновского излучения в импульсном аппарате образуется в рентгеновской трубке 2 под действием короткого импульса высокого напряжения, формируемого с помощью ключа 5 и разрядника 6. Напряжение на трубку прикладывается со вторичной обмотки импульсного пик-трансформатора 7 в момент разрядки дополнительной емкости 4 через его первичную обмотку. Импульсные аппараты находят применение при радиационной дефектоскопии быстротекущих процессов, контроле качества сварных

соединений магистральных трубопроводов, на монтаже и т. п. Частота всплеск в импульсных рентгеновских аппаратах составляет 0,2—15 Гц, причем время разрядки-импульса занимает всего 1—3 мкс. Сила тока в импульсе достигает 100—200 А.

За рубежом производством рентгеновских аппаратов занимаются следующие фирмы: Медикор (Венгрия), Пантак, Филлипс (Англия), Бальто (Бельгия), Пикер—Андрекс (Дания), Сименс, Мюллер, Зайферт (ФРГ), Пикер, Дженерал электрик, Вестингауз (США), Тошиба (Япония) и др.

Отличительная особенность деятельности перечисленных фирм — создание единых серий (типовых рядов) портативных аппаратов — моноблоков и аппаратов кабельного типа.

Ускорители электронов. В качестве источников тормозного излучения с непрерывным спектром в диапазоне энергий 1—100 МэВ используют ускорители электронов. Их применяют в радиационной дефектоскопии для контроля качества изделий большой толщины. Выпускают линейные ускорители, у которых ускорение электронов обеспечивается на прямолинейных траекториях движения, и циклические ускорители (бетатроны и микротроны), у которых ускорение электронов обеспечивается на круговых орбитах.

Линейный ускоритель (рис. 3.15, а) выполнен в виде вакуумной цилиндрической ускорительной камеры 1 с фокусирующим электромагнитом 2, расположенным на поверхности цилиндра. Высокоча-

Таблица 3.6

Основные характеристики ускорителей электронов

Ускоритель	Пределы регулирования энергии		МЭД на 1 м		Потребляемая мощность, кВт	Продолжительность непрерывной работы, ч	Масса, кг	
	Дж	МэВ	А/кг	Р/с			блока излучателя	пульта
Линейный с $E_{\max} = 9$ МэВ	$(9,6 + 14,4) \cdot 10^{-13}$	6—9	$6,4 \cdot 10^{-8}$	25	15	8	3500	200
Переносный малогабаритный бетатрон ПМБ-6 с $E_{\max} = 6$ МэВ	$(3,2 + 9,6) \cdot 10^{-13}$	2—6	$1,3 \cdot 10^{-6}$	0,005	1,2	0,25	80	20
Стационарный бетатрон ББ-М-25 с $E_{\max} = 25$ МэВ	$(1,1 + 4) \cdot 10^{-13}$	7—25	$2,5 \cdot 10^{-4}$	1,0	15	8	6500	3000
Микротрон с $E_{\max} = 30$ МэВ	$(0,8 + 4,8) \cdot 10^{-12}$	5—30	$7,5 \cdot 10^{-8}$	33	15	8	2000	200

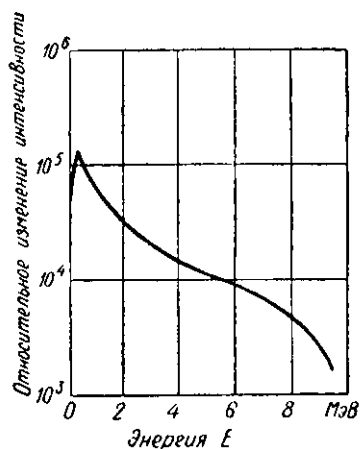


Рис. 3.16. Спектральное распределение интенсивностей тормозного излучения бетатрона при энергии электронов 10 МэВ

электроны в тороидальную камеру, где они ускоряются в вихревом электрическом поле, создаваемом переменным магнитным полем. За один полный оборот при длине круговой орбиты 1 м приращение энергии электронов составляет 15—20 эВ. За 10^8 оборотов по круговой орбите электрон ускоряется до энергии 100 МэВ. При изменении траектории полета электронов в конце цикла ускорения они попадают на мишень 6, в которой возникает тормозное излучение с мощностью экспозиционной дозы $1,3 \cdot 10^{-6}$ — $1,1 \cdot 10^{-3}$ А/кг (0,005—4,2 Р/с) на расстоянии 1 м от мишени при энергии 2—35 МэВ (табл. 3.6).

Микротрон (рис. 3.15, а) выполнен в виде вакуумной ускорительной цилиндрической камеры 1 с фокусирующим электромагнитом 2.

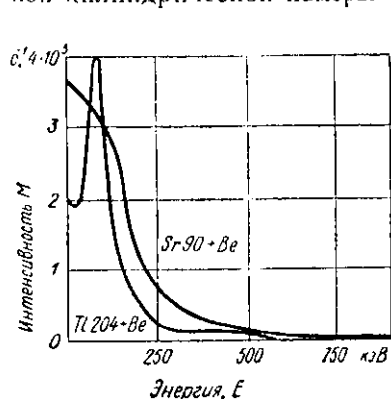


Рис. 3.17. Спектр тормозного излучения от β -источников Sr 90 + Be и Ti 204 + Be

стотный генератор 3 обеспечивает получение в волноводе 4, размещенном в камере 1, бегущей электромагнитной волны, электрическое поле которой направлено по оси волновода. Электроны, инжектируемые пушкой 5, ускоряются электрическим полем бегущей волны. При этом на каждых 30 см пути им сообщается энергия примерно 1 МэВ. Затем ускоренные электроны попадают на мишень 6, в которой возникает тормозное излучение с мощностью экспозиционной дозы $5 \cdot 10^{-4}$ — $1,03 \cdot 10^{-1}$ А/кг (2—420 Р/с) на расстоянии 1 м от мишени при энергии 3—10 МэВ (табл. 3.6).

Бетатрон (рис. 3.15, б) выполнен в виде вакуумной ускорительной тороидальной камеры 1, расположенной между полюсами электромагнита 2. Электронная пушка 5 инжектирует

электроны, которые по волноводу 4 направляются в центр ускоряющего промежутка резонатора 7. Электрон, попадающий в камеру, под действием магнитного поля начинает двигаться по круговой орбите, испытывая каждый раз ускорение при попадании в зону ускоряющего электрического поля, создаваемого резонатором. При каждом ускорении радиус движения электрона увеличивается и в конце цикла ускорения он попадает на мишень 6, в которой возникает тормозное излучение с мощностью экспозиционной дозы $7,5 \cdot 10^{-3}$ А/кг

(33 P/c) на расстоянии 1 м от мишени при энергии 5—30 МэВ (табл. 3.6).

Анализ спектрального распределения энергии ускорителей, в частности бетатрона (рис. 3.16), показывает, что интенсивность излучения обратно пропорциональна энергии излучения и круто падает до нуля в области максимальных энергий. Кроме того, интенсивность излучения круто падает от центра к краю пучка излучения, имеющего осевую симметрию, причем крутизна этого спада пропорциональна энергии. В частности, у бетатронов интенсивность уменьшается вдвое от центра к краю поля облучения: для энергии 15 МэВ в диапазоне углов 0—6,4°; для энергии 50 МэВ 0—1,9°. Регулируют поле облучения и выравнивают интенсивность в пучке на ускорителях с помощью коллиматоров и фильтров.

Радиоизотопные источники тормозного излучения. Использование прямого β -излучения в дефектоскопии не эффективно в связи с низкой проникающей способностью и значительным рассеянием β -частиц в объекте. Однако применение β -источников из Sr 90, Tl 204, Pm 147 и других для получения тормозного излучения дает положительные результаты. Это излучение возбуждается в мишенях из бериллия, графита, алюминия, магния и других элементов. Подобные источники имеют следующие характеристики (рис. 3.17): (Sr 90 + Be) $T_{1/2} = 27,7$ года, непрерывный спектр с $E_{\max} = 2,18$ МэВ; (Tl 204 + Be) $T_{1/2} = 4,1$ года, непрерывный спектр с $E_{\max} = 0,765$ МэВ; (Pm 147 + Be) $T_{1/2} = 2,6$ года, непрерывный спектр с $E_{\max} = 0,223$ МэВ. Изменяя мишени можно получить от одного источника тормозное излучение с различной максимальной энергией.

3.2.2. Радиоизотопные источники γ -излучения

В настоящее время для γ -дефектоскопии применяют исключительно искусственно изготавливаемые радиоактивные изотопы. Основные их характеристики приведены в табл. 3.7, а спектр излучения одного из них показан на рис. 3.18 на примере Tm 170.

Активную часть источников помещают в одну или две ампулы, каждую из которых герметично заваривают. Двойную ампулировку проводят как для источников излучения с большим радиационным выходом, так и для источников, активная часть которых выполнена из жидких или сыпучих материалов.

В практике радиационной дефектоскопии помимо источников, указанных в табл. 3.7, находят применение и ряд других перспективных источников (табл. 3.8),

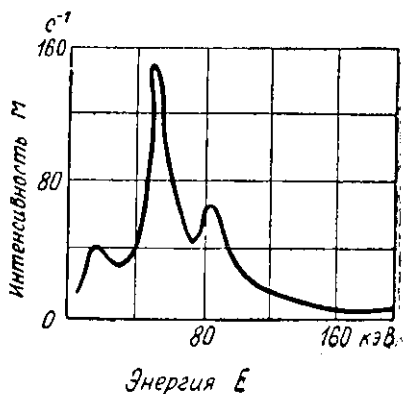


Рис. 3.18. Спектр излучения от источника Tm 170. Пик γ 84 кэВ

использование которых ограничивается либо их стоимостью, либо трудностью отделения сопутствующих примесей.

Гамма-дефектоскопы предназначены для выявления скрытых дефектов сварных соединений и других изделий просвечиванием их γ -излучением радиоактивных изотопов. Они состоят, как правило, из следующих узлов: радиационной головки с защитным блоком,

Т а б л и ц а 3.7

Основные характеристики радионуклидных источников γ -излучения

Источ- ник	Гамма- эквива- лент 1 Ки изотопа, г-экв Ra	МЭД γ -излучения 1 Ки на 1 м		Удельная активность	
		А/кг	Р/с	$\text{с}^{-1} \cdot \text{г}^{-1}$	Ки/г
Tm 170	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$7,2 \cdot 10^{-11}$	$2,79 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^{12} - 3,7 \cdot 10^{12}$	350—1000
Ir 192	0,55	$3,3 \cdot 10^{-8}$	$1,29 \cdot 10^{-4}$	$5,5 \cdot 10^{12} - 9,2 \cdot 10^{12}$	150—250
Cs 137	0,37	$2,2 \cdot 10^{-8}$	$0,86 \cdot 10^{-4}$	$3,7 \cdot 10^{11} - 9,2 \cdot 10^{11}$	10—25
Co 60	1,54	$9,2 \cdot 10^{-8}$	$3,57 \cdot 10^{-4}$	$1,85 \cdot 10^{12} - 4,4 \cdot 10^{12}$	50—120
Источ- ник	Гамма- эквива- лент 1 Ки изотопа г-экв Ra	Диапазоны энергий спектра		Период полураспада $T_{1/2}$	
		Дж	МэВ		
Tm 170	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$\beta - 1,48 \cdot 10^{-13}$ $1,52 \cdot 10^{-13}$	$\beta - 0,867$ 0,950	129 сут.	
Ir 192	0,55	$\gamma - 1,34 \cdot 10^{-14}$ $\beta - 3,84 \cdot 10^{-14} +$ $+ 1,07 \cdot 10^{-13}$ $\gamma - 3,20 \cdot 10^{-14} +$ $+ 1,7 \cdot 10^{-13}$	$\gamma - 0,084$ $\beta - 0,24 +$ $+ 0,67$ $\gamma - 0,2 + 1,06$	74,4 сут.	
Cs 137	0,37	$\beta - 8,3 \cdot 10^{-13}$ $\gamma - 1,06 \cdot 10^{-13}$	$\beta - 0,52$ $\gamma - 0,661$	29,6 лет	
Co 60	1,54	$\beta - 5,1 \cdot 10^{-13}$ $\gamma - 1,87 \cdot 10^{-13}$ $2,13 \cdot 10^{-13}$	$\beta - 0,318$ $\gamma - 1,17$ 1,33	5,25 лет	

Т а б л и ц а 3.8

Основные характеристики некоторых перспективных источников излучения

Источник	Диапазоны энергий спектра E		Период полураспада $T_{1/2}$
	Дж	МэВ	
Am 241	$3,2 \cdot 10^{-16} + 1,1 \cdot 10^{-15}$	0,02—0,07	470 лет
Sm 145	$9,7 \cdot 10^{-16}$	0,061	340 сут.
Eu 155	$9,7 \cdot 10^{-16} + 2,1 \cdot 10^{-15}$	0,061—0,132	1,81 года
Gd 153	$1,1 \cdot 10^{-16} + 1,64 \cdot 10^{-14}$	0,07—0,103	242 сут.
Yb 169	$1,0 \cdot 10^{-16} + 4,94 \cdot 10^{-14}$	0,063—0,309	31,8 сут.
Se 75	$1,06 \cdot 10^{-16} + 9,2 \cdot 10^{-14}$	0,066—0,572	120,4 сут.
Mn 54	$1,28 \cdot 10^{-13}$	0,8	291 сут.
Ce 152	$1,95 \cdot 10^{-15} + 2,25 \cdot 10^{-15}$	0,122—1,405	12,7 года

Таблица 3.9

Основные характеристики гамма-дефектоскопов

Тип	Назначение	Источник	Диаметр активной части, мм	МЗД у-излучения на 1 м			Экранирование	Масса радиоактивной лампы, кг	Расстояние перемещения источника, м	Расстояние до пульта управления, м	Контролируемая толщина, мм
				Акст	Р/с	Р/с					
ГУИ-С-2-1	Портативный аппарат для фронтального просвечивания общепромышленного назначения	Cs 137	5	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-4}$		Pb	21	—	4	До 60
РИД-21М (рис. 3.19, а)	Портативный плановый аппарат общепромышленного назначения	Cs 137 Ir 192 Tm 170	3—5 0,5—2 5,5	$1,3 \cdot 10^{-7}$ $6,5 \cdot 10^{-7}$ $3,2 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-4}$ $2,5 \cdot 10^{-4}$ $1,25 \cdot 10^{-4}$		ВНМЗ-2	25	До 12	До 12	До 60
«Грасса» (рис. 3.19, б)	Передвижной аппарат для фронтального просвечивания сварных швов газонефтепроводов диаметром до 1420 мм через одну и две стенки	Ir 192 Cs 137	3 5	$1,3 \cdot 10^{-6}$ $1,3 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-3}$ $5 \cdot 10^{-4}$		ВНМЗ-2	21	До 36	До 36	До 30
«Стальель-5»	Портативный аппарат для фронтального просвечивания в условиях стационарной сборки	Ir 192	2	$6,5 \cdot 10^{-7}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$		U	10	—	3,5	До 50

в котором находится источник γ -излучения; привода, управляющего выпуском и перекрытием пучка излучения; систем сигнализации об излучении и наведения пучка на объект контроля.

В комплект гамма-дефектоскопов входят также штативные устройства, вспомогательные принадлежности, транспортно-перезарядные контейнеры для безопасной транспортировки и перезарядки источников в эксплуатационных условиях, коллиматоры и диафрагмы,

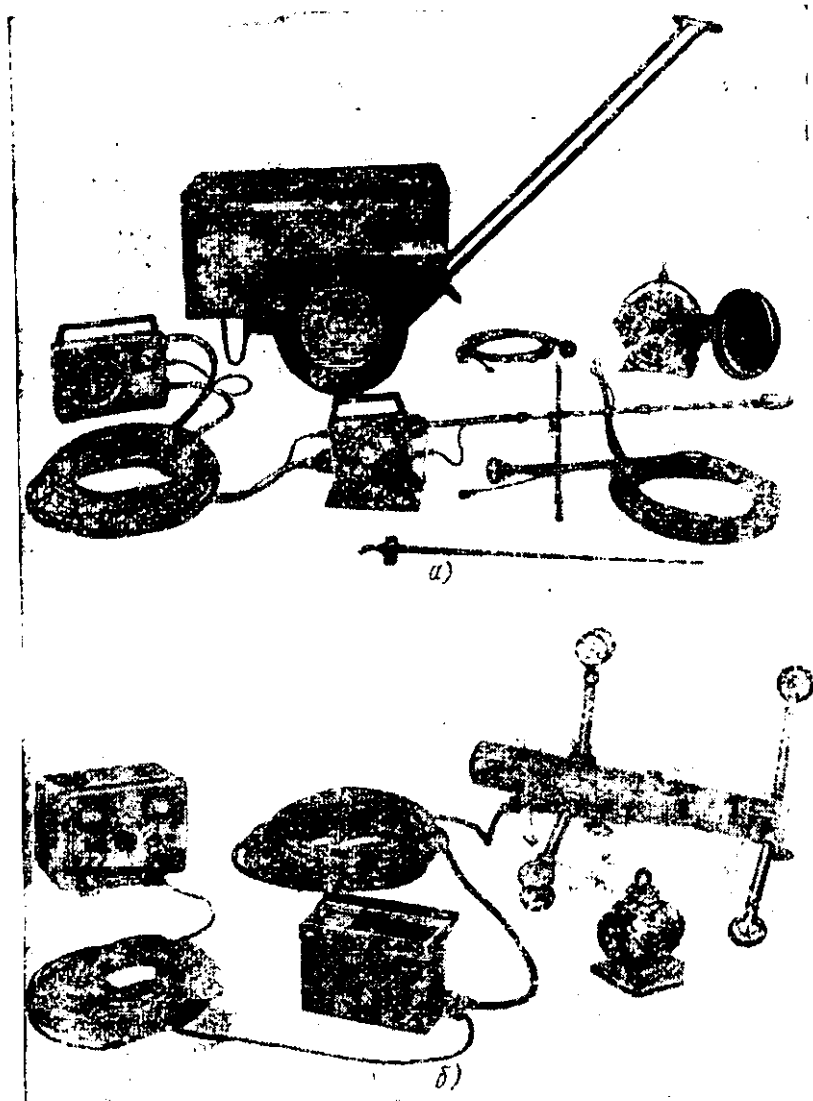


Рис. 3.19. Внешний вид гамма-дефектоскопов:

а — РИД-1М шлангового типа; б — «Грасса» для просвечивания сварных швов

обеспечивающие получение пучков излучения различной формы и размеров. По своей конструкции гамма-дефектоскоп прост, прочен, надежен в эксплуатации и мобилен.

Гамма-дефектоскопы РИД-21М, «Стпель-5», ГУП Cs-2-1 и другие (табл. 3.9) — портативные и полностью автономные. Это обеспечивает их успешное использование в полевых и монтажных условиях при отсутствии электроэнергии. Шланговые гамма-дефектоскопы типа РИД-21М, в которых источник излучения может подаваться из радиационной головки по ампулопроводу в зону контроля на расстоянии до 12 м, оказываются незаменимыми при фронтальном и панорамном просвечивании сварных соединений, расположенных в таких труднодоступных местах, как междудонные пространства и отсеки кораблей, трубные конструкции энергетических установок и т. п.

Гамма-дефектоскопы для фронтального просвечивания (ГУП Cs-2-1, «Трасса», «Стпель»-5 и другие) обеспечивают выпуск и перекрывание конусных, пирамидальных или кольцевых пучков непосредственно из радиационной головки с помощью встроенных или сменных коллиматоров.

В качестве защитных материалов, эффективно ослабляющих излучение, в радиационных головках и контейнерах используют свинец ($\rho = 11 \div 11,3 \text{ г/см}^3$, $Z = 82$), сплавы на основе вольфрама ВМ-3-2, ВМ-5-3 и др. ($\rho = 16 \div 18 \text{ г/см}^3$, $Z = 74$), обедненный уран ($\rho = 18,5 \text{ г/см}^3$, $Z = 92$). Защитные блоки всех гамма-дефектоскопов ослабляют γ -излучение до безопасных уровней. При этом МЭД на расстоянии 1 м от источника не более $2,0 \cdot 10^{-10} \text{ А/кг}$ (2,8 мР/ч), а МЭД на 100 мм от поверхности блока не более $7,17 \cdot 10^{-9} \text{ А/кг}$ (100 мР/ч).

В промышленности применяют портативные, передвижные и стационарные гамма-дефектоскопы, в которых используют следующие источники: Tm 170 с МЭД γ -излучения на расстоянии 1 м не более $32 \cdot 10^{-8} \text{ А/кг}$ ($1,25 \cdot 10^{-4} \text{ Р/с}$), Iг 192 и Cs 137 с МЭД на 1 м не более $5,5 \cdot 10^{-6} \text{ А/кг}$ ($2,5 \cdot 10^{-2} \text{ Р/с}$), Со 60 с МЭД на 1 м не более $1,3 \cdot 10^{-4} \text{ А/кг}$ ($5 \cdot 10^{-1} \text{ Р/с}$).

3.2.3. Источники нейтронов

Радиоизотопные источники быстрых нейтронов (табл. 3.10) применяют при нейтронной дефектоскопии, так как с их помощью можно получить поток тепловых нейтронов, пригодных для контроля. Для этого быстрые нейтроны пропускают через замедлитель, выполненный из легких элементов. Источники (Sb 124 + Be) имеют высокий уровень фона γ -излучения и требуют таких методов детектирования, которые были бы нечувствительны к γ -излучению. Однако они дают низкоэнергетические нейтроны, что обеспечивает им некоторые преимущества при получении тепловых нейтронов в замедлителе. Наиболее предпочтительны для нейтронной радиографии источники Po 210 + Be) и транслутониевые источники нейтронов Cf 252, обеспечивающие большой выход нейтронов и высокую удельную активность.

При пропускании быстрых нейтронов через замедлители получают тепловые нейтроны, интенсивность которых в 1000 раз меньше

Таблица 3.10

Основные характеристики радионуклидных источников
быстрых нейтронов

Источник	Период полураспада $T_{1/2}$	Выход нейтронов на 1 г изотопа, с^{-1}	Средняя энергия нейтронов	
			Дж	МэВ
Cf 252	2,63 года	$3 \cdot 10^{12}$	$3,7 \cdot 10^{-13}$	2,3
Po 210+Be	138 сут.	$1,28 \cdot 10^{10}$	$6,9 \cdot 10^{-13}$	4,3
Sb 124+Be	60 сут.	$2,7 \cdot 10^9$	$3,85 \cdot 10^{-13}$	0,024
Источник	МЭД γ -излучения на 1 м		Энергия γ -излучения	
	А/кг	Р/с	Дж	МэВ
Cf 252	$2,05 \cdot 10^{-8}$	$8,0 \cdot 10^{-4}$	$6,4 \cdot 10^{-15}$	0,04
Po 210+Be	$1,4 \cdot 10^{-9}$	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-15}$	0,1
Sb 124+Be	$3,2 \cdot 10^{-3}$	12,5	$1,28 \cdot 10^{-13}$	0,8
			$2,7 \cdot 10^{-13}$	1,7

интенсивности быстрых нейтронов из источника. При использовании коллиматорной системы с отношением длины коллиматора к его ширине 10 : 1 степень ослабления потока быстрых нейтронов из источника в поток тепловых нейтронов в месте установки детектора составит уже 10^{-6} . Таким образом, если необходим поток тепловых нейтронов плотностью $10^4 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, то выход быстрых нейтронов должен составлять $10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Ядерные реакторы служат источником в основном тепловых нейтронов для радиационной дефектоскопии. Тепловые нейтроны получаются в результате замедления нейтронов деления, образующихся в активной зоне реактора. Энергия нейтронов деления составляет от нескольких килоэлектронвольт до 18 МэВ. В результате замедления в графите нейтроны деления снижают свою скорость до скорости теплового движения атомов замедлителя. В ядерном реакторе плотность потока тепловых нейтронов может достигать $10^9 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. При этом потоку тепловых нейтронов сопутствует интенсивное γ -излучение, возникающее при делении ядер.

Для проведения нейтронной дефектоскопии в зоне реактора устанавливают канал-коллиматор. Коллиматор со стороны, примыкающей к замедлителю, снабжают диафрагмой для регулирования размеров пучка нейтронов и фильтром из свинца для уменьшения вредного влияния γ -излучения на результаты контроля. С другой стороны коллиматор снабжают затвором для выпуска и перекрытия потока нейтронов и диафрагмой для регулирования размеров поля облучения. Контролируемое изделие и детектор размещают в непосредственной близости от этой диафрагмы. Для обеспечения радиационной безопасности персонала, работающего на реакторе, вокруг коллиматора сооружают защитную камеру, внутри которой при просвечивании находятся изделия и детектор.

Генераторы нейтронов представляют собой ускорители заряженных частиц, под действием которых мишень ускорителя генерирует потоки быстрых нейтронов. В качестве ускоряемых частиц в них применяют ядра дейтерия, а в качестве мишени тяжелую воду, тритий, бериллий, литий. Энергия быстрых нейтронов составляет 2,5—22 МэВ, поток нейтронов достигает 10^8 — 10^{11} с⁻¹. Линейные и циклические ускорители могут быть источниками нейтронов с энергией до 1 МэВ при использовании в качестве мишеней лития или трития, а в качестве ускоряющих частиц — протонов.

3.3. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ РАДИАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ

3.3.1. Классификация основных параметров

Результаты контроля качества сварных соединений, просвечиваемых ионизирующими излучениями, определяется суммарным воздействием ряда параметров, зависящих от природы и свойств используемых источников, детектора и контролируемого изделия (схема 3.3).

Мощность P экспозиционной дозы (МЭД) излучения влияет на производительность контроля, а также определяет требования к технике радиационной безопасности и конструкции защитных устройств.

Энергетический спектр (энергия) E излучения определяет проникающую способность излучения и выявляемость дефектов в контролируемом изделии.

Плотность ρ и атомный номер Z контролируемого материала, в свою очередь, влияют на выбор необходимой МЭД и энергии излу-

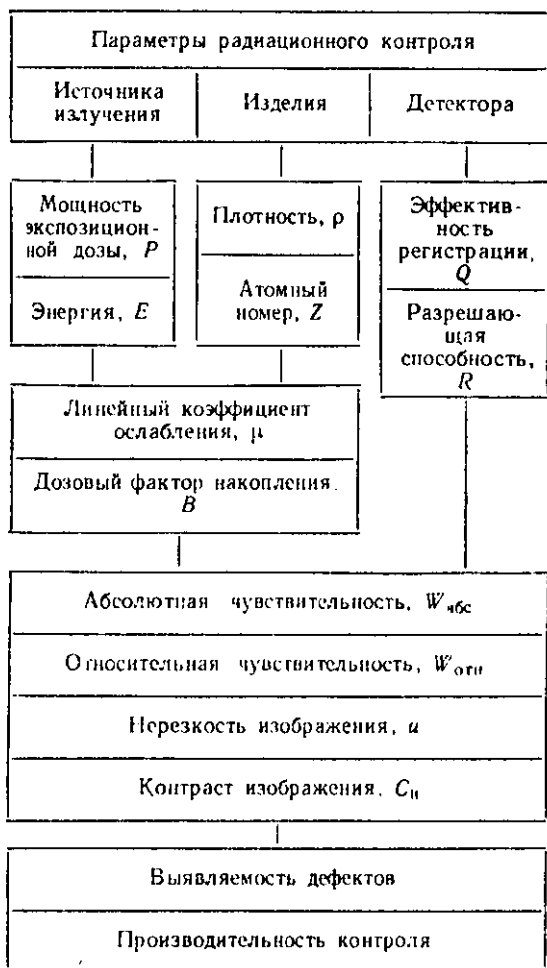


Схема 3.3

чения, обеспечивающих получение требуемой производительности и выявляемости дефектов.

Линейный коэффициент ослабления μ излучения в материале контролируемого изделия определяет проникающие свойства излучения и выявляемость дефектов.

Дозовый фактор накопления B характеризует рассеяние излучения в материале изделия и оказывает заметное влияние на выявляемость дефектов.

Эффективность регистрации Q детектора (спектральная чувствительность) определяет его способность реагировать на воздействие ионизирующего излучения в данном диапазоне энергии и МЭД излучения.

Разрешающая способность R детектора характеризует его свойства раздельно регистрировать рядом расположенные дефектные и бездефектные участки контролируемого изделия и характеризуется предельным количеством видимых штриховых линий, равномерно расположенных на единице длины тест-объекта, например на 1 мм.

Абсолютная чувствительность $W_{\text{абс}}$ определяется размером (объемом) минимально выявляемого дефекта или элемента эталона чувствительности и выражается в мм или мм³.

Относительная чувствительность $W_{\text{отн}}$ характеризуется отношением размера $\Delta\delta$ или объема ΔV минимально выявляемого дефекта или элемента эталона чувствительности к толщине δ или объему V контролируемого изделия и выражается в процентах:

$$W_{\text{отн}} = \Delta\delta/\delta \text{ } 100 \text{ } \%,$$

Нерезкость изображения u определяется размытием краев изображения дефекта на снимке или экране и выражается в миллиметрах.

Контраст изображения C_n дефекта на радиографическом снимке или радиоскопическом экране характеризуется отношением разности яркостей L_d — дефектного и L_o — бездефектного участков изображения к яркости L_o и выражается в процентах:

$$C_n = \frac{L_d - L_o}{L_o} 100 \text{ } \%,$$

Все перечисленные параметры в той или иной мере определяют выявляемость дефектов и производительность контроля.

3.3.2. Особенности основных параметров контроля

Изменение МЭД излучения у рентгеновских аппаратов и ускорителей электронов достигается регулированием тока и питающего напряжения, причем при изменении напряжения изменяется и энергетический спектр излучения.

У радиоизотопных источников энергетический спектр излучения определяется свойствами используемого радиоактивного изотопа и сопутствующих примесей. МЭД излучения у них зависит от суммарной активности изотопа, расположенного в объеме активной части

источника. Повышение МЭД возможно за счет соответствующего увеличения размеров активной части. В ряде случаев это нежелательно, так как получаемый выигрыш в производительности контроля не компенсируется проигрышем в виде ухудшения выявляемости дефектов и увеличения нерезкости изображения. Кроме того, для низкоэнергетических источников (например $Tm\ 170$) увеличение размеров активной части приводит к изменению энергетического спектра за счет самопоглощения его низкоэнергетических составляющих материалом активной части источника.

Повысить МЭД излучения радиоактивных источников можно увеличением их удельной активности, которая характеризуется количеством изотопа в единице объема (массы) источника. Удельная активность изотопа зависит от плотности потока нейтронов, в которых источник подвергается активации, макроскопического поперечного сечения взаимодействия нейтронов с активируемым изотопом и самопоглощения излучения материалом источника. Именно поэтому удельная активность источника имеет предельное значение. Она в основном определяется плотностью потока нейтронов реакторов, достигающей $10^{11}—10^{15}\text{ см}^{-2}\text{ с}^{-1}$ и временем активации, в течение которого изотоп подвергается облучению нейтронами в канале реактора.

К числу дополнительных параметров радиоизотопных источников, которые учитывают при их использовании, относится период полураспада. Этот параметр определяет периодичность замены источников, а также затраты на их приобретение и захоронение.

Линейный коэффициент ослабления излучения μ обратно пропорционален проникающим свойствам излучения и прямо пропорционален выявляемости дефектов. Поэтому для выявления дефектов минимальных размеров, т. е. для получения высокой чувствительности, следует использовать низкоэнергетическое рентгеновское и γ -излучения и высокоэнергетическое тормозное излучение ускорителей с большими значениями μ . В этом случае наличие в контролируемом объекте даже малого по величине внутреннего дефекта приведет к существенному изменению интенсивности излучения, достигающего детектора.

При стремлении обеспечить высокую производительность просвечивания следует применять высокоэнергетическое рентгеновское и γ -излучения и низкоэнергетическое тормозное излучение ускорителей с малыми значениями μ и большими длинами свободного пробега квантов в веществе. Такие излучения имеют лучшие проникающие свойства и поглощаются веществом существенно меньше, чем излучения с большими значениями μ , вследствие чего интенсивность излучения, достигающая детектора, изменяется мало.

В результате рассеяния рентгеновского и γ -излучений в контролируемом изделии вторичные электроны и кванты, образованные в процессе фотоэлектрического взаимодействия (фотоэффекта) и комптоновского рассеяния, в значительной мере отклоняются от направления первичного пучка излучения, что существенно ухудшает выявляемость дефектов. При использовании ускорителей образу-

щиеся в изделии пары электрон—позитрон существенно меньше отклоняются от направления первичного пучка излучения. Такое рассеянное излучение способствует в известной мере образованию скрытого изображения и незначительно ухудшает чувствительность.

Общая нерезкость изображения на экране и снимке при просвечивании изделий определяется воздействием следующих факторов: геометрической нерезкости u_r , возникающей из-за неточности применяемого источника излучения (рис. 3.31); внутренней нерезкости детекторов u_a , определяемой рассеянием ионизирующего излучения в материале детектора и зависящей от его энергии; нерезкости рассеяния u_p , вызываемой рассеянием ионизирующего излучения не только в материале детектора, но и в самом контролируемом изделии; нерезкости смещения u_c , вызываемой взаимными перемещениями источника излучения, изделия и детектора во время просвечивания.

Контраст изображения C_n дефекта на пленке (экране) определяется двумя факторами: контрастностью объекта и контрастностью детектора. Контрастность объекта прямо пропорциональна разнице в плотностях и атомных номерах дефектных и бездефектных мест изделия и обратно пропорциональна энергии излучения. Контрастность детектора характеризуется изменением плотности почернения пленки или яркости свечения экрана при воздействии на них различных экспозиционных доз излучения. Тот детектор обладает высшей контрастностью, который при облучении одинаковой дозой обеспечивает получение большего значения плотности почернения или яркости свечения.

Абсолютная и относительная чувствительности радиационного контроля определяются суммарным воздействием всех вышеперечисленных параметров.

3.4. ПРОМЫШЛЕННАЯ РАДИОГРАФИЯ

3.4.1. Классификация методов

В практике промышленной радиографии в зависимости от способа регистрации и типа детектора различают два основных метода — прямой экспозиции и переноса изображения (схема 3.4).

Метод прямой экспозиции — основной и наиболее распространенный метод промышленной радиографии, при котором используются практически все виды источников ионизирующих излучений. Изделия просвечивают на радиографическую пленку. На пленку под действием излучения образуется скрытое изображение, которое становится видимым только после фотообработки в проявителе и закрепителе. Для сокращения времени просвечивания применяют усиливающие флуоресцентные и металлические экраны.

В последние годы помимо чернобелых радиографических пленок начали находить применение цветные пленки. Однако улучшение выявляемости дефектов, получаемое на этих пленках за счет наличия цветовых контрастов, не компенсируется затратами труда и средств



Схема 3.4

на их фотообработку. В связи с этим они не нашли сколько-нибудь заметного применения в промышленности.

Метод переноса изображения получил применение при нейтронной радиографии, когда скрытое изображение получают на промежуточном металлическом активизируемом экране, размещаемом за изделием в нейтронном потоке. После этого скрытое изображение переносят на радиографическую пленку, прикладывая ее к металлическому экрану.

Метод переноса изображения, в котором в качестве промежуточного носителя скрытого изображения используют электрически заряжаемые полупроводниковые пластины, помещаемые за объектом в пучке ионизирующего излучения, а в качестве регистратора видимого изображения применяют обычную бумагу, на которой изображение проявляется с помощью сухих красящих веществ, получил название ксерорадиографии или электрорадиографии.

Нейтронная радиография. Этот метод обладает рядом ценных преимуществ перед прочими методами промышленной радиографии: возможностью использования зависимости ослабления потока нейтронов от атомного номера материала поглотителя для обнаружения дефектов с большим значением сечения взаимодействия в изделиях с малым значением сечения взаимодействия; возможностью обнаружения дефектов в радиоактивных изделиях с большим уровнем фона γ-излучения за счет применения метода переноса изображения с металлического экрана, активизируемого в нейтронном потоке и нечувствительного к γ-излучению, на радиографическую пленку.

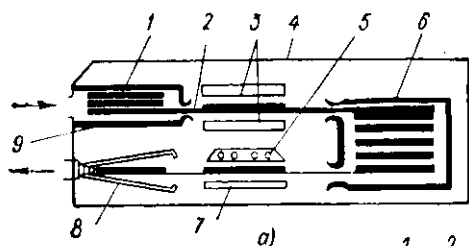
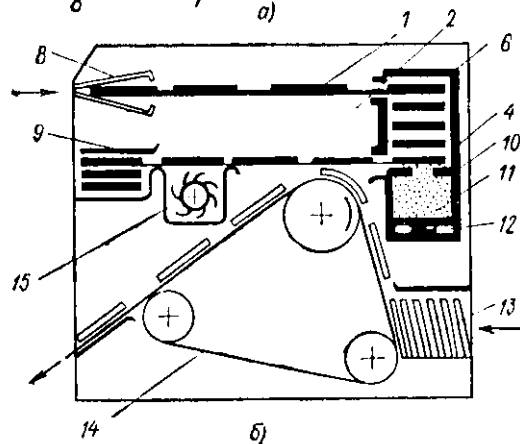


Рис. 3.20. Ксерорадиографическая установка:

а — зарядное устройство; б — про-
явочное устройство; 1 — пластина;
2 — каретка; 3 — разрядник; 4 —
камера; 5 — проволока; 6 — хра-
нилище; 7 — подложка; 8 — кас-
сети; 9 — коробка; 10 — электрод;
11 — порошок; 12 — вибратор;
13 — бумага; 14 — транспортер;
15 — очиститель



Указанные преимуще-
ства метода позволяют об-
наруживать дефекты свар-
ных соединений, содержа-
щих водород, бор, литий,
кадмий и другие элементы
в таких сильнопоглощаю-
щих рентгеновское и γ -из-
лучение материалах, как
свинец, вольфрам, уран,
висмут и др. Возможно
контролировать результа-
ты сборки сварных узлов
и агрегатов из тяжелых
металлов, содержащих

внутри легкие материалы, например пластмассы, взрывчатку и др. С помощью нейтронной радиографии контролируют степень выгорания горючего в радиоактивных тепловыделяющих элементах ядерных реакторов в процессе их эксплуатации, сварные швы корпусов герметизированных радиоизотопных источников излучения и др.

Нейтронная радиография находит также применение при контроле толщины кадмиевых покрытий на металлах, качества изделий из водородосодержащих материалов — резины, дерева, пластмассы, клееных соединений, при обнаружении гидридных образований в сварных швах из титана, циркония и других металлов, при наблюдении за распределением соединений бора в стали, содержания лития в образцах из тяжелых металлов (W, Mo), подвергающихся коррозии и т. д.

В настоящее время почти во всех атомных центрах широко используют метод нейтронной радиографии на пучках, выведенных из ядерных реакторов. Имеются стационарные установки с генераторами нейтронов и передвижные установки с радиоизотопным источником нейтронов из Cf^{252} .

Ксерорадиография (электрорадиография). По сравнению с пленочными методами контроля этот метод обладает рядом преимуществ, к числу которых относятся его экспрессность и значительное сокращение затрат при сохранении чувствительности к выявлению дефектов, близкой к радиографическому снимку.

Ксерорадиографическая пластина перед просвечиванием (рис. 3.20, а) электрически сенсibiliзируется, т. е. на ее поверхность

наносят равномерный электрический заряд, при этом проводящая подложка заземляется. Для зарядки пластину закрепляют на подвижной каретке, размещенной в светонепроницаемой камере и прокатывают вместе с кареткой под электродом, находящимся под высоким напряжением (5—10 кВ) относительно заземленной подложки. В процессе перемещения между проволокой и подложкой возникает коронный разряд, который создает ионы, равномерно распределяющиеся по поверхности чувствительного слоя, при этом потенциал пластины может достигать 600 В. Время зарядки составляет 10—15 с.

Заряженную пластину помещают в светонепроницаемую кассету, в противном случае электростатический заряд быстро исчезает. В кассете заряженную пластину можно хранить в течение 1 ч и более без существенной потери величины заряда. В процессе просвечивания прошедшее через объект ионизирующее излучение создает на пластине скрытое электростатическое изображение, причем величина остаточного заряда на каждом участке пластины пропорциональна интенсивности падающего излучения. В качестве источников излучения в основном используют рентгеновские аппараты и реже радиоизотопные источники тормозного и γ -излучений.

Для получения видимого изображения экспонированные пластины проявляют, причем время между окончанием просвечивания и началом проявления не должно превышать 1—2 ч во избежание искажения отпечатка и возникновения вуали. Проявление состоит в осаждении на чувствительный слой частиц сухих или жидких пигментов, причем число частиц на единице поверхности оказывается пропорционально плотности остаточного заряда. При осаждении частицы пигмента заряжаются в результате трибоэлектрического эффекта, возникающего при трении частиц друг о друга, и удерживаются на пластине электростатическими силами, величины которых пропорциональны заряду пластины и заряду частиц.

При сухом способе проявления применяют метод каскадного проявления, при котором проявляющий порошок изготовляют из смеси мелких частиц пигмента размером 0,1—20 мкм и крупного гранулированного материала размером 200—300 мкм, обеспечивающего достаточный трибоэлектрический заряд. Порошок на пластину наносят в качающемся лотке, время проявления составляет 5—10 с.

Находит применение метод проявления порошковым облаком (рис. 3.20, б), при этом пластину размещают над вибратором, из которого выбрасывается облако мелких частиц пигмента. Частицы проходят через круглый электрод, установленный между вибратором и пластиной, находящийся под напряжением 12 кВ и осуществляющий фильтрацию отрицательно заряженных частиц, которые прилипают к электроду. Положительно заряженные частицы остаются во взвешенном состоянии и прилипают к пластине. Продолжительность проявления этим способом составляет 30—40 с. Частицы порошка переносятся с пластины на обычную бумагу контактным способом и закрепляются на ней ацетоном или другими растворителями.

Ксерорадиографические пластины при тщательном обращении используются многократно и выдерживают до 500—1000 экспозиций.

Продолжительность просвечивания на пластину зависит от энергии излучения и в общем в 2—7 раз меньше, чем на пленку типа РТ-5 без применения фольг или экранов, причем чем выше энергия, тем меньший выигрыш в производительности контроля может быть достигнут. Чувствительность ксерорадиографии практически не уступает радиографии с применением мелкозернистых пленок.

К недостаткам метода следует отнести: отсутствие гибких ксерорадиографических пластин, что исключает возможность контроля изделий сложной конфигурации; быстрое возникновение повреждений на селеновом слое пластины, вызывающих появление ложных изображений и затрудняющих расшифровку снимков.

3.4.2. Детекторы промышленной радиографии

Радиографические пленки. Эмульсия радиографической пленки реагирует на прошедшее через объект излучение, изменяя параметры своего серебряного слоя и тем самым обеспечивая регистрацию проходящего потока излучения. Кроме того, пленки обладают интегрирующей способностью регистрировать чрезвычайно низкие потоки излучения за длительное время просвечивания в широком диапазоне энергий. Фотографическая эмульсия содержит в качестве чувствительного к излучению вещества галлоидную соль серебра (обычно бромистое серебро с небольшой примесью иодистого), равномерно в виде зерен распределенную в тонком слое желатина. Эмульсию наносят на обе стороны подложки (целлюлозы, стекла, бумаги и т. д.). При облучении пленки проникающим излучением в кристаллах бромистого серебра происходят изменения, приводящие к тому, что кристалл становится способным к проявлению, т. е. восстановлению до металлического серебра под действием проявителя.

Радиографические пленки подразделяют на две группы (табл. 3.11): безэкранные пленки, предназначенные для использования без флуоресцентных экранов или с металлическими усиливающими экранами; экранные пленки, предназначенные для использования с флуоресцентными усиливающими экранами в связи с их высокой чувствительностью к видимой или ультрафиолетовой части спектра.

Пленка, имеющая плотность почернения D и рассматриваемая в падающем на нее свете яркостью L_0 , ослабляет этот свет, вследствие чего яркость прошедшего света становится меньше L_0 и равной L_n . Фотографическая плотность почернения пленки D определяется как:

$$D = \lg \frac{L_0}{L_n}.$$

Пример 3.5. Радиографическая пленка, рассматриваемая на негатоскопе, имеющем яркость свечения экрана $L_0 = 100$ нт, ослабляет эту яркость до $L_n = 1$ нт. Определить плотность почернения пленки D . Используя предыдущую формулу, получим:

$$D = \lg 100/1 = 2.$$

Если построить зависимость плотности почернения D пленки от логарифма относительной экспозиции $\lg X$, то получим при данных

Таблица 3.11

Классификация и основные характеристики радиографических пленок

Класс	Группа	Тип пленки			Сравнительный экспозиционный фактор для $D = 2$	Средний градиент γ для $D = 1,5 \div +2,5$	Разре-шающая способ-ность R мм ⁻¹	Макси-мальная плотность пече-нения D_{max}^{**}	Постоянная чувстви-тельность k^*		Кэф-фициент контра-стности β
		РТ (СССР)	Кодак (США)	Агфа-верт (ФРГ)					кГ/Кл	ρ^{-1}	
Без-экранные пленки	Высоко-контрастные	РТ-5 РТ-5D	Микро-текс	D 2	10—15	4—4,5	140—180	10,2—11,5	$(7,8—11,6) \cdot 10^2$	0,2—0,3	5,2—5,5
		РТ-4M РНТМ-1D	Кри-сталлекс	D 4	5—7	3,5—4	110—140	9,0—10,2	$(1,94—2,72) \cdot 10^3$	0,5—0,7	4,8—5,0
	Высоко-чувствительные	РТ-3	Инда-стрекс	D 7	2—3	3—3,5	80—110	7,7—9,0	$(4,76—7,8) \cdot 10^3$	1,2—2,0	4,4—4,6
		РТ-1 РТ-1D	Коди-рекс	D 10	1	2,5—3	68—73	6,5—7,5	$(9,7—12,6) \cdot 10^3$	2,5—3,4	4,0—4,2
Экран-ные пленки	С флуо-ресцент-ными экранами	РТ-2	Инда-стрекс б	S	0,15—0,35	3—3,1	68—73	4,5—5,8	$(3,87—7,8) \cdot 10^4$	10—20	—
	Без экранов				2—4	2,5—2,6	68—73		$(3,1—7,0) \cdot 10^3$	0,8—1,8	—

* Значения k даны для $E \geq 300$ кэВ.** Значения D_{max} и k даны для времени проявления 5—10 мин.

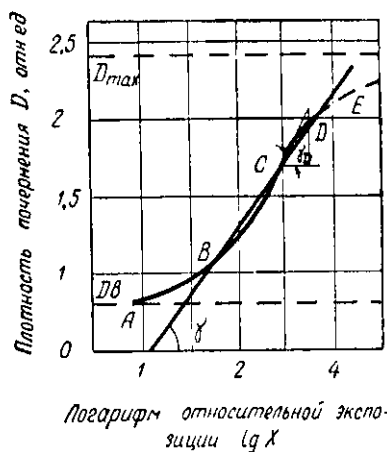


Рис. 3.21. Характеристическая кривая радиографической пленки

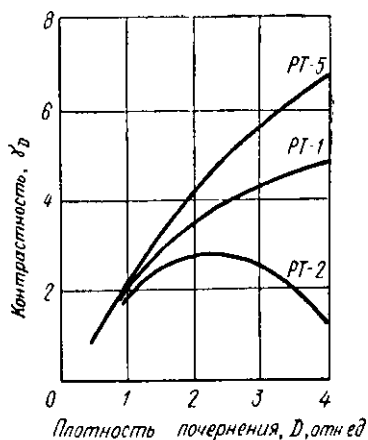


Рис. 3.22. Зависимость контрастности от плотности почернения радиографических пленок

условиях фотообработки характеристическую кривую (рис. 3.21). Пленка обладает вуальной плотностью почернения $D_0 = 0,1 \div 0,3$ еще до экспонирования вследствие известной непрозрачности подложки и способности некоторого числа зерен бромистого серебра самопроизвольно проявляться без воздействия на них излучения. Характеристическую кривую можно разделить на несколько участков: AB — область недодержек, BC и CD — область нормальных экспозиций, DE — область передержек. Область нормальной экспозиции в первом приближении представляет собой прямолинейный участок, для которого справедливо уравнение (см. стр. 86)

$$\Delta D = D - D_0 = \gamma (\lg X - \lg X_0),$$

где γ — тангенс угла наклона прямолинейного участка характеристической кривой или средний градиент пленки; X_0 и X — экспозиционные дозы, вызывающие почернение пленки D_0 и D соответственно.

Однако любая радиографическая пленка подобного строго прямолинейного участка не имеет, вследствие чего градиент или контрастность характеристической кривой для каждой ее точки определяется соотношением (см. стр. 86)

$$\gamma_D = \frac{dD}{d(\lg X)}.$$

Таким образом, *контрастность* — это функция плотности почернения и экспозиции и для пленок различного типа эта зависимость не остается постоянной (рис. 3.22). Для безэкранных пленок контрастность пленки с ростом плотности почернения увеличивается, поэтому для них наивыгоднее та плотность почернения или тот верхний предел интервала плотностей почернения, при которых возможен ее просмотр на существующем расшифровочном оборудовании. Использование больших плотностей почернения позволяет увеличивать диа-

пазон интенсивностей, который может быть передан на одном снимке, а также просвечивать при меньших энергиях излучения, что влечет за собой увеличение контрастности объекта и радиографической чувствительности. Максимальная контрастность пленок экранного типа получается при плотности почернения около двух, т. е. лучшая радиографическая чувствительность может быть получена именно при этой плотности почернения.

Метод промышленной радиографии, основан на том, что степень почернения радиографической пленки, находящейся в поле излучения, в некотором диапазоне почернений пропорциональна экспозиционной дозе. Так как плотность почернения D_0 безэкранных пленок пропорциональна числу проявленных зерен, а экспозиция X определяется числом квантов, приходящих на пленку, то можно записать

$$D_0 = D_{\max} [1 - \exp(-kX)],$$

где k — постоянная чувствительности пленки, зависящая от ее типа, энергии излучения и времени проявления, кг/Кл (P^{-1}); $D_{\max}$ — максимальная плотность почернения при условии перехода всех микрокристаллов бромистого серебра в металлическое серебро. Значение $D_{\max}$ — пропорционально количеству серебра на единицу площади, зависит от типа пленки и времени проявления.

Для экранных пленок, используемых с флуоресцентными усиливающими экранами, подобное соотношение имеет вид

$$D_s = D_{\max} \left[1 - \frac{1}{(1 + kX)^2} \right],$$

Спектральная чувствительность пленки определяется ее способностью получать различные плотности почернения при проявлении после облучения ионизирующими излучениями различной энергии с одинаковой экспозиционной дозой. На практике спектральная чувствительность Q характеризуется величиной, обратной отношению дозы X , необходимой для получения одинаковой плотности почернения D .

Радиографическая пленка обладает наивысшей спектральной чувствительностью в диапазоне энергий 40—50 кэВ, при энергиях выше 250—300 кэВ — чувствительность почти постоянна (рис. 3.23). Для безэкранных пленок чувствительность определяется соотношением

$$Q = \frac{1}{X} = 0,4343k \lg \left[\frac{D_{\max}}{D_{\max} - D} \right].$$

Одна из важнейших характеристик радиографических пленок — разрешающая способность, которая характеризуется количеством раздельно различимых штриховых линий одинаковой толщины на длине 1 мм ($мм^{-1}$). Мелкозернистые пленки типа РТ-5, РТ-4М имеют более высокую разрешающую способность, в отличие от крупнозернистых пленок типа РТ-3, РТ-1 и РТ-2 (см. табл. 3.11).

Ксерорадиографические пластины. При методе переноса изображения применяют полупроводниковые пластины, которые реагируют

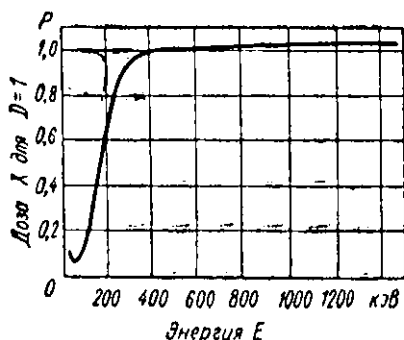


Рис. 3.23. Зависимость экспозиционной дозы X от энергии E излучения для получения плотности почернения $D = 1$ на радиографической пленке

на прошедшие через объект рентгеновское или γ -излучения в виде изменения параметров электрического поля, нанесенного на их поверхность таким образом, что величина остаточного заряда, образующего скрытое электростатическое изображение внутренней макроструктуры контролируемого объекта, пропорциональна изменению интенсивности излучения. Ксерорадиографическая пластина по существу служит промежуточным преобразователем радиационной информации в электростатическое изображение, которое в дальнейшем переносится и за-

крепляется на бумаге с помощью красящих веществ — пигментов.

Конструктивно ксерорадиографическая пластина выполнена в виде полированной проводящей подложки (алюминий, латунь, а также стекло или бумага с проводящим покрытием), на которую тонким слоем нанесены полупроводниковые материалы (аморфный селен, сера, антрацен и др.). Чувствительный слой наносят в вакууме. Удельное электросопротивление полупроводниковых слоев составляет 10^{13} — 10^{15} Ом·см до облучения и 10^7 — 10^{13} Ом·см при облучении рентгеновским или γ -излучениями.

Разрешающая способность ксерорадиографической пластины теоретически не ограничена, так как электростатическое поле не имеет зернистости, однако практически она определяется величиной пылинок проявляющего вещества и способом проявления. При сухом способе проявления разрешающая способность на ксерорадиограмме может достигать 60 линий на 1 мм, при использовании жидкостных проявителей — 120 линий на 1 мм. Однако на практике она не превышает 8—12 линий на 1 мм с использованием выпускаемых типов пластин и процессов переноса изображения (по сравнению с 68—140 линий на 1 мм для радиографических пленок.) Ксерорадиографические пластины используют с металлическими и флуоресцентными экранами, которые наносят между чувствительным слоем и подложкой пластины.

Металлические активируемые экраны-преобразователи. При нейтронной радиографии на тепловых и промежуточных нейтронах с использованием метода переноса изображения применяют экраны-преобразователи, которые реагируют на прошедший через объект поток нейтронов в виде образования наведенной активности, пропорциональной потоку нейтронов и имеющей сравнительно большой период полураспада. Эти экраны обеспечивают усиление информации и по существу служат преобразователями нейтронной информации в скрытое активационное изображение, которое в дальнейшем переносится на радиографические пленки. Преимущество подобных экра-

нов — их нечувствительность к сопутствующему γ -излучению, источником которого может быть само контролируемое изделие. В качестве экранных материалов применяют In 115 ($\sigma = 157$ барн, $T_{1/2} = 54$ мин), Au 197 ($\sigma = 98,8$ барн, $T_{1/2} = 2,7$ дня), Rh 103 ($\sigma = 11$ барн, $T_{1/2} = 4 \div 5$ мин) Dy 164 ($\sigma = 800$ барн, $T_{1/2} = 140$ мин) и др.

Индий обеспечивает получение радиограмм за 5–10 мин при интенсивности реакторного потока тепловых нейтронов $10^8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, а диспрозий — при интенсивности всего лишь $6 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Золото менее удобно вследствие слишком большого периода полураспада, но оно обеспечивает лучшие результаты по разрешающей способности. Родий в основном применяется при использовании реакторных пучков с интенсивностью потока $5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ и высокочувствительных пленок.

Усиливающие металлические и флуоресцентные экраны. Эти экраны применяются с целью сокращения времени просвечивания и обеспечения лучшей выявляемости дефектов. Усиливающее действие экранов характеризуется коэффициентом усиления, определяемым отношением времени просвечивания без экрана к времени просвечивания с экраном (при прочих равных условиях).

Усиливающее действие *металлических* экранов, используемых при методе прямой экспозиции определяется вторичными электронами, образующимися в экране при прохождении через него ионизирующего излучения. В качестве материала этих экранов используют фольги тяжелых металлов (свинца, вольфрама, олова и др.) в связи с тем, что они обеспечивают высокие коэффициенты усиления (рис. 3.24). Для каждого источника ионизирующего излучения материал экрана следует выбирать в зависимости от его энергии. В частности, для рентгеновского излучения с напряжением до 100 кВ целесообразно использовать олово, вольфрам, свинец; для рентгеновского излучения с напряжением более 100 кВ и γ -излучения — вольфрам, свинец.

Толщина экрана должна быть равна максимальной длине пробега вторичных электронов в экране. Изменение толщины фольги в ту или другую сторону приводит либо к уменьшению коэффициента преобразования энергии излучения в кинетическую энергию вторичных электронов, либо к ослаблению интенсивности ионизирующего излучения и, как следствие, к уменьшению усиливающего действия экрана (табл. 3.12). Металлические экраны используют с безэкранными радиографическими пленками типа РТ-1, РТ-3, РТ-4М, РТ-5. Промышленность выпускает

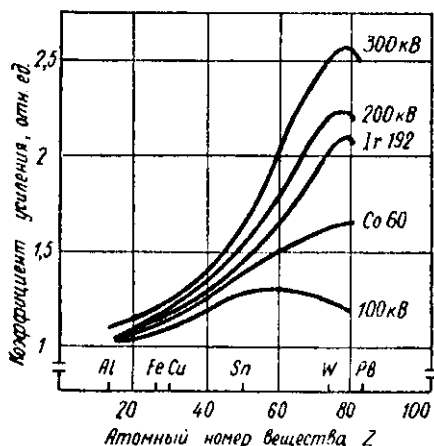


Рис. 3.24. Зависимость коэффициента усиления от атомного номера вещества экрана для различных источников излучения

Основные характеристики и области применения усиливающих экранов

Излучение		Флуоресцентный экран				Свинцовый экран	
Тормозное	У-излучение	Тип	Люминофор	Количество люминофора на экране, мг/см ²		Толщина, мм	
				переднем	заднем	переднего	заднего
10—60 кВ	Am 241	Стандарт (ЭУ-В2)	CaWO ₄	60	60	—	—
60—120 кВ	Tm 170	СБ (ЭУ-Б)	(BaPb) SO ₄	70	70	0,02	0,05
120—200 кВ Sr 90+Be	Se 75	УС	ZnS (Ag)	30	110	0,05—0,05	0,05—0,1
150—300 кВ	Ir 192	УФДМ (ЭУ-В3)	CaWO ₄	40	120	0,05—0,1	0,1—0,2
200—400 кВ 3—6 МэВ	Cs 137	ВП-1	CaWO ₄	80	120	0,1—0,2 0,5—1	0,2—0,3 1—1,5
300—1000 кВ 6—15 МэВ	Co 60	ВП-2	CaWO ₄	120	180	0,2—0,3 1—1,5	0,3—0,5 1,5—2
15—50 МэВ	—	УФД	CaWO ₄	200	200	1,5—2	2—3
Примечание. кВ — напряжение рентгеновского аппарата; МэВ — энергия ускорителя.							

15 типоразмеров экранов согласно ГОСТ 15843—70. Эти экраны выполнены в виде свинцовой фольги толщиной 0,05—0,5 мм, нанесенной на гибкую пластмассовую подложку.

Усиливающие действие флуоресцентных экранов, используемых при методе прямой экспозиции определяется действием фотонов видимой, сине-фиолетовой, ультрафиолетовой и инфракрасной области спектра, высвечиваемых из люминофоров при прохождении через них ионизирующего излучения. В качестве люминофоров используют ZnS , CdS , $BaSO_4$, $PbSO_4$, $CaWO_4$ и др. Флуоресцентные экраны выполняют в виде пластмассовых или картонных подложек, на которые наносят слой люминофора. Эти экраны используются с экранными радиографическими пленками, поскольку спектральная чувствительность эмульсионных пленки и спектр свечения экранов хорошо согласуются. Промышленность выпускает флуоресцентные экраны следующих типов: СБ на базе люминофора $(Ba, Pb)SO_4$; УС на базе люминофора $ZnS (Ag)$; УФДМ на базе люминофора $CaWO_4$ и др. (табл. 3.12). Размеры этих экранов определяются ГОСТ 15843—70.

Наименьшие экспозиции при радиографии получают с использованием флуоресцентных экранов (рис. 3.25), лучшую чувствительность — при использовании металлических фольг (рис. 3.26). Ухудшение чувствительности при применении флуоресцентных экранов определяется крупнозернистостью используемых люминофоров.

В настоящее время начинают находить применение флуорометаллические усиливающие экраны, выполненные в виде свинцовой подложки с нанесенным на нее слоем люминофора. Эти экраны имеют больший коэффициент усиления, чем металлические (рис. 3.25) и обеспечивает лучшую чувствительность, чем флуоресцентные экраны (рис. 3.26).

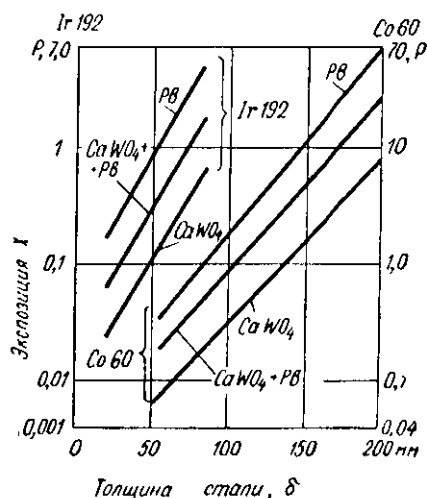


Рис. 3.25. Зависимость экспозиции от толщины стали для различных типов экранов и источников (Ir 192 и Co 60)

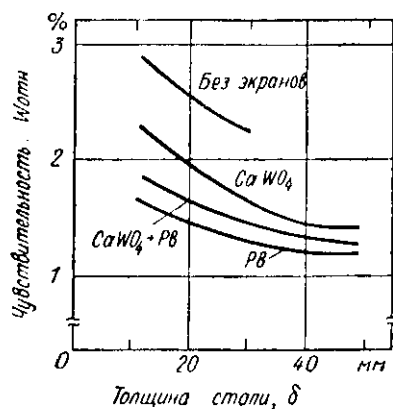


Рис. 3.26. Зависимость чувствительности рентгенографии от толщины стали для экранов различных типов

В практике радиографии применяют двойную комбинацию из усиливающих экранов в виде заднего и переднего экранов, между которыми размещены радиографические пленки. Применение заднего металлического экрана помимо стремления увеличить коэффициент усиления преследует другую цель — уменьшить влияние рассеянного излучения на пленку. Толщины металлических экранов, а также материал люминофора и его количество в составе флуоресцентных экранов выбирают в зависимости от энергии излучения (табл. 3.12). Коэффициент усиления уменьшается с ростом толщины контролируемого объекта.

Усиливающее действие экранов, применяемых при нейтронной радиографии на тепловых и промежуточных нейтронах с использованием метода прямой экспозиции основано на свойстве ряда материалов излучать вторичные γ -кванты, α -частицы или поток фотонов видимого света, интенсивность которых пропорциональна потоку нейтронов, проходящему через эти материалы. Кроме того, используют материалы, способные быстро активироваться в потоке нейтронов и имеющие очень короткий период полураспада. Это Ag 109 ($\sigma = 91$ барн, $T_{1/2} = 21$ с), Dy 164 ($\sigma = 2200$ барн, $T_{1/2} = 85$ с) и др. К материалам способным излучать вторичные γ -кванты, относятся Cd 113 ($\sigma = 20000$ барн), Sm 149, ($\sigma = 41000$ барн), Gd 155 ($\sigma = 61000$ барн) и др.

Эти экраны используют с безэкранными радиографическими пленками. Лучшие результаты по разрешающей способности получают при использовании металлических фольг из гадолиния толщиной 12,5—25 мкм, обладающих высоким сечением взаимодействия с тепловыми нейтронами. Фольги обычно устанавливают с двух сторон пленки, что сокращает экспозицию до 50% по сравнению с односторонней установкой. К материалам, излучающим вторичные α -частицы или поток фотонов видимого света, относятся Li 6 ($\sigma = 910$ барн) и B 10 ($\sigma = 3830$ барн). Эти экраны используют с экранными радиографическими пленками.

3.4.3. Методика и техника радиографии

Чувствительность. При промышленной радиографии основной показатель качества выполненного снимка — относительная чувствительность, определяемая по изображению на снимке деталей эталонов чувствительности. В практике как радиографии, так и радиоскопии применяют стандартизованные эталоны чувствительности нескольких типов (табл. 3.13).

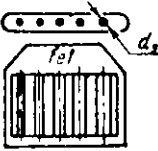
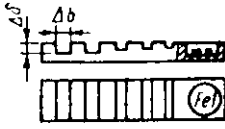
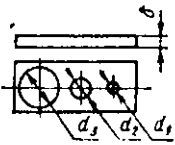
Зависимость относительной чувствительности от основных параметров просвечивания определяется уравнением

$$W_{\text{отр}} = \frac{\Delta\delta}{\delta} 100\% = \frac{2,3\Delta D_{\text{min}B}}{\gamma_{\text{ДЧ}}\delta} \cdot 100\%.$$

Это уравнение учитывает влияние различных факторов: радиационно-физических B и μ ; параметров радиографической пленки $\gamma_{\text{ДЧ}}$; толщины изделия δ , возможностей человеческого глаза ΔD_{min} — ми-

Таблица 3.13

Эталоны чувствительности, применяемые в промышленной радиографии

Тип эталона	Эскиз	Чувствительность (%) для $\delta = 10 \pm 50$ мм	Стандартизован в странах
Проволочный	 $d_2 = 0,05 \pm 4$ мм Геометрический ряд с основанием 1,25	1	СССР (ГОСТ 7512—69) ПНР ГДР ЧССР ФРГ Англия Япония
Канавочный с канавками переменной ширины	 $\Delta b = \Delta \delta = 0,1 \pm 7$ Геометрический ряд с основанием 1,39	1	СССР (ГОСТ 7512—69)
Пластинчатый с отверстиями	 $d_1 = \delta, d_2 = 2\delta, d_3 = 4\delta$	1,5—2	США
Ступенчатый с отверстиями	 $d = \delta$	2—2,5	Международный институт сварки (МИС)

нимальной разности плотностей почернения, различной глазом (прибором). Приведенное уравнение справедливо при отсутствии размытия краев изображения дефекта. В реальных условиях промышленной радиографии изображение дефекта всегда бывает размытым и характеризуется общей нерезкостью изображения u . Влияние нерезкости приводит к тому, что чувствительность ухудшается:

для канавочного дефектометра
$$W_{отн} = \frac{2,3\Delta D_{min}B}{\gamma_D \mu \delta} \left(1 + \frac{u}{\Delta b}\right) 100\%,$$

для проволочного дефектометра
$$W_{отн} = \frac{2,92\Delta D_{min}B}{\gamma_D \mu \delta} \left(1 + \frac{u}{d_2}\right) 100\%,$$

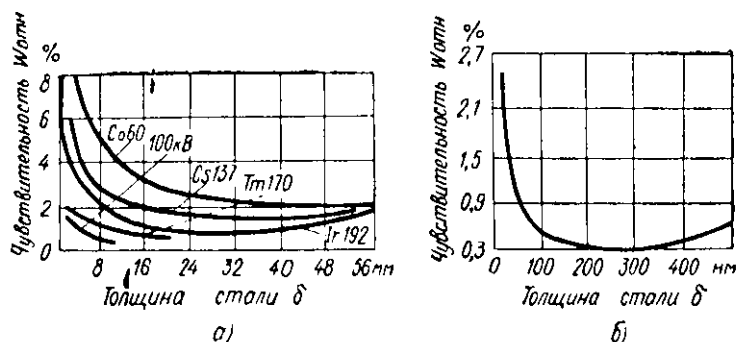


Рис. 3.27. Зависимость относительной чувствительности от толщины стали:

а — для рентгеновского и γ -излучений; б — для тормозного излучения бета-татрона; энергия 88 МэВ

где Δb и d_s — ширина и диаметр соответственно канавок и проволок эталонов чувствительности.

Эти соотношения позволяют определять в достаточном приближении значения минимального выявляемого дефекта: для канавочного дефектометра — дефекты типа непроваров, расслоений, макротрещин, имеющих ступенчатую или прямоугольную форму; для проволоочных дефектометров — дефекты шаровидной или овальной формы типа пор, включений и т. п. На рис. 3.27 и 3.28 приведены зависимости относительной и абсолютной чувствительностей при просвечивании с использованием различных источников излучения.

Величина минимальной выявляемой разности плотностей почернения $\Delta D_{\min}$ между изображением дефекта и основным фоном снимка определяется рядом факторов, к числу которых относятся степень совершенства глаза оператора, яркость экрана расшифровочного оборудования и условия расшифровки, а также размеры и форма изображения дефекта. Установлено, что глаз наиболее чувствителен при яркости более 30 кд/м² (30 нт), в этих условиях возможно различить разницу яркости около 0,14, что обеспечивает обнаружение минимальной разности плотностей почернения $\Delta D_{\min} = 0,006$. В общем виде, значения $\Delta D_{\min}$ при яркости экрана расшифровочного оборудования 30 нт составляют 0,006—0,02 (расстояние от глаза до экрана 25 см), причем меньшие значения соответствуют большим дефектам и малым отношениям длины дефекта к его ширине (до 20), а большие значения — малым дефектам и большим отношениям длины дефекта к его ширине (до 70).

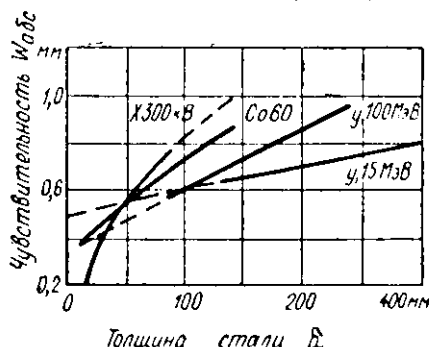


Рис. 3.28. Зависимость абсолютной чувствительности от толщины стали для различных источников излучения

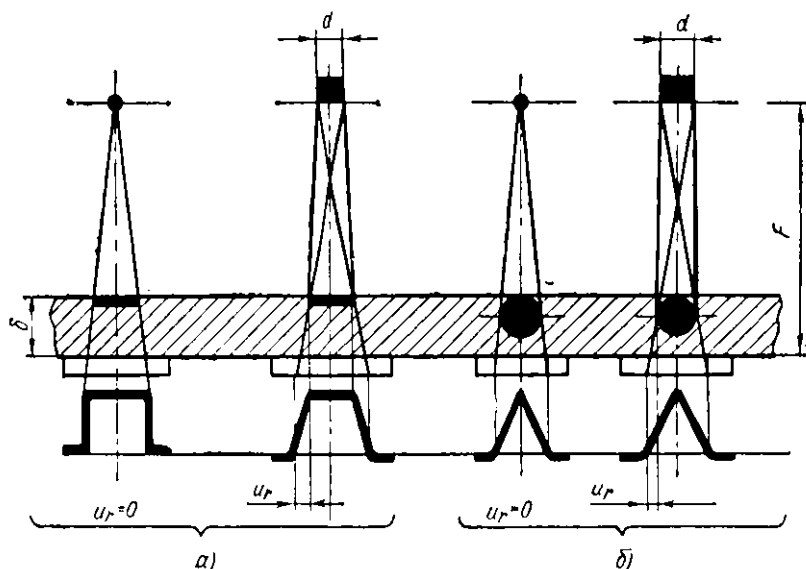


Рис. 3.29. Схемы образования геометрической нерезкости:

а — дефект ступенчатый; б — дефект шаровой формы

Величина общей нерезкости изображения определяется воздействием нескольких видов нерезкостей.

Геометрическая нерезкость (рис. 3.29) определяется из соотношения

$$u_r = d \frac{\delta}{F - \delta}.$$

Внутренняя нерезкость для рентгеновского излучения и флуорескопических экранов — $u_b = 0,1 \div 0,5$ мм; для рентгеновского излучения и экранов из Pb $u_b = 0,025 \div 0,1$ мм; для γ -излучения и экранов из Pb $u_b = 0,17 \div 0,5$ мм. Значения u_b зависят от энергии излучения, в частности, для Ir 192 $u_b = 0,17 \div 0,20$ мм; для Cs 137 $u_b = 0,27 \div 0,3$ мм; для Co 60 $u_b = 0,36 \div 0,5$ мм.

Нерезкость рассеяния:

$$u_p = u_b g^{\delta},$$

где δ — толщина просвечивания, см; g — коэффициент пропорциональности.

Для X-излучения $g = 1,25$; для Ir 192 $g = 1,15$; для Cs 137 $g = 1,09$; для Co 60 $g = 1,04$.

Нерезкость смещения, определяемая колебаниями источника, объекта и детектора в реальных условиях просвечивания обычно устраняется путем применения жестких штативных устройств, держателей источников и детекторов.

Общая нерезкость изображения, определяемая воздействием всех перечисленных детекторов, зависит также и от характера рас-

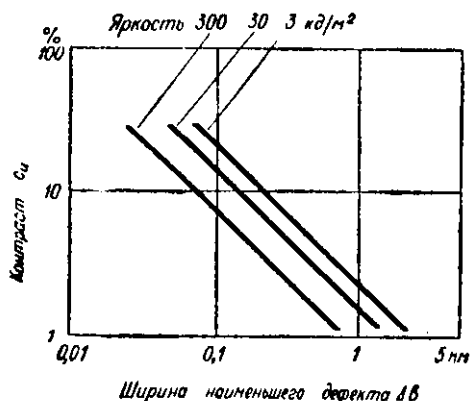


Рис. 3.30. Зависимость контраста изображения от ширины наименьшего видимого дефекта при различной яркости экрана негатоскопа

пределения нерезкости, связанной с формой дефекта или элемента эталона чувствительности. В связи с этим общая нерезкость изображения определяется соотношениями:

для канавочных эталонов чувствительности и дефектов ступенчатого типа (непровары, трещины и т. п.)

$$u = \sqrt[3]{u_r^3 + u_n^3};$$

для проволоочных эталонов чувствительности и дефектов овального типа (пор, включений, раковин и т. п.)

$$u = u_r + \frac{u_n}{2u_r} \left[1 - \exp\left(-\frac{2u_r}{u_n}\right) \right].$$

При просвечивании толстостенных изделий в двух последних уравнениях вместо u_n подставляют значение u_p .

Контраст изображения C_n определяет наряду с разрешающей способностью выявляемость дефектов. Он зависит не только от яркостей L_d и L_v дефектного и бездефектного участков изображения, но и от ширины дефекта Δb и его нерезкости u :

$$C_n = \frac{L_d - L_v}{L_v} \left(1 + \frac{u}{\Delta b} \right) 100\%.$$

Зависимость контраста C_n от Δb и L_v показана на рис. 3.30, из которого следует, что с ростом Δb и L_v возможно обнаруживать дефекты с существенно меньшим значением C_n . Наименьшие значения контраста изображения не превышают 1,4—2%.

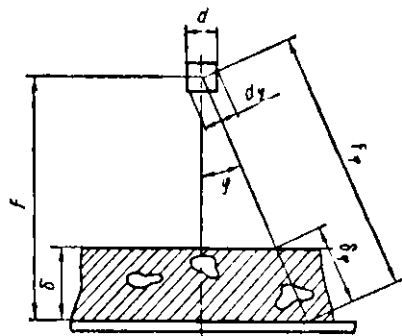


Рис. 3.31. Схема просвечивания плоского протяженного шва

При промышленной радиографии сварных соединений в основном используют схемы просвечивания (рис. 3.31—3.33), обеспечивающие контроль качества шва по участкам плоских протяженных изделий и изделий типа полых тел вращения.

Анализ приведенных схем показывает, что только при кольцевом просвечивании величина фокусного расстояния и толщина стенки — величины постоянные, при всех остальных способах контроля их значения меняются

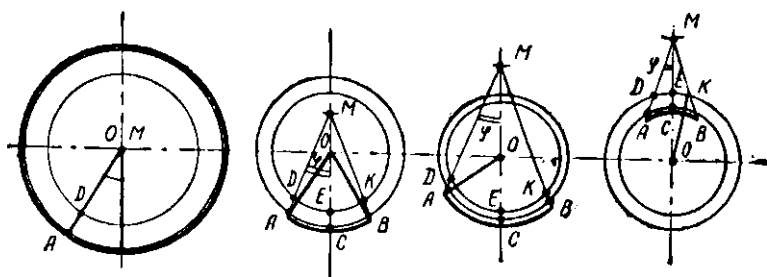


Рис. 3.32. Схемы просвечивания сварных соединений изделий типа полых тел вращения:

$$F = MC; \delta = EC; r = OA = OK; F_{\phi} = MA; \delta_{\phi} = DA$$

от центра к краю контролируемого участка. Суммарное влияние этих двух факторов оказывает существенное воздействие на получаемые результаты. В частности, радиографический снимок имеет, как правило, различные контрастности γ_D , плотности почернения D , общие нерезкости изображения u и, как следствие, различные значения относительной чувствительности контроля $W_{отн}$ по центру и краю снимка.

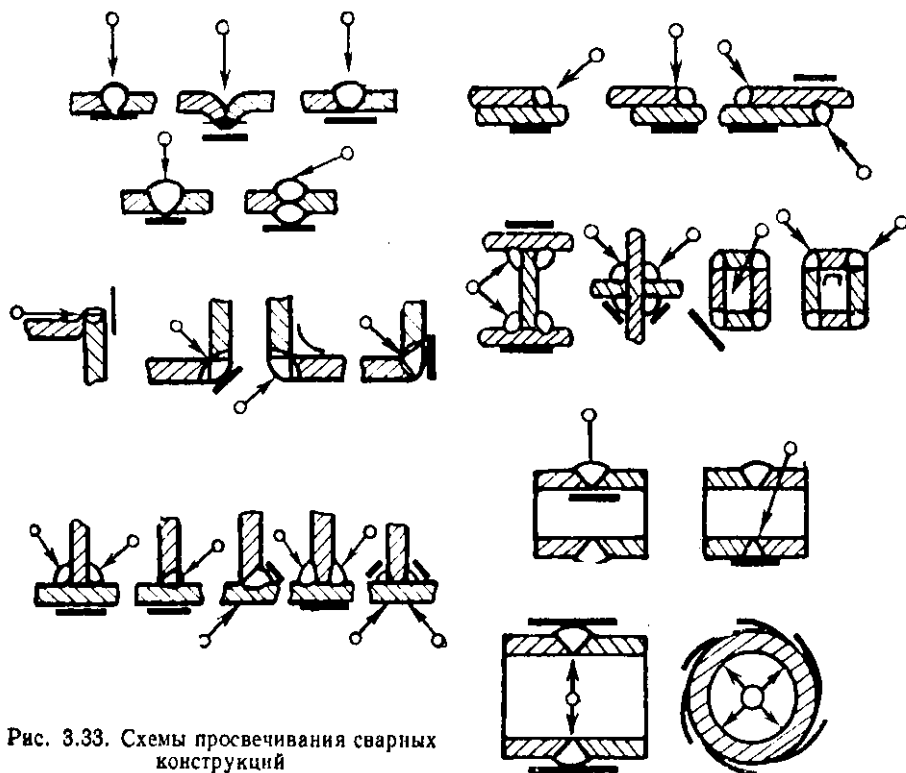


Рис. 3.33. Схемы просвечивания сварных конструкций

Таким образом, основные ограничения при использовании в практике промышленной радиографии любой из приведенных схем просвечивания следующие: получение допустимой разности плотностей почернения и допустимых общих нерезкостей изображения по центру и краю снимка; получение требуемой правилами контроля относительной чувствительности просвечивания $W_{отн}$ по центру и краю снимка; получение экономически оправданной производительности контроля.

Допустимая разность плотностей почернения ΔD между центром и краем снимка определяется для безэкранных пленок ограниченными возможностями расшифровочного оборудования (негатоскопов), позволяющего просматривать снимки с $D \leq 3$; для экранных пленок получением максимальной контрастности γ_D при наибольших значениях плотности почернения снимка $D = 1,5 \div 2,5$ (рис. 3.21); установленными правилами контроля нижними пределами минимальной плотности почернения снимка (обычно $D_{\min} \geq 1,5$).

В общем виде $\Delta D = D - D_{\min}$.

С учетом влияния параметров контроля это уравнение имеет вид

$$\Delta D = 0,87\gamma \left[2 \frac{F_{\phi} - F}{F_{\phi} + F} + 0,5\mu\delta \left(\frac{\delta_{\phi}}{\delta} - 1 \right) - \frac{B_{\phi} - B}{B_{\phi} + B} \right],$$

где F_{ϕ} , δ_{ϕ} и B_{ϕ} — фокусное расстояние, толщина просвечивания и дозовый фактор накопления по краю снимка соответственно; F , δ и B — аналогичные значения по центру снимка; значения среднего градиента γ для различных радиографических пленок см. в табл. 3.11.

В связи с изменением плотности почернения по поверхности снимка аналогично будет изменяться и его контрастность. Для безэкранных пленок

$$\gamma_D = 0,85fD \frac{D_{\max} - D}{2D_{\max} - D},$$

где f — коэффициент контрастности, учитывающий неравномерность размеров кристаллов бромистого серебра и их распределение в желатине; значения $D_{\max}$ см. в табл. 3.11.

Для экранных пленок в диапазоне плотностей почернения $D = 1,5 \div 2,5$ значения контрастности пленки γ_D можно принимать равными значениям среднего градиента γ (см. рис. 3.22 и табл. 3.11).

Так как относительная чувствительность радиографии зависит от контрастности снимка γ_D , общей нерезкости изображения u , количества рассеянного излучения, достигающего пленки, то при просвечивании изделий по участкам, когда все перечисленные параметры меняются от центра к краю снимка, чувствительность контроля также будет изменяться.

На рис. 3.34 приведены графики зависимости относительной чувствительности от угла ϕ при просвечивании плоских изделий различной толщины с использованием канавочных дефектометров. Фокусное расстояние выбирало из условия $u_r \leq u_p$. Снимки расшифровывали на негатоскопе с яркостью экрана 30 кд/м^2 (30 нт), при этом расстояние от глаза наблюдателя до экрана составляло 25 см. С увеличением угла ϕ чувствительность контроля существенно изменяется

Рис. 3.34. Зависимость относительной чувствительности от угла φ при просвечивании плоских протяженных стальных изделий (источник Cs 137, $D = 1,5$):

1 — $\mu\delta = 1$; $F = 35$ см; 2 — $\mu\delta = 2$; $F = 58$ см;
3 — $\mu\delta = 4$; $F = 83$ см; 4 — $\mu\delta = 6$; $F = 94$ см

от центра к краю снимка, причем большее отклонение получается при радиографии с использованием пленки РТ-5. Пример расчета параметров чувствительности дан в приложении 8.

Выбор режимов просвечивания. Выбор источника излучения, радиографической пленки и усиливающего экрана целиком определяет чувствительность просвечивания и производительность контроля. Общие рекомендации по выбору источников, пленки и экранов приведены в приложении 7, табл. 3.12 и 3.14 и на рис. 3.35. При необходимости получения высокой чувствительности следует использовать низкоэнергетические источники излучения и высококонтрастные мелкозернистые безкрайные пленки с металлическими усиливающими экранами. Для получения высокой производительности следует применять источники высокой энергии; высокочувствительные безкрайные пленки с усиливающими экранами и экранные пленки с флуоресцентными усиливающими экранами.

Пример 3.6. Выбрать источник излучения, радиографическую пленку и усиливающий экран для просвечивания стали толщиной $\delta = 10$ мм с получением максимальной производительности и наилучшей чувствительности контроля. Наилучшие результаты по чувствительности получают при использовании рентгеновских аппаратов. По табл. 3.14 выбираем необходимое напряжение на трубке в диапазоне 60—120 кВ. По табл. 3.5 подбираем аппарат РУП-120-5-1, у которого напряжение

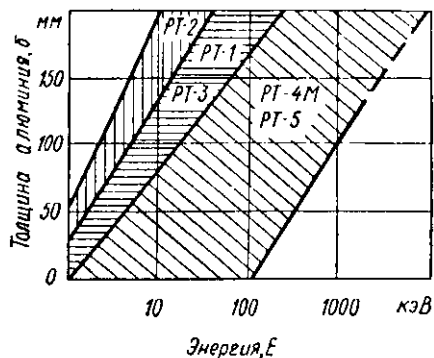
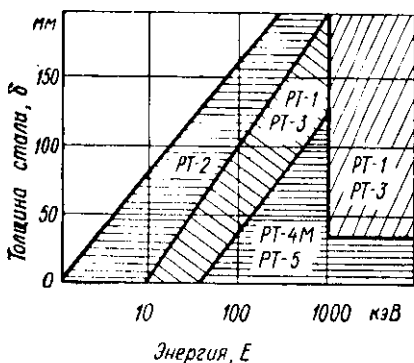
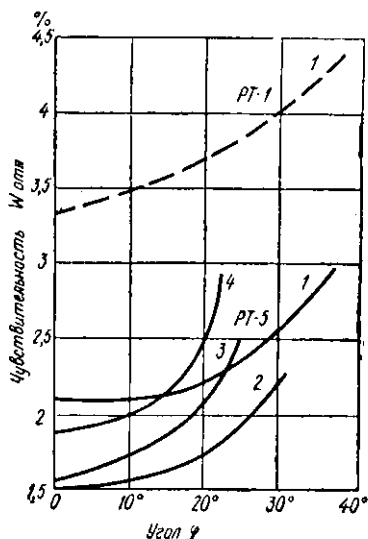


Рис. 3.35. Области применения радиографических пленок при просвечивании стали и алюминия

**Область применения источников ионизирующего излучения
в дефектоскопии**

Излучение		Диапазон контролируемых толщин, мм			
Тормозное	γ-излучение	Mg	Al	Tl	Fe
10—60 кВ	Am 241	До 80	До 50	До 8	До 4
60—120 кВ	Tm 170	10—200	3—70	2—40	1—20
Sr 90 + Be	Se 75	40—350	20—150	6—80	3—50
120—200 кВ					
150—300 кВ	Ir 192	70—450	40—250	10—120	5—80
200—400 кВ	Cs 137	100—500	50—350	20—150	10—120
3—6 МэВ					
300—1000 кВ	Co 60	300—700	200—500	60—300	30—200
6—15 МэВ					
15—50 МэВ	—	450—2000	250—1400	150—800	100—500

Примечание: кВ — напряжение рентгеновского аппарата; МэВ — энергия излучения ускорителя.

меняется от 50 до 120 кВ. По рис. 3.35 определяем рекомендуемую пленку РТ-2. Для получения минимальных затрат времени просвечивания выбираем флуоресцентный экран типа УС.

Фокусное расстояние при промышленной радиографии выбирают для заданной толщины объекта и с учетом размеров фокусного пятна (активной части) d по уравнению

$$F = \delta \left(\frac{d}{u_r} + 1 \right).$$

Геометрическую нерезкость выбирают из условия: $u_r \leq u_n$ при просвечивании тонкостенных изделий; $u_r \leq u_p$ при просвечивании изделий большой толщины, когда рассеянное излучение существенным образом влияет на ухудшение выявляемости. В этом случае общая нерезкость изображения u при $u_r = u_p$ равна: для ступенчатых дефектов

$$u = \sqrt[3]{u_p^3 + u_r^3} = 1,25u_p,$$

для овальных дефектов

$$u = u_r + \frac{u_p}{2u_r} \left[1 - \exp \left(-\frac{2u_r}{u_p} \right) \right] = 1,43u_p.$$

При $u_r = u_n$ общая нерезкость соответственно $u = 1,25u_n$ и $u = 1,43u_n$.

Пример 3.7. Определить фокусное расстояние при просвечивании стали толщиной $\delta = 35$ мм источником Cs 137 с размером активной части $d = 5$ мм.

Полагая $u_p = u_n = 0,3$ мм, получим

$$F = 35 \left(\frac{5}{0,3} + 1 \right) \approx 600 \text{ мм.}$$

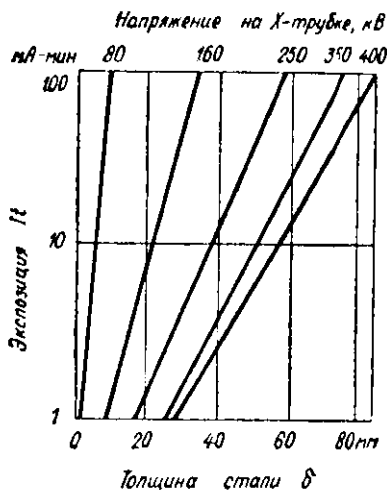


Рис. 3.36 Номограмма для определения экспозиций при рентгенографии стали (пленка РТ-1, $D = 1,5$, экран из Рв $\delta = 0,05$ мм; $F = 75$ см)

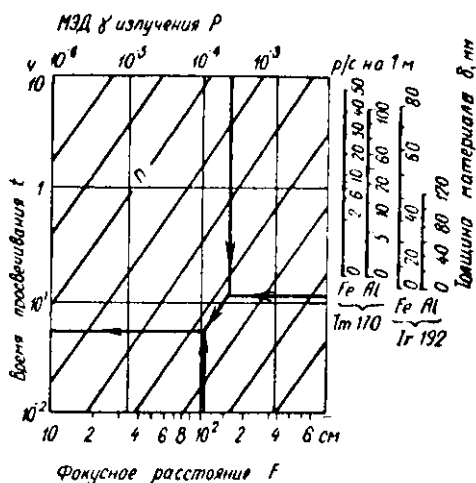


Рис. 3.37. Универсальная номограмма для определения времени просвечивания железа и алюминия на пленку РТ-1 ($D = 1,5$); источники:

Tm 170, экран из Рв, $\delta = 0,05/0,05$ мм и Ir 192, экран из Рв $= 0,1/0,2$ мм. Ключ номограмм $P\delta n - nFt$

Время просвечивания при промышленной радиографии выбирают либо по номограммам экспозиций, либо с помощью автоматических экспонометров, измеряющих и задающих необходимую дозу облучения для детектора. Номограммы экспозиций составляют с учетом толщины и материала контролируемого объекта, МЭД и энергии излучения, фокусного расстояния и комбинаций пленок и экранов.

На рис. 3.36 и 3.37 приведены в качестве примера номограммы экспозиций для рентгеновского аппарата и радиоизотопных источников излучения. Для рентгеновского аппарата экспозицию определяют как произведение силы тока трубки на время для выбранного значения напряжения на трубке и заданной толщины контролируемого материала. При значениях фокусных расстояний, отличных от тех, для которых построена номограмма, полученную экспозицию пересчитывают обратно пропорционально квадрату фокусных расстояний.

Пример 3.8. а) По номограмме (рис. 3.36) определить экспозицию при просвечивании стали толщиной $\delta = 38$ мм на фокусном расстоянии $F = 1000$ мм при напряжении на трубке $U = 250$ кВ. По номограмме для $F_n = 750$ мм экспозиция $\mathcal{E}_n$ составляет 10 мА·мин. Экспозиция $\mathcal{E}$ для $F = 1000$ мм:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_n \frac{F^2}{F_n^2} = 10 \frac{1000^2}{750^2} = 17,8 \text{ мА} \cdot \text{мин.}$$

б) По номограмме (рис. 3.37) для просвечивания стали толщиной $\delta = 20$ мм с использованием источника Ir 192 с МЭД излучения $P = 10^{-4}$ Р/с·м на фокусном расстоянии $F = 60$ см определить время просвечивания t . Пользуясь ключом номограммы $P\delta n - nFt$ получаем $t = 10^{-1}$ ч.

Выбор размера участка, контролируемого за одну экспозицию. При радиографии сварных соединений плоских протяженных изделий и полых тел вращения по участкам производительность контроля определяется временем t_{Σ} , затрачиваемым на просвечивание всего сварного соединения:

$$t_{\Sigma} = N(t + t_a),$$

где N — общее число снимков, затрачиваемое на контроль всего сварного соединения; t — время просвечивания, затрачиваемое на получение одного снимка; t_a — вспомогательное время, затрачиваемое на подготовку одного участка к просвечиванию (очистка и разметка шва, установка и снятие дефектометров, маркировочных знаков и кассет на участке просвечивания и т. д.).

При контроле плоских протяженных изделий число участков N , на которое разбивается сварной шов при его просвечивании коническим пучком излучения с углом коллимации 2φ (рис. 3.31):

$$N = \frac{l}{2(F - \delta) \operatorname{tg} \varphi},$$

где l — длина сварного шва.

При контроле сварных соединений по участкам, когда плотность почернения D убывает от центра к краю снимка, существуют такие размеры угла коллимации 2φ , определяющие величину участка, при которых достигаются минимальные затраты времени просвечивания t_{Σ} . В самом деле увеличение размера участка, контролируемого за одну экспозицию, приводит к увеличению времени просвечивания t , а увеличение числа снимков N приводит к уменьшению t . Таким образом, существует некоторое соотношение между N и t , когда общее время просвечивания $t_{\Sigma \min}$ достигает минимального значения. Для плоского сварного шва соотношение для вычисления этого оптимального значения угла коллимации (при условии $t \gg t_a$) имеет вид

$$\mu\delta = \frac{\cos \varphi_{\text{опт}} (2 \cos^2 \varphi_{\text{опт}} - 1)}{1 - \cos^2 \varphi_{\text{опт}}}.$$

Выбор оптимального угла коллимации $2\varphi_{\text{опт}}$ и соответствующего ему размера участка при контроле плоских швов (рис. 3.38) при выбранном фокусном расстоянии F в основном определяется толщиной плоского изделия, что особенно заметно в области малых толщин. Выигрыш во времени просвечивания $t_{\Sigma}/t_{\Sigma \min}$, полученный за счет выбора оптимального размера участка, показан на рис. 3.39. При контроле плоских сварных швов достигается существенное сокращение затрат времени просвечивания, при этом положение самого оптимума смещается в область больших размеров снимка с ростом вспомогательного времени.

Подготовка к просвечиванию заключается в предварительном осмотре сварного соединения и очистке его от шлака, масла и других загрязнений. Все наружные дефекты должны быть удалены, так как их изображение на радиограммах может помешать обнаруже-

нию изображений внутренних дефектов. При просвечивании по участкам участки разбивают и маркируют с применением маркировочных свинцовых знаков. Толщину знаков выбирают в зависимости от толщины объекта и энергии излучения. Иногда свинцовые знаки размещают на кассете, после просвечивания их изображение отпечатывается на снимке. В случае невозможности применения знаков снимки размечают, нанося надписи мягким графитовым карандашом непосредственно на пленке. В ряде случаев помечают черной тушью флуоресцентные экраны, что обеспечивает получение на снимке четкого отпечатка цифровой маркировки. Обычно кассеты и заряженные в них пленки маркируют в том же порядке, что и контролируемые участки шва.

Размеры радиографических пленок, усиливающих экранов, гибких и жестких кассет, маркировочных знаков регламентированы ГОСТ 15843—70 «Принадлежности для промышленной радиографии. Основные размеры». Этим стандартом рекомендованы к применению усиливающие экраны, гибкие и жесткие кассеты 15 типоразмеров: 6×24 , 6×36 , 6×48 , 6×72 , 10×12 , 10×24 , 10×36 , 10×48 , 10×72 , 13×18 , 18×24 , 24×30 , $7,5 \times 40$, 15×40 и 30×40 см, а также два типоразмера рулонных пленок 6×2000 и 10×2000 см. Усиливающие металлические экраны имеют следующие толщины: 0,02; 0,05; 0,09; 0,16; 0,2 и 0,5 мм. Экраны выполняют в виде свинцовой фольги, которую наклеивают на гибкую пластиковую подложку, обеспечивающую их сохранность и хорошее состояние поверхности.

Маркировочные знаки (буквы, цифры, стрелки) имеют следующие размеры: высота 5, 8, 12 и 18 мм, толщина 1; 1,5; 2,5 и 5 мм соответственно. Знаки поставляют в коробках в комплекте с пинцетами и пеналами для набора маркировки. Пеналы помещают в специально предусмотренные карманы на гибких кассетах, изготавливаемых из све-

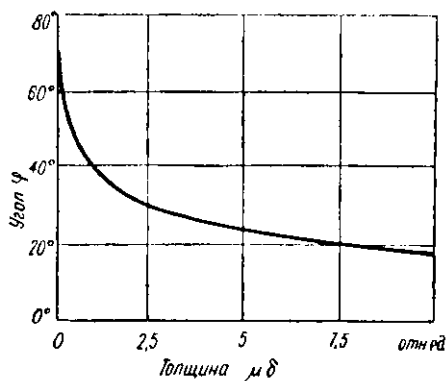


Рис. 3.38. Зависимость угла коллимации 2ϕ от толщины поглотителя при просвечивании плоских изделий конусным пучком излучения

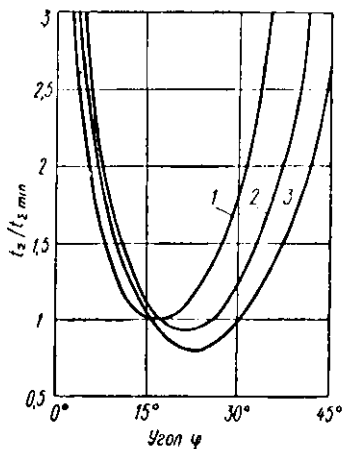


Рис. 3.39. Изменение выигрыша затрат общего времени просвечивания при радиографии плоских изделий по участкам:

1 — $t_0/t = 0$; 2 — $t_0/t = 1$; 3 — $t_0/t = 2$

тонепроницаемых материалов (пластиков, дермантина, бумаги и т. п.).

Эталоны чувствительности размещают на изделии со стороны, обращенной к источнику излучения. В случаях, если подобная установка невозможна, например при просвечивании труб через две стенки, разрешается установка эталона со стороны детектора. Для этого на кассете предусматривают дополнительный карман. Типы и размеры эталонов чувствительности регламентированы ГОСТ 7512—69 «Швы сварных соединений. Методы контроля просвечиванием проникающими излучениями» (табл. 3.13).

Предусмотрены канавочные и проволочные эталоны чувствительности четырех типоразмеров каждый. Канавочный эталон имеет шесть канавок, глубина (мм) которых отличается в 1,39 раза друг от друга: № 1 0,05; 0,07; 0,1; 0,14; 0,2; 0,27; № 2 0,14; 0,2; 0,27; 0,36; 0,5; 0,7; № 3 0,5; 0,7; 1,0; 1,4; 2,0; 2,7; № 4 1,4; 2,0; 2,7; 3,6; 5,0; 7,0.

Проволочный эталон представляет собой пластиковый чехол с установленными в нем семью проволоками, отличающимися друг от друга в 1,25 раза. Диаметры проволоки (мм) этих эталонов: № 1 0,05; 0,063; 0,08; 0,1; 0,125; 0,16; 0,20; № 2 0,1; 0,125; 0,16; 0,2; 0,25; 0,32; 0,40; № 3 0,32; 0,4; 0,5; 0,63; 0,8; 1,0; 1,25; № 4 1,0; 1,25; 1,6; 2,0; 2,5; 3,2; 4,0. Материал эталона должен быть аналогичен материалу контролируемого изделия.

Канавочные и проволочные дефектометры маркируют свинцовыми буквами и цифрами высотой 5 мм. Буквы обозначают материал эталона, цифры — его номер (например, Fe1, Cu2, Al3, Ti4).

При зарядке кассет радиографическую пленку помещают в кассету с использованием следующих схем зарядки: между двумя металлическими экранами; между двумя флуоресцентными экранами; между металлическим и флуоресцентным экранами; между парами экранов, каждая из которых состоит из одного металлического и одного флуоресцентного экрана. В последнем случае к пленке прикладывают флуоресцентный экран.

В ответственных случаях контроля применяют схему двойной зарядки, когда в одну кассету помещают вышеописанные комбинации экран—две пленки—экран.

Схемы просвечивания. Сварные соединения просвечивают по схемам, рекомендуемым ГОСТ 7512—69. В случаях, если контролю подвергают изделия с протяженными швами или со швами сложной конфигурации, их разбивают на участки таким образом, чтобы схемы просвечивания соответствовали рекомендуемому стандарту. Во всех случаях контроля необходимо устранять взаимные колебания и вибрации изделия, дефектоскопического оборудования и детекторов во избежание роста нерезкости изображения дефектов.

При просвечивании через две стенки сварных соединений труб малого диаметра (рис. 3.40) во избежание наложения изображения участка шва, обращенного к источнику излучения, на изображение участка шва, обращенного к пленке, источник сдвигают из плоскости

сварного соединения на расстояние a , зависящее от радиуса трубы r , ширины шва b и фокусного расстояния F

$$a = \frac{b}{r} (F - 1,5r).$$

В этом случае расстояние между внутренними краями изображения шва на снимке будет равно его ширине b .

При контроле сварных соединений с резкими перепадами толщины (рис. 3.41) применяют твердые, жидкие и порошковые компенсаторы для выравнивания плотности почернения по всему снимку. Их изготавливают из материала, имеющего ту же плотность, а по возможности тот же атомный номер, что и контролируемый объект. В качестве компенсаторов используют сухие или жидкие соли тяжелых элементов, опилки, дробь и т. п.

Контроль роликовой и точечной сварки, а также паяных соединений можно проводить с использованием низкоэнергетического излучения и высококонтрастной пленки, при этом возможно обнаружение трещин, пор, раковин и всплесков, а также непропаев и включений флюса.

Фотообработка радиограмм включает проявление, промежуточную промывку, фиксирование, промывку и сушку. Ручным способом радиограммы обрабатывают в специальных рамках или кассетах (рис. 3.42). Автоматическую обработку осуществляют с помощью автоматов рольного типа (рис. 3.43). Режимы фотообработки и составы проявляющих и фиксирующих растворов указаны заводами-изготовителями на каждой пачке радиографической пленки.

Необходимое условие качественной фотообработки радиограмм — постоянство поддержания температур и концентрации обрабаты-

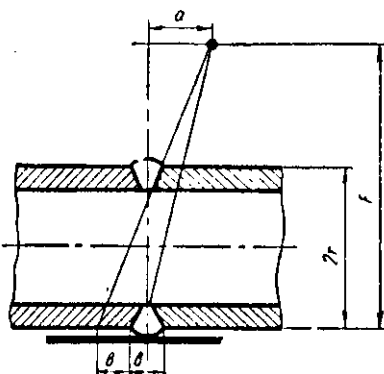


Рис. 3.40. Схема просвечивания через две стенки со смещением источника из плоскости шва

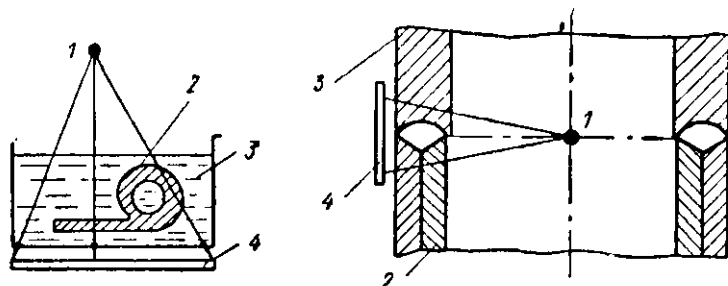


Рис. 3.41. Просвечивание с использованием компенсаторов

1 — источник; 2 — изделие; 3 — компенсатор; 4 — пленка

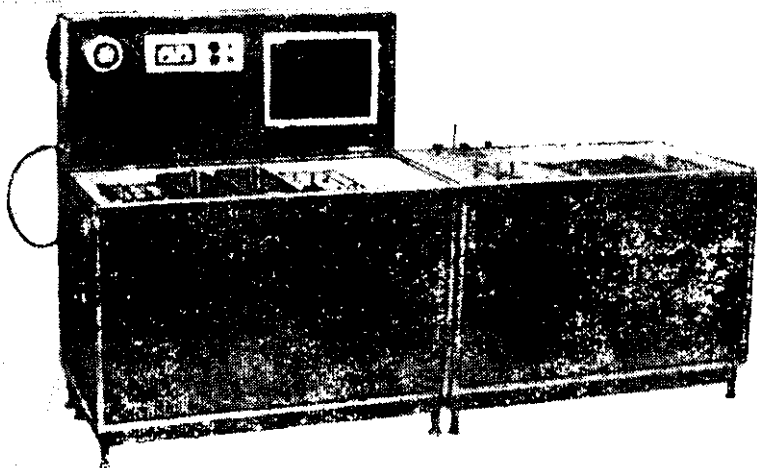


Рис. 3.42. Установка для ручной фотообработки радиограмм фирмы Полон (ПНР)

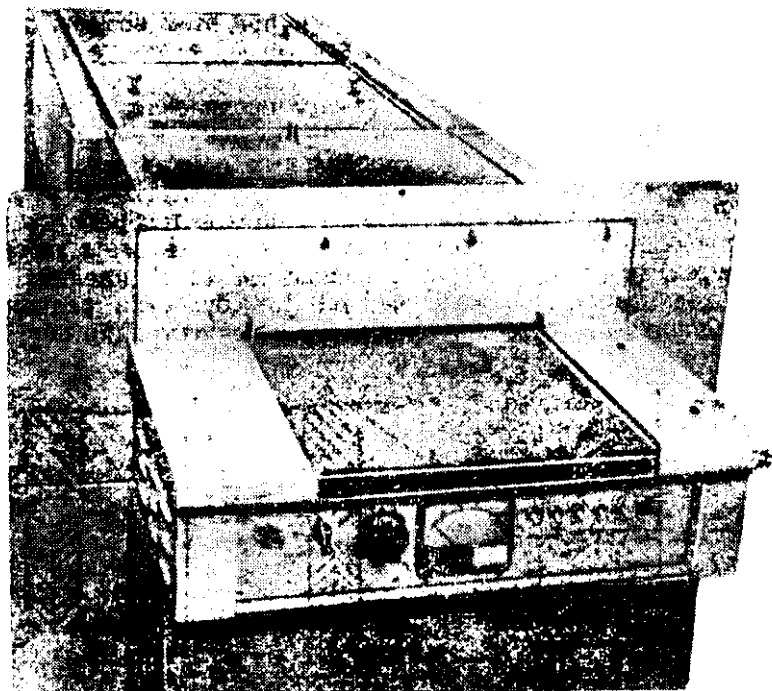


Рис. 3.43. Автомат для рольной фотообработки радиограмм АФ-10

вающих растворов, температуры сушки, обеспечение необходимой освещенности помещений с использованием красных фонарей.

Для ручного процесса фотообработки время проявления обычно составляет 6—12 мин при температуре 16—24° С, время фиксирования равно удвоенному времени проявления при температуре 15—18° С, время промывки 20—25 мин. Время сушки составляет 20—25 мин при температуре 35° С.

При автоматической фотообработке используют термостойкие пленки РТ-1Д, РНТМ-1Д и РТ-5Д, при этом времена проявления, фиксирования и промывки одинаковы и равны 1—3 мин, время сушки 4—6 мин при температуре 50—60° С.

Расшифровку снимков и оценку качества просвечиваемого сварного соединения поручают наиболее опытным операторам-расшифровщикам, которые по выполненным радиограммам дают заключение о наличии дефектов. Радиограммы расшифровывают в проходящем свете на негатоскопах (рис. 3.44). Современные негатоскопы обеспечивают регулирование яркости поля облучения и его размеров. Размеры поля негатоскопов регламентированы ГОСТ 15843—70 и составляют 100 × 480, 100 × 720, 150 × 400 и 400 × 400 мм. Максимальная яркость основного поля негатоскопа обычно позволяет рассматривать снимки с плотностью почернения до 3, а вспомогательного малого поля до 5.

Так как радиографическая пленка является детектором с высоким уровнем собственных шумов, вызванных неравномерностью полива эмульсии, некачественным проявлением и т. п., расшифровщики должны уметь отличить эти дефекты пленки от дефектов изделия. В сомнительных случаях проводят повторное просвечивание или сразу применяют двойную зарядку кассет.

В каждой отрасли промышленности в настоящее время существуют собственные правила и нормы, регламентирующие уровень дефект-

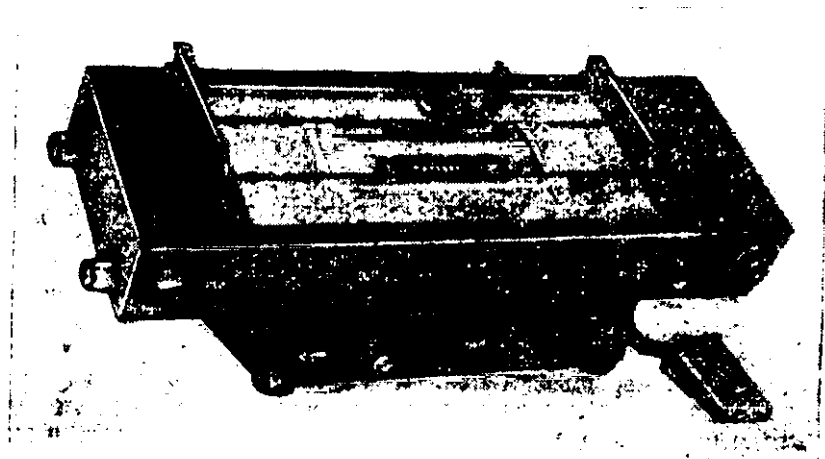


Рис. 3.44. Негатоскоп для расшифровки радиограмм фирмы Полон (ПНР)

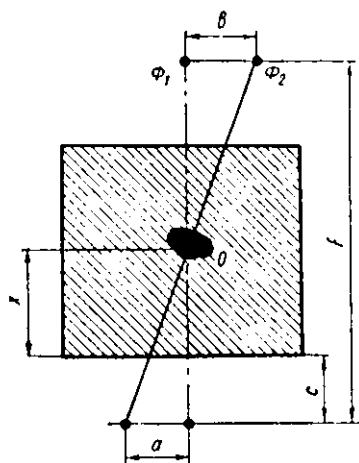


Рис. 3.45. Определение глубины залегания дефекта с перемещением источника излучения на расстояние b

ности сварных соединений и требования к качеству выполнения самой радиограммы. В общем виде снимок должен удовлетворять следующим требованиям: на радиограмме должен быть виден весь сварной шов с усилением и околошовная зона, ширина которой определяется правилами контроля; на снимке должны быть отчетливо видны маркировочные знаки и эталоны чувствительности; на снимке недопустимы пятна, царапины, отпечатки пальцев, подтеки, белый налет от плохой промывки и другие дефекты пленки и фотоподготовки.

Выявляемость дефектов при контроле сварных соединений. На радиограммах выявляются следующие дефекты: трещины продольные и поперечные в наплавленном и основном металле, направление которых совпадает с направлением просвечивания в диапазоне углов $0-12^\circ$, непровары сплошные и прерывистые по кромкам шва и наплавленного металла; вольфрамовые и шлаковые включения; поры—газовые включения; подрезы, проплавы, прожоги.

При радиографии обнаруживают дефекты, имеющие раскрытие от 0,05 мм и выше. Поры, обнаруживаемые на снимке, могут быть одиночными, групповыми, распределенными по всему сечению шва, вытянутыми в цепочку или расположенными отдельными скоплениями. Расшифровщик по изображению дефекта на снимке определяет его координаты, а также размеры (ширину и длину). Глубину залегания дефекта определяют способом съемки изделия со смещением источника излучения. В этом случае глубина x определяется из соотношения (рис. 3.45)

$$x = \frac{Fa}{b+a} - c.$$

Величина дефектов легко измеряется по их изображению на снимке с использованием в качестве мерительного инструмента лупы с десятикратным увеличением, снабженной шкалой с ценой деления 0,1 мм.

Наилучшим образом по снимкам оценивается величина пор и шлаковых включений сферической формы. Действительно, пора диаметром 2 мм в проекции на плоскость снимка будет иметь диаметр 2 мм, легко измеряемый линейкой. Независимо от природы дефектов, на основе закона поглощения излучения можно сказать, что с увеличением размеров дефектов по протяженности в глубину, плотность почернения снимка в месте дефекта будет увеличиваться. Плотность почернения отдельных участков радиографических снимков опре-



Рис. 3.46. Радиограмма сварного шва

деляется фотометрированием на денситометрах и микрофотометрах. Не рекомендуется оценка величины дефектов по протяженности в глубину сравнением почернения дефекта и канавки эталона на снимке.

Для сокращения протокольной записи обнаруженных на снимках дефектов применяют сокращенные обозначения, регламентированные ГОСТ 7512—69: Т — трещины, Н — непровар, П — поры, Ш — шлаковые включения, В — вольфрамовые включения, Пд — подрез, См — смещение кромок, Р — разностенность, О — ослабление корня шва. По характеру распределения дефекты объединяют в следующие группы: А — отдельные дефекты; Б — цепочка дефектов; В — скопление дефектов.

К цепочке дефектов относятся расположенные на одной линии дефекты в количестве не менее трех с расстоянием между ними, равным трехкратной величине дефекта или меньше. К скоплению дефектов относятся кучно расположенные дефекты в количестве не менее трех с расстоянием между ними, равным трехкратной величине дефектов или меньше. Размером дефекта считается его наибольший размер изображения на снимке в миллиметрах. При наличии группы дефектов разных размеров одного вида указывают средний или преобладающий размер дефекта в группе, а также общее число дефектов по всей длине снимка для одиночных дефектов (группа А), протяженность дефекта и расстояние между крайними дефектами, образующими цепочку (группа Б) или скопление (группа В). Каждую группу дефектов указывают в заключении отдельно.

Пример 3.9. На изображении участка шва сварного соединения С5 ГОСТ 5264—69 чувствительностью 3% и длиной 300 мм выявлены две трещины длиной по 5 мм, непровар длиной 120 мм, четыре отдельных шлаковых включения размером по 3 мм и одна цепочка пор длиной 25 мм.

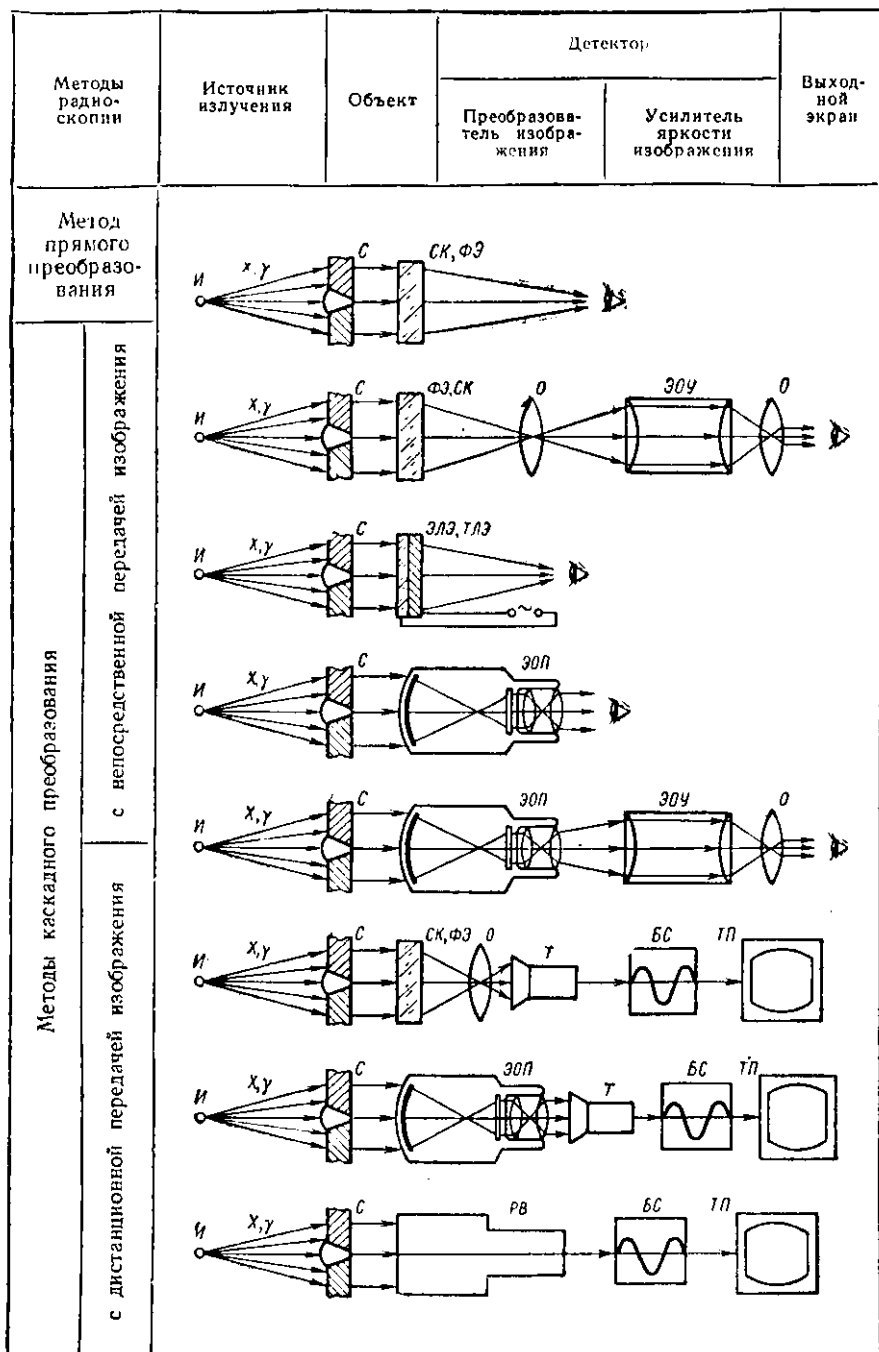
Запись в заключении: С5, 3, 300, Т-5-2; Н-120; ША-3-4, ПБ-1-25.

На рис. 3.46 показана схема сварного шва длиной 120 мм, видны поры диаметром 2 мм на протяжении 50 мм, трещина длиной 35 мм. Запись в заключении: 120, ПБ-2-50, Т-35-1.

3.5. ПРОМЫШЛЕННАЯ РАДИОСКОПИЯ

3.5.1. Классификация методов

Радиоскопия (радиационная интроскопия) основана на просвечивании изделий ионизирующим излучением; преобразовании скрытого радиационного изображения объекта в светотеневое или электрон-



ное изображения; усилении и передаче этих изображений или непосредственно оператору, или на расстояние с помощью оптических и телевизионных систем для последующего визуального анализа на выходных экранах.

В практике радиоскопии различают метод прямого преобразования скрытого радиационного изображения объекта в светотеневое изображение и методы каскадного преобразования скрытого радиационного изображения объекта в светотеневое как с непосредственной оптической передачей визуальной информации оператору, так и с дистанционной ее передачей с помощью телевизионных систем (схема 3.5).

На схеме 3.5 приняты следующие сокращения: И — источник; С — сварное соединение; ФЭ — флуороскопический экран; СК — сцинтилляционный кристалл; ЭОУ — электронно-оптический усилитель яркости; О — оптика; ЭОП — электронно-оптический преобразователь изображения; ЭЛЭ — электролюминесцентный экран; ТЛЭ — термолюминесцентный экран; Т — телевизионная передающая трубка; БС — телевизионный блок связи; ТП — телевизионный приемник; РВ — рентген-видикон.

Во всех перечисленных методах используют три основных физических явления: 1) люминесценцию кристаллических веществ под действием ионизирующих излучений; 2) фотоэффект под действием ионизирующих излучений или вызванной ими люминесценции, сопровождающейся эмиссией электронов с поверхности вещества в вакууме или газе под действием падающего на эту поверхность излучения; 3) вторичную электронную эмиссию при преобразовании электронных изображений в электрический сигнал и последующем воспроизведении видимого изображения в телевизионных системах.

На принципах люминесценции основано действие флуороскопических экранов, сцинтилляционных кристаллов и люминофоров, используемых в ЭОП, ЭОУ и приемных телевизионных трубках. Явление фотоэффекта использовано в рентген-видиконах, ЭОП и ЭОУ, а явление вторичной электронной эмиссии — в передающих и приемных телевизионных трубках, ЭОП и ЭОУ.

В качестве источников ионизирующего излучения при радиоскопии наибольшее применение нашли рентгеновские аппараты. Более ограничено используют линейные и циклические ускорители, а также радионуклидные источники с большими мощностями экспозиционных доз γ -излучения на расстоянии 1 м: $5,2 \cdot 10^{-5}$ — $5,2 \cdot 10^{-4}$ А/кг (0,2—2 Р/с). Перспективно применение ядерных реакторов и генераторов нейтронов для нейтронной радиоскопии.

3.5.2. Радиоскопические детекторы

Основные радиоскопические детекторы, преобразующие скрытое радиационное изображение объекта в его светотеневое изображение — это флуороскопические экраны (табл. 3.16), сцинтилляционные кристаллы, электронно-оптические преобразователи и электролюминесцентные экраны. Последние два детектора одновременно служат и усилителями яркости изображения. Кроме них для усиления яркости

Основные характеристики радиоскопических детекторов

Детекторы	Основные особенности	Разрешающая способность, мм ⁻¹	Коэффициент усиления яркости	Время прослеживания экрана при яркости $L_p = 1 \text{ кд/м}^2$	Коэф. контрастности	Рабочий диапазон энергий, кВ
Флуороскопический экран	Преобразователь изображения на базе (Zn, Cd) S (Ag), CaWO ₄	3	1	$10^{-2} - 10^{-1}$	1	60—150
Сцинтилляционный кристалл	Преобразователь изображения на базе CsI (Tl), NaI (Tl)	5—12,5	5—15	$10^{-6} - 10^{-8}$	1	150—2000
Электролюминесцентные экраны	Преобразователь-усилитель яркости изображения на базе фотопроводников	3—10	$10^1 - 10^2$	3—30	2	60—300
Электронно-оптические преобразователи	Преобразователь-усилитель яркости изображения на базе люминофоров	1—3	$10^3 - 10^4$	$10^{-3} - 10^{-1}$	1	60—2000
Электронно-оптические усилители видимого света	Усилитель яркости на люминофорах	1—2	$10^4 - 10^6$	$10^{-3} - 10^{-1}$	1	60—2000
Рентген-видиконы	Преобразователь-усилитель яркости изображения	0,5—50	20—50	$10^{-1} - 10^0$	0,7	40—1500
Телевизионная передающая и приемная система	Усилитель изображения на базе трубок: суперортикон, видикон и др.	—	—	$10^{-1} - 600$	4—10	—

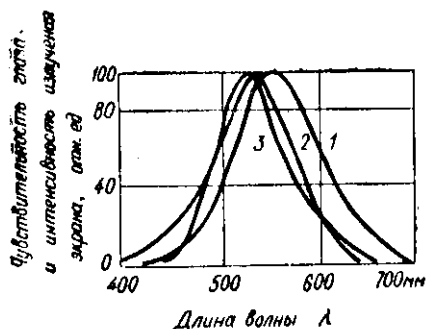


Рис. 3.47. Спектральная чувствительность глаза в условиях дневного зрения при яркости $L_v = 10$ кд/м² (1) и сумеречного зрения при яркости $L_v = 0,32$ кд/м² (2). Спектральный состав излучения флуороскопического экрана на базе (Zn, Cd) S (Ag) (3)

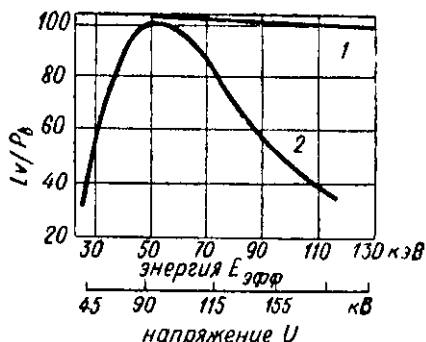


Рис. 3.48. Зависимость отношения яркости свечения сцинтилляционного кристалла (1) и флуороскопического экрана (2) на базе (Zn, Cd) S (Ag) к МЭД в воздухе от эффективной энергии рентгеновского излучения (I_v/P_v — в относительных единицах)

изображений применяют электроно-оптические усилители видимого света и телевизионную технику. В качестве детектора, обеспечивающего непосредственное преобразование ионизирующего излучения в электрический сигнал используют рентген-видикон.

Так как расшифровку радиоскопических изображений оператор осуществляет визуально, видимый спектр свечения выходного экрана должен быть хорошо согласован по спектральной чувствительности с чувствительностью человеческого глаза, которая зависит от длины волны света и освещенности изображения в условиях дневного и сумеречного зрения (рис. 3.47).

Флуороскопические экраны. Принцип действия флуороскопических экранов основан на мгновенной люминесценции кристаллов под действием ионизирующих излучений. Применение указанных в табл. 3.16 люминофоров вызвано тем, что спектральный состав испускаемого ими видимого света хорошо согласуется со спектральной чувствительностью человеческого глаза в условиях сумеречного зрения (рис. 3.47). Люминофоры, используемые для флуороскопических экранов, имеют среднюю толщину 85 мг/см² при плотности около 4,5 г/см³. Размеры экранов обычно равны 40×40; 35,6×35,6; 30×40; 24×30 и 18×24 см. Яркость свечения экрана определяет чувствительность метода. В зависимости от энергии излучения и мощности экспозиционной дозы P_0 в воздухе яркость флуороскопических экранов составляет $L_v = 10^{-4} \div 10^1$ кд/м². Зависимость яркости свечения L_v экрана от энергии ионизирующего излучения при постоянной мощности экспозиционной дозы P_0 в воздухе (ход с жесткостью экрана) показана на рис. 3.48. Максимум отношения L_v/P_0 достигается при энергии 45—55 кэВ и составляет обычно $L_v/P_0 = 3 \cdot 10^{-3}$ кд·с/Рм².

Именно эта энергия оптимальна для экранов, так как при ней возможно получение лучших из возможных значений чувствительности просвечивания. При использовании рентгеновских аппаратов по-

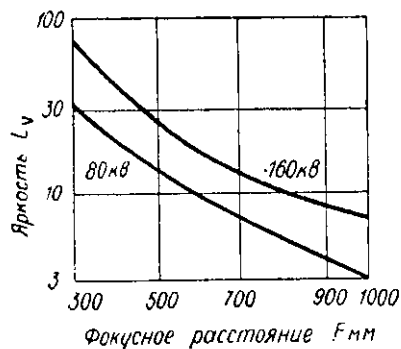


Рис. 3.49. Зависимость яркости флуороскопического экрана на базе (Zn, Cd) S (Ag) от фокусного расстояния для различных напряжений на рентгеновской трубке (значение L_v для перевода в кд/м^2 умножить на 10^{-2})

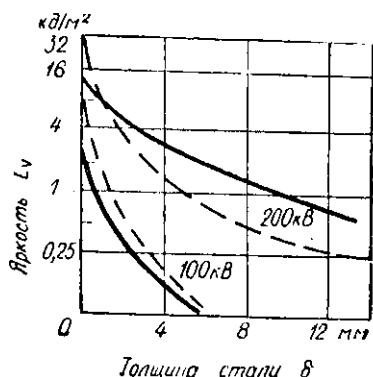


Рис. 3.50. Зависимость яркости сцинтилляционного кристалла на базе CsI (Tl) (сплошные линии) и флуороскопического экрана на базе (Zn, Cd) S (Ag) (штриховые линии) от толщины стали при одинаковом анодном токе и различных напряжениях рентгеновского излучения

вышенные мощности экспозиционной дозы, а следовательно, и яркости свечения экрана достигается увеличением силы тока и напряжения трубки. Однако в этом случае происходит потеря контрастности изображения в связи с тем, что эффективная энергия излучения увеличивается.

Повысить яркость свечения экрана можно также, уменьшив в известных пределах фокусное расстояние от источника до экрана (рис. 3.49). Пределы этого уменьшения лимитируются размерами фокусного пятна источника, малой разрешающей способностью и большой собственной внутренней нерезкостью экрана. Уменьшение толщины контролируемого изделия (рис. 3.50) позволяет повысить яркость свечения. Очевидно, что при просвечивании более плотных материалов при прочих равных условиях экран будет иметь меньшую яркость свечения.

Сцинтилляционные кристаллы. Принцип действия сцинтилляционных кристаллов основан на способности монокристаллов типа CsI (Tl), NaI (Tl), KI (Tl) и других светиться под действием ионизирующих излучений. Эти кристаллы по ряду параметров превосходят флуороскопические экраны, в частности, по разрешающей способности и эффективности регистрации (табл. 3.16).

К преимуществам сцинтилляционных кристаллов относятся: удовлетворительное совпадение спектра свечения кристалла со спектральной характеристикой фотокатодов усилителей яркости изображения; беззернистая структура, позволяющая создавать детекторы большой толщины для эффективной регистрации высокоэнергетического излучения с энергией до 15—30 МэВ; прозрачность для собственного излучения кристалла; короткое время послесвечения (10^{-5} — 10^{-8} с), что обеспечивает безынерционность появления и исчезновения изображения; возможность изготовления детекторов в виде больших монокристаллов, имеющих диаметр до 200 мм.

Помимо неорганических сцинтилляторов применяют также органические сцинтилляторы, например нафталин, имеющий время послесвечения до 10^{-9} с и низкую эффективность регистрации, обусловленную малой плотностью кристаллов ($\rho \leq 1,3$ г/см³) и малым эффективным атомным номером ($Z \leq 6$). В отличие от экрана отношение яркости свечения L_0 кристалла к мощности экспозиционной дозы излучения P_0 практически не зависит от изменения энергии излучения (рис. 3.48). Яркость свечения кристалла падает значительно меньше яркости экрана с ростом толщины поглотителя и напряжения на рентгеновской трубке (рис. 3.50). Кристаллы CsI (Tl) имеют меньшую яркость свечения, чем кристаллы NaI (Tl) при облучении их одинаковыми дозами излучения одной энергии. Однако большее применение нашли первые из них в связи с высокой гигроскопичностью кристаллов NaI (Tl).

Электролюминесцентные экраны. Принцип действия электролюминесцентных экранов основан на свечении некоторых люминофоров под действием переменного электрического поля, при этом происходит усиление яркости свечения (табл. 3.16 и рис. 3.51).

Двухэлектродный ЭЛЭ (рис. 3.51) представляет собой слоистый конденсатор, состоящий из наружной прозрачной основы 1, электропроводящих полупрозрачных слоев 2 и 7, заключенных между ними слоев фотопроводника 6 и электролюминофора 3, а также разделяющих непрозрачных слоев 4 и 5, устраняющих обратную связь между электролюминофором и фотопроводником. К проводящим покрытиям 2 и 7 подводят переменное напряжение 600—800 В с частотой 60—3000 Гц.

При отсутствии ионизирующего излучения основная доля напряжения падает на фотопроводнике из-за высокого значения его электрического сопротивления, в то время как на слой электролюминофора приходится незначительная часть падающего напряжения, в связи с чем он не люминесцирует. Однако стоит облучить фотопроводник ионизирующим излучением, его сопротивление начнет уменьшаться с увеличением интенсивности излучения, а напряжение на электролюминофоре возрастет, что вызовет его свечение, которое можно наблюдать со стороны стекла 1.

К недостаткам двухэлектродных ЭЛЭ следует отнести большое время послесвечения, это ограничивает возможности их использования при контроле движущихся объектов, а также свечение в темновом режиме (при отсутствии облучения).

Некоторые типы ЭЛЭ обеспечивают получение стопроцентного контраста изображения дефекта, что достигается введением между слоями 2 и 7 управляющего сетчатого электрода.

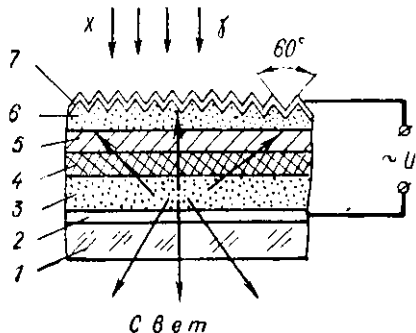


Рис. 3.51. Устройство электролюминесцентного экрана

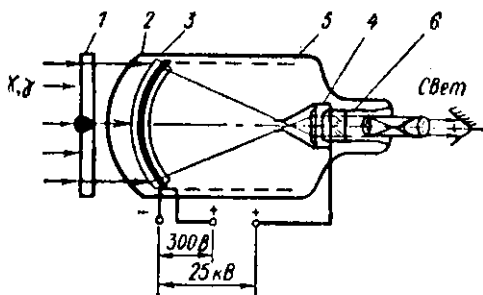


Рис. 3.52. Устройство электронно-оптического преобразователя

Подбирая амплитуду и фазу переменного напряжения, прикладываемого к электроду, возможно увеличивать или уменьшать яркость свечения фона или дефекта.

Электронно - оптические преобразователи рентгеновского и γ -излучений. Принцип действия ЭОП основан на люминесценции люминофора под действием ионизирующего излучения и последующем усилении яркости

свечения в 10^3 — 10^4 раз за счет ускорения фотоэлектронов, испускаемых фотокатодом, в электростатическом поле (табл. 3.16 и рис. 3.52). ЭОП выполнен в виде стеклянного баллона 2, в котором создан вакуум порядка 10^{-7} мм рт. ст. Внутри баллона установлены входные и выходные экраны. Входной экран 3 состоит из алюминиевой подложки сферической формы, слоя люминофора из сульфида цинка и сурьмяно-цезиевого фотокатода. Выходной экран 4, имеющий размеры в 10 раз меньше размеров входного экрана, состоит из конусообразного алюминиевого анода, внутри которого установлена стеклянная пластинка с нанесенным на ней слоем цинк-сульфид-селенидного люминофора.

Внутренняя поверхность стеклянного баллона покрыта проводящим покрытием, служащим фокусирующим электродом. Электрод 5 находится под постоянным напряжением 300 В, входной экран и анод находятся под напряжением 25 кВ. Под действием рентгеновских и γ -квантов, прошедших через контролируемое изделие 1, люминофор начинает светиться. Под действием этого свечения в фотокатод возникают фотоэлектроны, которые фокусируются и ускоряются электростатическим полем, вызывая свечение выходного экрана 4. Изображение на экране 4 рассматривают через свинцовое стекло с помощью оптики 6 или передают на приемную телевизионную трубку.

Для ЭОП отношение яркости свечения L_v выходного экрана к мощности экспозиционной дозы P_v излучения $L_v/P_v = 10$ кд·с/Рм².

Разрешающая способность выходного экрана зависит от флукуаций электронно-оптического изображения. Это приводит к неравномерной разрешающей способности ЭОП и составляет 1,5—3 линий на 1 мм в центре выходного экрана и 1—1,8 линий на 1 мм на его краю. С увеличением размера входного экрана размытие изображения на краях растет пропорционально.

В ЭОП, кроме того, происходят потери контраста изображения, которые обычно не превышают 15%. Современные ЭОП позволяют менять масштаб изображения за счет изменения потенциалов на электродах. Входные экраны ЭОП изготавливают диаметром 100—250 мм.

Использование высокоэнергетических источников излучения выше 1 МэВ возможно при изменении конструкции входного экрана, на котором со стороны источника устанавливают свинцовую или вольфрамовую подложку для преобразования коротковолнового первичного излучения в длинноволновое вторичное излучение и поток электронов. Такой ЭОП имеет повышенную разрешающую способность, достигающую 4—5 линий на 1 мм на краю выходного экрана за счет применения в отверстии анода электростатической фокусирующей системы с сеткой. Толщину металлической подложки подбирают соответственно энергии ионизирующего излучения. В частности, применение вольфрамовой подложки вместо стеклянной или алюминиевой позволяет увеличить яркость в 10 раз при энергии излучения 6—10 МэВ.

Термолюминесцентные преобразователи. Принцип действия подобных преобразователей основан на свойстве фосфоров накапливать энергию при их облучении ионизирующим излучением с последующим высвечиванием видимого света под действием теплоты.

Электронно-оптические усилители видимого света. Принцип действия ЭОУ основан на усилении яркости свечения флуорескопического экрана, сцинтилляционного кристалла и ЭОП за счет каскадного последовательного ускорения фотоэлектронов, испускаемых фотокатодами ЭОУ, в электростатических полях и последующей люминесценции выходных экранов каждого каскада. ЭОУ обеспечивает получение большого рабочего поля на выходном экране и значительное усиление яркости свечения, зависящее от числа каскадов усиления (табл. 3.16 и рис. 3.53).

ЭОУ выполнен в виде находящегося под вакуумом стеклянного баллона 4, с установленными внутри несколькими усиливающими каскадами, каждый из которых состоит из фотокатода 1, люминесцентного экрана 2 и электронной оптики, выполненной в виде конусообразного анода 3. В таких ЭОУ обеспечивается усиление яркости 30—100 на каждую ступень.

Основной недостаток ЭОУ — снижение разрешающей способности, потеря контраста, а также увеличение статических флуктуаций света с ростом числа каскадов усиления.

Рентген-видиконы. Принцип действия рентген-видикона основан на свойстве фотокатода мишени испускать фотоэлектроны под действием ионизирующего излучения, последующего ускорения фотоэлектронов в электрическом поле и регистрации полученного электронного изображения катодом трубки (табл. 3.16). Далее полученный сигнал передается через телевизионный блок связи на приемную трубку, где происходит преобразова-

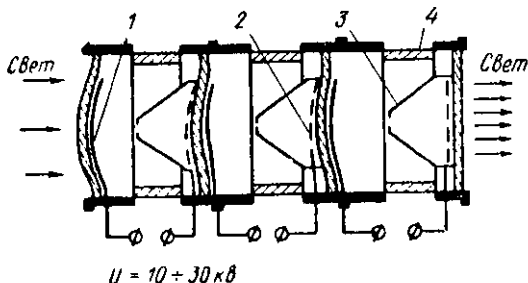


Рис. 3.53 Устройство электронно-оптического усилителя видимого света

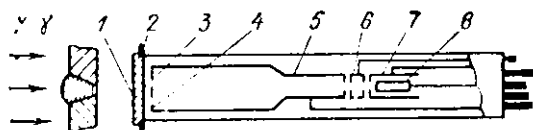


Рис. 3.54. Устройство рентген-видикона:

1 — мишень; 2 — сигнальная пластина; 3 — фотопроводник; 4 — сетка; 5 — фокусирующий электрод; 6 — анод; 7 — управляющий электрод; 8 — катод

ние электронного изображения в светотеневое. При прочих каскадных методах преобразования скрытого радиационного изображения в видимое светотеневое изображение (см. схему 3.5) происходит потеря информации на каждой ступени преобразования информации в ЭОП, ЭЛЭ и ЭОУ. В рентген-видиконах этот недостаток отсутствует в связи с тем, что в нем осуществляется непосредственное преобразование ионизирующего излучения в видеосигнал.

Конструктивно рентген-видикон (рис. 3.54) отличается от обычного светового видикона лишь узлом мишени, выполненной из алюминиевого диска с нанесенным на нем слоем фотопроводника из окиси свинца. Применение подобного фотопроводника обеспечивает возможность просвечивания в диапазоне энергий 40—1500 кэВ. В указанном диапазоне область эффективных энергий лежит в интервале 60—125 кэВ. Максимальный размер колбы рентген-видиконов достигает 300 мм. Рентген-видиконы обеспечивают высокую разрешающую способность в случае использования методики телевизионного увеличения рентгеновского изображения. В ряде рентген-видиконов в качестве чувствительного слоя используют аморфный селен, нанесенный на экран, имеющий диаметр 20—80 мм. Телевизионное увеличение рентген-видикона составляет 2—50 раз, разрешающая способность — 10—50 линий на 1 мм.

Телевизионные системы. Для передачи визуальной информации с выходных экранов ЭОП, ЭОУ, а также видеосигнала, полученного в рентген-видиконе, применяют промышленные телевизионные системы замкнутого типа, в которых видеосигнал передается по кабелю. Применение телевизионных систем обеспечивает радиационную безопасность обслуживающего персонала, позволяет усиливать яркость и контраст изображения, а также изменять его масштаб. Для передачи информации с экранов ЭОП и ЭОУ применяются обычные промышленные телевизионные установки. Они состоят из передающей телевизионной трубки, телевизионного канала связи с коаксиальным кабелем и телевизионного приемника-кинескопа.

В условиях низкой освещенности применяют передающие трубки типа суперортикон, а для передачи изображений высокой яркости — видиконы. Характеристики телевизионного канала связи играют существенную роль для радиационной нитроскопии, поскольку они вносят помехи в передаваемый сигнал в виде геометрических, контрастных и апертурных искажений и флуктуаций. От приемной трубки-кинескопа требуется обеспечение высокой яркости, контрастности и четкости изображений при малых размерах и высокой надежности в работе. В системах с рентген-видиконами они выполняют роль передающей телевизионной трубки. Последующая часть телевизионного тракта аналогична ПТУ.

3.5.3. Методика и техника радиоскопии

Аналогично промышленной радиографии основным показателем качества изображения при радиоскопии является относительная чувствительность, которую оценивают с помощью проволочных и канавочных эталонов чувствительности.

Относительная чувствительность $W_{отн}$ в зависимости от основных параметров просвечивания определяется соотношением

$$W_{отн} = \frac{\Delta\delta}{\delta} 100\% = C_n \frac{B}{\mu\delta} 100\%.$$

Это справедливо при отсутствии размытия краев изображения дефекта и учитывает влияние радиационно-физических параметров B и μ , толщины изделия δ , порогового контраста глаза C_n .

В реальных условиях радиоскопии изображение дефекта всегда бывает размытым и характеризуется общей нерезкостью изображения u . Влияние нерезкости приводит к тому, что чувствительность ухудшается, в связи с чем соотношение приобретает вид:

$$W_{отн} = C_n \frac{B}{\mu\delta} \left(1 + \frac{\Delta b}{u}\right) 100\%,$$

где Δb — ширина дефекта, мм (рис. 3.55, а).

Пороговый контраст глаза C_n ; в условиях сумеречного зрения

$$C_n = \frac{\Delta L_v}{L_v} = \frac{9,42 \cdot 10^{-6}}{D_3 \psi \sqrt{\theta p L_v}},$$

где D_3 — диаметр зрачка, см; ψ — угловой размер изображения дефекта, рад; θ — время инерции зрения, с; p — чувствительность

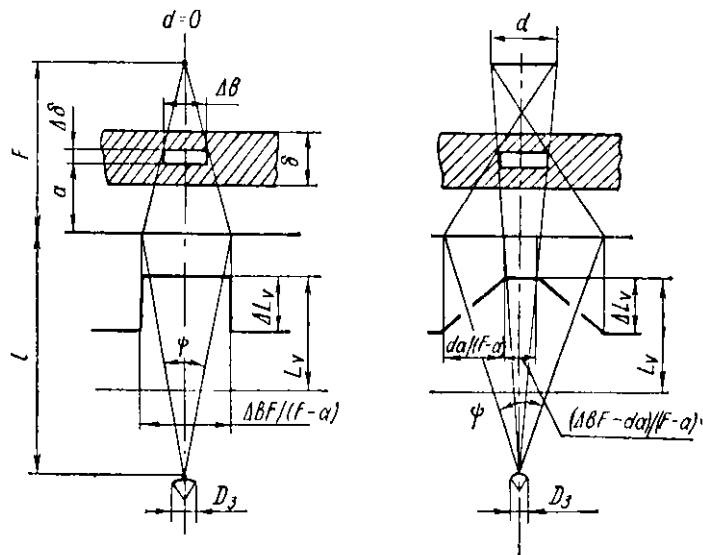


Рис. 3.55. Схемы образования изображения при радиационной интроскопии

сетчатки, отн. ед.: L_v — яркость свечения экрана; ΔL_v — разность яркостей между изображением дефекта и фоном экрана.

Для точечного источника излучения (рис. 3.55, а), когда геометрическая u_r и внутренняя u_v нерезкости равны нулю:

$$\psi = \frac{\Delta b F}{l(F-a)}.$$

Для протяженного источника излучения (рис. 3.55, б), когда $u_r \neq 0$, а $u_v = 0$:

$$\psi = (\Delta b F - ad)/[l(F-a)].$$

Общая нерезкость изображения дефекта на экранах интроскопов определяется по соотношениям (см. стр. 84).

Для протяженного источника

$$u_r = ad/(F-a).$$

Контраст скрытого радиационного изображения C_p характеризуется отношением толщины дефекта $\mu\Delta\delta$, выраженного в длинах свободного пробега излучения в веществе, к дозовому фактору накопления излучения, рассеянного контролируемым объектом:

$$C_p = \mu\Delta\delta/B.$$

Контраст светотеневого изображения определяется отношением разности яркостей изображения дефекта L_d и фона L_v к яркости фона L_v :

$$C_n = (L_d - L_v)/L_v = \Delta L_v/L_v.$$

Контрастность γ_L радиоскопического детектора характеризует потерю или приращение контраста светотеневого изображения по сравнению с контрастом радиационного изображения:

$$\gamma_L = C_p/C_n.$$

Разрешающая способность R радиоскопического детектора определяется аналогично разрешающей способности радиографических пленок (см. § 3.3). Для этих детекторов справедливо соотношение между разрешающей способностью R (линий на 1 мм) и общей нерезкостью изображения u (мм): $Ru \approx 1,5$.

В частности, при $u = 0,5$ мм детектор имеет разрешающую способность $R = 3$ линии на 1 мм.

При использовании телевизионных систем пороговый контраст

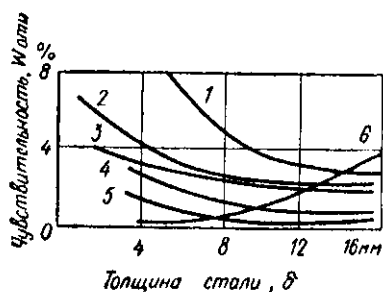
$$C_n = 1 - \left(1 - \frac{\mu\Delta\delta}{B}\right)^{\gamma_L},$$

где $\gamma_L = \gamma_1\gamma_2\gamma_3$; γ_1 — контрастность световой характеристики передающей трубки; γ_2 — контрастность амплитудной характеристики телевизионного канала связи; γ_3 — контрастность модуляционной характеристики приемной телевизионной трубки.

Для идеальной телевизионной системы $\gamma_L = \gamma_1\gamma_2\gamma_3 = 1$. При

Рис. 3.56. Чувствительность при радиационной интроскопии и радиографии стали рентгеновским излучением ($U = 150$ кВ, $I = 10$ мА, $d = 0,3 \pm 1,4$ мм):

1 — ЭОП; 2 — CsI (TI) + однокаскадный ЭОУ; 3 — CsI (TI) + ПТУ; 4 — пленка РТ-1; 5 — пленка РТ-6; 6 — рентген-видикон + ПТУ



просмотре крупных телевизионных изображений значение порогового контраста $C_n \approx 0,02$. Тогда

$$W_{отн} = 0,02 \frac{B}{\mu \delta} 100\%.$$

При просмотре мелких телевизионных изображений

$$C_n = \frac{6,1 \cdot 10^{-6}}{D_s \psi \sqrt{\partial \rho L_v}}.$$

Экспериментальные данные по чувствительности метода приведены на рис. 3.56 для различных типов детекторов в сравнении с промышленной радиографией на пленки РТ-1 и РТ-5. Чувствительность метода при контроле металлов средней плотности (железа и т. п.) в 2—4 раза хуже радиографического метода, поэтому радиоскопию применяют в сочетании с радиографией при контроле качества ответственных изделий.

При контроле сварных соединений из стали небольшой толщины и легких металлов (табл. 3.17 и 3.18) обеспечивается максимальная

Таблица 3.17

Области применения источников излучения и детекторов при радиоскопии изделий

Толщина контролируемого материала, мм			Излучение		Детектор
Al	Ti	Fe	тормозное	γ-излучение	
<10	<5	<2	60—120 кВ	—	ФЭ+ЭОУ+ПТУ
10—20	5—10	2—6	120—200 кВ	—	ЭОП+ПТУ
20—50	10—35	6—20	150—300 кВ	—	ЭОП+ПТУ
50—150	35—100	20—50	200—400 кВ	—	РВ+ПТУ
150—250	100—180	50—80	400—1000 кВ	—	РВ+ПТУ
>250	>180	>80	15—50 МэВ	—	CsI (TI)+ЭОУ+ПТУ
			3—6 МэВ	Ir 192	CsI (TI)+ЭОУ+ПТУ
			400—1000 кВ	Co 60	CsI (TI)+ЭОУ+ПТУ
			6—15 МэВ	—	CsI (TI)+ЭОУ+ПТУ
			15—50 МэВ	—	CsI (TI)+ЭОУ+ПТУ

Примечание. кВ — напряжение рентгеновского аппарата; МэВ — энергия излучения ускорителя.

Таблица 3.18

Основные характеристики рентгеновских интроскопов

Тип	Рентгеновский аппарат	Детектор	Диаметр контролируемого поля мм	Разрешающая способность, мм ⁻¹	Наибольшая толщина контролируемого материала, мм	
					Fe	Al
РИ-10Э *	РУП-200-5-2	1) CsI (Tl)+ +ЭОУ	190	5	50	120
РИ-10ЭТ**	РУП-150/300-10	2) ФЭ+ЭОУ CsI (Tl)+ +ЭОУ	190	2	80	200
РИ-10Т***	РУП-120-5	CsI (Tl)+ +ЭОУ	120	10	10	25
РИ-20Т***	РУП-150/300-10	CsI (Tl)+ +ЭОУ	150	10	40	100

* Электронно-оптический интроскоп. ** Электронно-оптический телевизионный интроскоп. *** Телевизионные интроскопы с двухкратным изменением масштаба изображения.

яркость экранов, а следовательно, и лучшая чувствительность контроля, сравнимая с радиографической чувствительностью. Производительность метода достигает 1—2 м/мин сварного шва без заметного снижения чувствительности. Одно из важных преимуществ радиоскопии — возможность получения стереоскопических изображений неподвижных и движущихся объектов при их просвечивании ионизирующим излучением от двух источников под двумя различными углами. При этом используется способность зрительного аппарата создавать пространственное изображение объекта по его левому и правому светотеневым изображениям на выходном экране детектора.

3.6. РАДИОМЕТРИЧЕСКАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ

3.6.1. Классификация методов

Радиометрическая дефектоскопия основана на просвечивании изделий ионизирующим излучением; преобразовании плотности потока или спектрального состава прошедшего излучения в пропорциональный им электрический сигнал (постоянное напряжение, ток или число, выраженное в каком-либо коде).

В практике радиометрической дефектоскопии различают следующие основные методы (схема 3.6): среднетоковый и импульсный. Различие между ними в основном определяется способами регистрации прошедшего излучения и электронной обработки дефектоскопической информации.

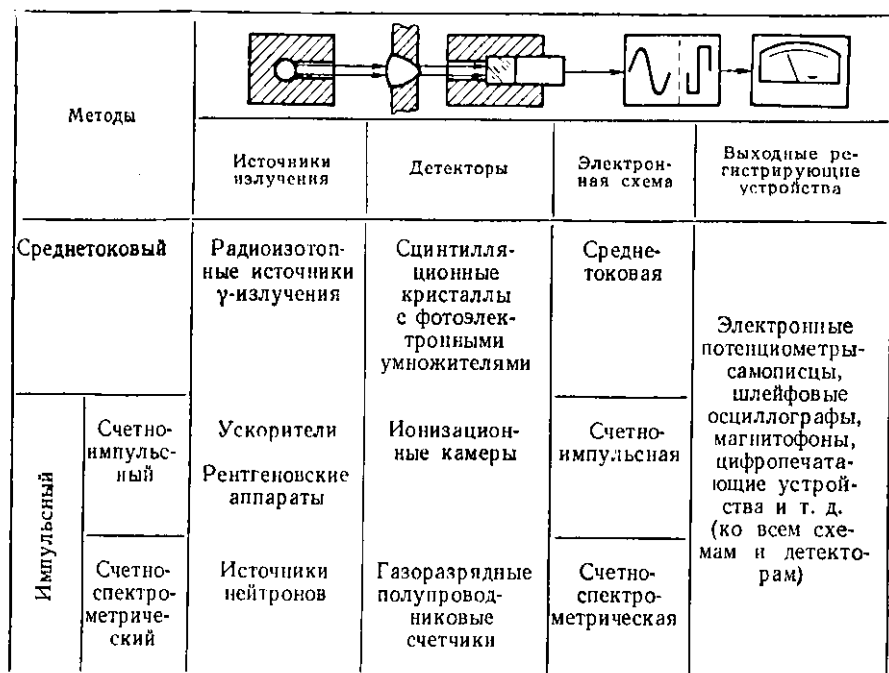


Схема 3.6

Любая система радиометрического контроля содержит источник излучения, детектор, электронную схему обработки информации, регистрирующий или показывающий прибор. В качестве источников излучения применяют в основном радиоизотопные источники γ -излучения, ускорители, реже рентгеновские аппараты и источники нейтронов. В качестве детекторов излучения используют в основном сцинтилляционные кристаллы с фотоэлектронными умножителями (ФЭУ), реже ионизационные камеры, газоразрядные и полупроводниковые счетчики и др.

При среднетоковом методе радиометрической дефектоскопии регистрируемый сигнал выдается в виде значения среднего тока, величина которого зависит от размеров дефекта. При импульсном методе сигнал регистрируется в виде последовательности импульсов, причем этот метод подразделяется на несколько разновидностей, из числа которых наиболее важен счетно-импульсный и счетно-спектрометрический. В первом из них регистрируется количество импульсов по изменению потока прошедшего излучения, во втором — импульсы определенной энергии (интервала энергий) прошедшего излучения, что в известной мере расширяет информационные возможности метода.

Преимущества радиометрии: высокая чувствительность; возможность бесконтактного контроля качества движущихся изделий

при их поточном производстве с осуществлением обратной связи на технологический процесс их изготовления; высокое быстродействие электронной аппаратуры, обусловленное электрической природой выходного сигнала, что позволяет получить высокую производительность контроля.

Основные недостатки радиометрии: интегрирующие свойства, которые обуславливают одновременную регистрацию сигналов о дефекте и локальных изменениях толщины изделия, определяемых состоянием внешней поверхности и качеством обработки, что затрудняет возможность определения формы, размеров и глубины залегания дефекта; отрицательное влияние на чувствительность рассеянного в изделии излучения; взаимосвязь между чувствительностью метода и его производительностью, которая приводит при стремлении получить высокую чувствительность к резкому сокращению производительности.

Первые два фактора затрудняют расшифровку полученной информации о наличии дефекта.

Указанные недостатки частично устраняются при использовании источников с высокой удельной активностью и электронной аппаратуры повышенного быстродействия. Влияние рассеянного излучения уменьшается при использовании жесткой коллимации пучка излучения и счетно-спектрометрического метода регистрации и обработки информации, что позволяет получить высокую чувствительность при малой производительности труда.

3.6.2. Детекторы радиометрической дефектоскопии

К числу основных характеристик радиометрических детекторов следует отнести:

1) эффективность регистрации — отношение зарегистрированных детектором заряженных частиц, γ -квантов или нейтронов к числу частиц, падающих на детектор;

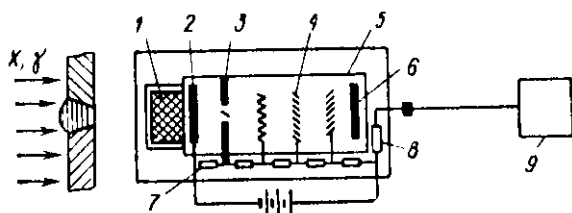
2) чувствительность детектора — отношение изменения числа зарегистрированных в единицу времени импульсов или среднего значения заряда к изменению плотности потока или интенсивности излучения;

3) энергетическое (амплитудное) разрешение детектора — отношение ширины кривой амплитудного распределения импульсов на полувысоте максимума к величине импульса, соответствующего максимуму распределения;

4) временное разрешение детектора — минимальный временной интервал, разделяющий акты независимой регистрации падающих на детектор частиц излучения.

Сцинтилляционные счетчики. Принцип действия сцинтилляционных счетчиков основан на измерении интенсивности световых вспышек, возникающих в люминофорах при прохождении через них ионизирующих излучений. Для регистрации световых вспышек используют фотоэлектронные умножители (ФЭУ) с регистрирующей электронной схемой,

Рис. 3.57. Устройство сцинтилляционного счетчика



В качестве сцинтилляторов используют люминофоры (Zn, Cd) S (Ag), CaWO_4 , CdWO_4 , кристаллы CsI (Tl) , NaI (Tl) и органические сцинтилляторы — антрацен, нафталин и др.

Счетчик работает следующим образом: ионизирующее излучение (рис. 3.57) поступает на сцинтиллятор 1 и создает в нем световые вспышки, часть которых попадает на фотокатод 2 ФЭУ, размещенный в баллоне 5, находящемся под вакуумом. Полупрозрачный сурьмяно-цезиевый фотокатод 2 нанесен на внутреннюю поверхность ФЭУ. Под воздействием фотонов с катода вылетают фотоэлектроны, которые, пройдя через фокусирующую диафрагму 3, попадают под действием электрического поля на электроды-умножители 4 и собираются на аноде 6. Питание ФЭУ осуществляется от источника стабилизированного переменного напряжения $U = 1000 \div 2200$ В через делитель напряжения 7. Далее при протекании тока на сопротивлении 8 появляется импульс напряжения, который попадает в регистрирующий прибор 9, состоящий из усилителя, пересчетного прибора, механического счетчика или показывающего прибора.

Основные преимущества сцинтилляционных счетчиков: высокая эффективность регистрации ионизирующих излучений (табл. 3.19); малое время высвечивания (10^{-7} с для неорганических и $10^{-6} - 10^{-9}$ с — для органических сцинтилляторов). Это обеспечивает высокую временную разрешающую способность или малое время послесвечения; наличие пропорциональности между амплитудой светового импульса и энергией частицы, что удобно при счетно-спектрометрическом методе радиометрической дефектоскопии.

Т а б л и ц а 3.19

Эффективность регистрации ионизирующих излучений радиометрическими детекторами, %

Детекторы	Рентгеновское и γ -излучение с энергией, МэВ						Нейтроны	
	0,005	0,05	0,66	1,25	6	14	0,03 эВ	2,05 МэВ
Сцинтилляционные счетчики	80—100	100	56	45	34	37	10—100	5
Ионизационные камеры	1—2	1—2	1—2	1—2	1—2	1—2	—	—
Газоразрядные счетчики	30—50	0,05—1	0,3—1	0,8—1	5	12	24	0,17

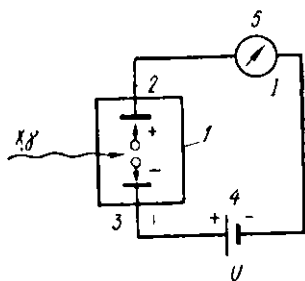


Рис. 3.58. Схема ионизационной камеры

Ионизационная камера.

Принцип действия ионизационной камеры (рис. 3.58)

основан на ионизации газа в измерительном объеме 1 между электродами 2 и 3, находящимися под напряжением от источника питания 4, при облучении камеры ионизирующим излучением. Возникающий в цепи ток, величина которого пропорциональна интенсивности падающего излучения, регистрируется измерительным прибором 5. Если увеличивать разность потенциалов U , начиная с нуля при постоянной интенсивности излучения, то высота импульса (или ток в цепи) вначале увеличивается (область I, рис. 3.59) пропорционально U , затем становится постоянной, достигая значения тока насыщения, и вновь увеличивается с ростом U . Ионизационные камеры обычно работают в режиме тока насыщения, когда каждый акт ионизации дает составляющую тока. Именно по току насыщения судят об интенсивности прошедшего излучения.

В практике используют импульсные ионизационные камеры, предназначенные для измерения числа частиц и их энергии путем регистрации импульсов тока, возникающих в камере при прохождении через нее заряженных частиц. Применяют также интегрирующие ионизационные камеры, предназначенные для измерения ионизационного тока, возникающего при прохождении через камеры потока частиц за некоторый интервал времени.

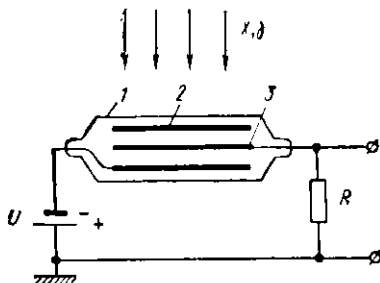


Рис. 3.60. Устройство газоразрядного счетчика

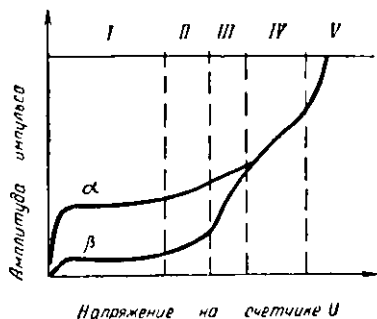


Рис. 3.59. Зависимость амплитуды импульса на выходе счетчика от напряжения:

I — область ионизационной камеры; II — область пропорционального счетчика; III — область ограниченной пропорциональности; IV — область счетчика Гейгера; V — область непрерывных разрядов

Газоразрядные счетчики. Принцип действия газоразрядных счетчиков (рис. 3.60) основан на возникновении газового разряда, сопровождающегося усилением ионизационного тока между электродами 2 и 3, находящихся в измерительной камере 1 под напряжением от источника питания, при прохождении через измерительный объем отдельных ионизирующих частиц.

ходящ

В зависимости от характера используемого газового разряда счетчики подразделяются на пропорциональные счетчики (область II, рис. 3.59) и счетчики Гейгера (область IV, рис. 3.59). Счетчики Гейгера в зависимости от рода газа, заполняющего измерительный объем, подразделяются на самогасящие, в которых разряд прекращается самостоятельно за время 10^{-7} с, и несамогасящие, в которых возникший разряд горит до тех пор, пока он не прекращается от внешнего воздействия.

Наибольшее распространение в практике нашли самогасящие счетчики, наполненные смесью аргона и паров этилового спирта. Применяют также счетчики с наполнителями из смеси инертных газов неона с примесью аргона и одного из галогенов — хлора или брома. Срок службы этих счетчиков практически неограничен вследствие полного восстановления молекул галогенов после их частичной диссоциации на атомы. Счетчики для регистрации мягкого γ -излучения имеют стенку из легкого материала (слюды, стекла, алюминия), а для жесткого излучения — из свинца, вольфрама.

Выпускаемые газоразрядные счетчики имеют рабочее напряжение 300—1750 В, длину плато счетной характеристики 60—400 В, наклон плато 0,05—1,5% на 1 В, максимальную импульсную нагрузку 3000—6000 с⁻¹ и срок службы до 200 ч.

3.6.3. Методика и техника радиометрической дефектоскопии

Относительная чувствительность $W_{\text{отн}}$ при радиометрической дефектоскопии определяется отношением толщины дефекта $\Delta\delta$ ко всей толщине δ изделия:

$$W_{\text{отн}} = \frac{\Delta\delta}{\delta} 100\% = \frac{B}{\mu\delta} \frac{\Delta M_{\text{min}}}{M} 100\%,$$

где ΔM_{min} — минимальное изменение выходного сигнала, регистрируемое прибором; M — среднее значение сигнала на выходе электронного блока.

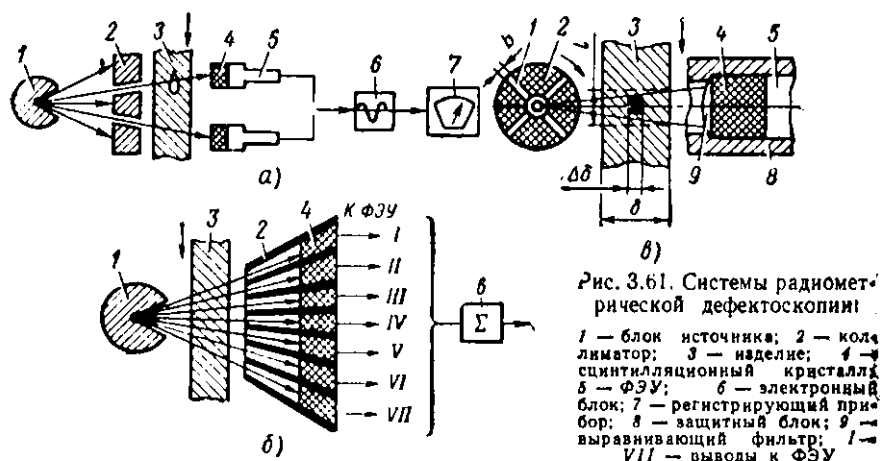
Это уравнение справедливо для случая, когда площадь поперечного сечения коллиматора S_k (см²) соизмерима с площадью дефекта S_d (см²).

Абсолютная чувствительность $W_{\text{абс}}$ при радиометрической дефектоскопии характеризуется минимальной величиной площади S_d или объема V_d дефекта, выявляемых при просвечивании:

$$W_{\text{пл}} = S_d = \frac{S_k B \Delta M_{\text{min}}}{\Delta\delta \mu M},$$

$$W_{\text{об}} = V_d = S_k \frac{B \Delta M_{\text{min}}}{\mu M}.$$

Такой подход определяется тем, что при радиометрической дефектоскопии регистрируется изменение интенсивности излучения, которое может быть одинаковым, хотя и обусловлено двумя различными по площади, но одинаковыми по объему дефектами.



Разрешающая способность метода характеризуется шириной минимального дефекта Δb в направлении, перпендикулярном потоку излучения, для случая, когда сечение коллиматора значительно превышает площадь дефекта,

$$\Delta b = \frac{S_{\kappa} B \Delta M_{\min}}{S_{\text{д}} \mu M}.$$

Таким образом, становится понятным стремление уменьшить размеры коллиматора с целью улучшить разрешающую способность метода. Однако при этом интенсивность излучения также резко уменьшается за счет сокращения поперечного сечения пучка излучения, вследствие чего уменьшается как величина выходного сигнала, так и чувствительность.

Производительность радиометрической дефектоскопии зависит от интенсивности используемого источника излучения, быстродействия электронной аппаратуры, абсолютных размеров минимального выявляемого дефекта, а также от требований, предъявляемых к достоверности обнаружения дефектов.

На практике применяют следующие основные системы радиометрической дефектоскопии: одноканальную (схема 3.6); двухканальную дифференциальную (рис. 3.61, а); многоканальную (рис. 3.61, б); сканирующую (рис. 3.61, в).

При использовании этих систем стремятся применять радиоизотопные источники с минимально возможными размерами активной части и с максимальной удельной активностью или ускорители с высокой интенсивностью излучения для получения наилучшей выявляемости дефектов, а также регистрирующую аппаратуру с максимальным быстродействием (до 0,25 мкс) для увеличения производительности контроля.

При радиометрическом контроле источник и детектор обычно остаются неподвижными во время просвечивания, а изделие построчно перемещается, причем шаг сканирования определяется

площадью поперечного сечения коллиматора. По сравнению с одноканальной системой применение дифференциальной системы контроля позволяет одновременно сравнивать дефектный и бездефектный участки изделия, при этом чувствительность метода повышается. При многоканальной системе возможно повысить скорость контроля в n^2 раз (где n — число каналов), однако схема регистрации становится чрезвычайно громоздкой, так как каждый из каналов требует отдельного тракта обработки информации.

При использовании сканирующей системы осуществляется развертка всего участка изделия за счет его перемещения и вращения коллиматора, который формирует узкий пучок γ -излучения шириной b , пробегающей зону контроля по всей ее ширине l . Сканирующая система обеспечивает повышение производительности в l/b раз. В случае применения в этой системе двух детекторов, размещенных на некотором расстоянии друг от друга, становится возможным определение глубины залегания дефекта. В сканирующих системах достигается производительность контроля до 200 м сварного шва в час.

Чувствительность радиометрической дефектоскопии превышает чувствительность промышленной радиографии и зависит от вида используемого детектора излучения (рис. 3.62), при этом лучшие результаты достигаются при использовании сцинтилляционных счетчиков. Используя радиоизотопные источники излучения и ускорители, возможно контролировать стальные изделия толщиной 50—500 мм с относительной чувствительностью 0,3—2%.

Обязательное условие применения радиометрической дефектоскопии при контроле качества сварных соединений — отсутствие поверхностных неровностей шва. Это определяется интегрирующими свойствами детекторов одинаково регистрировать информацию как о внутренних дефектах, так и о поверхностном рельефе изделия. Для устранения влияния рельефа усиление сварного шва снимают или зачищают. В ряде случаев используют жидкие, сыпучие или пластические компенсаторы, которые имеют одинаковую плотность, а по возможности и одинаковый атомный номер с контролируемым изделием.

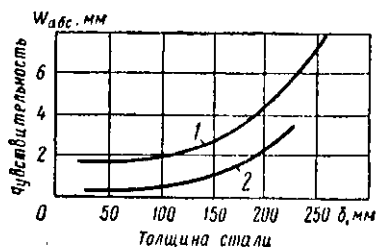


Рис. 3.62. Зависимость чувствительности радиометрической дефектоскопии от толщины стали, просвечиваемой излучением СоВ0: 1 — счетчик Гейгера; 2 — сцинтилляционный счетчик

3.7. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ И ДОЗИМЕТРИЯ

3.7.1. Биологическое действие ионизирующих излучений

Использование в промышленности методов и средств радиационной дефектоскопии связано с применением разнообразных источников ионизирующего излучения, которые оказывают вредное

биологическое действие на организм человека, поскольку поглощенная тканями энергия вызывает ионизацию атомов и молекул вещества, что приводит к разрушению клеток. Вызванные излучением изменения могут быть обратимыми (при малых поглощенных дозах) и необратимыми (при больших дозах), причем эти изменения могут происходить в отдельных органах и во всем организме.

Поскольку при радиационной дефектоскопии используются закрытые источники ионизирующего излучения, практически исключаются попадание внутрь организма радиоактивных веществ и их накопление в тканях и костях (внутреннее поражение), остановимся на особенностях действия радиации при внешнем облучении организма.

При однократном облучении всего тела человека возможны следующие нарушения в зависимости от суммарной поглощенной дозы: до 0,025 Дж/кг (0—25 рад) — видимых нарушений нет; 0,025—0,05 Дж/кг (25—50 рад) — возможны изменения в крови; 0,05—0,1 Дж/кг (50—100 рад) — нарушение нормального состояния трудоспособности; 0,1—0,2 Дж/кг (100—200 рад) — возможна потеря трудоспособности; более 0,2 Дж/кг (более 200 рад) — возможен смертельный исход.

Наиболее чувствительны к воздействию излучения следующие органы (в порядке уменьшения их чувствительности): лимфатические ткани и узлы, селезенка и зубная железа, костный мозг и зародышевые клетки. Время воздействия излучения на организм оказывает существенное влияние на процессы, протекающие в тканях. Чем меньше мощность дозы и чем более дробны акты воздействия излучения по времени, тем меньше его поражающее действие.

Воздействие α - и β -частиц на организм менее опасно, чем воздействие γ - и нейтронного излучений, поскольку их пробег в ткани мал и они не достигают кровеносных органов (для α -частиц пробег равен 40 мкм, для β -частиц — 1,3 мм).

Степень поражения организма при одинаковых значениях поглощенной дозы в значительной мере зависит от площади облучаемой поверхности. Так при гамма-терапии злокачественных опухолей размером от 2×2 см до 20×20 см пациенты могут получать единовременные дозы 0,2—0,5 Дж/кг (200—500 рад) без заметных поражений всего организма. Те же дозы при облучении всего тела приведут к смертельным исходам, составляющим до 50% общего числа пострадавших.

Наиболее устойчивы к воздействию радиации люди в возрасте свыше 25 лет, наименее устойчивы — дети. Воздействие излучения человеком не ощущается, при этом поглощенные дозы организмом суммируются и проявляются через некоторое время. Все перечисленные факторы обуславливают тщательную регламентацию норм радиационной безопасности и правил работы с источниками ионизирующих излучений, обязательную дозиметрию и защиту от их воздействия на облучающий персонал и население в целом.

3.7.2. Основные санитарные нормы и защита от излучения

Воздействие ионизирующих излучений на организм вызывает как генетические поражения, проявляющиеся в человеке и его потомстве, так и соматические поражения, проявляющиеся в лейкемии, раковых заболеваниях, сокращений продолжительности жизни и бесплодии. Основная задача защиты человека от ионизирующих излучений — не допустить возникновения соматических и генетических поражений, что обеспечивается предельно допустимыми дозами (ПДД) внешнего и внутреннего облучения, которые при их равномерном получении в течение 50 лет не вызывают изменений в состоянии здоровья облучаемого человека и его потомства. Значения ПДД регламентированы «Нормами радиационной безопасности» (НРБ-69), составленными с учетом рекомендаций Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ) и Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ).

Согласно НРБ-69 установлены следующие категории облучаемых лиц: категория А — персонал, работающий с источниками ионизирующего излучения; категория Б — отдельные лица из населения; категория В — население в целом. К категории Б относятся лица, работающие в помещениях, смежных с теми, в которых работает персонал категории А, а также лица, находящиеся в пределах санитарно-защитной зоны предприятия или проживающие на территории наблюдаемых зон, расположенных вокруг промышленных предприятий.

Значения ПДД внешнего облучения установлены для четырех групп критических органов или тканей (табл. 3.20): I группа — все

Т а б л и ц а 3.20

Предельно допустимые дозы внешнего облучения персонала (категория А) и пределы дозы внешнего облучения отдельных лиц из населения (категория Б) и населения в целом (категория В)

Группа органов	ПДД персонала, категория А				Предел дозы в год			
	квартал		год		для отдельных лиц из населения категории Б		для категории В население в целом	
	бэр	Дж/кг	бэр	Дж/кг	бэр	Дж/кг	бэр	Дж/кг
I	3 *	0,03	5 **	0,05	0,5 **	0,005	0,17	0,0017
II	8	0,08	15	0,15	1,5	0,015	0,5	0,005
III	15	0,15	30	0,30	3,0	0,030	1,0	0,01
IV	40	0,40	75	0,75	7,5	0,075	—	—

* Для женщин до 30 лет ПДД = 0,013 Дж/кг (1,3 бэр) за квартал.

** ПДД внешнего облучения рентгеновским излучением с $E_{\text{ф}} = 15+25$ кэВ не должны превышать: для I группы органов (кроме гонад) лиц категории А 0,15 Дж/кг (15 бэр) в год; для лиц категории Б 0,05 Дж/кг (5 бэр) в год, для мужских гонад лиц категории А 0,05 Дж/кг (5 бэр) в год, лиц категории Б 0,05 Дж/кг (0,5 бэр) в год.

тело, гонады, красный кровяной мозг; II группа — мышцы, жировая ткань, печень, почки, селезенка, желудочно-кишечный тракт, легкие и хрусталик глаза; III группа — костная ткань, щитовидная железа и кожный покров; IV группа — руки, предплечья, лодыжки и стопы.

Для сравнения различных видов ионизирующих излучений по ожидаемому биологическому эффекту используют коэффициент качества КК (табл. 3.21).

Таблица 3.21

Коэффициенты качества КК для различных видов излучений при хроническом облучении всего тела

Вид излучения	КК	Вид излучения	КК
β-, γ-излучения, рентгеновское излучение и позитроны	1	Нейтроны с энергией:	
		5 кэВ	2,5
α-излучение ($E \leq 10$ МэВ), протоны ($E \leq 10$ МэВ)	10	20 кэВ	5,0
		100 кэВ	8,0
		500 кэВ	10,0
Тяжелые ядра отдачи	20	1 МэВ	10,5
		10 МэВ	6,5
Тепловые нейтроны	3		

В табл. 3.20 значения ПДД даны в единицах эквивалентной дозы — Дж/кг и биологическом эквиваленте рентгена (бэр). Бэр — это такое количество энергии, поглощенное в 1 г ткани, при котором наблюдается эквивалентный биологический эффект, что и при поглощенной дозе излучения 1 рад рентгеновского и γ-излучений. Рад — внесистемная единица поглощенной дозы, равная поглощенной энергии 100 эрг на 1 г любого вещества. При воздействии на ткань нескольких видов излучений бэр определяется суммой произведений поглощенных доз этих излучений на соответствующие значения коэффициентов качества КК этих видов излучения.

Среди лиц категории А выделены две группы: 1) — лица, условия труда которых таковы, что дозы облучения могут превышать 0,3 годовой ПДД (работа в контролируемой зоне); 2) — лица, условия труда которых таковы, что дозы облучения не могут превышать 0,3 ПДД (работа вне контролируемой зоны). К последней группе относятся взрослые лица, работающие в пределах санитарно-защитной зоны, а также лица периодически посещающие контролируемую зону. Для этих лиц индивидуальный дозиметрический контроль и специальное медицинское наблюдение не требуется в отличие от лиц (персонала), работающего в контролируемой зоне.

Суммарная доза облучения всего организма, гонад или красного костного мозга не должна превышать:

$$D \leq 0,05 (N - 18) \text{ Дж/кг,}$$

где N — возраст человека в годах, 18 лет — возраст человека к началу профессионального облучения.

Таким образом, например, суммарная доза, накопленная к 30 годам, не должна превышать 0,6 Дж/кг (60 бэр).

Согласно НРБ-69 в исключительных случаях допускается облучение, приводящее к превышению ПДД в 2 раза в течение года или в 5 раз на протяжении всего периода работы, при этом персонал должен быть предупрежден об опасности дополнительного облучения. Такое предусмотренное особое облучение не разрешается в тех случаях, если: 1) добавление дозы к ранее накопленной превысит величину, установленную по последней формуле; 2) в течение предшествующих 12 месяцев работник при определенных условиях получил при однократном облучении дозу более полугодовой; 3) работник при аварии или случайном облучении ранее получил дозу, в 5 раз превышающую годовую; 4) работник — женщина в репродуктивном возрасте.

При непланируемом однократном облучении дозой свыше $1,25 \times 10^{-2}$ Кл/кг (25 Р) работник должен быть направлен на медицинское обследование. Все аварийные случаи, при которых обслуживающий персонал получил большие дозы, чем $1,25 \cdot 10^{-2}$ Кл/кг (25 Р) подлежат расследованию, выявлению причин и принятию специальных мер, определяемых инструкциями, утвержденными Главным санитарно-эпидемиологическим управлением МЗ СССР. На базе НРБ-69 и в их развитие все отрасли промышленности выпускают инструкции и правила, определяющие порядок транспортирования и получения, учета и хранения, монтажа и эксплуатации радиоактивных веществ и источников ионизирующих излучений, нормы освещения и вентиляции, требования к дезактивизации помещений и оборудования, а также рекомендации по выполнению перечисленных требований.

Требования санитарных правил при промышленной гамма-дефектоскопии определяют, что допустимая доза для операторов составляет $2 \cdot 10^{-10}$ А/кг (2,8 мР/ч), или $1,2 \cdot 10^{-9}$ А/кг (17 мР в смену), или $2,58 \cdot 10^{-5}$ А/кг (0,1 Р в неделю). ГОСТ 16760—71 «Гамма-дефектоскопы. Общие технические требования» определяют, что защита гамма-дефектоскопов должна обеспечивать снижение мощности экспозиционной дозы до $2 \cdot 10^{-10}$ А/кг (2,8 мР/ч) на расстоянии 1 м от источника и до $1,17 \cdot 10^{-9}$ А/кг (100 мР/ч) на расстоянии 100 мм от поверхности защитного блока. В любом случае защита от действия ионизирующего излучения обеспечивается строительством специальных защитных помещений для размещения в них аппаратуры, допустимым расстоянием между оператором и источником излучения, а также временем работы в поле облучения.

3.7.3. Лаборатории радиационной дефектоскопии

В состав служб неразрушающего контроля качества или в состав ЦЗЛ предприятий входят лаборатории радиационной дефектоскопии. Они располагаются в отдельно стоящих зданиях, оборудо-

ванных специальными защитными помещениями, в которых размещают установки различных типов: рентгеновские аппараты, гамма-дефектоскопы, ускорители и т. д. Толщина защиты подобных помещений целиком зависит от энергии и интенсивности источника излучения, а также от степени коллимации пучка. На многих предприятиях защитные помещения сооружают непосредственно в цехах в технологической цепочке, определяющей последовательность изготовления изделий. В состав защитных помещений входят хранилища для радиационных головок и транспортно-перезарядных контейнеров гамма-дефектоскопов. Хранилища на некоторых крупных заводах оборудуют манипулятором и смотровым защитным окном для проведения безопасной зарядки и перезарядки радиоактивных источников излучения.

Поскольку в нерабочем состоянии все переносные и передвижные гамма-дефектоскопы, заряженные источниками излучения, должны находиться в хранилище, его защита определяет общую суммарную активность источников, которые предприятие может приобретать и использовать, на что органам Государственной санитарной инспекции выдается санитарный паспорт предприятия. Дефектоскопическое оборудование с источниками излучения поставляют торгующие организации только после получения от предприятия копии санитарного паспорта.

Аналогичные требования предъявляют и к предприятиям, на которых используют передвижные лаборатории для радиационной дефектоскопии. В этом случае хранилища предусматривают непосредственно в передвижных лабораториях, либо сооружают временные хранилища в непосредственной близости от участка, на котором производят технологические операции изготовления изделия. Защитные помещения оборудуют канализацией, вентиляцией, водопроводом, отоплением, энергетическим оборудованием и грузоподъемными средствами. Их отделяют в соответствии с требованиями норм или санитарных правил, предъявляемыми к рентгеновским кабинетам и камерам для гамма-дефектоскопии.

Лаборатории помимо защитных и административно-хозяйственных помещений оборудуют фотолабораториями для обработки радиографических снимков. В состав фотолаборатории входят склад хранения радиографических пленок и принадлежностей для промышленной радиографии, склад химикатов, помещение для приготовления свежих растворов и выделения серебра из отработанных растворов, темная комната для зарядки и разрядки кассет, темная комната для фотообработки и сушки радиографических снимков, комната для расшифровки и архив радиограмм.

Площади и размеры стационарных лабораторий определяются габаритными размерами контролируемых изделий, применяемой аппаратурой, действующими в отрасли санитарными нормами и правилами проектирования заводов. Контроль изделий непосредственно в потоке их изготовления предъявляет специфические требования к лабораториям, поскольку дефектоскопическая аппаратура размещается в непосредственной близости к машинам, производящим

изделие. В этом случае защитные боксы и камеры монтируют непосредственно на линии с учетом того, что рядом работают лица категории Б. При определении толщины защиты необходимо, помимо прямого воздействия излучения, учитывать воздействие обратно рассеянного излучения, которое может возникнуть при отражении пучка от стен, потолочных перекрытий, ферм и цеховых конструкций.

На строительстве магистральных газонефтепроводов, монтаже заводов и электростанций, мостов и емкостей широко используют передвижные лаборатории различных типов, выполненные на базе микроавтобуса, грузовика, фургона-прицепа и других транспортных средств. Как правило, лаборатории на микроавтобусе обслуживают два оператора, один из которых одновременно является водителем. Лаборатория имеет в своем составе гамма-дефектоскоп, рентгеновский аппарат и фотолaborаторию, оборудованную баками-танками для обработки радиограмм, сушильным шкафом, рабочим столом для зарядки пленок в кассеты и негатоскопом. Подобная лаборатория рассчитана на ежедневный пробег в одну сторону до 50 км и выполнение за смену 25—50 снимков.

Другой тип лаборатории на фургоне-прицепе представляет собой полустационарную лабораторию, размещаемую, как правило, на строительной площадке или на полевой сварочной базе. Она имеет бытовой отсек для размещения двух операторов, оборудованный койками, столом, умывальником, шкафом для личных вещей. В рабочем отсеке установлены верстак, негатоскоп, шкафы для рентгеновских аппаратов и гамма-дефектоскопов. Фотолaborатория снабжена баками-танками, сушильным шкафом и ящиками для пленок и вспомогательных принадлежностей. Радиационные головки и транспортно-перезарядные контейнеры гамма-дефектоскопов размещают в отдельном хранилище, смонтированном на нижней стороне шасси фургона. Лаборатория оборудована бензоагрегатом мощностью 1—1,5 кВт, обеспечивающим ее полную автономность, что особенно важно в начальный период строительства, когда участки еще не оборудованы электропитанием от промышленной сети.

3.7.4. Дозиметрические приборы

Дозиметрические приборы — это по существу дополнительный орган чувств, обнаруживающий наличие, интенсивность и энергетический состав ионизирующего излучения. Промышленность выпускает дозиметрические приборы трех классов: 1-й класс — дозиметры для измерения экспозиционных или поглощенных доз или мощностей этих доз; 2-й класс — раднометры для измерения активности изотопов и интенсивности ионизирующих излучений; 3-й класс — спектрометры для измерения энергии и определения спектрального состава ионизирующих излучений.

Приборы по своему конструктивному исполнению подразделяются на индивидуальные, носимые, переносные силами двух человек и стационарные (см. приложение 5).

Операторы, работающие с источниками ионизирующих излучений, должны постоянно иметь при себе индивидуальные дозиметры типа ИФКУ или КИД-2. Дозиметрические службы предприятия в порядке надзора за соблюдением норм радиационной безопасности должны периодически осматривать помещения, в которых проводят работы, а также смежные помещения. При этом используют приборы типа КУРА-1. Рабочие помещения, боксы и камеры в обязательном порядке оборудуют сигнально-измерительными дистанционными многоканальными приборами типа УСИТ-2, обеспечивающими сигнализацию о превышении предельно допустимых мощностей доз в контролируемой зоне. При работе с радионуклидными источниками излучения возможную загрязненность поверхностей, которая может быть вызвана разгерметизацией источника, контролируют с помощью приборов типа РУП-1. Пересчетные приборы типа ПП-15 и спектрометры находят широкое применение в установках радиометрической дефектоскопии, работающих в счетно-импульсных и счетно-спектрометрических режимах.

УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

4.1. КЛАССИФИКАЦИЯ И ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДОВ

4.1.1. Принцип методов

Методы ультразвукового контроля основаны на исследовании процесса распространения упругих колебаний с частотой 0,5—25 МГц в контролируемых изделиях. Согласно общей схеме ультразвукового контроля сварки (рис. 4.1) акустическое поле источника (излучателя) 1 распространяется в объеме материала контролируемого изделия 2. При наличии дефекта 3 акустическое поле изменяет свою структуру. За дефектом имеется «тень» и поверхность дефекта отражает ультразвуковые колебания. Регистрируя с помощью приемника 4 ослабление акустической волны или с помощью приемника 5 появление отраженной акустической волны, можно судить о наличии дефектов в сварном шве.

4.1.2. Классификация методов

Для анализа процесса распространения ультразвуковых колебаний в контролируемых изделиях и соединениях используют три основных метода, различающихся один от другого по признаку обнаружения дефекта: теневой, зеркально-теневой и эхо-метод (рис. 4.2).

При теневом методе признаком обнаружения дефекта служит уменьшение интенсивности (амплитуды) прошедшей через изделие ультразвуковой волны от излучающего излучателя к приемному. Излучатели располагают на противоположных поверхностях изделия, что позволяет применять этот метод только при наличии двустороннего доступа к изделию.

При зеркально-теневом методе дефект обнаруживают по уменьшению интенсивности (амплитуды) отраженной от противоположной поверхности изделия ультразвуковой вол-

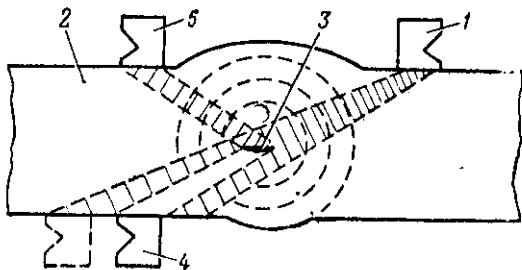


Рис. 4.1. Схема ультразвукового контроля сварки:

1 — излучатель; 2 — контролируемое изделие; 3 — дефект; 4, 5 — приемник акустических колебаний

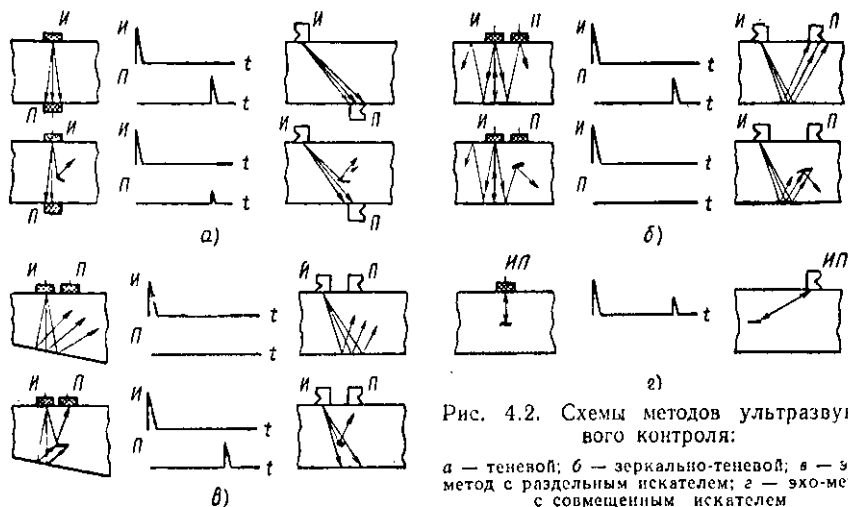


Рис. 4.2. Схемы методов ультразвукового контроля:

а — теневой; б — зеркально-теновым; в — эхо-метод с отдельным излучателем; г — эхо-метод с совмещенным излучателем

ны. Противоположную поверхность, зеркально отражающую ультразвук, называют донной поверхностью, а отраженный от нее импульс — донным импульсом.

При эхо-методе признаком обнаружения дефекта является прием излучателем эхо-импульса, отраженного от самого дефекта.

Если о наличии дефекта судят по появлению эхо-импульса от дефекта и по уменьшению донного импульса, то это значит, что контроль ведут одновременно по двум методам: эхо-методу и зеркально-теновому; такое сочетание методов при контроле сварных соединений для краткости называют эхо-теновым методом.

При любом методе контроля возможно использование двух излучателей, один из которых выполняет функции излучения (И), а другой — приема (П). Такая схема включения излучателей называется раздельной. В то же время при импульсном излучении для зеркально-тенового и эхо-методов возможно применение одного излучателя (ИП), включенного по совмещенной схеме, при котором один и тот же излучатель выполняет функции излучения зондирующих импульсов и приема эхо-сигналов.

4.1.3. Физические основы методов

Распространение упругих колебаний в средах. Методы ультразвуковой дефектоскопии (УЗД) основаны на исследовании процесса распространения упругих колебаний с частотой 0,5—25 МГц в контролируемых соединениях.

Распространение упругой волны сопровождается образованием зон, в которых частицы находятся в одинаковом колебательном состоянии. Минимальное расстояние между двумя такими зонами называется длиной волны. Длина волны λ связана со скоростью C распространения и частотой f колебаний соотношением

$$\lambda = C/f.$$

Скорость распространения волны определяется физическими свойствами среды. Поэтому изменение длины ультразвуковой волны в любой среде может быть достигнуто только путем изменения частоты возбуждаемых колебаний.

В бесконечном (неограниченном) объеме могут возникать волны двух типов: продольные и поперечные. В продольной волне (волне сжатия) частицы колеблются вдоль направления распространения волны, а в поперечной волне (сдвиговой волне) — перпендикулярно. Продольные волны могут быть возбуждены в любых средах, а поперечные — только в твердых.

В неограниченных твердых средах плотностью ρ скорость продольных волн C_l определяется модулем нормальной упругости E и коэффициентом Пуассона ν :

$$C_l = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}},$$

а скорость поперечной волны — модулем сдвига G :

$$C_t = \sqrt{G/\rho}.$$

В ряде случаев приближенное значение скорости продольной волны можно рассчитать по выражению

$$C_l = \sqrt{E/\rho}.$$

Поскольку в металлах $\nu \approx 0,3$, то из предыдущих выражений находим, что $C_l \approx 0,55C_t$.

Пример 4.1. Для стали $E \approx 20 \cdot 10^{10}$ Н/м², $G \approx 8 \cdot 10^{10}$ Н/м² и $\rho \approx 7,8 \cdot 10^3$ кг/м³. Тогда, согласно последним двум формулам получаем

$$C_l = \sqrt{\frac{8 \cdot 10^{10}}{7,8 \cdot 10^3}} = \sqrt{10,2 \cdot 10^6} \approx 3,20 \cdot 10^3 \text{ м/с};$$

$$C_t \approx \sqrt{\frac{20 \cdot 10^{10}}{7,8 \cdot 10^3}} \approx \sqrt{25,6 \cdot 10^6} \approx 5,05 \cdot 10^3 \text{ м/с}.$$

В твердых телах кроме продольных и поперечных волн могут быть возбуждены волны и других типов. Вдоль свободной поверхности твердого тела могут распространяться поверхностные волны или волны Рэлея. В металлах эти волны практически затухают на глубине около $1,5\lambda$. Скорость их примерно равна $0,93C_t$.

Если среда ограничена двумя поверхностями, расстояние между которыми соизмеримо с длиной волны, то в полученной таким образом пластине распространяются нормальные волны (их также называют волнами Лэмба, пластиночными или свободными).

При дефектоскопии сварных швов в основном используют поперечные и продольные ультразвуковые волны.

Пример 4.2. Определим длину продольной λ_l и поперечной λ_t волн в стали при частоте $f = 2$ МГц.

$$\lambda_l = \frac{5900}{2 \cdot 10^6} = 2,95 \text{ мм}; \quad \lambda_t = \frac{3260}{2 \cdot 10^6} = 1,63 \text{ мм}.$$

Пространство, в котором распространяются ультразвуковые волны, называют ультразвуковым (акустическим) полем. Поле в жидкостях и газах можно описать с помощью смещения u частиц от положения равновесия, колебательной скорости v этих частиц и акустического давления P , создаваемого последними. В твердых телах акустическое поле, имеющее более сложный вид, описывается с помощью напряжений и деформаций.

Ультразвуковая волна в направлении своего движения несет определенную энергию. Количество энергии, переносимой волной за 1 с через 1 см² площади, перпендикулярной к направлению распространения, называется интенсивностью ультразвука. Интенсивность J в плоской волне определяется формулой

$$J = 2\pi^2 f^2 C \rho u^2 = P^2 / 2\rho C.$$

Произведение скорости C ультразвука на плотность ρ среды, в которой он распространяется, называется удельным акустическим сопротивлением. Значения удельных сопротивлений, во многом характеризующие акустические свойства вещества, приведены в табл. 4.1.

Пример 4.3. Рассчитаем акустическое сопротивление стали $(\rho C)_\text{ст}$ для поперечной волны. Согласно данным табл. 4.1

$$(\rho C)_\text{ст} = 3200 \cdot 7,8 \cdot 10^8 = 2,54 \cdot 10^6 \text{ г/с} \cdot \text{см}^2.$$

По мере распространения ультразвуковой волны интенсивность ее падает. Ослабление интенсивности сферической волны обусловливается ее расхождением и затуханием колебаний, а плоской — только затуханием.

Снижение интенсивности ультразвука вследствие его затухания происходит по экспоненциальному закону:

$$J_r = J_0 \exp(-2\delta r),$$

где J_r — интенсивность ультразвука на расстоянии r от места, где интенсивность равна J_0 ; δ — коэффициент затухания, см⁻¹.

Поскольку амплитуда волны пропорциональна корню квадратному из интенсивности, влияние затухания на амплитуду описывается формулой

$$u_r = u_0 \exp(-\delta r).$$

Из выражения видно, что величина коэффициента затухания определяет длину пути волны, на котором амплитуда волны ослабляется в e раз (e — число Непера). Часто нет необходимости выполнять измерение u или J в абсолютных единицах, а достаточно определить их величину относительно некоторого постоянного уровня, который обозначим через u_0 или J_0 . В этом случае относительную величину $J/J_0 = u^2/u_0^2$ принято выражать в децибелах (рис. 4.3). Число децибел

$$N = 10 \lg J/J_0 = 20 \lg u/u_0.$$

Если амплитуды и интенсивности измеряют в децибелах, то коэффициент затухания удобно выражать в единицах отрицательный

Таблица 4.1
Скорость распространения, длина и затухание ультразвуковых волн в различных средах и акустическое сопротивление этих сред

Вещество	Скорость волны, м/с		Длина волны λ (мм) при частоте, МГц				Плотность, г/см ³	Удельное акустическое сопротивление, 10 ⁸ г/см ² ·с		Затухание (см ⁻¹) при частоте 2,5 МГц
			2,5		1,8					
	продольная	поперечная	продольная	поперечная	продольная	поперечная		продольная волна	поперечная волна	
Дюралюминий . . .	6 260	3080	2,50	1,23	3,48	1,70	2,70	1,70	0,83	0,002—0,05
Бериллий	12 500	7200	5,00	2,88	6,95	4,00	1,85	2,30	1,33	—
Вольфрам	5 460	2620	2,18	1,04	3,03	1,45	19,1	10,4	5,00	—
Вода	1 500	—	0,60	—	0,83	—	1,00	0,15	—	0,001
Воздух	330	—	0,13	—	0,18	—	0,0012	0,00004	—	1,00
Глицерин	1 920	—	0,77	—	1,07	—	1,26	0,242	—	0,06
Стекло кварцевое . .	5 570	3515	2,22	1,40	3,09	1,95	2,60	1,45	0,91	0,006
Магний	4 600	2200	1,84	0,88	2,55	1,22	1,70	0,78	0,38	0,001
Масло трансформаторное	1 425	—	0,57	—	0,79	—	0,89	0,128	—	—
Медь	4 700	2260	1,89	0,91	2,61	1,25	8,90	4,18	2,05	0,018—0,044
Плексиглас	2 670	1121	1,06	0,45	1,48	0,62	1,18	0,32	0,132	0,45
Полистирол	2 350	1120	0,94	0,45	1,31	0,62	1,06	0,25	0,119	0,23
Сталь	5 900	3260	2,36	1,30	3,28	1,81	7,80	4,60	2,54	0,01—0,08
Шлак (АН-348) . . .	6 000	—	2,40	—	3,33	—	3,30	2,00	—	—
Шлак (48-АФ-1) . . .	4 000	—	1,60	—	2,22	—	2,50	1,00	—	—



Рис. 4.3. Номограмма перевода децибел в относительные единицы

децибел/см. Из последних двух соотношений следует, что $\delta_{\lambda} = -8,69\delta$.

В твердых телах коэффициент затухания складывается из коэффициента поглощения и рассеяния. При поглощении звуковая энергия переходит в тепловую, а при рассеянии энергия остается звуковой, но уходит из направленно распространяющейся волны в результате отражений от неоднородностей среды. Затухание ультразвука в металлах, применяемых в сварных соединениях, определяется прежде всего рассеянием волны в поликристаллической структуре, связанным с упругой анизотропией кристаллов.

Коэффициент рассеяния в металлах зависит от соотношения средней величины зерен $\bar{D}$ и длины волны ультразвука λ (рис. 4.4).

Для дефектоскопии обычно применяют частоты 0,5—10 МГц так, чтобы $\lambda > (10 \div 15) \bar{D}$. В этом интервале ультразвук слабо затухает и, как правило, не возникают помехи, связанные с приемом сигналов, рассеянных на кристаллах.

Зависимость коэффициента затухания от величины зерна используют для измерения последней. При этом принимают диапазон длин волн от $\lambda = (3 \div 4) \bar{D}$ до $\lambda = (10 \div 15) \bar{D}$, так как δ быстро изменяется с диаметром зерна (пропорционально $\bar{D}^2$). Коэффициенты затухания могут изменяться в зависимости от технологии сварки и режимов термообработки. В сварных соединениях коэффициент затухания, как правило, максимален в переходной зоне (зоне термического влияния) и возрастает с увеличением частоты ультразвука. При некоторых частотах затухание может стать настолько большим, что ультразвуковые колебания полностью рассеются в основном металле и переходной зоне, не достигнув металла шва.

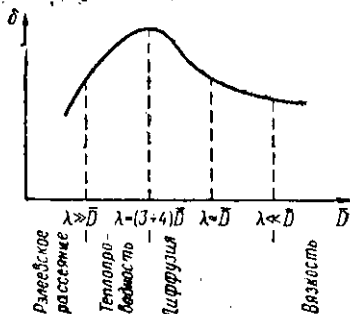


Рис. 4.4. Зависимость коэффициента δ затухания ультразвука от среднего размера $\bar{D}$ кристаллов поликристаллических тел

Отражение ультразвуковых волн. При падении волны на поверхность раздела двух сред в общем случае часть энергии проходит во вторую среду, а часть отражается в первую. Если ультразвуковая волна падает перпендикулярно к границе раздела двух сред, то проходящая и отражен-

ная волны будут такого же типа, как и падающая. Распределение энергии между отраженной волной и прошедшей определяется соотношением удельных акустических сопротивлений сред. Коэффициент отражения R (т. е. отношение интенсивностей отраженной и падающей волн) при падении волны по нормали

$$R = \left(\frac{\rho_1 C_1 - \rho_2 C_2}{\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2} \right)^2,$$

где $\rho_1 C_1$ и $\rho_2 C_2$ — акустические сопротивления первой и второй среды.

Очевидно, что коэффициент прохождения волны $D = 1 - R$.

Если акустические сопротивления равны, то падающая по нормали ультразвуковая волна (без потерь на отражение) полностью переходит из одной среды в другую. Чем больше разница в акустических сопротивлениях, тем больше интенсивность отраженной волны.

Коэффициенты отражения продольной волны на границе между металлом и некоторыми средами, заполняющими дефекты сварки, приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Коэффициенты отражения продольной волны при падении ее перпендикулярно границе раздела двух сред, %

Контролируе- мый металл	Воз- дух	Во- да	Масло минераль- ное	Медь	Кварц	Шлак (спек- шийся флюс АИ-348)	Воль- фрам	Шлак (спек- шийся флюс 43-АФ-1)
Дюралюминий	100	72	74	18	0,6	—	70	>7
Сталь	100	88	89	0,23	28	>15	—	—

Пример 4.4. При контроле соединений из стали волна падает перпендикулярно на трещину, выходящую наружу и вследствие этого заполненную водой.

Определим коэффициент R отражения волны от трещины.

По табл. 4.1 находим, что для стали $\rho_1 = 7,8 \text{ г/мм}^3$ и $C_{11} = 5900 \text{ м/с}$ и для воды $\rho_2 = 1 \text{ г/мм}^3$ и $C_{12} = 1500 \text{ м/с}$.

Тогда

$$R = \left(\frac{7,8 \cdot 10^3 \cdot 5900 - 1 \cdot 10^3 \cdot 1500}{7,8 \cdot 10^3 \cdot 5900 + 1 \cdot 10^3 \cdot 1500} \right)^2 = \left(\frac{46 \cdot 10^6 - 1,5 \cdot 10^6}{46 \cdot 10^6 + 1,5 \cdot 10^6} \right)^2 =$$

$$= \left(\frac{44,5}{47,5} \right)^2 = (0,936)^2 = 0,875.$$

Приведенные в табл. 4.2 значения коэффициентов отражения справедливы лишь при условии, что размеры несплошностей (дефектов) намного больше длины волны. Если же размеры несплошности значительно меньше длины волны, то волны огибают ее без существенного отражения. Для получения заметного отражения необходимо, чтобы размеры несплошности в направлении, перпендикулярном ультразвуковому лучу, были соизмеримы с длиной волны.

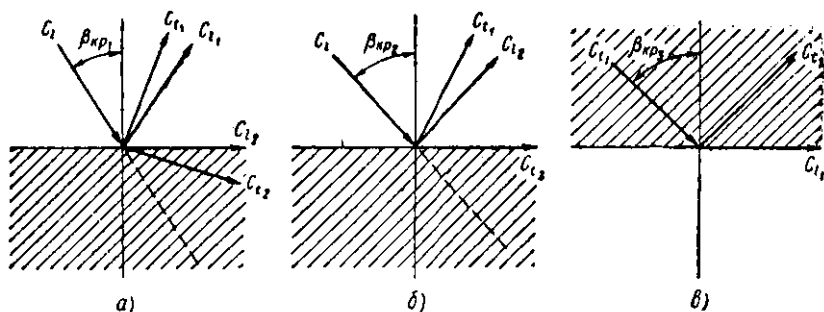


Рис. 4.5. Критические углы при отражении и преломлении ультразвуковой волны

При малой толщине несплошности доля отраженной от нее энергии определяется также величиной раскрытия в направлении прозвучивания. При частоте ультразвуковых колебаний 2,5 МГц трещины в стали, заполненные воздухом и имеющие раскрытие всего 10^{-4} — 10^{-6} мм, отражают около 90% энергии падающих на них колебаний.

Трансформация ультразвуковых волн. При падении ультразвуковой волны на границу раздела сред под некоторым углом β волна из первой среды проходит без искажения во вторую только в том случае, если вторая среда аналогична первой по акустическим свойствам; в любой другой полубезграничной твердой среде, в общем случае, возбуждаются одновременно продольная C_{l2} и поперечная C_{t2} волны. Углы преломления α_{l2} и α_{t2} и углы отражения β_l и β_t продольной и поперечной волн связаны с углом падения β волны соотношением Снеллиуса:

$$\frac{\sin \beta_l}{C_{l1}} = \frac{\sin \beta_t}{C_{t1}} = \frac{\sin \alpha_{l2}}{C_{l2}} = \frac{\sin \alpha}{C_{l2}} = \frac{\sin \beta}{C_{l1}}.$$

Если $C_{l1} < C_{l2}$, то по мере увеличения угла падения β , начиная с некоторого его значения $\beta_{кр1}$ (рис. 4.5, а), называемого первым критическим углом, преломленная продольная волна не будет проникать во вторую среду ($\alpha_{l2} = 90^\circ$). При дальнейшем увеличении угла наступает момент (рис. 4.5, б), когда поперечная волна начинает скользить вдоль поверхности раздела ($\alpha = 90^\circ$); соответствующий угол $\beta_{кр2}$ падения называют вторым критическим углом.

Значения критических углов удовлетворяют равенствам

$$\beta_{кр1} = \arcsin C_{l1}/C_{l2}; \quad \beta_{кр2} = \arcsin C_{l1}/C_{t2}.$$

Пример 4.5. Определим значения критических углов при падении продольной волны на сталь из органического стекла и из воды. Из табл. 4.1 находим, что скорость волн в стали $C_{l2} = 5900$ м/с, а $C_{t2} = 3260$ м/с, скорость продольных волн в оргстекле $C_{l1} = 2670$ м/с и в воде $C_{l1} = 1500$ м/с.

Тогда значения углов $\beta_{кр1}$ и $\beta_{кр2}$ при падении волны из оргстекла:

$$\beta_{кр1} = \arcsin 2670/5900 = \arcsin (0,451) = 26^\circ 50';$$

$$\beta_{кр2} = \arcsin 2670/3260 = \arcsin (0,82) = 55^\circ 15'.$$

при падении волны из воды:

$$\beta_{кр1} = \arcsin 1500/5900 = \arcsin (0,254) = 14^{\circ}45';$$

$$\beta_{кр2} = \arcsin 1500/3260 = \arcsin (0,46) = 27^{\circ}20'.$$

Если падающая волна поперечная, то по мере увеличения угла падения, начиная с некоторого значения $\beta_{кр3}$, продольная отраженная волна отсутствует в первой среде (рис. 4.5, в). Этот угол называется третьим критическим углом и определяется соотношением

$$\beta_{кр3} = \arcsin C_t/C_l.$$

Значение угла $\beta_{кр3}$ соответствует минимальному значению угла преломления поперечной волны, при котором еще не возбуждается продольная волна. При определенном угле падения, несколько меньше $\beta_{кр3}$, происходит максимальная трансформация поперечной волны в продольную.

Излучатели и приемники ультразвука. Для возбуждения и регистрации ультразвуковых колебаний при дефектоскопии металлов используют электроакустические преобразователи в виде пластины из пьезоэлектрических материалов: кварца, цирконата титаната свинца (ЦТС), титаната бария и др. Толщину d пьезоэлектрической пластины выбирают такой, чтобы собственная частота f_0 пластины соответствовала частоте возбуждаемых или принимаемых ультразвуковых колебаний:

$$f_0 = k_0/d.$$

Для титаната бария $k_0 = 2,5 \text{ МГц} \cdot \text{мм}$ и для ЦТС $k_0 = 1,88 \text{ МГц} \times \times \text{мм}$.

Пример 4.6. Необходимо выбрать пьезоэлектрическую пластину из керамики ЦТС для излучения колебаний частотой $f_0 = 2,5 \text{ МГц}$. Толщина пластины должна быть равна

$$d = k_0/f_0 = 1,88/2,5 = 0,75 \text{ мм}.$$

Для удобства прозвучивания шва и во избежание механических повреждений и износа пьезоэлектрической пластины последнюю помещают в специальном устройстве, называемом искателем. Искатели, предназначенные для ввода волны в направлении, перпендикулярном к поверхности контролируемого изделия, принято называть прямыми (или нормальными), а для ввода под некоторым углом — наклонными или призматическими (рис. 4.6 и 4.7). Призмы искате-

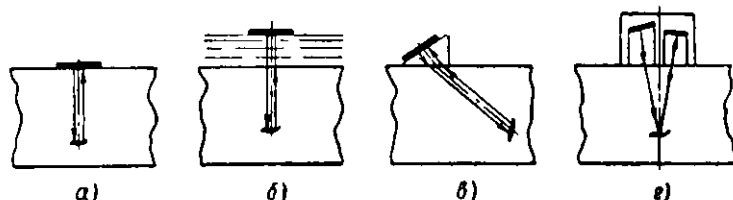


Рис. 4.6. Основные типы искателей для ультразвукового контроля:

а — нормальный; б — нормальный с акустической задержкой (иммерсионный); в — наклонный; г — раздельно-совмещенный

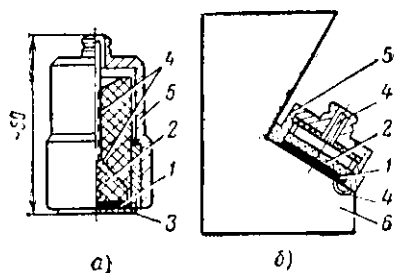


Рис. 4.7. Конструкция искателей:

а — прямой; б — наклонный; 1 — пьезопластина; 2 — демпфер; 3 — проектор; 4 — соединяющие проводники; 5 — корпус; 6 — призма

лей обычно изготавливают из органического стекла (плексигласа) или капролона.

Чтобы излучаемую искателем волну ввести в контролируемое изделие, необходимо между искателем и изделием создать акустический контакт. Акустический контакт обычно обеспечивают заполнением контактирующей среды пространства между излучающей плоскостью искателя и поверхностью изделия. В качестве контактирующей среды используют минеральные масла, солидол, технический глицерин, воду, спирт и т. п.

Различают два основных способа обеспечения акустического контакта: контактный и иммерсионный. При иммерсионном способе, в отличие от контактного, толщина слоя $d_{ж}$ контактирующей среды больше половины длины волнового пакета ультразвукового импульса, т. е.

$$d_{ж} \geq \frac{1}{2} \frac{C_{ж} \tau}{\cos \alpha_{ж}},$$

где $C_{ж}$ и $\alpha_{ж}$ — соответственно скорость распространения и угол преломления продольной волны в контактирующей среде, τ — длительность зондирующего импульса.

Пример 4.7. Контроль прямым искателем ($\alpha_{ж} = 0$); в качестве контактирующей жидкости используют воду. Длительность зондирующих импульсов $\tau = 4$ мкс. Определить толщину $d_{ж}$ слоя воды, при котором ввод колебаний будет иммерсионным.

По табл. 4.1 находим, что для воды $C_{ж} = 1500$ м/с. Тогда

$$d_{ж} \geq \frac{1}{2} \frac{1500 \cdot 4 \cdot 10^{-6}}{1} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 3 \text{ мм}.$$

При контактном способе интенсивность вводимых в металл ультразвуковых колебаний существенно зависит от толщины слоя контактирующей среды. Иммерсионный способ исключает влияние толщины слоя контактирующей среды на интенсивность вводимой в изделие волны. Таким образом, если обеспечить акустический контакт между искателем и изделием, то волна, введенная в изделие, дойдя до внутренних несплошностей или до поверхностей, отразится от последних (рис. 4.8). Распространение ультразвуковой волны или ее многократные отражения между поверхностями в изделии будут продолжаться до полного затухания колебаний.

При поиске дефектов искатель зигзагообразно перемещают вдоль контролируемого шва, прозвучивая его прямым (рис. 4.9, а), однократно (рис. 4.9, б), двукратно (рис. 4.9, в) или многократно (рис. 4.9, г) отраженным лучом. При прозвучивании сварных сое-

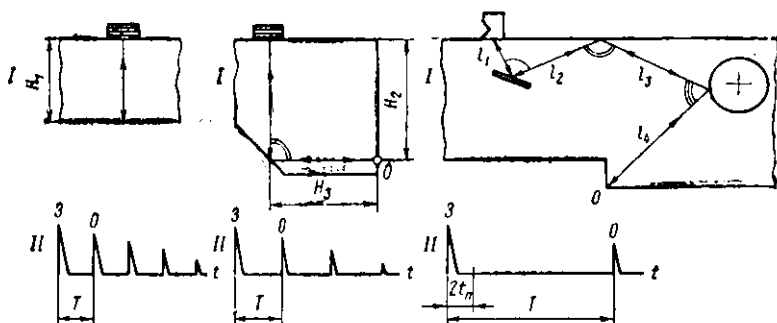


Рис. 4.8. Отражение ультразвуковой волны при распространении ее в контролируемом изделии:

I — схемы распространения ультразвукового луча; II — распределение во времени ультразвуковых импульсов на искателе; $З$ — зондирующий импульс; $О$ — эхо-импульс, отраженный от точки O ; T — интервал времени между зондирующим и отраженным импульсами

динений n -кратно отраженным лучом лист можно рассматривать как полубезграничную среду, если

$$n \leq \frac{\cos(\varphi_n + \varphi_n) - \cos 2\alpha_0}{\sin(\varphi_n + \varphi_n) \operatorname{tg} \alpha_0} - 1,5,$$

где φ_n и φ_n — углы раскрытия верхней и нижней половин основного лепестка диаграммы направленности наклонного искателя; α_0 — угол наклона акустической оси искателя.

В искателе любого типа пьезоэлектрический преобразователь излучает продольную волну. В связи с этим при установке прямого искателя на поверхность любой среды в последней распространяется продольная волна. Если размеры преобразователя существенно больше длины волны излучаемого им ультразвука, то ультразвуковые колебания в однородных металлах распространяются в виде направленного пучка (рис. 4.10, a).

Вблизи от излучателя, на участке, называемом ближней зоной или зоной Френеля, ультразвуковая волна распространяется почти

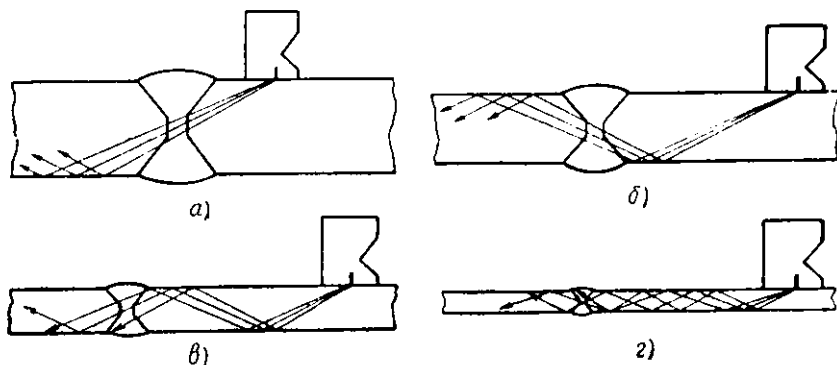


Рис. 4.9. Способы прозвучивания металла шва прямым (a), однократно отраженным ($б$), двукратно отраженным ($в$) и многократно отраженным ($г$) лучами

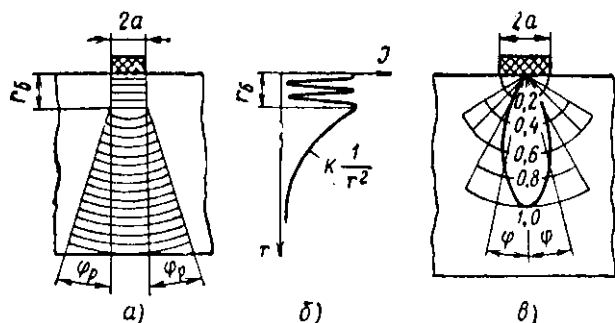


Рис. 4.10. Распространение ультразвуковой волны:

a — акустическое поле излучателя; b — распределение интенсивности по оси луча; φ — диаграмма направленности излучателя

без расхождения в стороны. В ближней зоне амплитуда поля как вдоль оси пучка, так и по его сечению претерпевает осцилляции (рис. 4.10, б). В дальней зоне поля или зоне Фраунгофера, расположенной за ближней зоной, начинается постепенное расхождение волны. Поле волны приобретает форму усеченного конуса, половина угла расхождения которого

$$\varphi_p \approx \arcsin 0,61\lambda/a = \arcsin 0,61C/af,$$

где a — радиус преобразователя.

Амплитуда волны в дальней зоне падает обратно пропорционально расстоянию r рассматриваемой точки от источника волн.

Протяженность r_0 ближней зоны может быть вычислена по формуле

$$r_0 = a^2/\lambda = a^2f/C.$$

Пример 4.8. Определим протяженность ближней зоны r_0 и угол раскрытия $2\varphi_p$ ультразвукового пучка в стали при возбуждении продольной волны пьезопреобразователем радиусом $2a = 12$ мм на частоту $f = 2,5$ МГц.

В стали скорость продольной волны $C_l = 5900$ м/с. Тогда

$$2\varphi_p \approx 2 \arcsin 0,61 \frac{5900 \cdot 10^3}{6 \cdot 2,5 \cdot 10^6} = 2 \arcsin (0,24) = 2 \cdot 13^\circ 55' \approx 28^\circ;$$

$$r_0 = \frac{36 \cdot 2,5 \cdot 10^6}{5900 \cdot 10^3} \approx 15 \text{ мм.}$$

При частоте продольных колебаний $f = 2,5$ МГц и диаметре преобразователя $2a = 12$ мм, широко используемых в дефектоскопии, протяженность ближней зоны в стали составляет $r_0 \approx 15$ мм, а угол расхождения всего $2\varphi_p = 28^\circ$. В связи с этим ультразвуковые колебания в контролируемом металле распространяются в виде направленного пучка (луча).

Диаграммы направленности. Направленность поля удобно представлять в виде графика в полярных координатах, называемого диаграммой направленности и характеризующего зависимость амплитуды поля в дальней зоне (см. рис. 4.10, а). Полярный угол φ отсчитывают от полярной оси, совмещаемой с направлением излучения, соответствующим максимальной амплитуде поля. Радиус-вектор Φ (φ)

пропорционален отношению амплитуды волны $u(\varphi)$ к максимальной амплитуде $u(0)$. При $\varphi = 0$ $\Phi(0) = 1$.

Направленность полей данного типа волн в контролируемой среде, создаваемых излучателями, будет одинакова, если равны произведения радиуса излучателей на соответствующую частоту ультразвука, т. е. если $a_1 f_1 = a_2 f_2 = a_3 f_3 = \dots = a_n f_n$. Если излучатель используется для приема ультразвуковых колебаний, то он также обладает определенной направленностью по чувствительности. Диаграммы направленности излучателя в режиме излучения и приема совпадают.

Диаграмма направленности прямого излучателя описывается выражением

$$\Phi(\varphi) \approx \frac{J_1\left(\frac{2\pi a}{\lambda} \sin \varphi\right)}{\frac{2\pi a}{\lambda} \sin \varphi}$$

где J_1 — символ цилиндрической функции Бесселя первого рода и первого порядка, φ — угол между нормалью к излучателю и линией, проведенной из центра излучателя к точке наблюдения.

Анализ выражения показывает, что по мере увеличения соотношения a/λ или произведения af увеличивается направленность поля. При $a/\lambda > 0,6$ в диаграмме кроме основного лепестка возникают боковые.

Диаграмму направленности наклонного излучателя можно описать функцией $\Phi(\alpha)$ в полярных координатах (рис. 4.11). Угол α_0 называют углом наклона акустической оси излучателя, а точку 0 на призме излучателя, через которую проходит акустическая ось, — точкой выхода (ввода) луча. Точка выхода луча гравировается на боковых плоскостях призмы излучателей. Выражение для расчета диаграмм направленности наклонных излучателей имеет весьма сложный вид.

Диаграмма направленности поля наклонного излучателя, как и прямого, может иметь кроме основного лепестка — боковые. Поскольку большая часть излучаемой энергии сосредоточена в основном лепестке (до 80%), в дефектоскопии обычно ограничиваются рассмотрением только основного лепестка диаграмм. Основной лепесток диаграммы направленности может быть аппроксимирован достаточно простым выражением, если известно значение φ_0 половины угла расхождения основного лепестка на уровне 0,8:

$$\Phi(\varphi) \approx \cos(\pi\varphi/5\varphi_0).$$

Значения φ_0 для данного излучателя могут быть рассчитаны, определены по графикам или измерены экспериментально.

Пример 4.9. Для контроля соединений из стали применяют излучатель с призмой из орг-

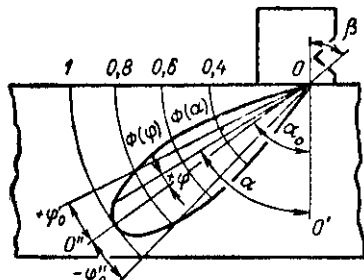


Рис. 4.11. Диаграмма направленности наклонного излучателя

стекла с углом призмы $\beta = 40^\circ$, преобразователем диаметром $2a = 12$ мм, частотой излучаемых колебаний $f = 2,5$ МГц.

Определим приближенное выражение для основного лепестка диаграммы направленности поля поперечной волны, возбуждаемой искателем в контролируемом изделии.

Для применяемого искателя $af = 6 \cdot 2,5 = 15$ мм·МГц. Для $af = 15$ мм·МГц значение половины углов раскрытия основного лепестка на уровне 0,8:

$$\Phi_0^I \approx \Phi_0^{II} \approx 3,8^\circ \approx 3,8/57,5 = 0,066 \text{ рад.}$$

Тогда

$$\Phi(\varphi) = \cos\left(\frac{\pi}{5 \cdot 0,066} \varphi\right) = \cos(9,55\varphi).$$

Обычно угол падения β (угол призмы) в наклонных искателях выбирают между первым и вторым критическими углами ($\beta_{кр1} < \beta < \beta_{кр2}$), обеспечивая тем самым возбуждение в контролируемом металле только поперечной волны.

Угол ввода луча α в общем случае отличается от угла наклона акустической оси искателя α_0 и от угла преломления α_c , рассчитываемого по выражению Снеллиуса. Между этими углами соблюдаются неравенства: $\alpha < \alpha_0$ при $\alpha_0 > 0$; $\alpha_0 > \alpha_c$ при $\alpha_0 < \alpha_{c \max}$, $\alpha_0 = \alpha_c$ при $\alpha_0 \approx \alpha_{c \max}$; $\alpha_0 < \alpha_c$ при $\alpha_c > \alpha_{c \max}$ ($\alpha_{c \max}$ — угол преломления, рассчитанный по выражению Снеллиуса).

При малом затухании ультразвука, что в большинстве случаев имеет место при контроле сварных соединений, величина отклонения угла ввода луча от угла наклона акустической оси искателя не превышает 2° и практически не зависит от глубины расположения отражателя.

В связи с этим при контроле сварных соединений, за исключением швов большой толщины, можно принимать $\alpha \approx \alpha_0$. В процессе прозвучивания сварных соединений могут наблюдаться отклонения истинного значения угла ввода луча от расчетного. Отклонения угла ввода луча в металл могут быть вызваны изменением угла призмы вследствие ее истирания; изменением положения призмы, приводящим к непараллельности ее рабочей плоскости и поверхности металла; изменением скорости распространения ультразвуковых колебаний вследствие понижения или повышения температуры призмы искателя и металла. Постоянство угла ввода луча в металл при изменении температуры обеспечивается применением термостабильной системы ввода ультразвуковых колебаний.

Режимы работы искателей. Ультразвуковые волны от искателя излучаются в контролируемое изделие непрерывно или в виде импульсов заданной длительности τ . Длительность импульсов τ , применяемых в дефектоскопии сварных соединений, составляет несколько микросекунд. Импульсы ультразвуковых колебаний, излучаемые в контролируемое изделие, принято называть зондирующими импульсами.

4.2. ОСНОВНЫЕ ИЗМЕРЯЕМЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕФЕКТОВ

Признаком обнаружения дефекта при ультразвуковом контроле является прием эхо-сигнала, амплитуда которого превышает заданный уровень, от отражателя, расположенного в металле шва. Для получения информации о выявленных дефектах используют следующие основные измеряемые характеристики дефекта: максимальную амплитуду эхо-сигнала от дефекта, координаты расположения дефекта в шве, условные размеры дефекта, количество дефектов на определенной длине шва.

4.2.1. Амплитуда эхо-сигнала от дефекта

Амплитуда эхо-сигнала — наиболее простая измеряемая характеристика, которая при прочих равных условиях зависит от размеров, ориентации и конфигурации отражающей поверхности, глубины ее расположения и шероховатости.

Волна того же типа, что и падающая, отражается только под углом, равным углу падения, если неровности отражающей поверхности много меньше длины волны. Такая отражающая поверхность называется зеркальной, а отражение от нее зеркальным. Если поверхность раздела двух сред имеет неровности, размеры которых соизмеримы с длиной ультразвуковой волны, наблюдается диффузное отражение, при котором лучи рассеиваются в разные стороны под различными углами.

Большинство несплошностей, встречающихся в сварных соединениях (непровары, трещины, окисные пленки), имеют поверхности, вызывающие диффузное отражение распространяющихся в металле ультразвуковых волн, применяемых при дефектоскопии. Амплитуда эхо-сигнала, отраженного от неровной поверхности, меньше, чем эхо-сигнала от зеркальной при падении ультразвуковой волны перпендикулярно к границе раздела сред (рис. 4.12, а). В то же время при падении ультразвуковой волны под некоторым углом к границе раздела энергия волны, отраженной в направлении к излучателю, тем больше, чем значительнее неровности отражающей поверхности (рис. 4.12, б).

При взаимодействии ультразвуковой волны излучателя с локальным дефектом вокруг последнего образуется акустическое поле отраженной волны. Интенсивность отраженной волны зависит прежде всего от размеров и формы дефекта; направления, в котором происходит отражение; расстояния от дефекта. Интенсивность отраженного акустического поля дефекта удобнее всего представить в сферических координатах в виде *индикатрисы рассеяния*.

Амплитуда эхо-сигнала зависит и от взаимного положения совмещенного излучателя и дефекта (см. рис. 4.13).

Для приближенной оценки амплитуды эхо-сигнала от реального дефекта последние заменяют эквивалентными моделями в виде отра-

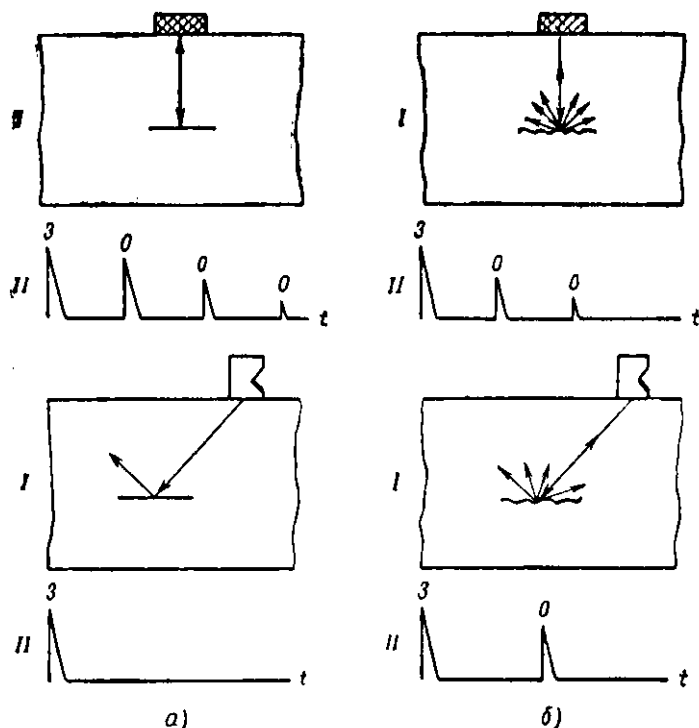


Рис. 4.12. Зеркальное (а) и диффузное (б) отражение при нормальном и наклонном падении волны на отражающую поверхности
 1 — схемы распространения ультразвукового пучка; II — распределение во времени t ультразвуковых импульсов на преобразователе;
 З — возбуждающий импульс; О — отраженный импульс (эхо-сигнал)

жателей правильной геометрической формы. В табл. 4.3 приведены основные виды дефектов и соответствующие им модели, а также выражения для расчета максимальных амплитуд U_d эхо-сигналов от моделей дефектов, расположенных в дальней зоне искателя. Обратите внимание, что выражения для расчета амплитуд эхо-сигналов

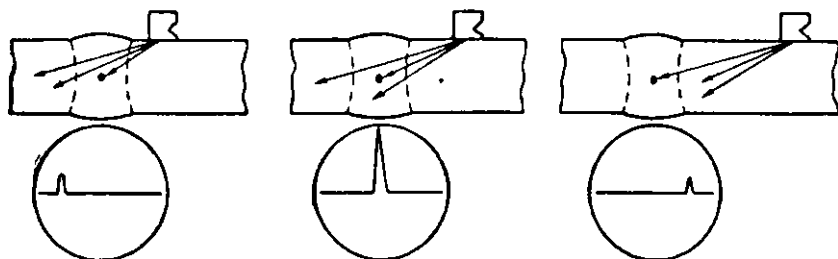
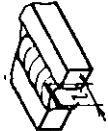
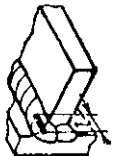
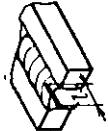
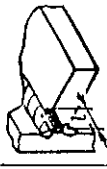
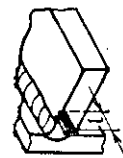
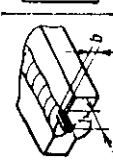
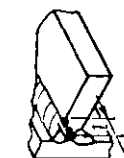


Рис. 4.13. Зависимость амплитуды эхо-сигнала, отраженного дефектом, от положения наклонного искателя

Основные дефекты в сварных соединениях и соответствующие им модели

Наименования и изображения реальных дефектов в сварных соединениях			Модели дефектов	
			Вид отражателя	Амплитуда U_d эхо-сигнала от отражателя в дальней зоне
Шлаковые включения и поры	округлой формы			$U_d = k \frac{b}{2\lambda_l (r + \Delta r)^2} \times \exp \{-2(\delta_l r + \delta_l r_l)\}$
				$U_d = k \frac{l \sqrt{2b}}{\lambda_l^{3/2} (r + \Delta r)^2} \times \exp \{-2(\delta_l r + \delta_l r_l)\}$
	продолговатые			$U_d = k \frac{\sqrt{b}}{2\lambda_l (r + \Delta r)^{3/2}} \times \exp \{-2(\delta_l r + \delta_l r_l)\}$
Трещины продольные	$l < D_s$ $l \approx b$			$U_d = k \frac{\pi b^2}{\lambda_l^2 (r + \Delta r)^2} \times \exp \{-2(\delta_l r + \delta_l r_l)\}$
	$l > D_s$ $l \gg b$			$U_d = k \frac{\sqrt{2} b}{\lambda_l^{3/2} (r + \Delta r)^{3/2}} \times \exp \{-2(\delta_l r + \delta_l r_l)\}$

Наименования и изображения реальных дефектов в сварных соединениях		Модели эффектов	
		Вид отражателя	Амплитуда $U_{\text{д}}$ эхо-сигнала от отражателя в дальней зоне
Цепровары острой формы в корне шва при разделке	 $l < D_3$ $l \approx b$		$U_{\text{д}} = k \frac{\pi b^2}{\lambda_t^2 (r + \Delta r)^2} \times \exp[-2(\delta_{\text{д}} r + \delta_{\text{д}} r_1)]$
			$U_{\text{д}} = k \frac{\sqrt{2} b}{\lambda_t^{3/2} (r + \Delta r)^{3/2}} \times \exp[-2(\delta_{\text{д}} r + \delta_{\text{д}} r_1)]$
	 $l < D_3$ $l \approx b$		$U_{\text{д}} = k \frac{lb R(\alpha) R(90 - \alpha) \sin \alpha}{\lambda_t^2 (r + \Delta r)^2} \times \exp[-2(\delta_{\text{д}} r + \delta_{\text{д}} r_1)]$
			$U_{\text{д}} = k \frac{\sqrt{2} b R(\alpha) R(90 - \alpha) \sin \alpha}{\lambda_t^{3/2} (r + \Delta r)^{3/2}} \times \exp[-2(\delta_{\text{д}} r + \delta_{\text{д}} r_1)]$
Примечание. $k = \frac{U_{\Sigma} S_{\text{дн}}(\beta) \cos \alpha}{\cos \gamma}$; $\Delta r = r_1 \frac{C_1 \cos \alpha}{C_2 \cos \beta}$; $D_3 =$ диаметр ультразвукового луча в сечении, где расположен дефект.			

от большинства отражателей могут быть представлены в следующем общем виде:

$$U_d = U_0 D_{II}(\beta) \left(S_a \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} \right) \left(\frac{Ab^y}{\lambda_l^2} \right) \frac{1}{(r + \Delta r)} \cdot \frac{1}{(r + \Delta r)^q} \cdot e^{-2(\delta_l r_1 + \delta_l r)},$$

В выражениях, приведенных в табл. 4.3, приняты следующие обозначения: S_a — площадь пьезоэлектрического преобразователя в искателе; β — угол призмы искателя; α — угол наклона акустической оси; $D_{II}(\beta)$ — коэффициент преобразования продольной волны в поперечную при данном угле β призмы; λ_l — длина поперечной волны в контролируемом металле; b и l — размеры модели дефекта; r — путь ультразвука в металл от искателя до модели дефекта; r_1 — средний путь ультразвука в призме искателя; δ_l и δ_1 — коэффициенты затухания поперечной волны в контролируемом металле и продольной волны в материале призмы соответственно; Δr — приведенный путь ультразвука в призме искателя, равный $\Delta r = r_1 \frac{C_{II} \cos \alpha}{C_{I2} \cos \beta}$.

Из последнего уравнения видно, что амплитуда эхо-сигнала пропорциональна площади преобразователя S_a . Множитель $\cos \alpha / \cos \beta$, всегда меньший единицы, показывает, что амплитуда эхо-сигнала уменьшается с увеличением угла призмы β .

Коэффициент $D_{II}(\beta)$, называемый коэффициентом прозрачности, характеризует, какая часть энергии падающей продольной волны трансформируется в поперечную; величина $D_{II}(\beta)$ зависит от угла β и всегда меньше единицы.

Множитель Ab^y/λ_l^2 определяет зависимость амплитуды эхо-сигнала от размеров отражателя b и соотношения этого размера к длине волны; показатели y и z в этом множителе обуславливаются формой отражающей поверхности.

Множитель $1/(r + \Delta r)$ подчеркивает убывание амплитуды падающей на отражатель волны с увеличением пути $(r + \Delta r)$ из-за расхождения излучаемого в металле пучка.

Множитель $1/(r + \Delta r)^q$ характеризует убывание амплитуды отраженной от дефекта волны с увеличением расстояния $(r + \Delta r)$ от него. Убывание обязано расхождению отраженной волны, причем показатель q зависит от формы отражающей поверхности. Для компактных отражателей (сфера, диск) $q = 1$, для вытянутых (цилиндр, полоса) $q = 0,5$.

Слагаемые $\delta_l r_1$ и $\delta_l r$ в показателе последнего множителя определяют затухание продольной волны в призме искателя и поперечной волны в металле на пути от искателя до отражателя.

При контроле амплитуды U_d эхо-сигналов от реальных дефектов (моделей дефектов) измеряют путем сопоставления их с амплитудой U_0 эхо-сигнала от отражателя, принятого за эталонный. В табл. 4.4 сведены основные виды эталонных отражателей и выражения для расчета амплитуд U_0 эхо-сигналов от них. Отношение амплитуды U_d эхо-сигнала от дефекта к амплитуде U_0 эхо-сигнала от эталонного

Основные виды эталонных отражателей

Эталонный отражатель		Амплитуда U_0 эхо-сигнала
Наименование	Внешний вид	
Бесконечная плоскость		$U_0 \approx k \frac{1}{2\lambda_l (r + \Delta r)} \exp[-2(\delta r + \delta r_1)]$
Цилиндрическая поверхность (выпуклая)		$U_0 \approx k \frac{\exp[-2(\delta r + \delta r_1)]}{\sqrt{2S_0 \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} \lambda_l^{1/2} (r + \Delta r)^{1/2}}}$
Плоскостное отверстие		$U_0 \approx k \frac{\pi b_0^2}{\lambda_l^2 (r + \Delta r)^2} \exp[-2(\delta r + \delta r_1)]$
Угловой отражатель (зарубка)		$U_0 \approx k \frac{I_0 b_0 R (\alpha) R (90 - \alpha) \sin \alpha}{\lambda_l^2 (r + \Delta r)^2} \exp[-2(\delta r + \delta r_1)]$
Сегментный отражатель		$U_0 \approx k \frac{S_0}{\lambda_l^2 (r + \Delta r)^2} \exp[-2(\delta r + \delta r_1)]$
Боковое отверстие		$U_0 \approx k \frac{\sqrt{b_0}}{2\lambda_l (r + \Delta r)^{3/2}} \exp[-2(\delta r + \delta r_1)]$
Отверстие со сферическим аном		$U_0 \approx k \frac{b_0}{2\lambda_l (r + \Delta r)^2} \exp[-2(\delta r + \delta r_1)]$

отражателя называют условным коэффициентом выявляемости дефекта и обозначают k_d , т. е.

$$k_d = U_d / U_0.$$

Если амплитуды U_d и U_0 выражены в децибелах N_d и N_0 соответственно, то

$$k_d = N_d - N_0.$$

При прозвучивании сварных соединений в процессе контроля признаком обнаружения дефекта служит обнаружение эхо-сигналов такой амплитуды, которая превышает амплитуду от эталонного отражателя в некоторое определенное число раз k_{d0} . Для сравнения амплитуд эхо-сигналов в дефектоскопах имеются аттенюаторы, прокалиброванные в децибелах. При отсутствии в дефектоскопе аттенюатора амплитуды эхо-сигналов от выявленных дефектов сравнивают с амплитудами эхо-сигналов от эталонных отражателей в тест-образце.

Пример 4.10. Определим коэффициент выявляемости k_d дефекта в виде сферической поры диаметром $2b_0 = 10$ мм в сварном соединении из стали при эталонировании чувствительности по боковому цилиндрическому отверстию диаметром $2b_0 = 8$ мм в тест-образце из стали. Глубина расположения дефекта $H_0 = 100$ мм, а эталонного отражателя $H_0 = 47$ мм. Контроль ведется на частоте $f = 2,5$ МГц искателем с углом призмы $\beta = 40^\circ$ ($\alpha = 50^\circ$) и с пьезопреобразователем диаметром $2a = 12$ мм, средний путь ультразвука в призме $r_1 = 12$ мм.

Пользуясь табл. 4.3 и 4.4, найдем выражение для коэффициента k_d как отношение амплитуды U_d эхо-сигнала от сферического отражателя к амплитуде U_0 эхо-сигнала от бокового цилиндрического отражателя

$$\begin{aligned} k_d = \frac{U_d}{U_0} &= \frac{D_{II} S_a b_0 \cos \alpha e^{-2(\delta_l r_1 + \delta_l r_0)} \cdot 2\lambda_l \cos \beta (r_0 + \Delta r)^{3/2}}{2\lambda_l (r_0 + \Delta r)^2 \cos \beta \cdot D_{II} \cdot S_a \cos \alpha \cdot \sqrt{b_0} e^{-2(\delta_l r_1 + \delta_l r_0)}} = \\ &= \frac{b_0 e^{-2\delta_l (r_0 - r_0)} \cdot (r_0 + \Delta r)^{3/2}}{\sqrt{b_0} (r_0 + \Delta r)^2}. \end{aligned}$$

Вспомним, что

$$r_0 = \frac{H_0}{\cos \alpha} = \frac{100 \text{ мм}}{\cos 50^\circ} = \frac{100 \text{ мм}}{0,643} \approx 156 \text{ мм};$$

$$r_0 = \frac{H_0}{\cos \alpha} = \frac{47}{\cos 50^\circ} = \frac{47}{0,643} \approx 73 \text{ мм};$$

$$\Delta r = r_1 \frac{C_l}{C_t} \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} = 12 \frac{2,67 \cos 50^\circ}{3,26 \cos 40^\circ} = 12 \frac{2,67 \cdot 0,643}{3,26 \cdot 0,766} \approx 8 \text{ мм}.$$

Из табл. 4.1 следует что при $f = 2,5$ МГц $\lambda_l = 1,3$ мм и $\delta_l = 0,004 \text{ мм}^{-1}$. Тогда

$$k_d = \frac{5(73 + 8)^{3/2}}{\sqrt{4}(156 + 8)^2} e^{-2 \cdot 0,004(156 - 73)} = \frac{5 \cdot 729}{2 \cdot 27000} e^{-0,684} = 0,0675 \cdot 0,50 = 0,034.$$

По номограмме рис. 4.3 находим, что 0,034 соответствует 29,7 отр. дБ.

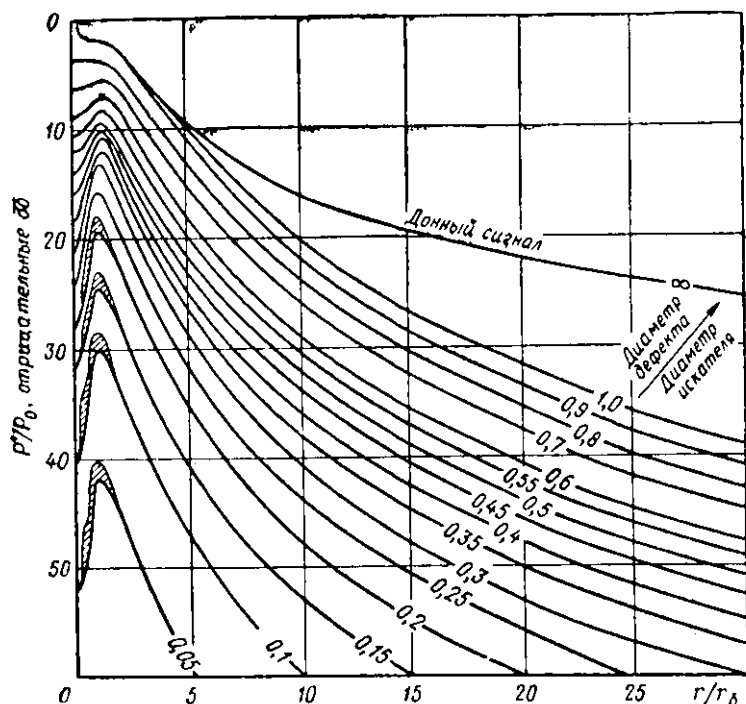


Рис. 4.14. АРД-диаграмма для максимального эхо-сигнала от плоскостонного отверстия

Амплитуда эхо-сигнала от дефекта в большинстве случаев может быть выражена через минимальную площадь $S_{\min}$ плоского дна отверстия, расположенного на той же глубине и имеющего ту же отражательную способность, что и выявленный дефект. Однозначной связи между амплитудой эхо-сигнала и размерами дефекта не наблюдается. Однако по амплитуде эхо-сигнала можно судить о предельном минимальном размере выявленного дефекта, измеряемого упомянутой площадью $S_{\min}$. Эта площадь называется эквивалентной площадью дефекта.

Определить эквивалентную площадь дефектов можно по тест-образцам, в которых на разной глубине выполнены отверстия с плоским дном различной площади. Необходимость изготовления и использования наборов тест-образцов с искусственными дефектами весьма затрудняет проведение ультразвукового контроля особенно при проверке сварных швов большой толщины, когда образцы становятся громоздкими и нетранспортабельными. В связи с этим разработана методика определения эквивалентных размеров дефектов без применения тест-образцов. Для этого необходимы измеритель амплитуд эхо-сигналов (аттенюатор или имитатор дефектов) и АРД-диаграмма (амплитуда—расстояние—диаметр) (рис. 4.14).

На оси ординат этой диаграммы указаны значения амплитуды отраженного от диска сигнала, отнесенные к амплитуде максимального сигнала, который может быть получен при полном возвращении к приемнику всей излученной в изделие энергии. Это отношение выражено в отрицательных децибелах. По оси абсцисс отложено расстояние до дефекта, причем за единицу принята длина ближней зоны искателя. Параметром семейства кривых является отношение диаметра диска к диаметру излучателя. Заштрихованные области в левой части диаграммы соответствуют изменению амплитуд, вызываемому различной длительностью ультразвуковых импульсов.

Пример 4.11. Определим с помощью АРД-диаграммы амплитуду сигнала от плоского дефекта диаметром 6 мм, расположенного в стальном образце на глубине 100 мм перпендикулярно оси нормального искателя диаметром 12 мм, на частоту 2,5 МГц.

Длина волны $\lambda = C/f = 5,9 \cdot 10^3 / 2,5 \cdot 10^6 = 2,35$ мм. Длина ближней зоны $r_0 = a^2/\lambda = 6^2/2,35 = 15,3$ мм. Приведенное расстояние $r/r_0 = 100/15,3 = 6,5$. Приведенный диаметр дефекта $2b/2a = 6/12 = 0,5$. На пересечении вертикали $r/r_0 = 6,5$ и кривой $2b/2a = 0,5$ находим $P/P_0 = 25,5$ отн. дБ. $\approx 0,053$.

4.2.2. Координаты дефекта

Координаты дефекта при знании технологии сварки контролируемых соединений и особенно при наличии статистических данных о распределении дефектов различного вида по сечению шва позволяют с определенной вероятностью предполагать вид (характер) выявленного дефекта. Кроме того, координаты дефекта необходимы для ремонта забракованного участка.

При контроле изделий прямым искателем измерению подлежит лишь глубина H расположения отражающей поверхности (рис. 4.15, а)

$$H = C_{12}t/2,$$

где t — время прохождения ультразвукового импульса от поверхности, на которой установлен искатель, до дефекта и обратно.

Определение координат залегания отражающей поверхности (глубины H и расстояния L от центра излучения искателя) при прозвучивании наклонным

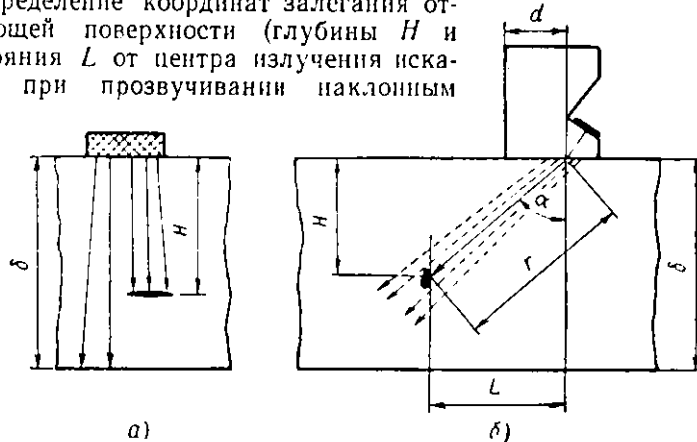


Рис. 4.15. Определение координат залегания дефекта при прозвучивании прямым (а) и наклонным (б) искателями

искателем основывается на измерении времени t , проходного импульсом в металле, и последующем пересчете этой величины в координаты H и L по известному углу ввода луча α (рис. 4.15, б):

$$H = r \cos \alpha = \frac{C_{t_2}(T - 2t_n)}{2} \cos \alpha;$$

$$L = r \sin \alpha = \frac{C_{t_2}(T - 2t_n)}{2} \sin \alpha,$$

где T — интервал времени между моментом излучения зондирующего и моментом приема отраженного импульса; время прохождения ультразвука через призму искателя.

Пример 4.12. Определим интервал времени T между зондирующим импульсом и эхо-сигналом от дефекта, расположенного на глубине $H = 100$ мм в изделии из стали. Дефект обнаружен наклонным искателем, излучающим колебания под углом $\alpha = 50^\circ$, у которого $t_n = 4$ мкс.

Согласно табл. 4.1 скорость поперечной волны в стали $C_{t_2} = 3,260$ мм/мкс. Путь проходимый поперечной волной в стали от искателя до дефекта, равен

$$r = H / \cos \alpha = 100 / \cos 50^\circ = 100 / 0,643 = 155,5 \text{ мм.}$$

Тогда

$$T = \frac{2 \cdot 155,5}{3,260} + 2 \cdot 4 = 95,5 + 8 \approx 103,5 \text{ мкс.}$$

Пример 4.13. Определим координаты дефекта H и L , если при контроле сварного соединения стальных листов искателем с углом призмы $\beta = 40^\circ$ ($\alpha = 50^\circ$, $t_n = 4$ мкс) измеренный интервал времени между зондирующим импульсом и эхо-сигналом составил $T = 108$ мкс.

Из табл. 4.1 следует, что в стали скорость поперечной волны $C_{t_2} = 3,260$ м/с = 3,26 мм/мкс.

Тогда

$$H = \frac{3,26(108 - 8)}{2} \cdot 0,643 = 105 \text{ мм; } L = \frac{3,26(108 - 8)}{2} \cdot 0,766 = 127 \text{ мм.}$$

4.2.3. Условные размеры дефекта

К условным размерам выявленных дефектов относят их условную протяженность l , условную ширину Δx и условную высоту ΔH (рис. 4.16). Условная протяженность характеризует размеры дефекта вдоль шва (в плане), а условная ширина и условная высота — размеры дефекта в сечении шва.

Величину условной протяженности дефекта измеряют длиной зоны перемещения искателя вдоль шва, в пределах которой воспринимается эхо-сигнал от выявленного дефекта. Аналогично, при перемещении искателя нормально ко шву, измеряют величину условной ширины дефекта. Величину условной высоты дефекта вычисляют по разности интервалов времени между зондирующим и эхо-импульсом при крайних положениях искателя, между которыми измеряли условную ширину Δx .

Возможны два способа задания крайних положений искателя при измерении условных размеров l , Δx и ΔH .

Способ 1. За крайние положения искателя принимают такие, при которых амплитуда эхо-сигнала от выявляемого дефекта уменьшилась до значения $U_{\min}$, составляющего определенную часть A от максимального значения $U_{\max}$, т. е. $U_{\min} = AU_{\max}$.

При измерении условных размеров по способу 1 значения l , Δx и ΔH дефектов, истинные размеры которых не превышают размеры ультразвукового пучка в месте расположения дефекта, в основном определяются конфигурацией и ориентацией дефектов и монотонно растут с увеличением глубины их расположения (рис. 4.17, б). При этом в большинстве случаев из дефектов, расположенных в дальней зоне искателя, наибольшие условные размеры будут иметь дефекты округлой формы, имеющие круговую индикатрису рассеяния. Условные размеры округлых дефектов, измеренные по способу 1, не зависят от их истинного размера (рис. 4.17, а).

Плоские дефекты, ориентированные нормально к акустической оси искателя, размеры которых меньше ширины пучка, имеют условные размеры меньше условных размеров отражателя округлой формы, расположенного на той же глубине, что и дефект. Если условные размеры выявленного дефекта существенно превышают условные размеры соответствующего ненаправленного отражателя, то это значит, что дефект значительно больше ширины пучка, равной условному размеру (l или Δx) ненаправленного отражателя, расположенного на той же глубине, что и дефект.

Способ 2. За крайние положения искателя принимают такие, при которых амплитуда эхо-сигнала достигла некоторого заданного абсолютного значения $U_{\min}$, не зависящего от максимальной амплитуды эхо-сигнала.

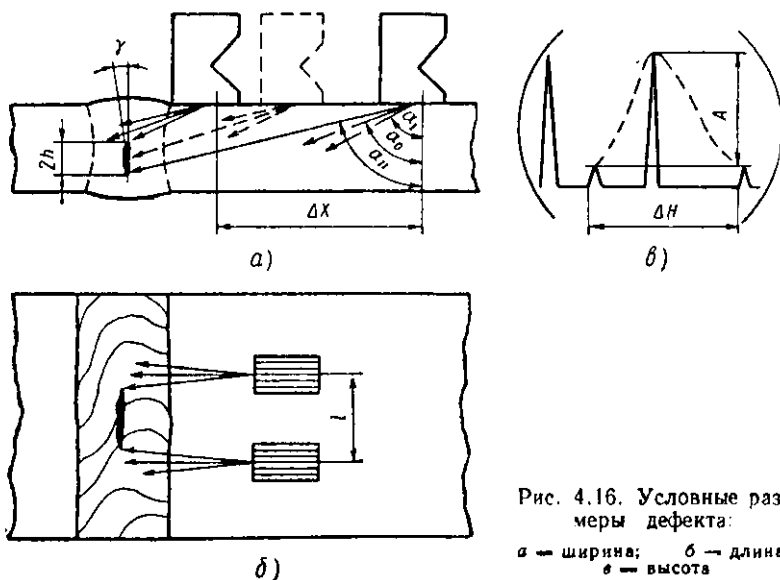


Рис. 4.16. Условные размеры дефекта:

α — ширина; δ — длина;
 δ — высота

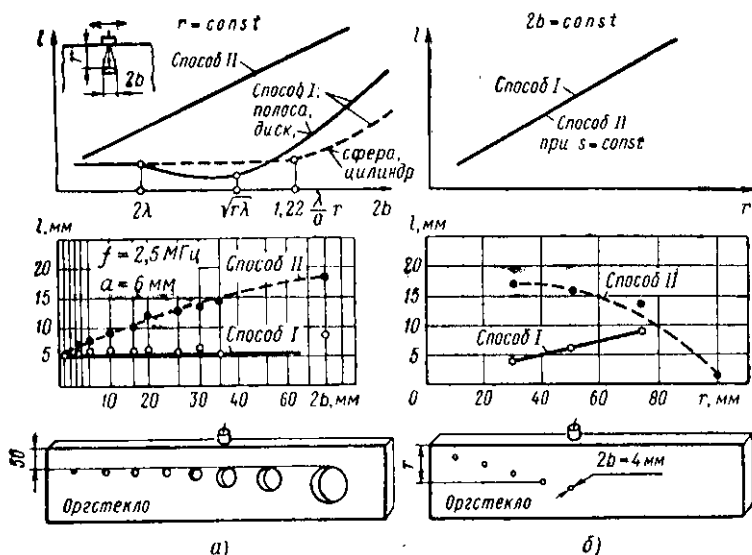


Рис. 4.17. Зависимости условной протяженности l дефектов от их размера b (а) и от глубины расположения r (б) при измерении по способу I и способу II

Измеренные по способу 2 значения условных размеров во многом зависят от максимальной амплитуды эхо-сигнала от дефекта. Поэтому условные размеры ненаправленных дефектов связаны с их истинными размерами постольку, поскольку последние определяют амплитуду эхо-сигнала (рис. 4.17, а). Измерение условных размеров дефекта с круговой индикатрисой рассеяния не дает никакой новой полезной информации по сравнению с той, которая содержится в амплитуде эхо-сигнала от дефекта. Более того, значения l , Δx и ΔH дефекта, измеренные по способу 2 при постоянной условной чувствительности, немонотонно зависят от глубины залегания дефекта (рис. 4.17, б).

В зависимости от поставленной задачи может быть использован тот или другой способ задания крайних положений искателя при измерении условных размеров дефекта.

Если, например, ставится задача получить дополнительную информацию о конфигурации отражающей поверхности дефектов, размеры которых меньше ширины ультразвукового пучка в месте расположения дефекта, то целесообразно использовать способ I. Этот способ измерения оказывается предпочтительным также и при оценке истинной протяженности дефектных участков, когда последняя существенно превышает ширину ультразвукового пучка. При этом необходимо более точно определить границы дефектного участка. Граница дефектного участка приблизительно совпадает с осью искателя в положении, соответствующем ослаблению амплитуды эхо-сигнала U_{max} в 2 раза ($A = 0,5$), где U_{max} — максимальная амплитуда эхо-сигнала при озвучивании края дефектного участка.

Однако обычно вначале измеряют **условные размеры дефектов** по способу 2.

Из изложенного видно, что значения Δx , ΔH и l одного и того же дефекта существенно зависят от глубины его расположения и от способа измерения условных размеров, а величины Δx и ΔH каждая в отдельности однозначно не определяют размеры, конфигурацию и ориентацию дефекта в сечении шва.

4.3. АППАРАТУРА ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ

Аппаратура для ультразвукового контроля сварных соединений представляет собой комплекс приборов и устройств, предназначенных для выявления внутренних дефектов (включений) в сварных швах и исследования структуры металла.

Весь комплекс аппаратуры можно подразделить на следующие основные группы: ультразвуковые дефектоскопы; ультразвуковые анализаторы структуры; комплекты эталонов и тест-образцов для проверки и настройки приборов; координатные линейки и шаблоны для определения места расположения отражающих поверхностей, минимальных размеров дефектов; вспомогательные приспособления.

4.3.1. Ультразвуковые дефектоскопы

Ультразвуковой дефектоскоп представляет собой прибор, предназначенный для излучения ультразвуковых колебаний, приема и регистрации отраженных сигналов, а также для определения координат выявленных несплошностей. Эхо-сигналы регистрируют, как правило, по экрану электронно-лучевой трубки, на котором в определенном масштабе воспроизводится ход ультразвукового луча в контролируемом объекте.

Элементарные блок-схемы импульсных дефектоскопов, работающих по эхо-методу, с включением искателей по раздельной и совмещенной схеме, приведены на рис. 4.18, а, б. В ряде случаев применяют включение искателей по раздельно-совмещенной схеме (рис. 4.18, в), соединяя их параллельно, благодаря чему каждый искатель в отдельности выполняет функции излучения зондирующих импульсов и приема их отражений, а также отражений зондирующих импульсов, излучаемых вторым искателем. Данная схема включения искателей объединяет в себе преимущества раздельной и совмещенной схем.

При совмещенной и раздельно-совмещенной схемах на вход приемного тракта кроме эхо-сигналов от выявляемых дефектов поступает зондирующий импульс. Если дефект расположен в зоне под поверхностью так, что эхо-сигнал от него возвращается ранее, чем окончилось излучение зондирующего импульса, то дефект не будет обнаружен. Зону под поверхностью, на которой установлен искатель и дефекты в которой не могут быть выявлены эхо-методом, называют мертвой зоной.

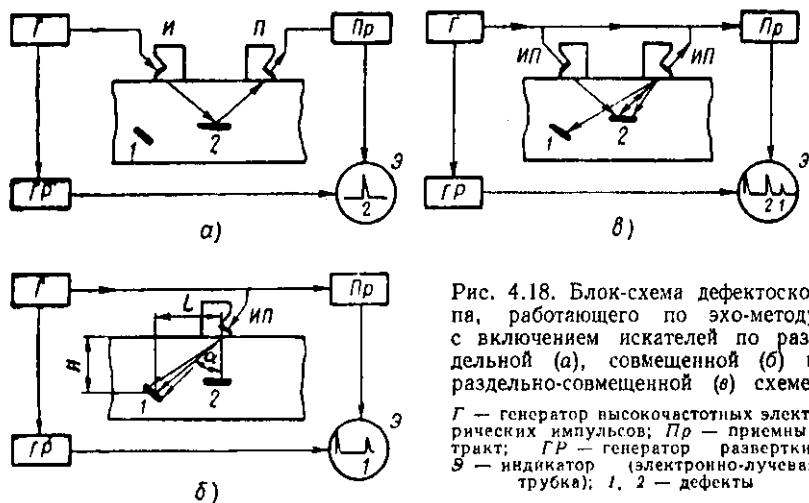


Рис. 4.18. Блок-схема дефектоскопа, работающего по эхо-методу с включением искателей по раздельной (а), совмещенной (б) и раздельно-совмещенной (в) схеме:

Г — генератор высокочастотных электрических импульсов; ПР — приемный тракт; ГР — генератор развертки; 3 — индикатор (электронно-лучевая трубка); 1, 2 — дефекты

Из рассмотренных методов для выявления внутренних дефектов в сварных соединениях наиболее широкое применение находит эхо-импульсный метод с включением наклонных искателей по совмещенной схеме.

В связи с тем, что ультразвуковые колебания при контроле сварных соединений вводят в основном под углом со стороны одного из листов, необходимо иметь возможность наблюдать на экране электронно-лучевой трубки только ход луча в металле шва и регистрировать лишь те эхо-сигналы, которые соответствуют отражениям от несплошностей, расположенных в металле шва. Это требует введения в прибор удобно перестраиваемой системы временной селекции и изменения масштаба изображения.

Прибор для контроля сварных соединений должен обеспечивать возможность непосредственного отсчета координат обнаруженных дефектов для различных типов искателей.

При контроле сварных соединений кроме электронно-лучевой трубки необходимо иметь дополнительные световой или звуковой индикаторы, использование которых освобождает оператора от необходимости одновременно наблюдать как за перемещаемым искателем, так и за экраном электронно-лучевой трубки. Применение дополнительных индикаторов не только облегчает работу оператору, но и повышает надежность контроля.

Основные узлы дефектоскопов для контроля сварных соединений (рис. 4.19): искатель, возбудитель пьезопреобразователя, усилитель высокой частоты с детектором, видеоусилитель—каскад совпадений, генератор напряжения развертки, глубиномер, осциллографический индикатор, дополнительные индикаторы, блок питания.

Возбудитель пьезопреобразователя предназначен для генерирования высокочастотных электрических импульсов, импульсов синхронизации и напряжения экспоненциальной формы, исполь-

зуемого для коррекции коэффициента усиления приемного тракта во времени. Генерируемые электрические колебания преобразуются пьезопластиной искателя в ультразвуковые колебания. Импульсы этих колебаний при наличии акустического контакта между искателем и поверхностью контролируемого металла проникают внутрь металла и распространяются в нем.

Дойдя до границы какой-либо инородной среды (дефекта или противоположной поверхности металла), импульсы отражаются. Часть энергии отраженных ультразвуковых колебаний попадает на пьезоэлектрическую пластину искателя, которая преобразует их в электрические колебания. Импульсы электрических колебаний подаются на вход усилителя высокой частоты.

Усилитель высокой частоты (у. в. ч.) усиливает высокочастотные электрические импульсы. Функциональной схемой предусматривается работа с одним искателем, используемым как в режиме излучения, так и в режиме приема. Так как при работе одним искателем нельзя полностью устранить попадание зондирующего импульса на вход у. в. ч., стремятся к тому, чтобы максимально сократить время, в течение которого чувствительность дефектоскопа за счет перегрузки приемника зондирующим импульсом оказывается заниженной. Для этого на вход усилителя высокой частоты подают запирающее напряжение экспоненциальной формы.

Амплитуда и длительность корректирующего напряжения можно регулировать с помощью ручки временной регулировки (в. р. ч.), выведенной на переднюю панель приборов. Введение системы в. р. ч. способствует уменьшению мертвой зоны дефектоскопа с наклонным искателем, а следовательно, лучшему выявлению дефектов, располо-

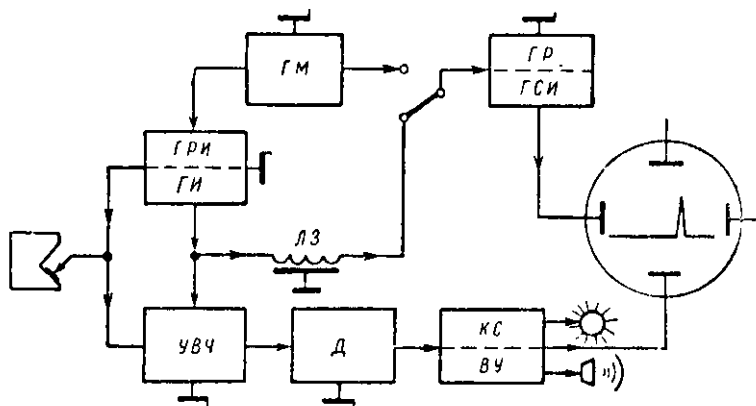


Рис. 4.19. Функциональная схема ультразвукового дефектоскопа:

ГИ — генератор синхронизирующих импульсов; ГРИ — генератор радиоимпульсов; УВЧ — усилитель высокой частоты; ГР — генератор развертки; Д — детектор; ГМ — глубиномер; ГСН — генератор стробирующих импульсов; КС — каскад совпадений; ВУ — видеоусилитель; ЛЗ — линия задержки. Блокам Д, УВЧ, ГРИ/ГИ, ГМ, ГР/ГСН соответствуют ручки: «отсечка», «чувствительность», «ВРЧ», «координаты», «глубина прозвучивания». Положения переключателя: «по слоям» (верхнее) и «от поверхности»

женных на малой глубине. С выхода у. в. ч. высокочастотные электрические импульсы поступают на детектор, преобразующий их в видеоимпульсы, более удобные для наблюдения на экране электронно-лучевой трубки. Амплитуда протектированных импульсов регулируется ручкой «чувствительность» (аттенюатором), градуированной в децибелах. Импульсы с выхода детектора поступают на видеоусилитель—каскад совпадений.

Видеоусилитель—каскад совпадений предназначен для временной селекции эхо-сигналов, поступающих с детектора, и усиления их до величины, достаточной для наблюдения на экране электронно-лучевой трубки и срабатывания дополнительных индикаторов.

Временная селекция необходима для того, чтобы на дополнительные индикаторы дефектоскопа не проникали зондирующий импульс, а также эхо-сигналы от неровности поверхности и от несплошностей, расположенных вне контролируемого слоя. Принцип временной селекции состоит в том, что видеоусилитель—каскад совпадений обычно закрыт и открывается лишь на время, в течение которого ожидаются эхо-сигналы от возможных дефектов, расположенных в контролируемом слое. Время открытого состояния каскада совпадений определяется временным расположением и длительностью селектирующего импульса. В качестве этого импульса используется импульс подсвета развертки, вырабатываемый генератором напряжения развертки. Длительность t этого импульса определяет собой толщину контролируемого слоя H , а интервал времени T между моментом излучения зондирующего импульса и моментом начала стробирующего импульса—глубину h расположения верхней границы контролируемого слоя.

Величины H , t , h и T связаны между собой соотношениями

$$t = \frac{2H}{\cos \alpha} \frac{1}{C_{t2}}; \quad T = \frac{2h}{\cos \alpha} \frac{1}{C_{t1}} + 2t_n.$$

Величины H и h можно устанавливать непосредственно по шкалам глубиномера для определенных значений углов α .

Генератор напряжения развертки предназначен для формирования пилообразного напряжения, используемого для получения линии развертки на экране электронно-лучевой трубки, а также для получения импульса подсвета, предназначенного для увеличения яркости изображения на экране электронно-лучевой трубки во время прямого хода луча. Этот импульс используют также в качестве селектирующего. Длительность его можно регулировать ручкой «глубина прозвучивания», выведенной на переднюю панель приборов. Ручка «глубина прозвучивания» не калибрована. Заданную глубину прозвучивания устанавливают с помощью шкал глубиномера.

Схема приборов выполнена таким образом, что при изменении длительности развертки длина линии развертки на экране электронно-лучевой трубки не меняется, в результате чего при контроле сварного соединения в режиме «по слоям» разрешающая способность может быть установлена максимально возможной, что особенно важно при контроле сварных соединений отраженным лучом.

Генератор напряжения развертки в режиме «контроль от поверхности» запускают импульсом синхронизатора через линию задержки для того, чтобы при работе призматическими искателями на индикаторы не проникал зондирующий импульс. Время задержки равно времени $2t_n$ прохождения импульса через призму искателя и составляет примерно 8 мкс.

При контроле сварных соединений в режиме «по слоям» генератор развертки запускают с задержкой на время T , определяемое глубиной расположения верхней границы контролируемого слоя (такой режим развертки называют также «лупой времени»). Для запуска используют импульс глубиномера.

Применение двух режимов работы генератора напряжения развертки позволяет «рассматривать» на экране электронно-лучевой трубки лишь ту часть пути ультразвукового импульса, которая проходит через контролируемый участок шва (рис. 4.20).

Глубиномер предназначен для измерения координат отражающей поверхности дефекта, измерения толщины контролируемого слоя, устанавливаемого ручкой «глубина прозвучивания», а также для расположения контролируемого слоя на заданной глубине.

Принцип измерения координат при эхо-импульсном методе ультразвуковой дефектоскопии состоит в измерении времени между моментом излучения зондирующего импульса и приема отраженного.

В дефектоскопе время измеряется методом сравнения по экрану электронно-лучевой трубки неизвестного временного интервала с временем задержки синхронимпульса в схеме глубиномерного устройства. Для этого глубиномер содержит схему переменной задержки, о величине которой можно судить по углу поворота оси переменного сопротивления схемы. Ось этого переменного сопротивления поворачивают с помощью ручки «координаты дефекта», выведенной на переднюю панель прибора. Вращая ручку «координаты дефекта», на развертке экрана перемещают маркерный импульс вырабатываемый глубиномером.

При совмещении маркерного импульса с передним фронтом эхо-сигнала, отраженного от дефекта, длительность задержки маркерного импульса равна времени прохождения зондирующего импульса от пьезоэлектрической пластины до отражающей поверхности и обратно. Шкала барабана, расположенного на оси потенциометра «координаты дефекта», проградуирована в микросекундах для измерения времени распространения ультразвукового импульса, а также в миллиметрах для непосредственного отсчета координат отражающих поверхностей (дефектов) при контроле искателями с различным углом ввода луча.

Если контроль ведут в режиме «по слоям», то на экране трубки не виден маркерный импульс. В этом случае для измерения координат отражающей поверхности необходимо, вращая ручку «координаты дефекта», подвести эхо-сигнал от дефекта к началу линии развертки.

Дополнительные индикаторы представляют собой обычно телефонные наушники или динамик, вмонтированный в корпус дефектоскопа, и лампочку накаливания. Порог срабатывания дополнитель-

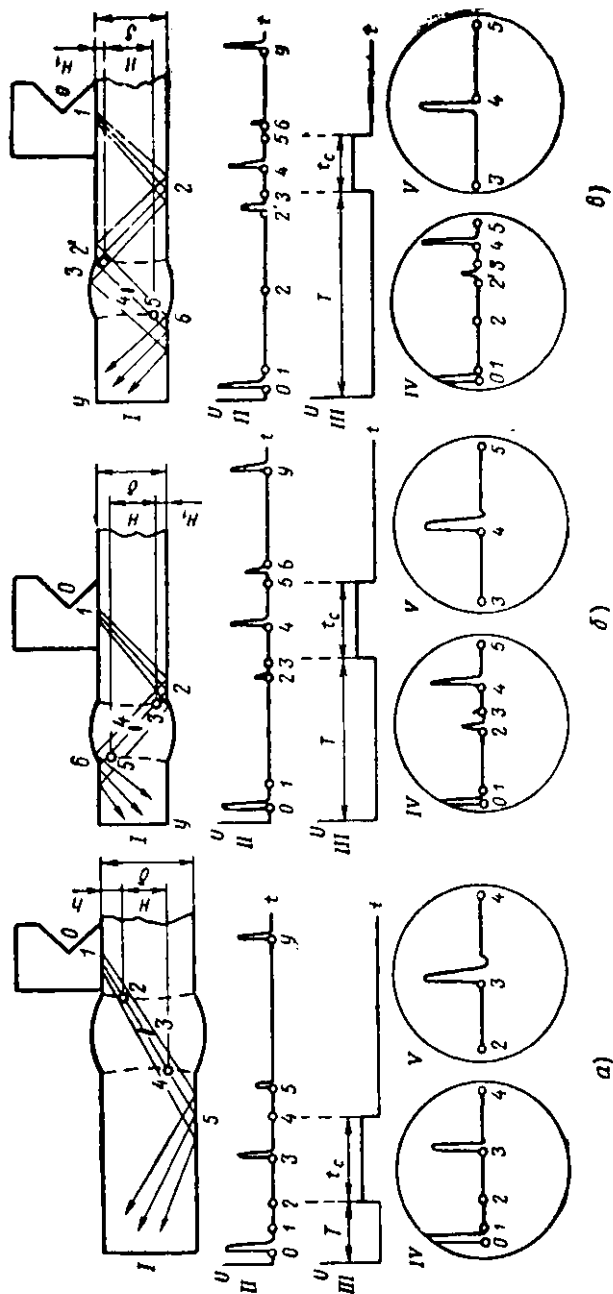


Рис. 4.20. Временная селекция эхо-сигналов при ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений:
 а — прозвучивание прямым лучом; б — прозвучивание однократно отраженным лучом; в — прозвучивание лучом, прошедшим через дефекторный тракт; U — временная диаграмма сигнала на выходе дефектоскопа; U — временная диаграмма сигнала на выходе дефектоскопа без системы «слухи времени»; U — экран осциллографического индикатора дефектоскопа с «слухи времени»

ных индикаторов регулируют отдельной ручкой. Индикаторную лампочку можно переключать в режим непрерывного горения для освещения при работе в затемненных местах.

Рассмотренная функциональная схема положена в основу ультразвуковых дефектоскопов типа УЗД-НИИМ-5 (рис. 4.21): УЗД-НИИМ-5А, УЗД-59, ДУК-11ИМ и ДУК-13ИМ. Приборы работают на частотах 1,8 и 2,5 МГц. Индикацию дефектов проводят по импульсам, возникающим на экране электронно-лучевой трубки, загоранию лампочки, расположенной на искателе, а также по появлению звука в телефонных наушниках.

Чувствительность дефектоскопов регулируется в широких пределах и обеспечивает выявление дефектов в стали с эквивалентной площадью 2—3 мм² на глубине до 100 мм. Плавная регулировка коэффициента усиления приемного тракта во времени улучшает возможность обнаружения дефектов, расположенных на малой глубине. Мертвая зона приборов при работе с дополнительными индикаторами не превышает 8 мм для искателей с углом призмы 30 и 40° и 3 мм для искателей с углом призмы 50°.

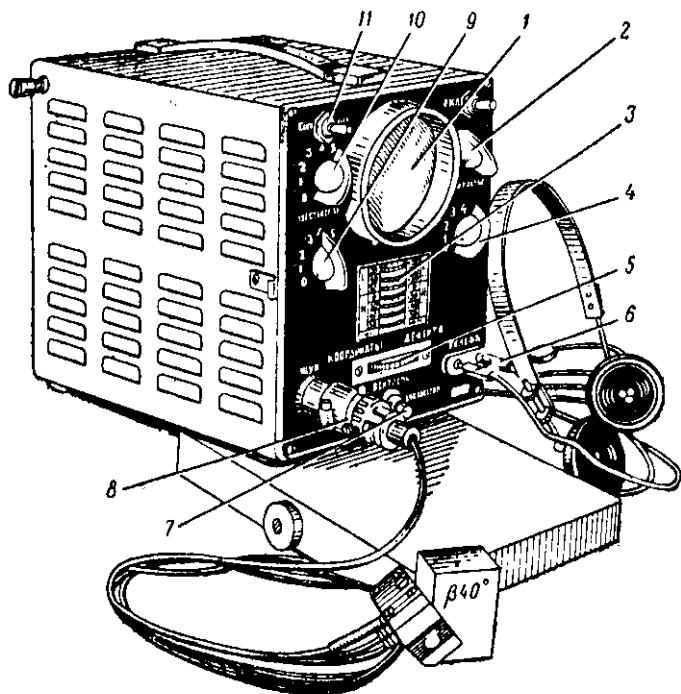


Рис. 4.21. Ультразвуковой дефектоскоп УЗД-НИИМ-5:

1 — экран; 2 — ручка «Глубина контроля», регулирующая величину контролируемого слоя; 3 — шкала глубиномера с линзой; 4 — ручка регулировки длины развертки; 5 — ручка «Координаты дефекта»; 6 — гнезда для включения телефонных наушников; 7 — тумблер для установки одного из следующих режимов контроля: «Контроль по поверхности» или «Контроль по слоям»; 8 — разъем для подключения кабеля искателя; 9 — ручка регулировки характера изменения чувствительности во времени; 10 — ручка регулировки чувствительности (аттенюатор на входе приемника); 11 — тумблер для перевода лампочки, расположенной у искателя, из режима индикатора в режим непрерывного горения

Т а б л и ц а 4.5

Основные характеристики ультразвуковых дефектоскопов,
применяемых для контроля сварных соединений

Характеристика дефектоскопа	ДУК-11ИМ	ДУК-13ИМ	ДУК-66П	УДМ-3
Частота ультразвука, излучаемого наклонными искателями, МГц	2,5	1,8; 2,5	1,8; 2,5 5,0	1,8; 2,5; 5,0
Максимальная условная чувствительность (мм) по эталоны № 1 при $\beta = 40^\circ$ и $f = 2,5$ МГц	50	45	55	60
Мертвая зона (мм) при работе с искателем: $\beta = 0$ $\beta = 40^\circ$ $\beta = 50^\circ$	— 8 3	— 8 3	7 8 3	7 8 3
Максимальная глубина прозвучивания при работе прямым искателем, мм	700	700	700	2000
Дополнительные индика- торы	1) Динамик; 2) Индика- торная лампочка	Телефон- ные науш- ники	Динамик	Индикатор- ная лам- почка
Режимы контроля	1) От по- верхности; 2) По слоям	1) От по- верхности; 2) По слоям	1) От по- верхности; 2) По слоям	От поверх- ности
Источники питания	Сеть напря- жением 220 В	1) Сеть на- пряже- нием 36, 127 или 220 В; 2) Аккуму- ляторная батарея на- пряже- нием 12 В	1) Сеть на- пряже- нием 36, 127 или 220 В; 2) Аккуму- ляторная батарея на- пряже- нием 12 В	Сеть напря- жением 12, 127 или 220 В
Масса дефектоскопа, кг	9	4	10	16
Примечание. Углы призм наклонных искателей 30, 40, 50°.				

Для определения координат дефектов, а также для измерения толщины изделий в дефектоскопах имеется электронный глубиномер с восемью шкалами: четырьмя — для измерения глубины при работе прямым искателем и призматическими с углами падения луча 30, 40 и 50°, тремя — для измерения расстояния отражающей поверхности от центра излучения искателя с теми же углами падения и одной — для измерения времени прохождения ультразвукового импульса от пьезоэлектрической пластины искателя до отражающей поверхности и обратно.

Для определения места расположения отражающей поверхности, вращая ручку глубиномера, подводят яркую точку на линии развертки к началу импульса и по шкалам, соответствующим применяемому типу искателя, отсчитывают координаты отражающей поверхности.

Наличие «электронной лупы» позволяет вести контроль толщины изделий по слоям. Величину контролируемого слоя регулируют в пределах 8—500 мм. Приборы подключают к сети переменного тока или аккумуляторной батарее. Потребляемая при этом мощность не превышает 100 Вт. Масса приборов около 10 кг.

В Советском Союзе для контроля сварных соединений, кроме приборов УЗД-НИИМ-5 (ДУК-11ИМ, ДУК-13ИМ), широко применяют дефектоскопы типа УДМ-3 и ДУК-66П (табл. 4.5).

4.3.2. Ультразвуковые структурные анализаторы

Ультразвуковые структурные анализаторы по своему устройству и функциональной схеме мало чем отличаются от ультразвуковых дефектоскопов. В связи с этим для контроля структуры в ряде случаев используют ультразвуковые дефектоскопы, имеющие аттенюаторы и измерители времени распространения ультразвука.

Ультразвуковой контроль структуры металлов основан на исследовании частотной зависимости затухания упругих колебаний и их скорости распространения в контролируемом изделии или соединении.

В Советском Союзе для контроля структуры разработан ультразвуковой структурный анализатор ДСК-1 (УСАД-1). Косвенной характеристикой структуры при применении этого прибора служит отношение амплитуд сигналов, прошедших через изделие на разных частотах ультразвука и измеренных при постоянной чувствительности прибора. Эти отношения названы структурными коэффициентами

$$k_{1,2} = U_{f1}/U_{f2}; \quad k_{1,3} = U_{f1}/U_{f3}; \quad k_{2,3} = U_{f2}/U_{f3},$$

где U_f — амплитуды сигналов при постоянном усилении и соответствующих частотах.

Для исключения влияния разброса искателей и коэффициентов усиления усилителя при разных частотах на результаты измерений структурных коэффициентов в приборе предусмотрены потенциометры для выравнивания чувствительности приемно-передающего тракта на разных частотах.

4.3.8. Метрологическое обеспечение и приспособления

Тест-образцы, эталоны и координатные линейки входят в комплект аппаратуры для контроля сварных соединений и предназначены для настройки приборов, выбора параметров прозвучивания и определения месторасположения выявленных дефектов.

Тест-образцы представляют собой образцы сварных соединений, в которых выполнены искусственные отражатели (см. табл. 4.4). Тест-образцы могут быть изготовлены из основного металла при условии, что его акустические свойства близки к акустическим свойствам металла шва. Как правило, качество поверхности тест-образцов должно соответствовать качеству поверхности основного металла соединений, подлежащих контролю.

В ряде случаев тест-образцы подвергают механической обработке. Чистота обработки тест-образцов, предназначенных для работы с наклонными искателями, должна соответствовать классу $\nabla 3$ — $\nabla 4$. При такой поверхности, когда на ней видны следы скоростной чистовой обработки, величина усилия прижатия наклонного искателя к образцу в меньшей степени влияет на коэффициент прозрачности призма—металл, т. е. на результаты исследований, чем при обработке по классу $\nabla 6$ и выше.

В отличие от тест-образцов эталоны изготавливают из материала со строго регламентированными свойствами и по чертежам, утвержденным отраслевыми или государственными стандартами. В Советском Союзе в соответствии с ГОСТ 14784—69 применяют комплект из трех эталонов (рис. 4.22), предназначенных для измерения основных параметров контроля (см. § 4.3).

Координатные линейки, по конструкции напоминающие логарифмические, применяют тогда, когда шкалы глубиномера не проградуированы в координатах H и L для искателя с используемым углом ввода луча. Универсальные координатные линейки позволяют выбирать тип искателя и пределы его перемещения для контроля

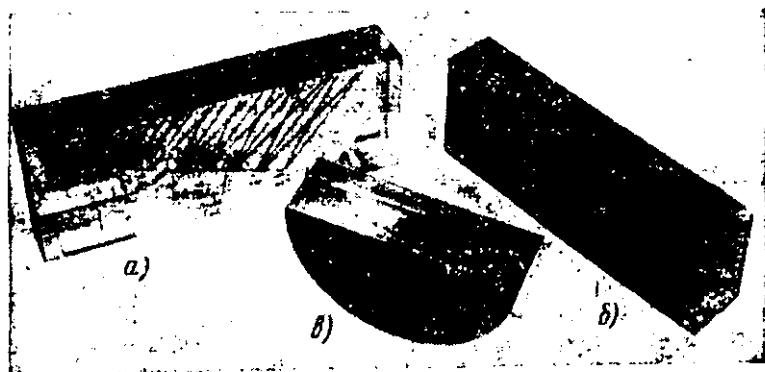


Рис. 4.22. Комплект эталонов для измерения основных параметров ультразвукового контроля:

а — эталон № 1; б — эталон № 2; в — эталон № 3

соединений заданного типоразмера и определять координаты выявленных дефектов, если известно время между зондирующим импульсом и эхо-сигналом от дефекта.

К вспомогательным приспособлениям, необходимым при контроле сварных соединений, относятся: шабер, металлическая щетка и ветошь для очистки поверхности от грязи и брызг металла; метр для измерения параметров шва и координат выявленных дефектов; мел для отметки дефектных участков; карандаш и бумага для регистрации результатов контроля; приспособления для перемещения искателя в заданных пределах (держатель или магнитная линейка).

4.4. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ

Основные параметры ультразвукового контроля сварных соединений — такие параметры, которые определяют достоверность результатов контроля. Очевидно, что ряд параметров всецело зависит от применяемой аппаратуры. В связи с этим из совокупности параметров контроля выделяют параметры аппаратуры (табл. 4.6).

Т а б л и ц а 4.6

Основные параметры эхо-метода

Параметры контроля	Параметры аппаратуры
Длина волны λ , мм Чувствительность: реальная — мм предельная S , мм ² эквивалентная S_e , мм Направленность поля искателя α_0 ; Φ_0 , град Угол ввода луча α , град Точность измерения координат (точность селекции) A , % Мертвая зона M , мм Разрешающая способность по дальности Δ , мм Разрешающая способность по углу Δ_y , мм	Частота f , МГц Чувствительность, мм: условная K_y эквивалентная S_e Размеры преобразователя a , мм Угол призмы β , град Погрешность глубиномера (погрешность селектирующей системы) A_r , % Длительность, мкс: зондирующих импульсов τ реверберационных шумов из призм τ_p Разрешающая способность T_p , мкс

Длина ультразвуковой волны определяется частотой излучаемых колебаний. Частота ультразвука, обуславливаемая типом применяемой аппаратуры, в процессе ее эксплуатации практически остается неизменной. Для обеспечения высокой воспроизводимости результатов контроля необходимо, чтобы отклонение частоты излучаемых колебаний от номинального значения не превышало 10%.

Чувствительность в ультразвуковой дефектоскопии различают реальную, предельную, условную и эквивалентную. Реальная чув-

ствительность обусловлена минимальными размерами дефектов различного характера, уверенно выявляемых в изделиях или соединениях определенного вида. Она может быть оценена статистической обработкой результатов контроля и металлографического исследования большой серии объектов одного вида.

Предельная чувствительность определяется минимальными размерами искусственного, оптимального с точки зрения выявляемости, отражателя (модели дефекта), который еще уверенно обнаруживается в шве при данной настройке прибора. В качестве меры предельной чувствительности используют площадь S (мм²) отверстия с плоским дном, ориентированным перпендикулярно акустической оси искателя (см. табл. 4.4, п. 3). Отверстия высверливают в тест-образце сварного соединения на заданной глубине. Качество поверхности тест-образца должно соответствовать качеству поверхности контролируемых соединений. Если качество поверхностей неодинаково, то должна быть внесена поправка путем измерения и сравнения амплитуд эхо-сигналов от адекватных отражателей в тест-образце и в соединении (например, угол листа и образца или цилиндрические отверстия, выполненные в тест-образце и в листе контролируемого соединения).

В связи со сложностью изготовления отверстий с плоским дном, ориентированным строго перпендикулярно акустической оси наклонного искателя, для определения предельной чувствительности ГОСТ 14782—69 разрешается применять сегментные или угловые отражатели (см. табл. 4.4, пп. 4 и 5).

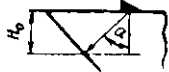
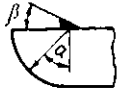
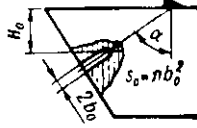
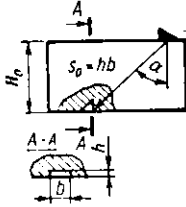
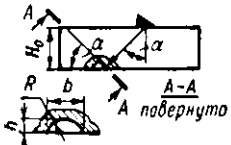
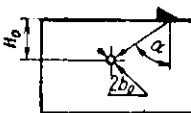
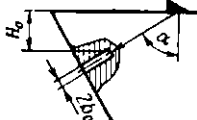
Площадь S плоскодонного отверстия равна площади сегментного отражателя и связана с эквивалентной площадью S_1 углового отражателя соотношением $S = NS_1$, где $N = 2,5$ для искателя с углом призмы 30—32°, 1,5 для искателя с углом призмы 37—40° и 0,5 для искателя с углом призмы 49—50°. Ширина b и высота h углового отражателя должны быть больше длины поперечной ультразвуковой волны, причем $4 \geq h/b \geq 0,5$.

Сегментный отражатель аналогично отверстию с плоским дном изготавливают в образце контролируемого металла таким образом, чтобы плоскость сегмента была перпендикулярна акустической оси искателя. Высота h сегментного отражателя должна быть больше длины поперечной ультразвуковой волны, причем $h/b \geq 0,4$.

Предельная чувствительность может быть оценена и по отражателям другого вида, выполненным в тест-образце. Формулы для приближенной оценки предельной чувствительности S на глубине H приведены в табл. 4.7, где b_0 — размер отражателя, расположенного в тест-образце на глубине H_0 .

Пример 4.14. Определим площадь S_1 и размеры h и b углового отражателя для настройки дефектоскопа с искателем, угол призмы которого $\beta = 40^\circ$, на предельную чувствительность $S = 12$ мм², частота УЗ колебаний $f = 2,5$ МГц. Согласно изложению $S_1 = S/N = 12/1,5 = 8$ мм². Учитывая, что длина волны при частоте $f = 2,5$ МГц равна $\lambda_r = 1,3$ мм (см. табл. 4.1), принимаем $h = 2$ мм ($h \geq \lambda_r$). тогда $b = S_1/h = 4$ мм, при этом $h/b = 2/4 = 0,5$, что удовлетворяет указанному выше условию.

Соотношения для приближенного расчета предельной чувствительности S (мм³) на глубине H ультразвукового контроля при настройке чувствительности дефектоскопа по отражателю, расположенным в дальней зоне излучателя

Вид отражателя	Соотношения
	$S \approx \frac{\lambda_t H^2}{2H_0 \cos \alpha} \exp \left[-\frac{2\delta_t}{\cos \alpha} (H_0 - H) \right]$
	$S \approx \frac{\lambda_t^{3/2} H^2}{\sqrt{2S_a \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} R^{1/2} \cos^2 \alpha}} \times \exp \left[-\frac{2\delta_t}{\cos \alpha} (H_0 - H) \right]$
	$S \approx S_0 \left(\frac{H}{H_0} \right)^2 \exp \left[-\frac{2\delta_t}{\cos \alpha} (H_0 - H) \right],$ $\lambda_t < b < \frac{0,1\lambda_t H}{a \cos \alpha}$
	$S \approx NS_0 \left(\frac{H}{H_0} \right)^2 \exp \left[-\frac{2\delta_t}{\cos \alpha} (H_0 - H) \right],$ $\frac{\alpha^\circ}{N} \left \begin{array}{c c c} 35-40 & 45-52 & 64-69 \\ \hline 2,5 & 1,5 & 0,5 \end{array} \right $ $\lambda_t < h < \frac{0,05\lambda_t H}{a \cos \alpha}; \quad \lambda_t < b < \frac{0,1\lambda_t H}{a \cos \alpha};$ $0,5 < \frac{h}{b} < 4,0$
	$S \approx S_0 \left(\frac{H}{H_0} \right)^2 \exp \left[-\frac{2\delta_t}{\cos \alpha} (H_0 - H) \right],$ $\lambda_t < h < \frac{0,1\lambda_t H}{a \cos \alpha}; \quad \lambda_t < b < \frac{0,1\lambda_t H}{a \cos \alpha}; \quad h/b > 0,4$
	$S \approx \frac{b_0^{1/2} \lambda_t H^2}{2H_0^{3/2} \cos^{1/2} \alpha} \exp \left[-\frac{2\delta_t}{\cos \alpha} (H_0 - H) \right],$ $\lambda_t < b < \frac{0,1\lambda_t H}{a \cos \alpha}$
	$S \approx \frac{b_0 \lambda_t}{2} \left(\frac{H}{H_0} \right)^2 \exp \left[-\frac{2\delta_t}{\cos \alpha} (H_0 - H) \right],$ $\lambda_t < b < \frac{0,1\lambda_t H}{a \cos \alpha}$

Условная чувствительность характеризуется размером и глубиной расположения заранее установленных искусственных эталонных отражателей, выполненных в эталонном образце из материала с определенными, строго регламентированными, акустическими свойствами и уверенно выявляемых дефектоскопом.

Для эталонирования условной чувствительности используют эталон № 1 (см. рис. 4.23). Условная чувствительность дефектоскопа с искателем, измеренная по эталону № 1, выражается максимальной глубиной H расположения цилиндрического отражателя, уверенно фиксируемого всеми индикаторами дефектоскопа. При наличии аттенюатора на входе усилителя дефектоскопа в качестве меры условной чувствительности можно использовать уменьшение эхо-сигнала от какого-либо отражателя, например от донной поверхности в эталонном образце, при котором еще срабатывают индикаторы дефектоскопа.

Если реальная и предельная чувствительности определяют собой чувствительность метода в целом при контроле соединений данного вида, то условная характеризует только чувствительность дефектоскопа с искателем. Предельная чувствительность всегда может быть переведена в условную с помощью

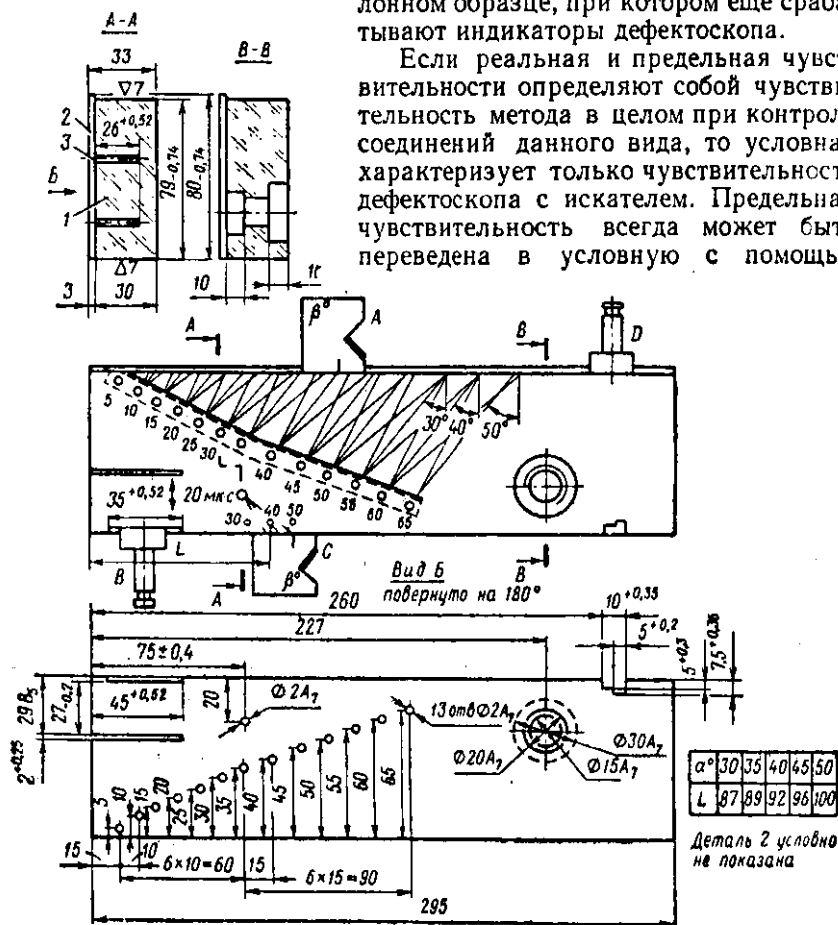


Рис. 4.23. Эталон № 1:

1 — основание; 2 — стенка; 3 — бумажная прокладка

тест-образца и эталона или пересчитана по формулам табл. 4.7. Реальная и предельная чувствительности могут быть воспроизведены по условной чувствительности, если соблюдается строгое соответствие частоты колебаний и диаграммы направленности искателя частоте и диаграмме, при которых определялась заданная условная чувствительность.

В некоторых случаях, например при контроле соединений листов сложной формы и малой толщины, пользоваться тест-образцами или эталоном для измерения и настройки предельной или условной чувствительности невозможно. При этом для настройки чувствительности используют тест-образцы, изготовленные из основного металла или сварного соединения с моделями дефекта, отличающимися от рассмотренных, или с реальным дефектом. Чувствительность дефектоскопа, настроенного по такому тест-образцу, как правило, технически невозможно сопоставить с условной или предельной чувствительностями. Дефектоскоп при такой чувствительности выявляет реальные дефекты, эквивалентные по отражающим характеристикам модели дефекта или дефекту в тест-образце. Поэтому данную чувствительность и называют эквивалентной.

Следует иметь в виду, что даже при строго стабильной условной чувствительности реальная и предельная чувствительности контроля одного и того же сварного соединения могут существенно меняться в зависимости от качества поверхности металла, акустических свойств среды, контактирующей с поверхностью, температуры, при которой ведется контроль, а также от скорости сканирования.

Направленность поля искателя в контролируемом металле обуславливает угловую разрешающую способность, а также точность измерения координат дефектов. Направленность поля достаточно полно определяется углом α_0 наклона акустической оси диаграммы и углом φ_0 раскрытия половины ее основного лепестка на уровне 0,8.

Под *углом ввода ультразвукового луча* в металл α понимают угол между нормалью к поверхности изделия, проходящей через точку ввода луча, и линией, соединяющей центр отражателя с круговой индикатрисой рассеяния и точку ввода луча при установке искателя в положение, при котором амплитуда эхо-сигнала от отражателя максимальна.

Для удобства измерения угла ввода луча ГОСТ 14782—69 предусматривает эталон № 2 (см. рис. 4.24, а), состоящий из стандартной шкалы, проградуированной непосредственно в значениях угла α , и образца из контролируемого металла, прикрепляемого к шкале посредством винтов. Угол ввода ультразвукового луча измеряют также по образцу из контролируемого металла с цилиндрическим отверстием радиусом R , расположенным на глубине H , превышающем ближнюю зону искателя. Измеренное значение угла вычисляют по выражению

$$\alpha = \arctg L_0/H,$$

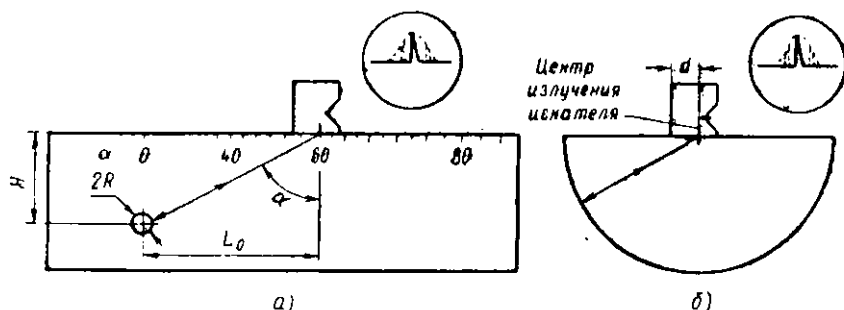


Рис. 4.24. Эталон № 2 (а) и эталон № 3 (б)

где L_0 — расстояние от центра отверстия до центра излучения искателя при установке последнего в положение, соответствующее максимальной амплитуде эхо-сигнала от отверстия.

Радиус отверстия не должен превышать $0,2H$. При этом среднеквадратическая погрешность измерения угла ввода луча не превышает $0,5^\circ$.

Для определения значения углов ввода луча с высокой точностью угол следует измерять при температуре t_n , при которой осуществляется контроль, или вносить поправку, если измерение выполнялось при другой температуре t_m .

Если положение точки выхода луча неизвестно, то его определяют по эталону № 3 с полуцилиндрической поверхностью (рис. 4.24, б). Точка выхода луча (центр излучения искателя) расположена на искателе против центра полуокружности эталона № 3 при установке искателя в положение, при котором амплитуда эхо-импульса от цилиндрической поверхности максимальна.

Точность измерения координат при любом типе глубиномерного устройства характеризуется случайной и систематической погрешностью.

Относительная случайная погрешность, связанная с неточностью установки искателя в положение, соответствующее максимальной амплитуде эхо-сигнала от отражателя, подчиняется нормальному закону распределения, зависит от натренированности оператора и не превышает 4%.

Суммарная относительная систематическая погрешность A_Σ измерения координаты H или L алгебраически складывается из возможных систематических ошибок, связанных с отклонением истинных значений T , C_t , t_n и α_1 от значений T_0 , C_{t0} , t_{n0} и α_{10} , принятых при расчете координат или построении глубиномерных устройств:

$$A_\Sigma = A_T + A_C + A_t + A_\alpha,$$

где A_T — систематическая ошибка, обусловленная погрешностью глубиномера $\Delta T = T_0 - T$; A_C — систематическая ошибка, вызванная отличием скорости поперечной волны C_t в контролируемом металле от предполагаемого значения C_{t0} на величину $\Delta C_t =$

$= C_t - C_{t0}$; A_t — систематическая ошибка, связанная с отличием времени распространения ультразвука в призме искателя t_n от предполагаемого значения t_{n0} на величину $\Delta t_n = t_{n0} - t_n$; A_α — систематическая ошибка, вызванная отклонением угла ввода луча в контролируемом металле α_1 от предполагаемого значения α_{10} на величину $\Delta\alpha = \alpha_1 - \alpha_{10}$.

Зная величины суммарных систематических погрешностей $A_{\Sigma H}$ и $A_{\Sigma L}$, легко по данным измерения координат $H_{из}$ и $L_{из}$ рассчитать их истинные значения H и L :

$$H = \frac{H_{из}}{1 + A_{\Sigma H}}; \quad L = \frac{L_{из}}{1 + A_{\Sigma L}}.$$

Ошибка A_α образуется из ошибок A_α^I , A_α^{II} , A_α^{III} и A_α^{IV} , возникающих в результате следующих причин, приводящих к изменению угла ввода луча: изменения угла призмы на величину $\Delta\beta$ вследствие ее истирания; случайного подъема призмы на угол θ ; изменения температуры призмы на величину Δt ; затухания ультразвука на пути до дефекта.

В табл. 4.8 приведены аналитические выражения для систематических погрешностей измерения координат H и L при работе наклонным искателем. Расчет суммарных относительных погрешностей по этим выражениям для вполне реальных условий контроля сварных соединений показывает, что относительная погрешность измерения глубины H лежит в очень широких пределах (до 60%), резко возрастающая с уменьшением глубины залегания отражающей поверхности и практически с увеличением угла ввода луча. Поэтому при контроле швов малой толщины, где применяются большие углы ввода луча, возникновение существенных погрешностей измерения координат отражающих поверхностей наиболее вероятно.

Для обеспечения необходимой точности измерения при контроле швов малой толщины определять координаты удобно непосредственно по развертке трубки, систематически калибруя ее по тест-образцу с моделями дефектов в виде угловых или сегментных отражателей.

При контроле швов средней толщины (25—100 мм) вероятность возникновения серьезных систематических ошибок мала. Эта вероятность вновь возрастает при контроле соединений большой толщины (более 150 мм) из металла со значительным затуханием. Ошибка измерения координаты L практически не превышает 5—15%.

Относительная погрешность A_T определяется только относительной точностью измерения глубиномером интервала времени между моментом излучения зондирующего импульса и моментом приема его отражения, т. е. точностью работы глубиномера. При определении точности работы глубиномера в качестве эталонных интервалов времени целесообразно использовать интервалы времени между последовательными донными эхо-сигналами, возникающими при прозвучивании образца из любого материала с известной скоростью распространения ультразвука в нем.

Т а б л и ц а 4.8
Формулы для расчета относительных систематических погрешностей измерений координат дефекта

Обозначение погрешности	Причина, вызвавшая погрешность	Аналитическое выражение для подсчета погрешности измерения координаты		Знак погрешностей
		n	l	
A_T	Неточность отсчета времени T по глубиномеру	$A_{TH} = \frac{\Delta T}{T - 2t_n}$, $\Delta T = T_n - T$	$A_{TL} = \frac{\Delta T}{T - 2t_n}$, $\Delta T = T_n - T$	При $\Delta T > 0$ $A_{TH} > 0$ $A_{TL} > 0$
A_c	Отклонение C_t от C_{t0} в k раз, где $k = \frac{C_t}{C_{t0}}$	$A_{cH} = \frac{\cos \alpha_{10}}{k \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \alpha_{10}}} - 1$	$A_{cL} = \frac{1}{k^2} - 1$	При $k > 1$ $A_{cH} > 0$ (при $\alpha_{10} > 45^\circ$) $A_{cL} < 0$
A_t	Изменение (уменьшение) времени t_n на величину Δt_n , где $\Delta t_n = t_{n0} - t_n$	$A_{tH} = -\frac{C_{t0} \cos \alpha_{10}}{2H} \frac{2 \Delta t_n}{A_{tH}} = A_{tL}$	$A_{tL} = -\frac{C_{t0} \sin \alpha_{10}}{2} \frac{2 \Delta t_n}{A_{tL}}$	При $\Delta t_n > 0$ $A_{tH} < 0$ $A_{tL} < 0$
A'_α	Изменение угла призмы на величину $\Delta \beta$, где $\Delta \beta = \beta - \beta_0$			При $\Delta \beta > 0$ ($\Delta \alpha > 0$) $A'_{\alpha H} > 0$ $A'_{\alpha L} < 0$
A''_α	Подъем призмы на угол θ	$A_{\alpha H} = \frac{\cos \alpha_{10}}{\cos (\alpha_{10} + \Delta \alpha)} - 1$	$A_{\alpha L} = \frac{\sin \alpha_{10}}{\sin (\alpha_{10} + \Delta \alpha)} - 1$, где $\Delta \alpha = \alpha_1 - \alpha_{10}$	При $\theta > 0$ ($\Delta \alpha > 0$) $A''_{\alpha H} > 0$ $A''_{\alpha L} < 0$
A'''_α	Изменение температуры контроля (призмы) на величину Δt^0			При $\Delta t^0 > 0$ ($\Delta \alpha > 0$) $A'''_{\alpha H} > 0$ $A'''_{\alpha L} < 0$
$A''V_\alpha$	Затухание ультразвука на пути до отражателя (дефекта)			При $\Delta \alpha < 0$ $A''V_{\alpha H} < 0$ $A''V_{\alpha L} > 0$

Временной интервал T_0 между зондирующим импульсом и n -м донным отражением при номинальных значениях длины l_0 образца и скорости C_{l_0} продольной волны:

$$T_0 = n \frac{2l_0}{C_{l_0}}.$$

Точность работы глубиномера удобно проверять по эталону № 1, в котором предусмотрена специальная прорезь. Эхо-сигналы, многократно отраженные от этой прорези, отстоят друг от друга на 20 мкс.

Мертвая зона определяется минимальной глубиной расположения дефекта, эхо-сигналы от которого не совпадают во времени с зондирующим импульсом. Величина мертвой зоны зависит от длительности зондирующего импульса, а для наклонных искателей — и от конструкции призмы.

Для приема эхо-импульса от дефекта отдельно от зондирующего импульса необходимо, чтобы время T , прошедшее между моментом излучения зондирующего импульса и моментом возвращения эхо-сигнала, было больше длительности зондирующего импульса τ . Время T связано с глубиной H расположения дефекта соотношениями:

для прямого искателя

$$T = 2H/C_{l_2},$$

для наклонного искателя

$$T = 2H \operatorname{cosec} \alpha / C_{l_2} + 2t_n.$$

Приравнивая время T к длительности ультразвукового импульса τ , получаем значения величины мертвой зоны: при работе прямым искателем

$$M = \tau C_{l_2} / 2,$$

при работе наклонным искателем

$$M = (\tau - 2t_n) \sin \alpha / 2.$$

При $2t_n > \tau$, что имеет место в применяемых конструкциях наклонных искателей, мертвая зона могла бы отсутствовать, если бы отраженные в призму искателя ультразвуковые колебания после многократных отражений полностью поглощались и не возвращались на пьезоэлектрическую пластину. Наличие эхо-импульсов, появляющихся в результате многократных отражений зондирующего импульса в призме искателя, делает невозможной регистрацию эхо-импульсов от дефектов, расположенных близко от поверхности, создавая тем самым мертвую зону величиной до 3—10 мм.

Величина мертвой зоны зависит от угла ввода луча и размеров отражателя. Она тем меньше, чем больше угол ввода луча и размеры отражателя. Мертвую зону при работе наклонным искателем принято характеризовать минимальной глубиной расположения цилиндрического отражателя, эхо-импульс от которого можно отличить от зондирующего импульса и эхо-импульсов шумов, возвращающихся

из призмы. Цилиндрический отражатель диаметром 2 мм и длиной более ширины ультразвукового пучка должен быть выполнен в образце из контролируемого металла. В качестве такого образца можно использовать эталон № 2.

Пример 4.15. Определим величину мертвой зоны M при контроле изделий из стали для прямого искателя, если длительность зондирующего импульса $\tau = 4$ мкс.

Из табл. 4.1 находим, что скорость продольной волны в стали $C_{l1} = 5900$ м/с $= 5,9$ мм/мкс.

Тогда $M = 4 \cdot 5,9/2 \approx 12$ мм.

Разрешающая способность при ультразвуковой дефектоскопии обусловлена разрешающей способностью по дальности (лучевая разрешающая способность) и разрешающей способностью по углу (фронтальная разрешающая способность). Как та, так и другая зависят от направленности ультразвукового поля и от скорости распространения волны в контролируемом металле. Разрешающая способность по дальности Δ_l , кроме того, определяется разрешающей способностью аппаратуры T_p , т. е. минимальным временем между эхо-сигналами, еще различимыми на экране электронно-лучевой трубки. Разрешающие способности Δ_l и Δ_r связаны соотношениями

$$\Delta_l = C_{l2} T_p / 2; \quad \Delta_r = C_{l2} T_p / 2,$$

где Δ_l и Δ_r — разрешающие способности метода при прозвучивании металла продольными и поперечными волнами соответственно.

Измерив разрешающую способность аппаратуры T_p , легко вычислить разрешающие способности метода. Разрешающая способность аппаратуры может быть измерена по выявлению отражателей, расположенных один за другим таким образом, что эхо-сигналы от них сдвинуты во времени на известную величину. Для проверки разрешающей способности достаточно иметь два подобных отражателя. Отражатели могут быть выполнены в любом материале с известной скоростью распространения ультразвука. Такие отражатели в виде пазов предусмотрены в эталоне № 1.

Значения основных параметров контроля конкретных соединений выбирают на основе предварительных экспериментальных исследований. Оптимальными считаются такие значения параметров, при которых обеспечивается наибольшая достоверность результатов контроля.

4.5. МЕТОДИКА И ТЕХНОЛОГИЯ КОНТРОЛЯ

При выборе методики контроля стремятся обеспечить наиболее надежное выявление дефектов в швах при возможно меньшем количестве необходимых операций.

Оптимальные параметры (частота ультразвуковых колебаний, чувствительность и угол призмы искателя) определяют экспериментально для каждого конкретного соединения. В процессе отработки методики контроля данные ультразвуковой дефектоскопии сопостав-

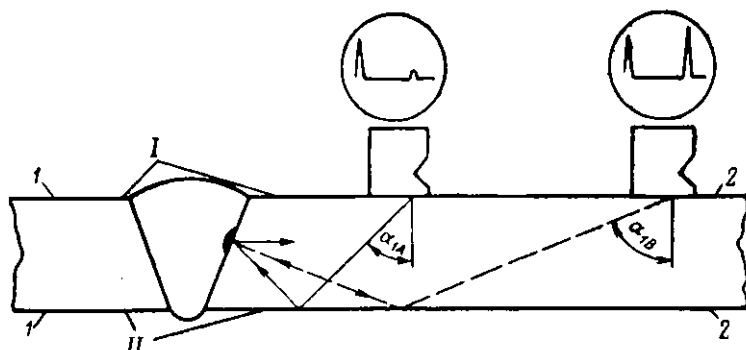


Рис. 4.25. Иллюстрация выявляемости дефекта в зависимости от угла ввода луча:

I и *II* — поверхности соединения; *1* и *2* — стороны соединения

ляют с результатами осмотра излома или металлографического исследования швов.

Способы прозвучивания, тип искателей и пределы их перемещения определяют с учетом типа и размеров сварного соединения, а также характера ожидаемых дефектов. Угол ввода колебаний выбирают таким, чтобы расстояние от искателя до шва было как можно меньшим, а направление луча — возможно близким к максимальному значению индикатрисы рассеяния дефекта. Двукратно и многократно отраженным лучом контролируют в случае, если размеры усиления шва не позволяют прозвучивать шов прямым или однократно отраженным лучом при оптимальном угле ввода луча. Особое внимание должно быть уделено тем дефектам, отражение от которых можно получить лишь тогда, когда их поверхность перпендикулярна акустической оси искателя (рис. 4.25).

4.5.1. Контроль стыковых швов

Швы стыковых соединений контролируют, как правило, эхо-методом с включением искателя по совмещенной схеме. Швы толщиной более 150 мм прозвучивают прямым лучом с двух противоположных поверхностей металла (рис. 4.26, а). Проконтролировать весь объем наплавленного металла с одной поверхности не удастся, так как для прозвучивания таких швов однократно отраженным лучом чувствительность дефектоскопа оказывается недостаточной.

При прозвучивании применяют искатели с углом призмы 30 или 40°. Часто для обеспечения большей надежности контроля применяют последовательное прозвучивание обоими искателями. Искатель с углом призмы 50° используют для выявления возможных дефектов в зоне шва, которая не могла быть прозвучена искателями с меньшим углом призмы. Обычно пределов временной регулировки чувствительности серийных дефектоскопов оказывается недостаточно для выравнивания чувствительности по глубине. В этом случае прибегают к послойному способу контроля, при котором сначала кон-

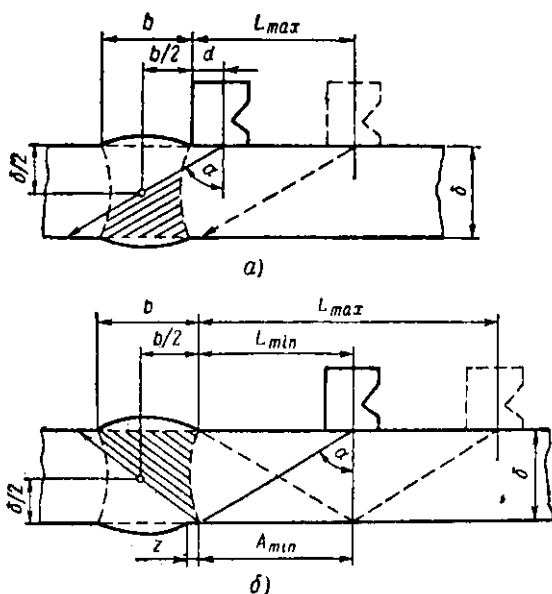


Рис. 4.26. Схемы прозвучивания стыковых соединений с одной поверхности:

а — прямым лучом; б — однократно отраженным лучом

тролируют верхнюю часть металла шва на пониженной чувствительности, а затем при переходе к контролю более глубоких слоев увеличивают чувствительность.

В ряде случаев при контроле сварных соединений большой толщины могут возникнуть помехи, связанные с рассеянием ультразвука крупнозернистой структурой. При большом уровне структур-

ных помех для увеличения отношения сигнал—шум следует уменьшить длительность (но не амплитуду) зондирующего импульса, увеличить диаметр преобразователя и применить фокусировку ультразвука (только для выявления дефектов в ближней зоне).

Швы толщиной менее 150 мм могут быть прозвучены с одной поверхности основного металла прямым и однократно отраженным лучом (рис. 4.26). При этом угол ввода α обычно выбирают таким, чтобы ось луча в одном из положений искателя пересекла ось симметрии шва толщиной δ на глубине $0,5\delta$. Величину угла α находим из соотношений:

при прозвучивании прямым лучом

$$\operatorname{tg} \alpha \geq (b + 2d)/\delta;$$

при прозвучивании однократно отраженным лучом

$$\operatorname{tg} \alpha \geq (b + 2z)/\delta.$$

Расстояние z составляет ~ 5 мм и необходимо для обеспечения направленного отражения основной части ультразвуковой энергии в контролируемую область шва.

Чем меньше толщина основного металла, тем больший угол ввода луча необходим для контроля шва, ибо с уменьшением толщины δ ширина b усиления падает незначительно; при этом для прозвучивания шва прямым лучом всегда требуется больший угол ввода луча, чем для прозвучивания того же шва лучом, отраженным от противоположной поверхности основного металла. Так, например, для контроля швов толщиной $\delta = 30 \div 60$ мм прямым лучом используют типовой искатель с углом ввода луча $\alpha = 65^\circ$ ($\beta = 50^\circ$), а однократно

отраженным лучом — искатель с углом ввода $\alpha = 50^\circ$ ($\beta = 40^\circ$), при толщине $\delta = 15+25$ мм контроль прямым и однократно отраженным лучом осуществляют посредством искателя с углом ввода $\alpha = 65^\circ$ ($\beta = 50^\circ$).

Швы листов толщиной менее 10 мм с помощью типовых искателей могут быть прозвучены только лучом, претерпевшим многократные отражения в основном металле. В этом случае ложные сигналы, отраженные от усиления шва или подкладного кольца, почти совпадают во времени с ожидаемыми сигналами от дефектов, что существенно осложняет контроль. Для повышения разрешающей способности следует стремиться, чтобы средняя часть шва, где наиболее вероятно появление непроваров и шлаков, контролировалась прямым ультразвуковым лучом. Это может быть достигнуто использованием специальных искателей с большими углами наклона и малой стрелой.

При контроле стыковых швов любой толщины угол ввода луча и способ прозвучивания определяют собой зону перемещения искателя. При прозвучивании шва прямым лучом искатель перемещают от усиления на расстояние (см. рис. 4.26, а) $L_{\max} \approx \delta \operatorname{tg} \alpha$.

В случае контроля шва однократно или многократно отраженным лучом искатель перемещают в зоне, ограниченной минимальным $L_{\min}$ и максимальным $L_{\max}$ расстояниями от усиления:

$$L_{\min} \approx n\delta \operatorname{tg} \alpha + z = A_{\min} + z;$$

$$L_{\max} \approx (n + 1) \delta \operatorname{tg} \alpha,$$

где n — число отражений ультразвукового луча в металле.

Значения α , $L_{\max}$ и $A_{\min}$ легко могут быть определены по шкалам глубиномера или координатной линейки.

Пример 4.16. Определим угол ввода луча α , выберем искатель и рассчитаем пределы перемещения искателя при контроле шва стыкового соединения листов толщиной 40, ширина валика усиления которого $b = 36$ мм. В комплект дефектоскопа входят искатели с углами $\beta = 40^\circ$ ($\alpha = 50^\circ$) и $\beta = 50^\circ$ ($\alpha = 65^\circ$) и стрелой $d = 15$ мм.

Угол ввода луча α_n при прозвучивании нижней части шва прямым лучом

$$\alpha_n \geq \operatorname{arctg} \frac{36 + 2 \cdot 15}{40} = \operatorname{arctg} (1,65) \approx 59^\circ 30'.$$

Угол ввода луча $\alpha_{\text{отр}}$ при прозвучивании верхней части шва однократно отраженным лучом

$$\alpha_{\text{отр}} \geq \operatorname{arctg} \frac{36 + 2 \cdot 4}{40} = \operatorname{arctg} (1,1) = 48^\circ.$$

Из имеющихся в распоряжении искателей выбираем для контроля нижней части шва искатель с углом $\alpha_n = 65^\circ$ ($\beta = 50^\circ$) и верхней части — искатель с углом $\alpha_{\text{отр}} = 50^\circ$ ($\beta = 40^\circ$).

При контроле нижней части шва искателем с углом $\beta = 50^\circ$ $L_{\min} = 15$ мм, $L_{\max} = 40 \operatorname{tg} 65^\circ = 40 \cdot 2,145 = 86$ мм; при контроле верхней части шва искателем с углом $\beta = 40^\circ$

$$L_{\min} = 1 \cdot 40 \cdot \operatorname{tg} 50^\circ + 4 = 40 \cdot 1,19 + 4 = 52 \text{ мм};$$

$$L_{\max} = (1 + 1) \cdot 40 \cdot \operatorname{tg} 50^\circ = 2 \cdot 40 \cdot 1,19 = 95 \text{ мм}.$$

4.5.2. Контроль швов тавровых соединений

Швы тавровых соединений так же, как и стыковых, контролируют эхо-методом по совмещенной схеме. На рис. 4.27 приведены схемы прозвучивания угловых швов тавровых соединений, которые могут быть применены для выявления внутренних дефектов. Наиболее целесообразен ввод ультразвукового луча в шов через основной металл привариваемого листа (схема 3), так как он позволяет вы-

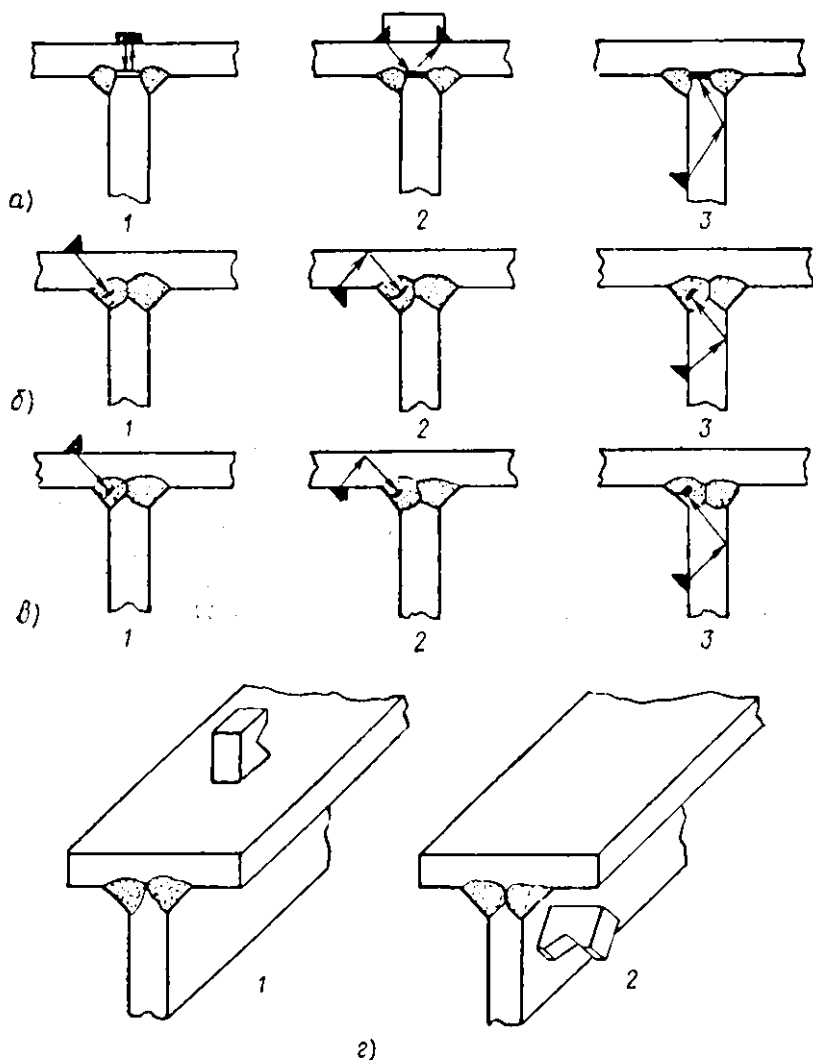


Рис. 4.27. Возможные схемы прозвучивания угловых швов при выявлении
 а — непровара в корне шва; б — продольных трещин; в — пор и шлака; г — волно-
 речных трещин

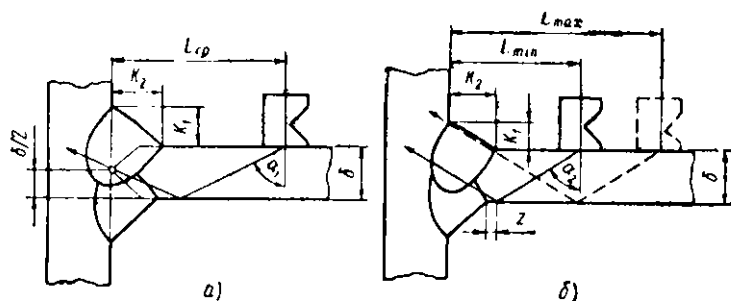


Рис. 4.28. Схемы контроля тавровых соединений с полным проваром корня шва

явить все виды внутренних дефектов в угловых швах тавровых и крестовых соединений и наиболее прост в реализации на практике.

В ответственных тавровых и крестовых соединениях сварных металлоконструкций, как правило, предусматривают полный провар в корне шва. Качество швов таких соединений может быть проконтролировано путем прозвучивания наплавленного металла однократно отраженным лучом (рис. 4.28). При этом непровар в корне шва наиболее устойчиво выявляется искателем с углом призмы $\beta \approx 50^\circ$, а трещины, поры, шлаковые включения и непровары по кромке — искателем с углом призмы $\beta \approx 40^\circ$.

Поскольку непровар в корне шва — наиболее вероятный дефект, контроль целесообразно начинать с прозвучивания соединения искателем с углом призмы $\beta \approx 50^\circ$ ($\alpha \approx 65^\circ$). Искатель следует перемещать от полки в пределах, равных $L_{cp} \pm 5$ мм; величина L_{cp} может быть определена по соотношению (рис. 4.28, а):

$$L_{cp} = 1,5\delta \operatorname{tg} \alpha_1.$$

Участки швов, в которых не обнаружен непровар в корне шва, прозвучивают искателем с углом призмы $\beta = 40^\circ$ ($\alpha_2 = 50^\circ$), перемещаемым в пределах, определяемых расстояниями L_{min} и L_{max} от полки соединения (см. рис. 4.28, б),

$$L_{min} = k_1 + z + \delta \operatorname{tg} \alpha_2;$$

$$L_{max} = k_2 + 2\delta \operatorname{tg} \alpha_2.$$

Угол ввода луча α и расстояние L между центрами излучения искателя выбирают из условия пересечения осей диаграмм направленности искателей на глубине, равной толщине полки δ (рис. 4.29):

$$L = 2\delta \operatorname{tg} \alpha.$$

При перемещении искателя по поверхности полки над стенкой в случае полного провара ультразвуковой луч без отражений будет переходить из полки в стенку (рис. 4.29, а). Если же в соединении окажется непровар, то часть ультразвуковых колебаний отразится от него к приемному искателю (рис. 4.29, б). Амплитуда эхо-сигнала от непровара будет пропорциональна его ширине.

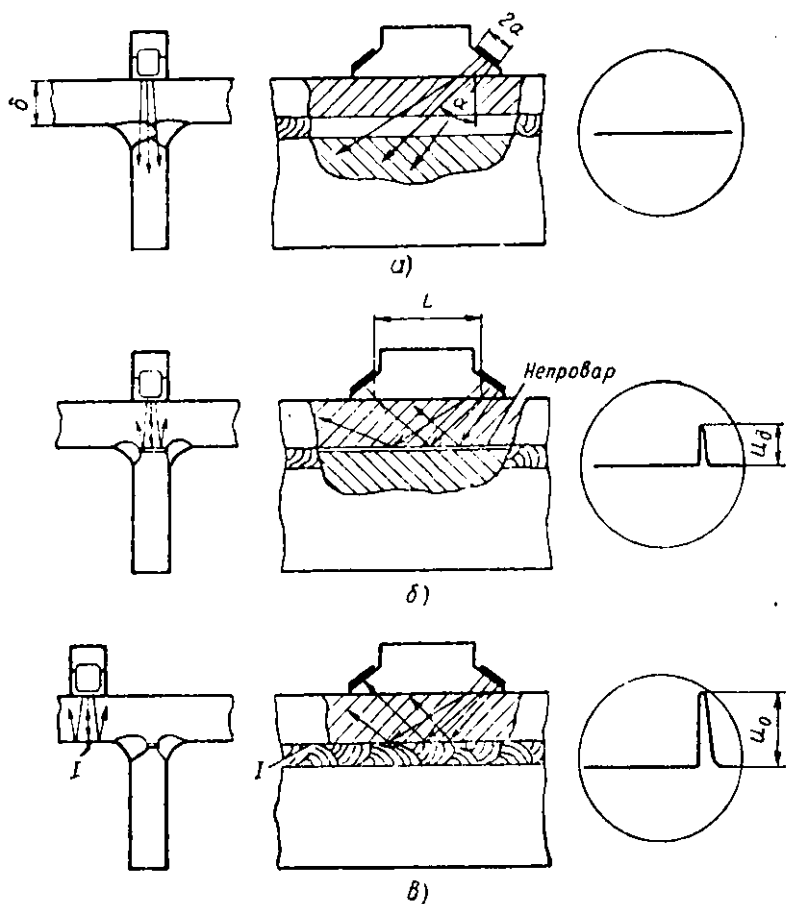


Рис. 4.29. Схема прозвучивания таврового соединения:
 а — с полным проваром, б — с непроваром в корне шва; в — при определении амплитуды эхо-сигнала от бесконечной плоскости

Для измерения ширины непровара первым методом применяют тест-образец (рис. 4.30), изготовленный из того же металла, что и полка. Прорези в тест-образце имитируют собой непровары различной ширины. Расстояние от верхней плоскости тест-образца до торцов прорезей строго равно толщине полки. С практически достаточной точностью можно считать, что ширина обнаруженного непровара при длине его более диаметра ультразвукового пучка равна ширине той прорези в тест-образце, эхо-сигнал от которой равен по величине эхо-сигналу от выявленного непровара (рис. 4.30).

Погрешность этого метода зависит от соответствия качества поверхности контролируемого соединения качеству поверхности тест-образца. Влияние качества поверхности соединения на результаты измерения и необходимость использования тест-образца исключаются применением второго метода, названного безэталоным.

Безэталонный метод основан на сравнении амплитуды U_d эхо-сигнала от непровара с амплитудой U_0 от бесконечной плоскости, расположенной на той же глубине, что и непровар. В качестве такой плоскости используют поверхность 1 полки соединения (см. рис. 4.29, а). Если длина непровара существенно превышает его ширину, то соотношение амплитуд эхо-сигналов от непровара и от бесконечной плоскости при расположении их в дальней зоне вначале пропорционально величине b , а затем $-\sqrt{b}$.

Безэталонный метод может быть реализован с помощью дефектоскопа, имеющего аттенуатор или какое-либо устройство для измерения амплитуд эхо-сигналов.

Контролю должно предшествовать экспериментальное построение или расчет зависимости $U_d/U_0 = F(b)$. Имея такую зависимость, не представляет трудностей, измерив соотношение амплитуды эхо-сигнала U_d от выявленного непровара и амплитуды эхо-сигнала U_0 от поверхности листа, по данной зависимости отсчитать искомую ширину b непровара. Опыт применения данного метода при контроле нескольких тысяч тавровых соединений показывает, что погрешность измерения зависит от равномерности ширины непровара в озвучиваемой области и практически составляет 0,5—1 мм.

Рассмотренные методы не могут быть применены для измерения высоты непровара в односторонних угловых швах тавровых соединений с V-образной разделкой. В подобных случаях высота непровара может быть оценена путем сравнения амплитуды эхо-сигнала от выявленного непровара с амплитудой эхо-сигнала от непровара известной величины в образце соединения.

В настоящее время ультразвуковая дефектоскопия — единственный метод, выявляющий в угловых швах тавровых и крестовых соединений трещины с раскрытием менее 0,2 мм и тонкие непровары в корне шва.

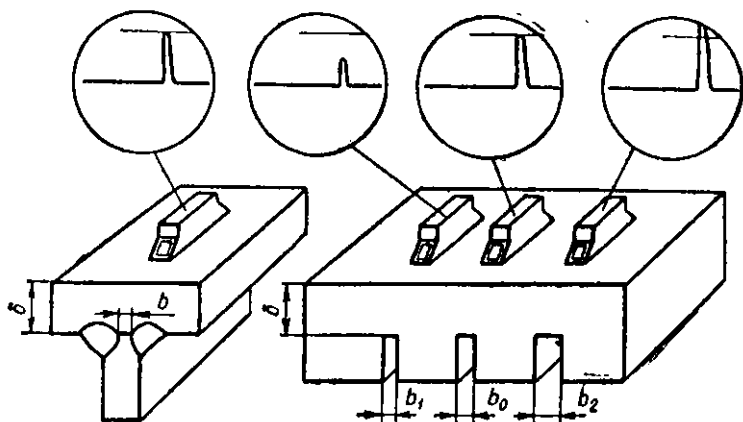


Рис. 4.30. Измерение ширины непровара с использованием тест-образца

4.5.3. Контроль соединений внахлестку

Шов соединения внахлестку прозвучивают со стороны основного листа однократно отраженным лучом с помощью искателя, включенного по совмещенной схеме (рис. 4.31). При этом обеспечивается выявление трещин, непроваров вертикальной кромки и корня шва, а также одиночных включений и их скоплений. Обнаружение непроваров горизонтальной кромки не гарантируется. Объясняется это тем, что ультразвуковой луч, попадая на горизонтальный плоский дефект, отражается под углом и не возвращается на искатель.

Горизонтальные непровары могут быть выявлены зеркально-теневым методом при включении искателей по раздельной схеме

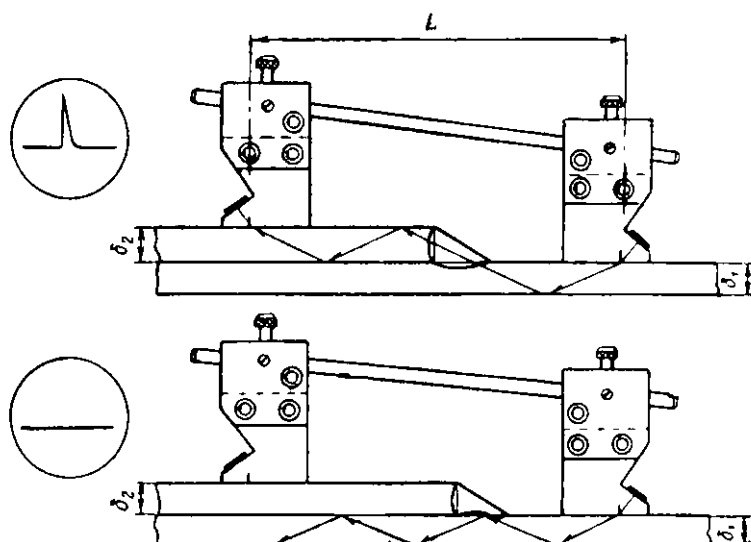
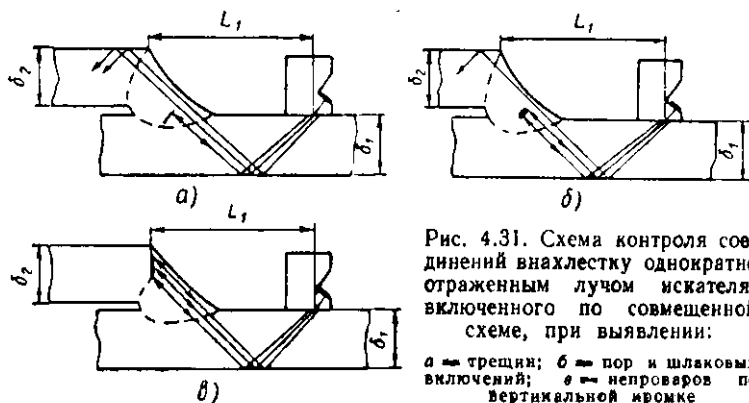


Рис. 4.32. Схема прозвучивания соединения внахлестку при выявлении непровара горизонтальной кромки

(рис. 4.32). Ультразвуковой импульс, проходя от передающего излучателя через бездефектный шов, принимается приемным излучателем. При обнаружении в шве горизонтального непровара или другого крупного дефекта, расположенного в наплавленном металле шва, амплитуда импульса на экране уменьшается.

4.5.4. Контроль контактной сварки

Ультразвуковая дефектоскопия соединений, выполненных контактной сваркой, сводится к прозвучиванию шва импульсами ультразвуковых колебаний и исследованию процесса их распространения вхо- или теньевым методами.

Толщина шва составляет небольшую величину по сравнению с остальными его размерами. Дефекты контактной сварки имеют наибольшую площадь, как правило, в плоскости сварного стыка. Поэтому прозвучивать шов следует в направлении, перпендикулярном к плоскости соединения. Применение прямого излучателя оказывается возможным, если стык отстоит от плоскости, на которой установлен излучатель, на расстоянии не более 200—300 мм и не менее, чем величина мертвой зоны дефектоскопа. В остальных случаях контактный шов прозвучивают с помощью наклонного излучателя путем ввода колебаний в шов через основной металл.

Ультразвуковую дефектоскопию широко используют для выявления дефектов контактной сварки инструмента (рис. 4.33, а) и рельсов (рис. 4.33, б). Опыт применения ультразвуковой дефектоскопии швов контактной сварки показывает, что при контроле выявляется большинство недопустимых дефектов. Однако встречаемые иногда в контактных стыках дефекты в виде слипания металла могут быть не обнаружены дефектоскопом, так как они практически не отражают ультразвуковых колебаний частотой 2,5—3 МГц.

Ультразвуковую дефектоскопию начинают использовать и для выявления внутренних дефектов в сварных точках (рис. 4.33, в). Колебания, излучаемые одной пластиной, распространяются в верхнем листе и при попадании на качественно сваренную точку прони-

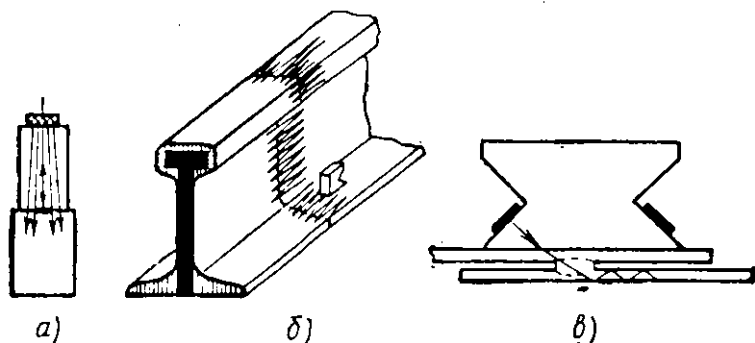


Рис. 4.33. Схема прозвучивания сварных стыков инструмента (а), рельса (б) и сварной точки (в)

кают в нижний лист. Интенсивность колебаний, достигающих другой пластины, в этом случае весьма мала. При наличии дефекта интенсивность принимаемого сигнала резко увеличивается, что регистрируется индикатором дефектоскопа. Диаметр сварной точки определяют по длине зоны, в которой при перемещении искателя над точкой на экране дефектоскопа отсутствует импульс. Недостаток изложенной методики состоит в том, что весьма опасный дефект типа слипания часто практически не выявляется, так как пропускает ультразвуковые лучи так же хорошо, как и качественное сварное соединение.

Для контроля швов малой толщины (менее 10 мм) обычно применяют ультразвуковые колебания с частотой ~ 5 МГц, для контроля швов толщиной 10—50 мм — 2,5 МГц и для швов толщиной более 50 мм — 2,5—1,5 МГц.

4.5.5. Технология ультразвукового контроля

Технология контроля сварного шва определяется типоразмером соединения и требованиями к его качеству. Тем не менее в технологии контроля различных соединений можно выделить следующие основные этапы: внешний осмотр соединения, выбор способа прозвучивания и типа искателя, определение пределов его перемещения, подготовка поверхности соединения к контролю, размещение, включение, проверка работоспособности и настройка аппаратуры, прозвучивание металла шва, оформление результатов контроля, оценка качества соединения по результатам контроля.

При осмотре сварного соединения определяют его тип, толщину свариваемых листов, ширину усиления или размеры катетов шва, необходимые для выбора параметров контроля, а также устанавливают отсутствие недопустимых внешних дефектов. При обнаружении внешних дефектов их устраняют. Подготовка поверхности изделия к прозвучиванию заключается в очистке участков поверхностей, в пределах которых будут перемещаться искатели, от отслаивающейся окалины и грязи и в покрытии очищенной поверхности контактирующей средой.

Дефектоскоп размещают не далее 0,7 м от контролируемого участка шва. Перед включением прибор заземляют. После включения прибора проверяют по эталонам и тест-образцам соответствие параметров дефектоскопа с искателями параметрам, заданным инструкцией. Затем настраивают дефектоскоп в соответствии с указаниями последней. При этом на экране стремятся выделить участок, соответствующий пути ультразвукового луча в металле шва при данном способе прозвучивания.

Прозвучивание наплавленного металла при любом из способов обеспечивается путем продольно-поперечного сканирования искателем (рис. 4.34). Шаг поперечного сканирования должен быть меньше размеров сечения ультразвукового пучка и практически составляет 2—4 мм. Для повышения надежности контроля в процессе сканирования искателю придают непрерывные вращательные дви-

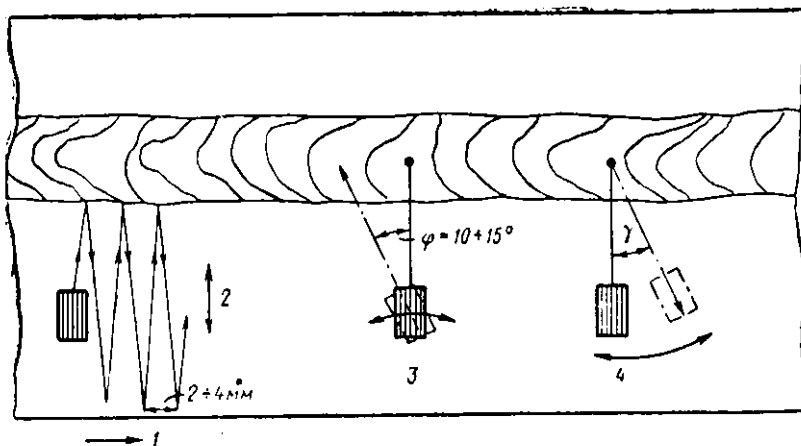


Рис. 4.34. Схемы сканирования шва:

1 — продольное; 2 — поперечное; 3 — вращательное; 4 — поворотное

жения на угол $\varphi \approx 10 \div 15^\circ$ от положения, при котором ось искателя нормальна к продольной оси шва (рис. 4.34).

Для выявления различным образом ориентированных дефектов сварной шов при возможности прозвучивают с двух сторон. Информация о конфигурации и ориентации дефектов может быть получена также путем озвучивания дефекта под различными углами (рис. 4.35) исследования огибающих последовательности эхо-сигналов от него, частотной зависимости амплитуды эхо-сигнала и т. п.

Прозвучивание соединений вначале осуществляют при повышенной поисковой чувствительности по сравнению с той, которая указана в инструкции для отбраковки дефектных участков по амплитуде эхо-сигнала (браковочной чувствительности). Признаком обна-

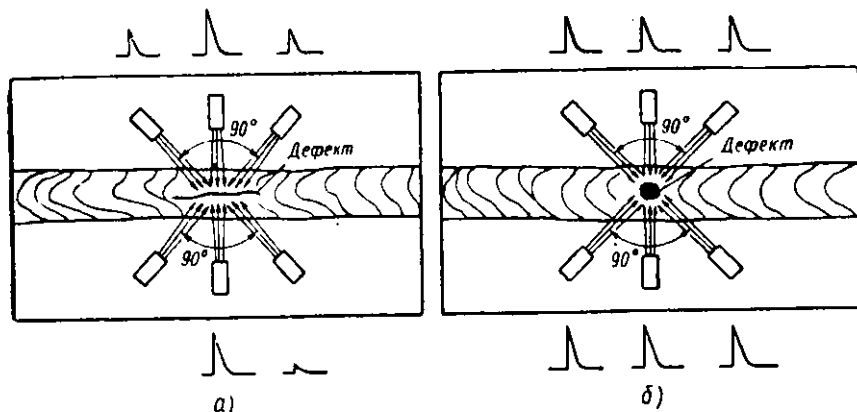


Рис. 4.35. Оценка конфигурации дефекта путем озвучивания его под различными углами:

а — дефект плоский; б — дефект округлый

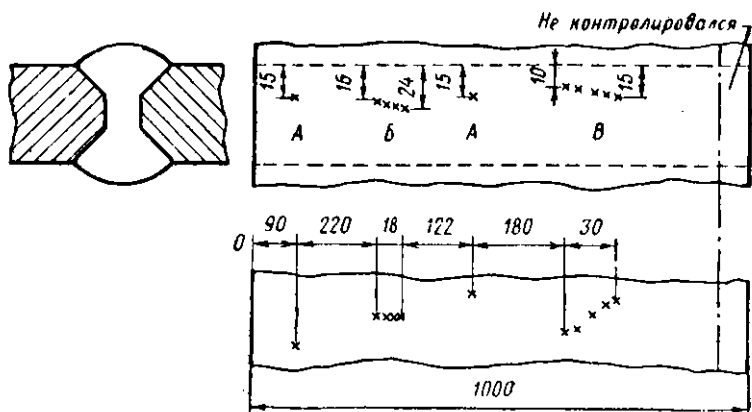


Рис. 4.36. Карта ультразвукового контроля стыкового сварного шва (по ГОСТ 14782—69)

ружения дефекта при прозвучивании шва служит эхо-сигнал, превосходящий по амплитуде некоторое указанное в инструкции значение. Для того чтобы убедиться, что данный эхо-сигнал вызван внутренней несплошностью, а не появился в результате отражения от неровностей или краев соединения, определяют координаты отражающей поверхности. Если результаты измерения, озвучивания и осмотра поверхности контролируемого участка подтверждают возможность возникновения ложных отражений, то следует произвести дополнительную зачистку или прикоснуться пальцем, смоченным в контактирующей среде, к месту предполагаемой неровности на поверхности, вызывающей появление ложного отражения. Уменьшение величины импульса при прикосновении пальца, связанное с переходом ультразвуковой энергии в палец, подтверждает, что отражение происходит именно от этой неровности.

Убедившись, что это не ложный сигнал, измеряют характеристики выявленного дефекта при браковочной чувствительности, которая предусмотрена инструкцией.

Результаты контроля оформляют в журнале, составляя на дефектные участки карты контроля. На рис. 4.36 показан пример заполнения карты контроля стыкового шва, рекомендуемой ГОСТ 14782—69. По результатам контроля оценивают качество сварного соединения в соответствии с требованиями, предъявляемыми техническими условиями на сварку. При этом обычно учитывают предполагаемые вид дефекта, его размеры, характеризуемые амплитудой эхо-сигнала, протяженность дефектов, минимальное расстояние между дефектами и количество отдельных дефектов на определенной длине шва.

Несмотря на то, что при ультразвуковой дефектоскопии невозможно точно определить вид и размеры выявленных дефектов, в большинстве случаев оказывается возможным по его результатам оценить качество проконтролированного соединения. Если же по результатам

ультразвукового контроля нельзя выявленный дефект определенно отнести к недопустимому, то для уточнения характера выявленного дефекта используют методы просвечивания. При невозможности или неэкономичности применения методов просвечивания сомнительный участок бракуют.

Заметим, что дефекты, большие по данным ультразвуковой дефектоскопии и не обнаруженные радиографией, должны классифицироваться как трещины или тонкие непровары и, как правило, устраняться.

4.5.6. Область применения и перспективы развития

Ультразвуковую дефектоскопию широко применяют для проверки качества многих сварных соединений из низкоуглеродистых и низколегированных сталей толщиной до 700 мм, в частности для контроля электрошлаковой сварки корпусов доменных печей, станин гидравлических прессов, котлов, мостов, корпусов судов, труб и т. п. При толщине листов более 80 мм ультразвуковая дефектоскопия в ряде случаев — наиболее надежный метод выявления внутренних дефектов в соединениях из сталей. Однако существует класс сварных соединений из высоколегированных сталей, не проверяемых ультразвуком при современном его состоянии из-за большого уровня структурных помех.

При ультразвуковой дефектоскопии сварных швов из алюминиевых сплавов обеспечивается выявление всех наиболее опасных дефектов, в том числе окисных пленок и густых сеток мелких пор, не обнаруживаемых рентгенографированием. В то же время вольфрамовые включения ультразвуковой дефектоскопией выявляются значительно хуже.

Ультразвуковой контроль стыковых соединений из меди имеет ряд существенных отличий. Объясняется это тем, что превышение скорости продольной волны в плексигласе ($C_{I1} = 2670$ м/с) над скоростью сдвиговой волны в меди ($C_I = 2500$ м/с) не позволяет с помощью типовых искателей возбудить чистую сдвиговую волну в меди достаточной интенсивности с большим углом ввода луча α , необходимым для контроля стыковых сварных соединений. Поэтому для прозвучивания соединений из меди используют специальные искатели, например искатели с термостабильной системой ввода сдвиговой волны.

Интенсивное затухание сдвиговых волн в меди, а также рассеяние пучка на границе зерен в зоне наплавленного металла определяют более низкое значение оптимальной частоты ультразвука (1,5—1,8 МГц) по сравнению с диапазоном оптимальных частот для контроля аналогичных соединений из сталей и легких сплавов (2,5—5 МГц).

Метод ультразвуковой дефектоскопии во многих случаях предпочтителен или единственно возможен. Однако он имеет существенный недостаток — достоверность результатов ультразвукового контроля во многом зависит от квалификации оператора, его сосредото-

точности в процессе работы и от степени соответствия основных параметров контроля параметрам, предусмотренным инструкцией. В связи с этим при организации и проведении ультразвукового контроля следует особое внимание уделять вопросам подготовки операторов, создания условий, способствующих максимальной сосредоточенности оператора в процессе прозвучивания, а также стандартизации основных параметров контроля.

К ультразвуковому контролю сварных соединений могут быть допущены специалисты, обладающие соответствующей квалификацией. Согласно действующему в СССР «Временному положению» квалификация оператора считается достаточной, если он прошел теоретическую и практическую подготовку по ультразвуковой дефектоскопии в соответствии с утвержденной Программой, успешно выдержал испытания в экзаменационной комиссии и приобрел производственный опыт контроля.

Сосредоточенность оператора в процессе работы обусловлена многими факторами. Отрицательно сказываются неблагоприятные метеорологические условия и отсутствие удобного доступа к сварному соединению. Поэтому согласно «Временному положению» ультразвуковой контроль, как правило, следует выполнять при температуре не ниже $+5^{\circ}\text{C}$. При этом по возможности сварное соединение должно быть установлено в удобное для прозвучивания положение. Сосредоточенности оператора способствует также применение дополнительных индикаторов в дефектоскопе и приспособлений для перемещения искателя.

Длительные сравнительные исследования выявляемости дефектов методами ультразвуковой дефектоскопии, рентгенографирования и макроструктурного анализа показывают, что при правильной организации может быть достигнута достаточно высокая надежность выявления протяженных дефектов в виде трещин, непроваров и скоплений шлаковых и газовых включений. Вероятность выявления таких дефектов близка к единице и мало зависит от навыков оператора по прозвучиванию соединений. В то же время вероятность выявления одиночных дефектов, которые при тщательном прозвучивании обязательно обнаруживаются, во многом определяется опытом оператора и в зависимости от стажа его работы колеблется в широких пределах.

Учитывая, что сравнительно низкая вероятность выявления одиночных дефектов связана со случайным их пропуском оператором в процессе сканирования, необходимо уделять особо серьезное внимание обучению операторов надежным приемам сканирования. Достоверность результатов ультразвуковой дефектоскопии может быть повышена также за счет введения системы ультразвукового контроля каждого соединения несколькими операторами.

Однако высокая степень достоверности ультразвуковой дефектоскопии может быть достигнута только путем автоматизации процесса контроля. При этом под автоматическим контролем следует понимать процесс, обеспечивающий не только получение информации о наличии (отсутствии) внутренних дефектов, но также и реги-

страцию этой информации в виде документа с одновременной выдачей заключения о качестве соединения в соответствии с заданными техническими условиями. Очевидно, что уровень автоматизации ультразвукового контроля будет определяться степенью выполнения аппаратурой функций элементов обобщенной схемы контроля сварных соединений (рис. 4.37).

В этой схеме устройство построчного сканирования обеспечивает определенный характер излучения ультразвукового луча и такое перемещение искательной системы, при котором осуществляется построчное сканирование всего контролируемого объема. Приемно-сигнализирующее устройство усиливает поступившие на искательную систему отраженные и преобразованные импульсы, селектируя и подавая на индикаторы лишь те из них, которые являются эхосигналами от дефектов. Программа работы селектирующей системы определяется способом сканирования шва, его типом и размерами. Устройство наблюдения постоянно накапливает данные о координатах луча и следит за показаниями индикаторов обнаружения дефектов.

При срабатывании индикатора оно выдает сигнал на регистрирующее устройство, которое фиксирует координаты расположения выявленных дефектов, а также другую информацию о них (относительные размеры, конфигурацию и т. п.). Дешифратор оценивает качество контролируемого соединения согласно введенной в него программе, составленной в соответствии с техническими условиями на качество сварного соединения. Контроль качества акустического контакта, а также работоспособности всех узлов автомата, выполняет устройство самоконтроля, которое при нарушении контакта или работоспособности аппаратуры останавливает процесс дефектоскопии и подает соответствующий сигнал.

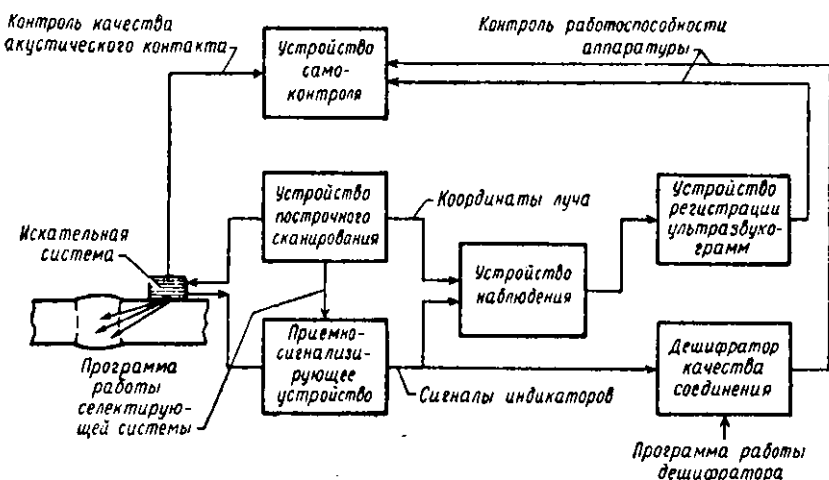


Рис. 4.37. Обобщенная функциональная схема процесса ультразвуковой дефектоскопии

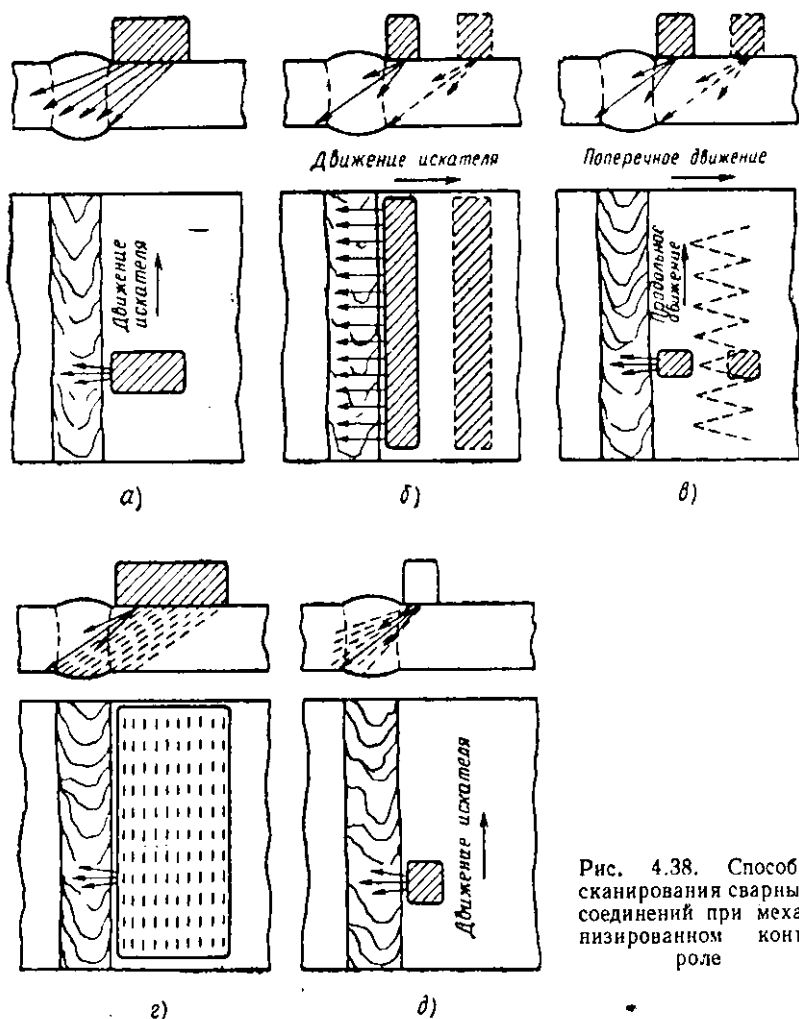


Рис. 4.38. Способы сканирования сварных соединений при механизированном контроле

Рассмотренной функциональной схемой охватываются различные варианты процесса ультразвуковой дефектоскопии швов: ручной, механизированный и автоматический.

Естественно, что аппаратуре прежде всего должны быть переданы функции сканирования контролируемого шва. Для этого разработаны специальные искательные устройства, основанные на определенном способе сканирования. Возможные способы сканирования в зависимости от характера излучения ультразвукового луча и траектории перемещения искательной системы относительно шва можно разделить на пять основных видов (рис. 4.38).

1. Способ продольного сканирования, путем перемещения искательной системы вдоль шва. Искательная система содержит один

или несколько приемно-излучающих элементов, озвучивающих все сечение шва (рис. 4.38, а).

2. Способ поперечного сканирования, путем поперечного перемещения искательной системы перпендикулярно ко шву. Искательная система содержит один или несколько приемно-излучающих элементов, озвучивающих часть сечения шва по всей его длине (рис. 4.38, б).

3. Способ продольно-поперечного сканирования, при котором искательная система содержит один или несколько приемно-излучающих элементов, одновременно озвучивающих узкую область наплавленного металла. Этот способ выполняется путем продольно-поперечного перемещения искательной системы (рис. 4.38, в).

4. Способ бегающего луча обеспечивает ввод луча в металл под одним или разными фиксированными углами. Искательная система содержит мозаику из приемно-излучающих элементов, каждый из которых прозвучивает узкую область шва. Сканирование шва выполняется путем последовательного переключения приемно-излучающих элементов, благодаря чему луч обегает весь контролируемый объем, в то время как сама искательная система находится в покое относительно контролируемого соединения (рис. 4.38, г).

5. Способ качающегося луча, при котором искательная система содержит один или несколько приемно-излучающих элементов, в любой момент прозвучивающих узкую область шва. Сканирование шва проводится путем качания луча и перемещения искательной системы вдоль шва (рис. 4.38, д).

При контроле различных изделий и сварных соединений можно применять как перечисленные способы сканирования, так и некоторые их комбинации. Однако любую схему сканирования всегда при рассмотрении можно заменить эквивалентным способом из предложенной выше классификации.

Сканирование осуществляется или за счет механизированного перемещения специальной каретки с искателем по соединению, или соединения в специальной установке.

Способ сканирования обуславливает объем информации, который может быть зафиксирован на ультразвукограмме при автоматизированном контроле. При автоматизированном контроле в ряде случаев желательно получать документ в виде ультразвукограмм двух видов.

Ультразвукограмма I вида характеризует отсутствие или наличие в шве дефектов, их расположение по длине и ширине шва и относительные размеры, а иногда и глубину залегания. Ультразвукограмма II вида представляет собой фотографию изображения поперечного сечения шва в месте обнаружения дефекта, характеризующая конфигурацию выявленных дефектов и их расположение по сечению шва.

Искажения в изображениях дефектов на ультразвукограммах во многом определяются способом сканирования и разрешающей способностью аппаратуры.

При механизированном сканировании особо остро встают вопросы непрерывной или систематической проверки основных параметров

контроля, что значительно усложняет аппаратуру. Однако до настоящего времени не решена задача автоматической непрерывной проверки и подстройки предельной чувствительности контроля с учетом возможных изменений качества акустического контакта.

Не менее сложной задачей оказывается автоматическая оценка качества соединения в процессе его контроля.

При автоматической оценке качества проконтролированного соединения используют дешифратор — счетно-решающее устройство, программированное в соответствии с техническими условиями на качество сварки, в которое непрерывно при контроле вводят данные прозвучивания. Перечисленные сложности препятствуют применению установок для автоматического контроля швов. В то же время уже находят широкое применение стационарные и передвижные установки для механизированного ультразвукового контроля сварных соединений с получением документа и с автоматизированной оценкой.

МАГНИТНЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

5.1. КЛАССИФИКАЦИЯ И ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДОВ

Электромагнитные методы контроля основаны на регистрации изменения взаимодействия электромагнитного поля с контролируемым и эталонным объектами контроля. Для этих целей используют широкий спектр электромагнитных явлений, начиная от постоянного электрического и магнитного поля до переменных полей с частотами порядка десятков миллионов герц. Дальнейшее увеличение частоты приведет к диапазону, характерному для методов проникающей радиации.

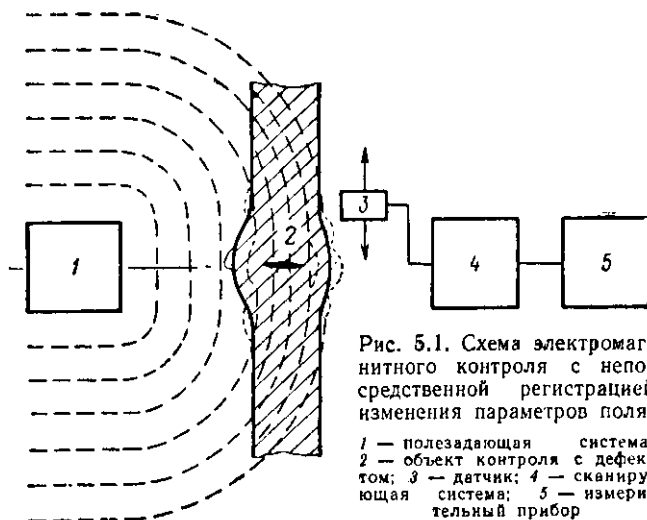
Для электромагнитных методов контроля используют диапазон частот, в пределах которого справедливы уравнения Максвелла, являющиеся основой макроскопической теории электромагнитного поля. Для проникающих излучений уравнения Максвелла неприменимы в связи с квантовым характером передачи энергии.

5.1.1. Принципиальная схема контроля

Из обобщенной схемы электромагнитного контроля (рис. 5.1) следует, что электромагнитное поле источника ползающей системы 1 взаимодействует с объектом контроля 2. В результате взаимодействия в окрестности объекта контроля поле приобретает структуру, присущую только данному объекту.

Структуру поля вблизи наружной поверхности объекта можно установить с помощью регистратора — датчика 3, перемещаемого вдоль поверхности контролируемого объекта, сканирующей (считывающей) системы 4, и измерительного прибора 5.

При отклонении параметров контролируемого объекта от эталона, не имеющего недопустимых дефектов и отклонений параметров, свойств, геометрии, а также при появлении дефектов сплошности, структура поля вблизи поверхности контролируемого объекта изменяется. По измеренному изменению параметров поля контролируемого объекта относительно эталона можно судить об изменении параметров контролируемого объекта и о наличии дефектов в нем.



5.1.2. Классификация методов

Для контроля качества сварных швов на изделиях из ферромагнитных сталей наиболее широкое промышленное применение и развитие получили магнитные (магнитостатические) методы контроля. Интенсивно развиваются электромагнитные (вихретоковые) методы, пригодные для контроля сварных швов на изделиях из токопроводящих неферромагнитных и ферромагнитных материалов.

Электротоковые и электростатические, а также радиоволновые и тепловые методы не получили пока большого развития и применения в практике производственного контроля сварки.

Магнитные и электромагнитные методы контроля подразделяют по способам возбуждения и регистрации полей. Классификация магнитных методов контроля представлена на схеме 5.1 и электромагнитных (вихретоковых) на схеме 5.2. Для магнитного контроля используют импульсные, постоянные, переменные (до 100 Гц) и комбинированные магнитные поля. Изделия можно контролировать как при намагничивании (в приложенном магнитном поле), так и после намагничивания до насыщения в поле остаточной намагниченности объекта контроля (в остаточном поле). Первый режим контроля используют при намагничивании постоянным, переменным и комбинированным магнитным полем, второй — только при намагничивании изделий постоянным или импульсным магнитным полем.

По методам регистрации магнитных полей и их неоднородностей, обусловленных дефектами сплошности, магнитные методы контроля подразделяют на магнитопорошковый, магнитографический, магнитоферрозондовый, индукционный, магнитополупроводниковый.

Электромагнитные (вихретоковые) методы подразделяют в основном по полезадающим системам, поскольку регистратором изменений

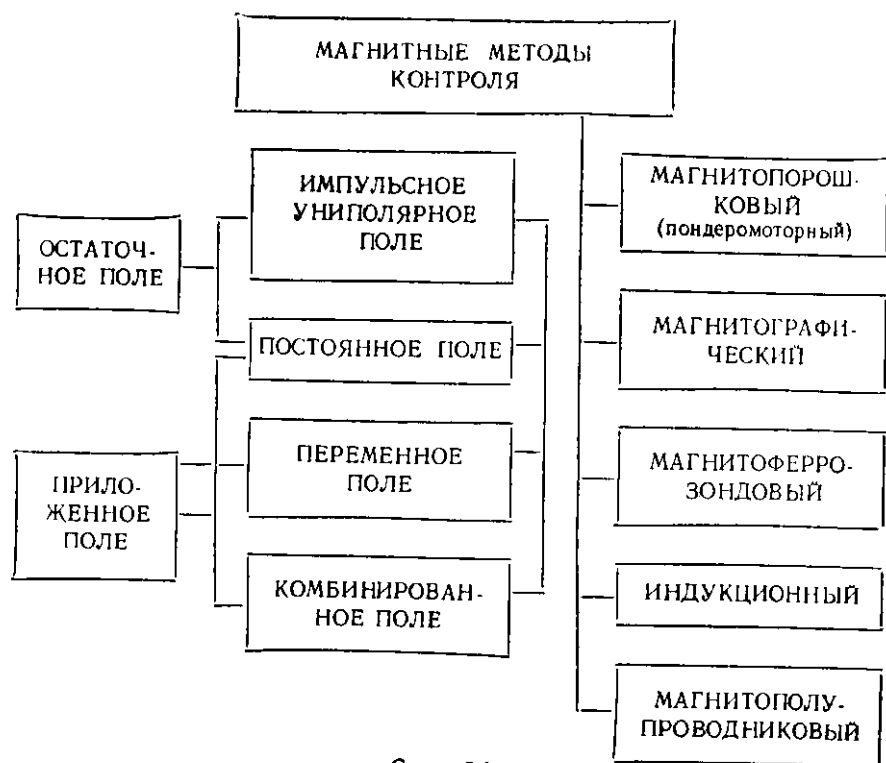


Схема 5.1

электромагнитного поля в подавляющем большинстве случаев служит проводящий контур (катушка). Полезающие системы могут быть проходными (вставными), если катушка с током охватывает деталь или вставляется в нее (например, в трубу, рис. 5.2, а, б), и накладными, когда катушку с током устанавливают на деталь торцом (рис. 5.2, в).

В первом случае электромагнитная волна от полезающей системы распространяется в направлении контролируемого объекта, во втором — вдоль его поверхности.

Измерительные катушки могут быть выполнены отдельно, от генераторных (полезающих) и обычно располагаются вблизи поверхности контролируемого

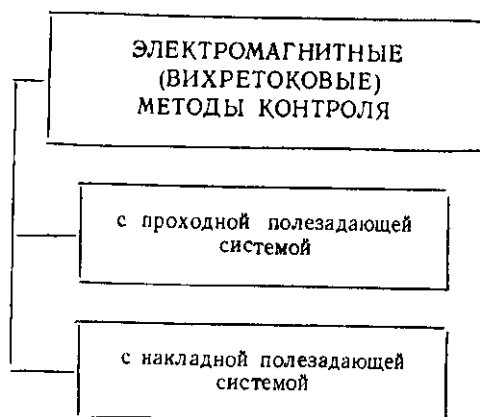


Схема 5.2

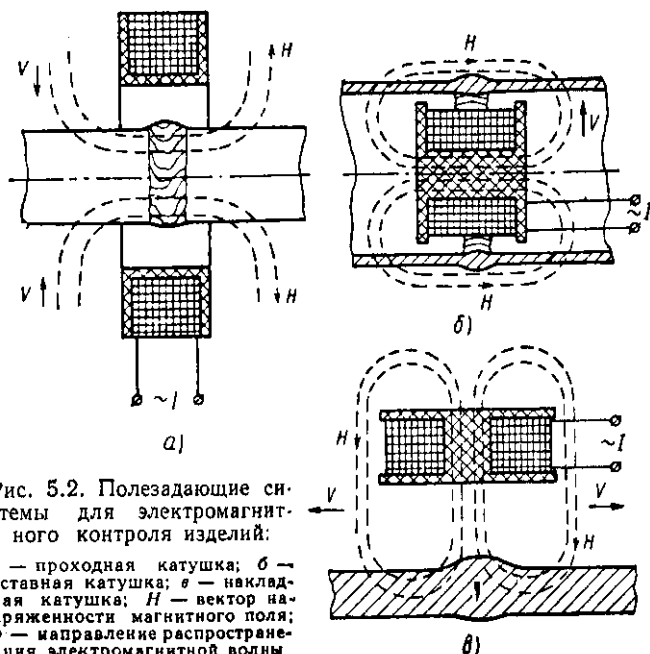


Рис. 5.2. Полезадающие системы для электромагнитного контроля изделий:

а — проходная катушка; б — вставная катушка; в — накладная катушка; H — вектор напряженности магнитного поля; V — направление распространения электромагнитной волны

изделия (рис. 5.3). Иногда удается совместить функции полезадающей и измерительной катушек в одной (например при резонансных методах измерения). Существуют еще дополнительные разделения электромагнитных методов по особенностям схемных решений, на которых мы не будем останавливать внимание. При электромагнитных методах контроля может быть использован также метод регистрации перераспределения поля вихревых токов по выделению теплоты и перераспределению температуры контролируемой детали.

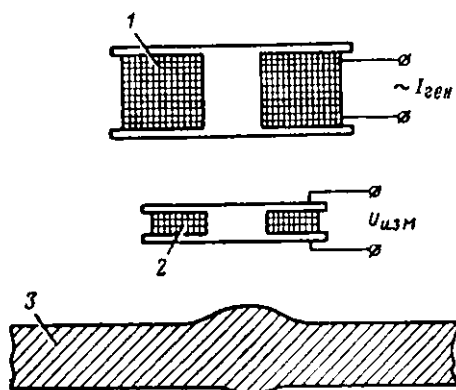


Рис. 5.3. Схема регистрации параметров электромагнитного поля при электромагнитном (вихретоковом) контроле:

1 — полезадающая катушка (генераторная); 2 — измерительная катушка; 3 — контролируемое изделие

Разновидности схем контроля. По способу индикации первичной информации о параметрах электромагнитного поля различают схемы контроля без преобразования в электрический сигнал (визуальный) и с преобразованием в электрический сигнал (метрический). В первой группе схем контроля информация о дефектах воспринимается непосредственным наблюдением косвенных признаков, вызванных измене-

нием электромагнитного поля, например осаждение поляризованных или намагниченных частиц на поверхности контролируемого изделия вблизи мест расположения дефектов (рис. 5.4). Вторая группа схем основана на преобразовании параметров электромагнитного поля в электрический сигнал. Эта группа схем контроля более информативна по сравнению с первой. Она позволяет обнаруживать не только дефекты сплошности, но и неравномерность свойств материала, отклонения геометрии и эталона и т. п. Кроме того, вторая группа схем легко согласуется с системами автоматической обработки измерительной информации, а также автоматизированными системами управления технологическими процессами (АСУТП).

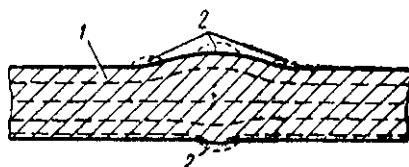


Рис. 5.4. Схема контроля с использованием поляризованных частиц:

1 — объект контроля; 2 — осажденные поляризованные частицы

Системы контроля с преобразованием в электрический сигнал, в свою очередь, подразделяют на следующие три подгруппы.

В первую входят системы с непосредственным преобразованием параметров электромагнитного поля в электрический сигнал с помощью датчиков и сканирующих устройств (см. рис. 5.1, 5.3).

Во вторую входят системы с промежуточной регистрацией параметров электромагнитного (магнитного) поля на специальный носитель записи (например, на магнитную пленку) и с последующим преобразованием записанной информации в электрический сигнал (рис. 5.5). Промежуточный носитель записи может запоминать информацию о поле вблизи поверхности изделия (например, в виде остаточной намагниченности пленки) или в любой иной форме (по изменению окраски и т. п.).

Третья подгруппа систем контроля основана на преобразовании в электрический сигнал косвенных признаков изменения электромагнитного поля. К ним относятся осаждение поляризованных (намагниченных) частиц или неравномерность температурного поля (теплового излучения) поверхности изделия, вызванная перераспределением энергии электромагнитного поля вследствие наличия

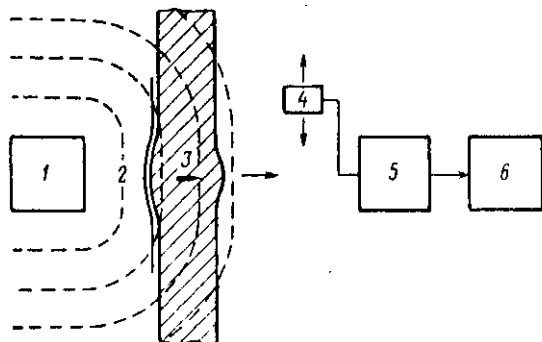


Рис. 5.5. Схема контроля с промежуточным носителем информации:

1 — ползущая система; 2 — промежуточный носитель информации; 3 — объект контроля с дефектом; 4 — датчик-преобразователь; 5 — сканирующая система; 6 — измерительный прибор

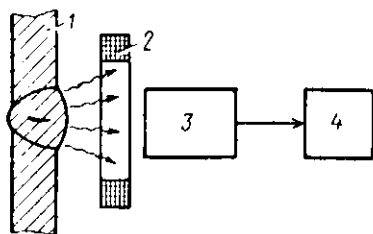


Рис. 5.6. Схема контроля с регистрацией теплового излучения:

1 — объект контроля с дефектом; 2 — ползающая система; 3 — преобразователь теплового (инфракрасного) излучения; 4 — измерительный прибор

дефектов или неоднородности свойств материала в контролируемом изделии (рис. 5.6).

По взаимному расположению ползающей системы и регистраторов относительно контролируемого изделия различают схемы контроля с односторонним и двусторонним (экранные) подходом к изделию. В первом случае ползающая и регистрирующая системы находятся по одну сторону от контролируемого изделия. Во втором — изделие находится между ползающей и регистрирующей системами.

5.1.3. Физические основы методов

Характеристики электромагнитного поля. Изложенные ниже основные положения теории электромагнитного поля общие для всех электромагнитных методов контроля. Основные характеристики электромагнитного поля: $\vec{E}$ — напряженность электрического поля; $\vec{D}$ — электрическая индукция; $\vec{H}$ — напряженность магнитного поля; $\vec{B}$ — магнитная индукция.

Векторы поля есть функции времени и координат точки наблюдения. Для поля в вакууме справедливы соотношения

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}; \quad \vec{B} = \mu_0 \vec{H},$$

где $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \approx \frac{1}{36\pi} 10^{-9}$ Ф/м; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} = 1,256 \cdot 10^{-6}$ Г/м.

Электромагнитные свойства материалов. Связь векторов поля в материальной среде характеризуют уравнениями

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}; \quad \delta = \sigma \vec{E}; \quad \vec{B} = \mu \vec{H},$$

где ϵ — диэлектрическая проницаемость; σ — удельная проводимость; δ — плотность тока проводимости; μ — магнитная проницаемость.

Эти параметры, выражающие макроскопические электромагнитные свойства среды, устанавливают экспериментально.

Постоянные ϵ_0 и μ_0 называют по аналогии с ϵ и μ проницаемостью вакуума. В отношении взаимодействия с электромагнитным полем все вещества и среды подразделяют на классы (группы) в соответствии с числовыми значениями параметров σ , ϵ , μ .

В зависимости от степени электропроводности вещества делят на проводники и диэлектрики (изоляторы). У идеального провод-

ника $\sigma \rightarrow \infty$, а у идеального диэлектрика $\sigma \rightarrow 0$. Промежуточную область составляют полупроводники. Деление веществ на проводники и диэлектрики весьма условно. Эта условность особенно ярко проявляется при взаимодействии гармонически изменяющихся с некоторой круговой частотой ω полей со средами. При этом среду характеризуют как диэлектрик, если $\sigma/\omega\epsilon \ll 1$, и как проводник, если $\sigma/\omega\epsilon \gg 1$.

В том диапазоне частот, который используют для дефектоскопии, свойства сред изменяются довольно существенно (см. рис. 5.7). Можно считать, что с ростом частоты вещество приобретает диэлектрические качества.

Удельные проводимости металлов изменяются в пределах $0,5 \cdot 10^7 \div 6 \cdot 10^7$ См/м, а диэлектриков от 10^{-12} до $2 \cdot 10^{-17}$ См/м. Относительная диэлектрическая проницаемость сред $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$ всегда больше единицы. Для воды она достигает значения 81,1; для пластмасс составляет 1,8—2,8. Сухой воздух имеет относительную диэлектрическую проницаемость 1,0006. Относительная магнитная проницаемость $\mu_r = \mu/\mu_0$ большинства веществ чаще всего незначительно отличается от единицы. Различают парамагнетики ($\mu_r > 1$) и диамагнетики ($\mu_r < 1$). Исключение составляют ферромагнетики, у которых относительная проницаемость может составлять десятки и сотни тысяч единиц.

Диамагнетики есть газы He, Ar, Kr, Xe, H, N, Cl, Br, а также ряд металлов и полупроводников: Be, Cu, Zn, Ag, Cd, Sb, Au, Bi, Se. Наиболее сильными диамагнитными свойствами обладают Se, Bi, As, Au, Ag и Cd. Ферромагнитными свойствами обладают следующие чистые металлы: Fe, Co, Ni, Gd, Dy, Er, а также некоторые сплавы неферромагнитных элементов.

Макроскопические параметры веществ и сред в большинстве случаев можно считать не зависящими от векторов поля. Исключение составляют ферромагнетики — вещества, магнитная проницаемость μ которых значительно и сложным образом зависит от магнитного поля.

Так как ферромагнитными свойствами обладает большинство сталей и сплавов железа, то рассмотрим особенности этого класса веществ. Состояние ферромагнитного материала в постоянном магнитном поле характеризуется кривой намагничивания, отражающей зависимость индукции от напряженности магнитного поля $B(H)$ (рис. 5.8). Для построения этой кривой необходимо, чтобы образец находился в предварительно размагниченном состоянии.

Кривую намагничивания ферромагнетиков разделяют на несколько участков.

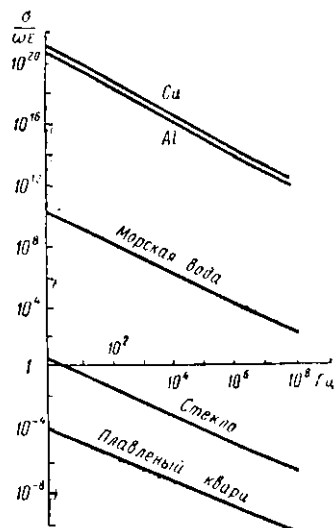


Рис. 5.7. Изменение свойств сред с увеличением частоты электромагнитного поля

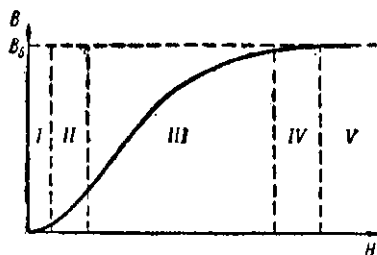


Рис. 5.8. Кривая намагничивания ферромагнитных материалов

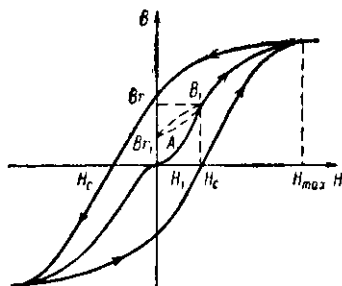


Рис. 5.9. Петля гистерезиса

Участок I характеризуется обратным намагничиванием. В его пределах μ постоянна. Участки II, III, IV характеризуют отдельные фазы необратимого намагничивания, связанного с доменной структурой ферромагнетика. Последний участок V весьма близок по характеру изменения к парамагнитному процессу.

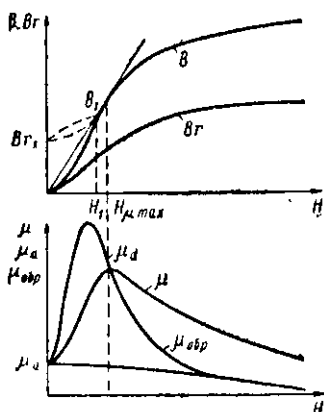
При знакопеременном намагничивании ферромагнетика наблюдается явление гистерезиса (рис. 5.9). Форма и размеры петли гистерезиса при знакопеременном намагничивании зависят от величины максимального значения амплитуды поля H , но, начиная с некоторого значения $H_{\max}$, становятся независимыми от поля. Такая петля получила наименование предельной петли гистерезиса. Значение индукции, получаемое при уменьшении напряженности поля до нуля, называется остаточной индукцией Br . Значение напряженности противоположно направленного магнитного поля, при котором индукция равна нулю, называют коэрцитивной силой H_c .

Циклическое намагничивание вещества пульсирующим полем приводит к изменению петли гистерезиса. Если ферромагнетик из начального состояния намагнитить полем H_1 , то намагниченность в нем будет изменяться в соответствии с кривой начального намагничивания $B(H)$. При уменьшении поля H до нуля размагничивание пойдет по спинке петли гистерезиса до Br_1 . При повторном намагничивании до H_1 намагниченность начнет возрастать по участку петли Br_1AB_1 (рис. 5.9). Петля Br_1B_1 носит название частной петли гистерезиса.

Полная проницаемость μ ферромагнетика определяется отношением величины индукции B к соответствующему значению магнитного поля H в данной точке кривой индукции:

$$\mu = B/H.$$

Рис. 5.10. Изменение индукции и проницаемости ферромагнитных материалов



На рис. 5.10 показано, что полная проницаемость при определенном значении поля H достигает максимального значения. Максимальную проницаемость

нетрудно найти по основной кривой $B(H)$. Для этого из начала координат проводят касательную к основной кривой индукции. Максимальный угол наклона этой касательной определяет значение максимальной проницаемости.

Кроме полной проницаемости различают дифференциальную μ_d , начальную μ_a и обратимую $\mu_{обр}$ проницаемости, которые имеют важное значение при формировании структуры электромагнитных полей вблизи поверхности контролируемого изделия. Если магнитное состояние вещества фиксируется в какой-либо точке на основной кривой индукции, то при увеличении магнитного поля на величину ΔH возрастает и индукция на величину ΔB . Соответственно смещается точка на кривой индукции. Предел отношения $\Delta B/\Delta H$ при $\Delta H \rightarrow 0$ называется дифференциальной проницаемостью:

$$\mu_d = \lim_{\Delta H \rightarrow 0} \Delta B/\Delta H.$$

Начальная проницаемость определяется как

$$\mu_a = \lim_{H \rightarrow 0} B/H.$$

Наклон частной петли гистерезиса характеризуется обратной проницаемостью

$$\mu_{обр} = \lim_{\Delta H_1 \rightarrow 0} \Delta B_1/\Delta H_1.$$

Иногда магнитное состояние вещества характеризуют не магнитной индукцией B , а намагниченностью J , которая пропорциональна результирующему магнитному моменту. Она зависит от магнитного момента единицы объема вещества (магнитной восприимчивости) κ и напряженности магнитного поля H :

$$J = \kappa H. \quad (5.1)$$

Величина магнитной восприимчивости диа- и парамагнитных веществ очень мала (10^{-3} до 10^{-6}), причем у диамагнитных веществ она отрицательна. Для ферромагнетиков существует сильная зависимость κ от напряженности магнитного поля, причем κ достигает значений до 10^6 .

От намагниченности к индукции и от магнитной восприимчивости к проницаемости можно перейти с помощью соотношений:

$$B = H + 4\pi J; \quad \mu = 1 + 4\pi \kappa.$$

Откуда

$$J = (B - H)/4\pi; \quad \kappa = (\mu - 1)/4\pi.$$

Из последних соотношений следует, что все сказанное выше об индукции и проницаемости справедливо для намагниченности и восприимчивости. При повышении температуры намагниченность J ферромагнетиков уменьшается, причем при некоторой температуре θ (точка Кюри) ферромагнетизм исчезает и металл становится парамагнитным.

Влияние примесей на электромагнитные свойства металлов. Электропроводность металлов зависит от их структуры, обусловлен-

ной режимами термической и механической обработки, химической чистоты и распределения легирующих материалов.

Так, например, присутствие 0,1% фосфора, мышьяка, железа или кремния в меди вызывает изменение электропроводности на $(0,5 \div 1) \cdot 10^7$ См/м, что составляет 10—20% нормы. Хром мало влияет на электропроводность. Титан и кобальт уменьшает ее весьма сильно.

Сплавы алюминия АМг2, АМг3, АМг6, а также АК8, АК6, Д1, В93, В95 отличаются по электропроводности на $0,5 \cdot 10^7$ См/м, и более, т. е. приблизительно на 20% номинального значения. Электропроводность естественно стареющих алюминиевых сплавов в свежавакаленном состоянии выше, чем в состаренном. Она зависит от температуры нагрева под закалку и времени выдержки. При перегреве электропроводность резко уменьшается.

Электропроводность многих термообработанных алюминиевых сплавов, бериллиевой бронзы, латуней, сплавов титана и ряда других металлов связана с твердостью и прочностью. При работе в условиях повышенных температур их прочность снижается, а электропроводность, как правило, увеличивается.

По изменению электропроводности можно получить информацию о химическом и фазовом составе металла; режимах термообработки; можно сортировать металл по маркам, оценивать твердость и прочность стареющих алюминиевых и других сплавов; управлять процессом плавки и сварки специальных сплавов с высоким содержанием меди и добавками кадмия, олова, свинца и кремния.

Магнитные свойства монокристаллов ферромагнетиков анизотропны. Магнитная анизотропия наблюдается и у поликристаллов при наличии текстуры (направленной волокнистости). Намагниченность насыщения J_s , точка Кюри θ , константа анизотропии — структурно-нечувствительные характеристики металла, т. е. в первом приближении зависят только от состава, атомного строения, кристаллической структуры. Для неферромагнитных металлов к структурно-нечувствительным характеристикам относятся магнитная восприимчивость χ и магнитная проницаемость μ .

На значения χ , μ , J , B в слабых и средних магнитных полях, а также на значения H_c ферромагнетиков оказывают влияние особенности микроструктуры: величина зерна, форма и распределение структурных составляющих в гетерогенной среде, фазовый состав, а также механические напряжения и интенсивность пластической деформации. Даже такой классический ферромагнетик, как железо (Fe), в зависимости от типа решетки может быть ферромагнетиком и парамагнетиком. Так, например, феррит — ферромагнитен, аустенит — парамагнитен. Твердые растворы неферромагнитных элементов в железе, имеющие гранцентрированную кубическую решетку (безуглеродистые сплавы и аустенитные сплавы и стали), обычно также парамагнитны. При легировании железа ферромагнитными элементами (Ni, Co) при определенных концентрациях образуются твердые растворы с г. ц. к. решеткой, обладающие ферромагнитными свойствами.

Химические соединения Fe с углеродом и азотом ферромагнитные при комнатной температуре. Окислы железа могут быть ферромагнитными, парамагнитными и антиферромагнитными. Многие интерметаллические соединения железа даже при очень большом содержании Fe парамагнитны, однако в случае упорядочения могут быть и ферромагнитными (например Fe_3Al).

Для обычных мало- и среднелегированных конструкционных сталей после закалки или изотермической обработки, когда основной структуры служит ферромагнитная фаза (мартенсит, бейнит), а количество аустенита не превышает 10—15%, насыщение достигается уже в полях $H \cong 800 + 1200$ А/см. При малых количествах ферромагнитной фазы в парамагнитной основе (например, небольших количествах δ -феррита в аустенитных сталях или мартенсита в коррозионностойких сталях и т. п.) для насыщения требуются поля не менее 4000—5000 А/см, а во многих случаях и до 8000 А/см.

По изменению магнитных характеристик вещества можно судить о количественном соотношении фаз в сталях (в частности, аустенита и мартенсита, аустенита и δ -феррита) исследовать состояние сталей после термического воздействия (термообработки, сварки), обнаруживать кристаллографическую текстуру, получающуюся при прокате, контролировать кинетику превращения и количественное соотношение фаз после изотермической закалки высокопрочных сталей.

Электромагнитное поле в однородной безграничной среде. Электромагнитное поле — особая форма материи, взаимодействие которой со средой описывается уравнениями Максвелла. Эти уравнения основные в макроскопической теории электромагнитного поля, имеющей дело с осредненными свойствами окружающего пространства и физических сред.

Уравнения Максвелла:

Дифференциальная форма	Интегральная форма
$\text{rot } \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t};$	$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = - \frac{d}{dt} \int_S \vec{B} d\vec{S};$

(5.2)

$\text{div } \vec{D} = \bar{\rho};$	$\oint_S D d\vec{S} = q;$
-------------------------------------	---------------------------

(5.3)

$\text{rot } \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \delta;$	$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \frac{d}{dt} \int D d\vec{S} + \int \delta d\vec{S};$
$\text{div } \vec{B} = 0;$	$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0,$

(5.4)

где $\bar{\rho}$ — объемная плотность заряда; q — электрический заряд.

Уравнение (5.2) представляет закон электромагнитной индукции, который часто записывается несколько иначе:

$$\epsilon = -d\Phi/dt, \quad (5.5)$$

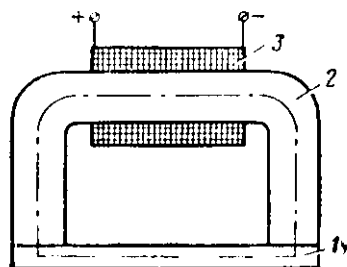


Рис. 5.11. Магнитная цепь и ее электрический аналог:

1 — образец; 2 — магнитопровод; 3 — катушка

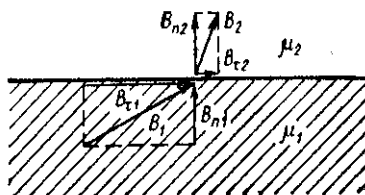
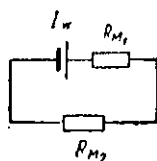


Рис. 5.12. Преломление вектора индукции на границе раздела двух сред

где e — электродвижущая сила в проводящем контуре; Φ — магнитный поток, охватываемый этим контуром.

Для качественного и количественного описания взаимодействия электромагнитного поля с веществом и телами удобно рассматривать область вне источника электромагнитного поля. Такое поле часто называют полем внешнего источника. Наиболее простой вид поля внешнего источника есть однородное поле, в каждой точке которого векторы магнитной и электрической индукции имеют постоянную величину и направлены в одну и ту же сторону. Между постоянным магнитным полем, а также электрическим полем в проводнике и диэлектрике существует формальная аналогия, позволяющая переносить решения одной и той же задачи на разные случаи электромагнитных полей простой заменой векторов и свойств веществ: $\vec{D}$, $\vec{E}$, $\vec{B}$ и ϵ , σ , μ .

Постоянное магнитное поле внешнего источника, возбуждаемое в контролируемом образце, зависит от параметров самого материала и полезадающей системы. На рис. 5.11 представлен замкнутый магнитопровод, состоящий из образца и полезадающей системы в виде электромагнита постоянного тока (2 — магнитопровод и 3 — катушка возбуждения).

Магнитодвижущая сила Iw , измеряемая числом ампер-витков, возбуждает магнитный поток в замкнутом контуре 1—2. При равенстве поперечных сечений магнитопровода и образца поле в образце будет определяться из соотношения

$$H_1 = Iw/l_1 + \frac{\mu_1}{\mu_2} l_2,$$

где l_1 и l_2 — длина, μ_1 и μ_2 — магнитная проницаемость образца и магнитопровода соответственно.

При постоянной геометрии и магнитодвижущей силе поле в образце зависит от соотношения магнитных проницаемостей образца и полезадающей системы. Это обстоятельство имеет важные следствия для проектирования полезадающих систем и выбора режимов контроля при магнитной дефектоскопии.

При переходе через границу раздела двух сред, характеризующихся параметрами μ_1 и μ_2 , вектор напряженности постоянного магнитного поля H внешнего источника преломляется. Тангенциальная составляющая вектора напряженности сохраняет свою величину неизменной: $H_{\tau_2} = H_{\tau_1}$. Нормальная составляющая вектора индукции при переходе через границу раздела сред непрерывна и сохраняет свою величину неизменной (рис. 5.12): $B_{n_2} = B_{n_1}$.

Учитывая соотношение $\vec{B} = \mu \vec{H}$, получим $H_{n_2}/H_{n_1} = \mu_2/\mu_1$. Таким образом, нормальная составляющая вектора напряженности поля претерпевает разрыв на границе двух сред.

Распространение электромагнитных колебаний в сплошных средах сопровождается затуханием, т. е. убыванием амплитуды напряженности электрической и магнитной напряженности по мере удаления от источника (полезадающей системы). Это затухание подчиняется экспоненциальному закону

$$H_x = H_0 e^{-kx}; \quad E_x = E_0 e^{-kx},$$

где H_x и E_x — соответствующие амплитудные значения напряженности магнитного и электрического поля на некотором расстоянии x от начала отсчета, характеризующегося значениями H_0 , E_0 ; k — коэффициент затухания.

При распространении электромагнитных волн в диэлектрике

$$k = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}.$$

Так как удельная проводимость диэлектрика σ весьма мала, то затухание сравнительно невелико и во многих случаях им пренебрегают. Затухание электромагнитных волн в проводниках зависит от частоты и на много порядков превосходит затухание в диэлектриках:

$$k = \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma}{2}}.$$

В пределе при $\sigma \rightarrow \infty$ (идеальный проводник) коэффициент затухания $k \rightarrow \infty$, т. е. переменное электромагнитное поле не может существовать в идеальной проводящей среде.

При падении плоской электромагнитной волны на границу раздела двух сред, имеет место отражение и преломление волны.

Электромагнитное поле в первой среде представляет собой суперпозицию падающей и отраженной волн, а во второй — только прошедшую волну.

При любых углах падения на границу плотной поглощающей среды преломленная волна распространяется в направлении нормали к границе. Поглощение энергии средой вызывает экспоненциальное затухание волн (рис. 5.13). Волна, входящая в проводник, затухает в $e = 2,718 \dots$ раз на глубине

$$\Delta^0 = 1/k = \sqrt{2/\omega \mu \sigma} = A/\sqrt{f}.$$

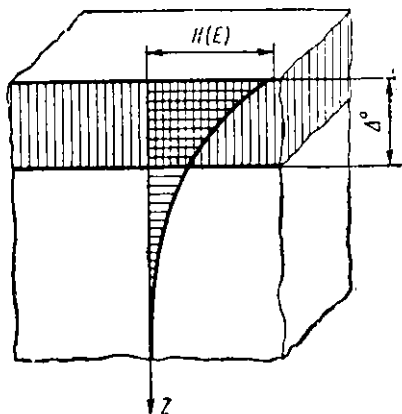


Рис. 5.13. Затухание электромагнитного поля в проводящей среде

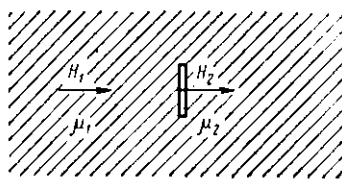


Рис. 5.14. Тонкая трещина в сплошном материале

Величина Δ° называется глубиной проникновения электромагнитного поля. Значение постоянной A зависит от электропроводности и магнитной проницаемости материала. Для серебра и меди оно близко к 65, для алюминия — 82,6, для латуни — 127 и т. д. При постановке в формулу частоты в герцах глубина проникновения получается в миллиметрах. На расстоянии нескольких Δ° поле становится весьма слабым. Так, на глубине $10\Delta^\circ$ амплитуда поля окажется в $e^{10} = 22026$ раз меньше, чем на границе. Поэтому электромагнитное поле на большой глубине пренебрежимо мало, и глубокие слои оказывают исчезающе малое влияние на электромагнитный процесс.

Затухание электромагнитных волн препятствует выявлению дефектов, залегающих глубоко от поверхности, особенно при высоких частотах электромагнитных колебаний.

Искажение поля дефектами. Определить векторы поля в каждой точке пространства при заданных граничных условиях можно с помощью уравнений Максвелла. Методы решения конкретных задач на основе уравнений Максвелла рассмотрены в специальных курсах теории электромагнитного поля и теоретических основ электротехники. В данном разделе ограничимся лишь качественным анализом этих решений.

Рассмотрим характер изменения однородного магнитного поля внутри безграничного парамагнетика с дефектом в виде тонкого плоского параллелепипеда, расположенного перпендикулярно к вектору H (рис. 5.14).

Положим, что проницаемость парамагнетика равна μ_1 , а полости дефекта μ_2 . Тогда в соответствии с условиями на границе раздела двух сред, нормальная компонента вектора магнитной индукции сохраняет свою величину:

$$B_{n1} = B_{n2}; \mu_1 H_1 = \mu_2 H_2.$$

Откуда

$$H_2 = \frac{\mu_1}{\mu_2} H_1.$$

Если $\mu_1 > \mu_2$, то поле внутри полости H_2 больше, чем поле внутри сплошного парамагнетика H_1 . Оно является вторичным полем, вызванным первичным от внешнего источника, и имеет местный (локальный) характер.

Пример 5.1. Вычислим, во сколько раз поле внутри дефекта больше поля в основном металле (Ст3) при режиме намагничивания $H = 100 \text{ А/см} = 10^4 \text{ А/м}$. По кривой намагничивания металла определим значение индукции B . Оно приблизительно равно 2,1 Т. Поле внутри трещины

$$H_2 = \frac{\mu_1}{\mu_2} H_1 = \frac{B/H_1}{\mu_2} H_1 = \frac{B}{\mu_2}.$$

Проницаемость воздуха приблизительно равна проницаемости вакуума (пустоты):

$$\mu_2 = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} = 1,256 \cdot 10^{-6} \text{ Г/м};$$

$$H_2 = \frac{2,1}{1,256 \cdot 10^{-6}} = 167 \cdot 10^4 \text{ А/м},$$

т. е. поле внутри полости трещины в 167 раз больше, чем в металле.

Проведенные соотношения лишь весьма приближенно отражают процесс формирования поля дефекта. Более строгие параметры поля можно найти на основе принципа суперпозиции. Согласно этому принципу поле, образованное несколькими источниками, представляет собой сумму полей каждого из источников, существующих в тех же условиях отдельно.

Исходя из этого принципа можно показать, что при наличии дефектов в однородной изотропной среде, находящейся в однородном внешнем поле, однородность последнего нарушается.

Однородное поле в сплошной среде H_e можно представить как суперпозицию поля H_1 — пространства с дефектом и поля H_2 — материала, заполняющего полость дефекта (рис. 5.15, а). Учитывая принцип суперпозиции, можно записать $H_e = H_1 + H_2$. Откуда искомое решение будет иметь вид:

$$\vec{H}_1 = \vec{H}_e - \vec{H}_2 = \vec{H}_e + (-\vec{H}_2).$$

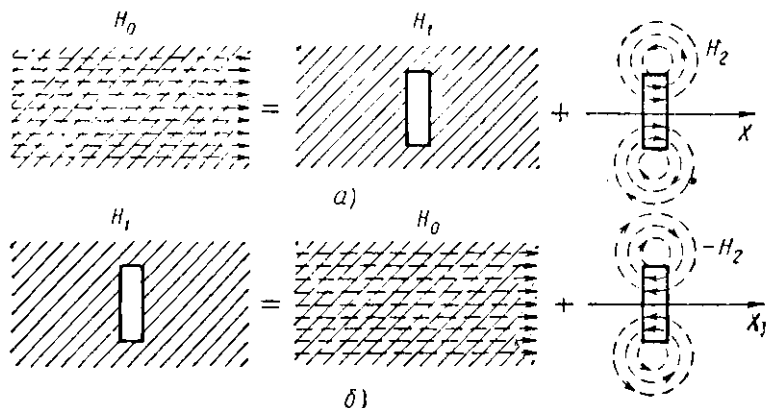


Рис. 5.15. К определению поля дефекта

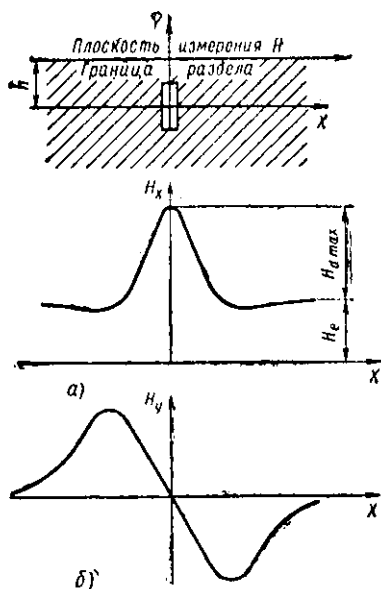


Рис. 5.16. Изменение составляющих поле дефекта:

а — тангенциальная; б — нормальная

рис. 5.16, а, практически не зависящий от формы локального дефекта уже на сравнительно небольшом удалении от его поверхности. Нормальная вертикальная составляющая поля дефекта H_y имеет характер, изображенный на рис. 5.16, б, и также мало зависит от формы дефекта.

Амплитудные значения составляющих полей зависят от размеров дефектов, их ориентации по отношению к внешнему полю, соотношения проницаемостей среды и дефекта, а также от расстояния до точек наблюдения. Чем больше дефекты, ближе к дефекту точки наблюдения изменения поля и чем больше отличие проницаемостей, тем больше амплитудные значения составляющих полей дефектов.

Для получения максимального возмущения поля внешнего источника дефектом ориентация внешнего поля должна быть такой, чтобы вектор напряженности был направлен перпендикулярно к плоскости дефекта или к его наибольшему размеру. Тогда поле дефекта совпадает с внешним полем по направлению и будет давать максимально возможные амплитудные значения. В противном случае поле дефекта самопроизвольно ориентируется в направлении нормали к стенкам трещины (дефекта), а интенсивность его быстро убывает с увеличением угла между нормалью и направлением намагничивания.

Следует особо подчеркнуть, что «дефектами» с точки зрения теории электромагнитного поля могут быть не только нарушения сплош-

Последнее уравнение можно представить как суперпозицию однородного магнитного поля и поля материала полости дефекта, имеющего намагниченность противоположного знака (рис. 5.15, б). Поскольку первичное поле однородно, то задача сводится по существу к определению поля намагниченного тела, имеющего форму и размеры дефекта.

Решение указанной задачи для дефектов сравнительно простой формы (трещины, эллипсоида, цилиндра, сферы) весьма громоздко. Однако можно дать некоторый качественный анализ этих решений.

Все дефекты сплошности изотропных сред приводят к возникновению местной неоднородности поля, достаточно быстро убывающей по мере удаления от дефекта (примерно пропорционально второй степени расстояния). Тангенциальная (продольная) составляющая поля дефекта H_x имеет характер, изображенный на

ности сред, но и локальные нарушения однородности изотропности магнитных, диэлектрических и электрических параметров μ , ϵ и σ .

Сварной шов в постоянном поле. Наружные границы тел существенно влияют на поля от дефектов как на самих границах раздела, так и в окружающем тело пространстве. Если граница раздела сред плоская, совпадает с направлением намагничивания и обе среды изотропны (однородны), то поле внешнего источника в обеих средах не искажается. Дефекты одной из сред вызывают искажение поля и в другой среде.

При достаточно большом отношении проницаемостей материала и среды ($\mu_1/\mu_2 \gg 100$) поле дефекта в окружающей среде можно считать примерно вдвое большим, чем в безграничной среде.

При намагничивании сварного шва вдоль его направления поверхность границы раздела сред можно считать в первом приближении совпадающей с направлением намагничивания и все сказанное в предыдущем разделе сохраняет свою силу. Задача становится намного сложнее, когда граница раздела сред неплоская в направлении намагничивания. Такой случай встречается, например, при поперечном намагничивании сварного шва с усилением.

На рис. 5.17 приведено изменение тангенциальной составляющей поля вдоль поверхности шва с усилением в направлении намагничивания. Над поверхностью усилительного валика поле H_x существенно уменьшается, причем в переходной зоне от основного металла оно изменяется весьма интенсивно. Поле от дефекта намного меньше, чем в случае плоской поверхности при том же расстоянии от верхней кромки дефекта до поверхности. Это обусловлено тем, что кривизна поверхности сваренного шва совпадает с направлением линий напряженности поля дефекта и ослабляет тангенциальную составляющую последнего. Представленное на рис. 5.17 изменение поля является сложной функцией размеров усилительного валика b и h , его радиуса кривизны R , размеров, формы и глубины залегания дефекта.

Анализ этой функции показывает, что при большой высоте усиления h и малом радиусе R поле дефекта, залегающего достаточно глубоко, становится неразличимым на фоне поля от изменения геометрии. Поле дефекта лишь несколько увеличивает уровень намагниченности валика шва $H_{ш}$, не давая местного изменения намагниченности H_d . Таким образом,

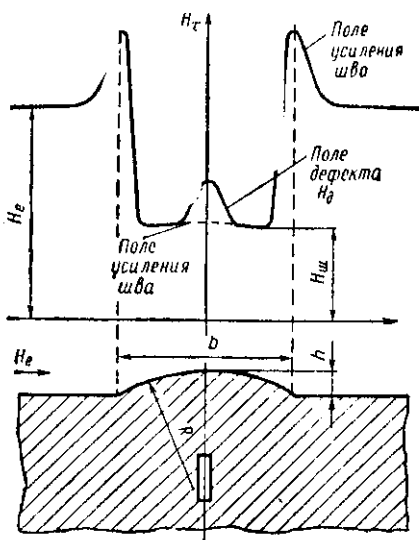


Рис. 5.17. Изменение поля над сварным швом с дефектом

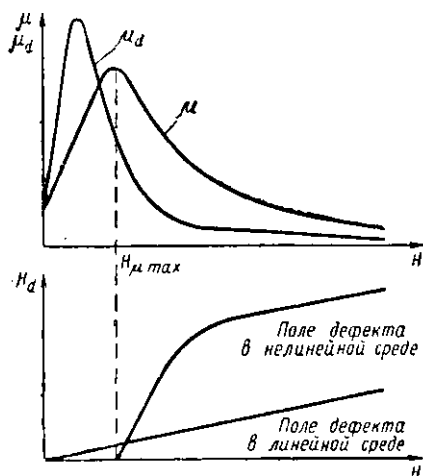


Рис. 5.18. Зависимость поля дефекта от режима намагничивания ферромагнитного материала

сти тела. Дополнительно увеличивается намагниченность от поля дефекта в слое вещества, заключенного между внешней границей раздела и поверхностью вещества. При достаточно сильных полях, когда проницаемость бездефектного тела лежит на участке за $\mu_{\max}$ (см. рис. 5.10), проницаемость этого слоя снижается и это как бы увеличивает эффективный размер дефекта, внося существенный вклад в его поле.

Нелинейность магнитных свойств среды включает в работу не только полную проницаемость среды μ , но и дифференциальную проницаемость μ_d . Структура магнитного поля в окрестности дефекта сложным образом зависит от размеров, формы пространственного положения, взаимной ориентации дефекта и поля, а также от режима намагничивания H , влияющего на соотношение μ_d/μ .

Эти качественные выводы подкреплены экспериментальными исследованиями, из которых следует, что с уменьшением дифференциальной магнитной проницаемости слоя металла над дефектом поле от дефекта значительно возрастает.

Обычно поле от дефекта в нелинейной среде при режиме намагничивания $H > H_{\mu \max}$ (рис. 5.18) в 8—10 раз превосходит поле от дефекта в линейной среде при тех же значениях μ . Последнее справедливо для плоской границы раздела сред. Однако для сложных границ раздела при определенных режимах намагничивания вместо усиления поля дефекта может быть значительное его ослабление, если слой металла над дефектом намагничен до значений, соответствующих $\mu_{\max}$. Это обстоятельство вынуждает для каждого конкретного случая экспериментально исследовать режимы намагничивания в широком диапазоне значений полей H .

при поперечном намагничивании сварных швов выявление дефектов зависит от соотношений размеров усиления сварочного шва.

Строго говоря, поверхность шва при продольном намагничивании также нельзя назвать ровной, так как имеется чешуйчатость, обусловленная характером образования поверхности валика усиления. Неровности поверхности сварного шва оказывают влияние на поля от дефектов и создают трудности распознавания последних. Все сказанное выше было справедливо для линейных магнитных свойств, т. е. когда $\mu = \text{const}$.

Нелинейность магнитных свойств материала вносит существенные коррективы в структуру магнитного поля вблизи поверхности

В переменном электромагнитном поле дефекты сплошности сред вызывают локальное изменение векторов $\vec{H}$ и $\vec{E}$, аналогичное в первом приближении рассмотренному ранее для постоянных магнитных и электрических полей. Однако ввиду затухания электромагнитных волн вне границ тела может быть получена информация только о дефектах, залегающих сравнительно не глубоко от поверхности.

Особенности поведения тел в постоянном магнитном поле. Если ферромагнитное тело помещено в однородное магнитное поле, то при намагничивании поле внутри этого тела H будет отличаться от внешнего намагничивающего поля H_e на некоторую величину H_0 , которая пропорциональна намагнитченности J :

$$H = H_e - H_0; \quad H_0 = NJ.$$

Коэффициент пропорциональности N называется размагничивающим фактором. Можно записать, что $H = H_e - NJ$. Таким образом, истинная напряженность магнитного поля, которая действует на тело, меньше напряженности внешнего поля.

Размагничивающий фактор зависит от формы тела и его ориентации к направлению внешнего поля H_e . Наиболее строго определен размагничивающий фактор для тел в форме эллипсоидов. Для эллипсоида вращения при намагничивании вдоль оси вращения коэффициенты размагничивания могут быть вычислены по формулам:

$$N = \frac{4}{3}\pi \text{ при } \lambda = 1 \text{ (шар);}$$

$$N = 4\pi \text{ при } \lambda = 0 \text{ (тонкая пластинка);}$$

$$N = \frac{4\pi \ln 2\lambda - 1}{\lambda^2} \text{ при } \lambda > 50 \text{ (тонких длинных стержней),}$$

где λ — отношение продольной оси эллипсоида вращения к поперечной.

Эллипсоид вращения при намагничивании вдоль одной из осей имеет однородное внутреннее поле H . Образцы конечной длины и неэллипсоидальной формы в однородном внешнем поле намагничиваются неравномерно. Размагничивающий фактор становится функцией, сложно зависящей от формы и ориентации тела относительно внешнего однородного поля. В первом приближении он уменьшается с увеличением длины тела при намагничивании вдоль наибольшего размера.

Так как $J = \kappa H$, то $H = H_e - N\kappa H$, откуда

$$H = H_e \frac{1}{1 + \kappa N},$$

где κ — магнитная восприимчивость вещества, которая определяется природой материала.

Величина κ и μ связаны с магнитной восприимчивостью κ_m и магнитной проницаемостью μ_m тела соотношениями:

$$\kappa_m = \kappa / 1 + \kappa N; \quad \mu_m = 4\pi\mu / 4\pi + N(\mu - 1).$$

Магнитная восприимчивость и магнитная проницаемость, равно как и диэлектрическая проницаемость тел, зависят не только от физической природы их вещества, но и от формы и ориентации по отношению к векторам магнитного и электрического полей.

Пример 5.2. Определим проницаемость сферы и тонкой пластинки

$$\mu_{г. сф} = \frac{\mu \cdot 4\pi}{4\pi + \frac{4}{3}\pi(\mu - 1)} = \frac{\mu}{1 + \frac{1}{3}\mu - \frac{1}{3}} = \frac{3\mu}{2 + \mu}.$$

Из последнего уравнения следует, что при изменении проницаемости материала сферы в пределах $1 \leq \mu \leq \infty$ проницаемость самой сферы изменится в пределах $1 \leq \mu_{г. сф} \leq 3$.

$$\mu_{г. пл} = \frac{\mu \cdot 4\pi}{4\pi + 4\pi(\mu - 1)} = \frac{\mu}{1 + \mu - 1} = \frac{\mu}{\mu} = 1.$$

Из этого следует, что при намагничивании тонкой пластинки перпендикулярно ее поверхности независимо от магнитной проницаемости ее материала проницаемость самой пластинки остается постоянной и равной проницаемости пустоты, а поле внутри пластинки равно намагничивающему полю.

Приведенные примеры дают важные для магнитной дефектоскопии выводы.

1. При магнитопорошковой дефектоскопии проницаемость сферических частиц порошка мало зависит от магнитных свойств материала порошка μ . Важно только, чтобы выполнялось условие $\mu \leq 10$, тогда $\mu_{г. сф} \geq 2,5$.

2. Плоские изделия бессмысленно намагничивать перпендикулярно к их поверхности, так как при любых значениях полей они не намагничиваются и, следовательно, не дадут никакой информации о дефектах материала.

3. При намагничивании тонких плоских пластинок в произвольно ориентированных полях пластинки намагничиваются только той составляющей поля, которая направлена вдоль поверхности пластинки (тангенциальная составляющая).

Из изложенных кратких сведений теории электромагнитного поля следует, что по изменению векторов поля $\vec{H}$ и $\vec{E}$ в окрестности тел, находящихся в электромагнитном поле внешнего источника, при соблюдении ряда дополнительных условий, в принципе можно определить изменение электромагнитных макроскопических свойств тел μ , σ , ϵ , отождествив указанное изменение с изменением структуры, механических свойств и т. п.; изменение геометрии тел; наличие дефектов сплошности и однородности внутри тел.

Теоретическое определение характеристик поля возможно только для сравнительно простых случаев, т. е. тел простой геометрии, находящихся в однородных электрических и магнитных полях или подвергаемых воздействию электромагнитных волн простой конфигурации (например, плоских или concentрических).

Наиболее эффективный способ получения информации об изменениях свойств μ , σ и ϵ , а также о дефектах сплошности — метод сопоставления (сравнения) поля исследуемого тела с эталонным,

характеристики которого служат началом отсчета измеряемых векторов напряженности магнитного поля.

Для получения информации о состоянии тел, т. е. об изменении их свойств и дефектах необходимо, во-первых, возбудить электромагнитное поле в теле и, во-вторых, измерить его характеристики $\vec{H}$ и $\vec{E}$ или местную неоднородность поля, характеризующую величину интенсивности изменения в направлении измерения $d\vec{H}/dl$ или $d\vec{E}/dl$.

5.1.4. Методы регистрации и измерения электромагнитных полей

Методы регистрации и измерения электромагнитных полей и их градиентов с точки зрения обработки информации подразделяют на две группы: с преобразованием в электрический сигнал; без преобразования в электрический сигнал.

Рассмотрим физические принципы только тех методов, которые получили широкое распространение в промышленной дефектоскопии. К ним относятся регистраторы переменного электромагнитного поля с помощью витка (катушки) из проводящего материала; регистрация постоянного магнитного поля с помощью магнитной ленты и феррозонда; регистрация неоднородностей постоянного поля с помощью магнитных индукционных головок и магнитного порошка.

Регистрация переменных электромагнитных полей. Переменное электромагнитное поле проще всего регистрируется с помощью датчика — контура из проводящего материала (катушки), ось которой совпадает с направлением вектора H (рис. 5.19). В соответствии с законом электромагнитной индукции в катушке наводится электродвижущая сила (э. д. с.), пропорциональная изменению магнитного потока в единицу времени:

$$U = -d\Phi/dt = -\omega\mu_0 SH_m \cos \omega t,$$

где ω — число витков катушки; ω — круговая частота переменного поля; S — площадь катушки; H_m — амплитудное значение напряженности магнитного поля.

Для повышения чувствительности измерения, выражаемой как отношение изменения э. д. с. к изменению напряженности поля H , катушку включают в колебательный контур, настроенный на частоту $f = \omega/2\pi$.

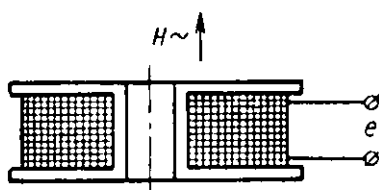


Рис. 5.19. Катушка для регистрации переменных полей

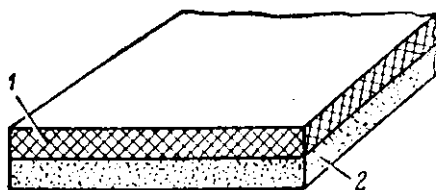


Рис. 5.20. Разрез магнитной пленки:
1 — основа; 2 — магнитный лак

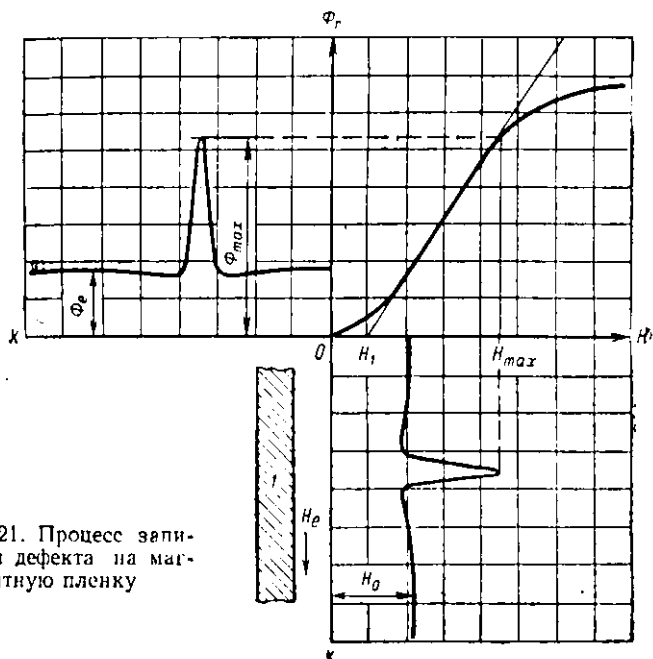


Рис. 5.21. Процесс записи поля дефекта на магнитную пленку

Простота реализации измерения электромагнитного поля с помощью катушки, преобразование поля в электрический сигнал, обеспечили широкое применение такого датчика. Недостаток указанной системы измерения — малое пространственное разрешение, обусловленное размерами катушки.

Регистрация постоянного магнитного поля. Для регистрации постоянного магнитного поля H без преобразования в электрический сигнал наибольшее распространение получила тонкая ферромагнитная лента, аналогичная применяемой в звукозаписи магнитной ленте и феррозондовые датчики (магнитные зонды).

Ферромагнитная лента позволяет регистрировать составляющую постоянного магнитного поля H_x , направленную вдоль поверхности ленты без преобразования в электрический сигнал. Он заключается в преобразовании воздействовавшего на высококоэрцитивную тонкую магнитную ленту поля в остаточный магнитный поток последней.

Магнитные ленты (пленки) состоят из основы (рис. 5.20), покрытой лаком, содержащим тонко размолотый порошок ферромагнетика. Основу изготовляют из ацетилцеллюлозы, поливинилхлорида, полиэфиров и лавсана, а магнитоактивный слой — из порошка окиси железа, взвешенного в лаке, имеющем хорошую адгезию с основой. Толщина основы 10—120 мкм, толщина слоя магнитного лака 10—20 мкм.

На рис. 5.21 схематически представлен процесс записи поля от дефекта в плоской пластинке на предварительно размагниченную магнитную ленту единичной ширины при условии, что последняя

плотно прилегает к поверхности изделия вблизи дефектного места. В первом квадранте построена кривая остаточной намагниченности носителя записи; в четвертом — изменение поля, действующего на ленту вдоль поверхности изделия в направлении намагничивания; во втором квадранте строится зависимость остаточного потока в ленте в том же направлении.

Кривая остаточной намагниченности магнитной ленты в широком диапазоне полей имеет явно выраженную нелинейную характеристику, свойственную ферромагнетикам. Это накладывает определенные условия на выбор режимов намагничивания (однородного поля H).

Наибольший интерес представляет линейный участок кривой остаточной намагниченности, так как для него характерна максимальная крутизна, характеризующая чувствительность к изменению регистрируемого магнитного поля H .

Для магнитных лент разнообразных типов, выпускаемых отечественной и зарубежной промышленностью линейный участок находится в интервале полей от 100—300 до 400—600 А/см, а крутизна линейного участка изменяется в пределах $1,3 \cdot 10^{-13} \div 14 \cdot 10^{-13}$. Такой диапазон магнитных полей вполне соответствует оптимальным условиям магнитного контроля ферромагнитных материалов.

Преимущества магнитных лент как регистраторов постоянного магнитного поля: высокая разрешающая способность, позволяющая регистрировать неоднородность магнитного поля, соизмеримую с размерами частиц, т. е. имеющих геометрические размеры единицы порядка мкм; широкий диапазон магнитных полей; возможность регистрации полей на сложных поверхностях и в узких зазорах; возможность неоднократного повторного использования после намагничивания.

К существенным недостаткам лент следует отнести: необходимость вторичного преобразования информации с пленки для исследования ее намагниченности; регистрация только одной составляющей поля, направленной вдоль ее поверхности; некоторые сложности размагничивания и хранения лент, обусловленные необходимостью предотвращения воздействия внешних магнитных полей.

Феррозондовые регистраторы.

Феррозондовые датчики позволяют измерять небольшие по величине магнитные поля, преобразуя информацию о поле в электрический сигнал.

Феррозонды основаны на особенностях процессов перемагничивания ферромагнитных материалов, при одновременном воздействии постоянного и переменного магнитного поля. В этих условиях магнитное состояние материала изменяется по несимметричной

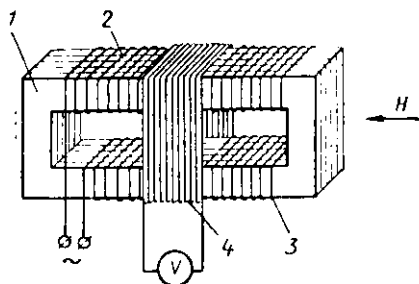


Рис. 5.22. Схема феррозонда:

1 — сердечник; 2, 3 — генераторные катушки; 4 — измерительная катушка

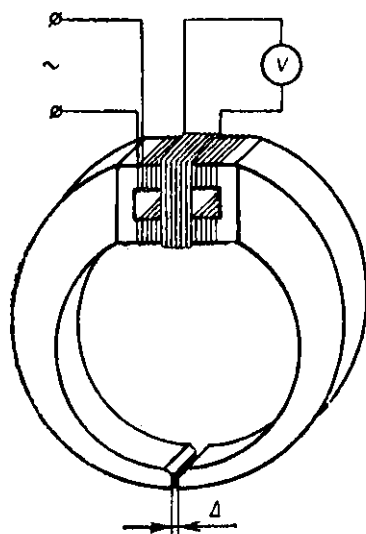


Рис. 5.23. Феррозонд с концентраторами поля

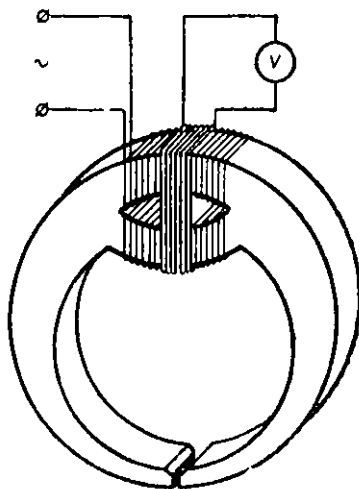


Рис. 5.24. Магнитомодуляционная головка

петле гистерезиса, что приводит к появлению четных гармоник в спектре сигнала измерительной катушки, амплитуда которых пропорциональна измеряемому полю.

На рис. 5.22 схематично показано устройство наиболее простого измерительного зонда, сердечник которого изготовлен из тонких пластин магнитомягкого материала пермаллоя. На оба плеча сердечника намотаны катушки 2 и 3, имеющие одинаковое число витков, которые соединены последовательно. Измерительная катушка надета на сердечник 1, охватывая первые две катушки. Если через катушки 2 и 3 пропустить переменный ток от специального генератора, то в измерительной катушке 3 э. д. с. не возникнет, так как изменения магнитного потока во времени от каждой из первых двух катушек равны и противоположны по направлению.

При помещении сердечника в постоянное однородное поле, которое направлено вдоль оси катушек в результате искажения петли гистерезиса сердечника нарушается равновесие магнитных потоков в плечах сердечника; в измерительной катушке возникает э. д. с., пропорциональная напряженности магнитного поля. Частота ее вдвое выше частоты генератора. С помощью такого феррозонда при частоте переменного тока 10^3 Гц можно измерить магнитные поля порядка 10^{-3} А/см.

Недостаток описанного феррозонда-полемера — малое пространственное разрешение, обусловленное размерами самого зонда. Для повышения пространственного разрешения используют специальные концентраторы магнитного поля с весьма малым рабочим зазором Δ (рис. 5.23). Хорошо экранированные концентраторы реагируют на поле вблизи концов сердечника в окрестности зазора, составляющей

5—20 мкм. Сердечники концентраторов изготавливают из металла с высокой магнитной проницаемостью. Для уменьшения потерь в магнитопроводе концентратора последний изготавливают заодно с сердечником феррозонда (рис. 5.24). Такой датчик магнитного поля получил название магнито-модуляционной головки.

Практическое применение нашли также феррозонды, состоящие из двух одинаковых полузондов, представляющих собой стержни из магнитомягкого материала с двумя катушками: генераторной и измерительной (рис. 5.25, а). Сердечники обоих полузондов располагают параллельно на небольшом расстоянии друг от друга. Одноименные обмотки полузондов соединяют между собой (w_1 с w'_1 и w_2 с w'_2) по полевой или градиентометрической схемам. В первой схеме обмотки возбуждения соединяют так, чтобы переменные магнитные потоки в сердечниках полузондов всегда были направлены противоположно друг другу, а измерительные обмотки соединяют последовательно-согласованно (рис. 5.26, б). Такие феррозонды применяют для измерения напряженности магнитных полей.

При градиентометрической схеме (рис. 5.25, в) обмотки возбуждения обоих полузондов соединяют последовательно-согласованно с тем, чтобы направления потоков в сердечниках совпадали, а измерительные обмотки соединяют между собой встречно. И в том, и в другом случаях измерительные обмотки w_2 и w'_2 соединяют так, чтобы при отсутствии подмагничивающего (постороннего) поля э. д. с. на выходных концах феррозонда была равна нулю.

При помещении феррозонда в измеряемое (постоянное) магнитное поле нечетные гармоники в полузонах будут вычитаться, а четные — складываться. В результате на выходных концах феррозонда появится в основном э. д. с. четных гармоник с преобладанием второй. При такой конструкции феррозонда значительно облегчается выделение второй гармоники, что приводит к большей чувствительности и точности измерений. Для выделения полезного сигнала необходим избирательный усилитель, так как невозможно изготовить два идентичных полузонда и поэтому на выходе феррозонда, наряду с полезным сигналом второй гармоники, имеются помехи в виде э. д. с. основной частоты (f_1) и более высоких нечетных гармоник (3 и 5-й).

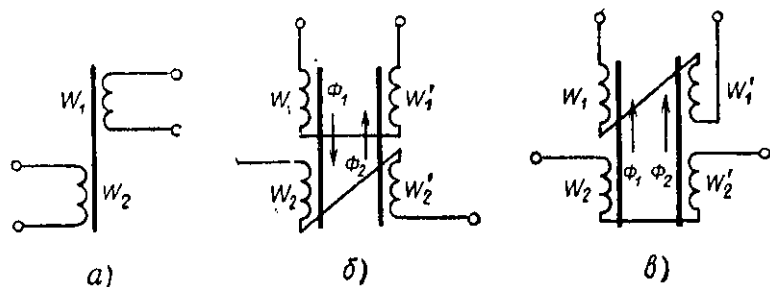


Рис. 5.25. Электрические схемы феррозондов:

а — полумер; б — полевой; в — градиентометр

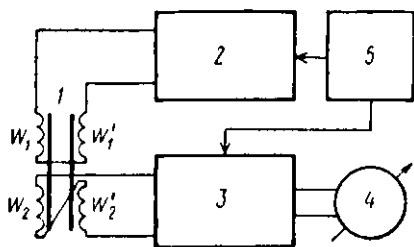


Рис. 5.26. Блок-схема феррозондового полемера:

1 — феррозонд; 2 — генератор; 3 — избирательный резонансный усилитель; 4 — измерительный прибор; 5 — блок питания

В целях уменьшения уровня помех полузонды электрически уравниваются. Для этого либо шунтируют обмотки полузондов активными сопротивлениями, либо добиваются оптимального сдвига фазы э. д. с. второй гармоники одного полузонда относительно другого путем параллельного или последовательного подключения конденсаторов к их обмоткам.

На рис. 5.26 показана блок-схема феррозондового прибора — полемера, состоящего из собственно феррозонда 1, электронного генератора 2 для питания возбуждающей обмотки феррозонда током повышенной частоты (обычно 1—10 кГц), избирательного усилителя 3, настроенного на частоту второй гармоники ($2f_1$), и выходного индикаторного устройства 4 (стрелочный прибор, электронно-лучевая трубка, реле и т. д.). Питание прибора осуществляется от блока 5.

5.1.5. Регистрация неоднородностей постоянного поля

Магнитные головки. Помимо феррозондов, собранных по градиентометрической схеме, неоднородность (градиенты) магнитного поля может быть выявлена следующими двумя методами: индукционным и пондеромоторным.

Индукционный метод заключается в том, что в неоднородном магнитном поле движется с некоторой скоростью v металлический незамкнутый контур (катушка), э. д. с. в которой пропорциональна скорости изменения магнитного потока в единицу времени:

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} = - \frac{d\Phi}{dx} \frac{dx}{dt} = - \frac{d\Phi}{dx} v \quad (5.6)$$

т. е., как это следует из формулы (5.6), при постоянной скорости v э. д. с. пропорциональна изменению потока вдоль направления движения.

Для измерения неоднородности постоянных магнитных полей с высоким разрешением используют концентраторы магнитного поля, описанные ранее. Устройство, представляющее сердечник из металла с высокой магнитной проницаемостью и обмоткой, получило наименование магнитной индукционной головки (рис. 5.27). Головка намного проще феррозонда, так как не требует специального генератора для питания, однако для нее необходимо перемещение с равномерной скоростью v , причем щель рабочего зазора Δ должна быть строго перпендикулярна к направлению движения, а последнее, в свою очередь, направлено вдоль магнитного поля H .

Магнитный порошок. Пондеромоторный метод выявления неоднородности постоянного и переменного магнитного поля, изменяющегося со сравнительно низкой частотой (до 100 Гц), заключается в эффекте взаимодействия неоднородного магнитного поля с ферромагнитными частицами. Этот метод несмотря на отсутствие преобразования в электрический сигнал обладает наглядностью и высокой разрешающей способностью.

Если ферромагнитное тело с массой m поместить в неоднородное магнитное поле, то на него будет действовать сила

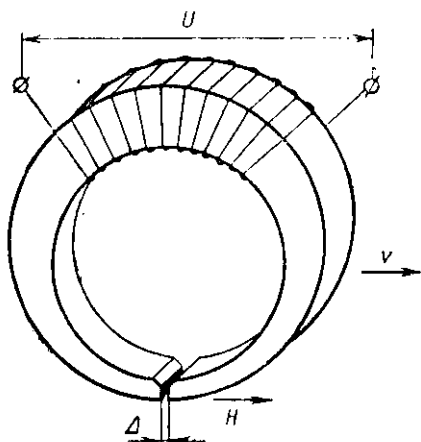


Рис. 5.27. Индукционная магнитная головка

$$F_x = m (\kappa_r - \kappa_{cp}) H \frac{dH}{dx}, \quad (5.7)$$

где κ_r и κ_{cp} — удельные восприимчивости тела и окружающей среды соответственно. Если восприимчивостью среды можно пренебречь, формула (5.7) приобретает более простой вид

$$F_x = m \kappa_r H \frac{dH}{dx} = m J_r \frac{dH}{dx},$$

где J_r — удельная намагниченность тела.

Таким образом, сила, действующая на частицу ферромагнитного вещества в неоднородном постоянном магнитном поле, пропорциональна градиенту этого поля dH/dx , массе частицы и ее удельной намагниченности.

5.2. МАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ

Магнитные методы контроля основаны на обнаружении магнитных потоков (полей) рассеяния, создаваемых несплошностями (различными дефектами или неоднородностями структуры) в намагниченных изделиях из ферромагнитных материалов.

5.2.1. Магнитопорошковый метод

Принцип метода. Сущность магнитопорошкового метода заключается в том, что на поверхность намагниченной детали наносят ферромагнитный порошок в виде суспензии с керосином, маслом, мыльным раствором и т. п. или в виде магнитного аэрозоля. Под действием втягивающей (пондеромоторной) силы магнитных полей рассеяния частицы порошка перемещаются по поверхности детали и скапливаются в виде валиков над дефектами. Форма этих скопле-

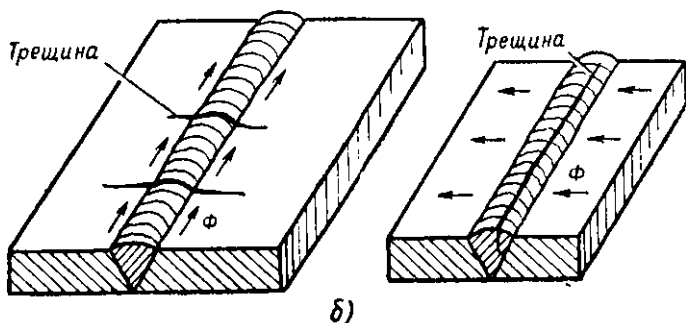


Рис. 5.28. Осаждение магнитного порошка
а — на трещинах; б — на дефектах сварки

ний порошка соответствует очертаниям выявляемых дефектов (рис. 5.28).

Чувствительность метода. Чувствительность магнитопорошкового метода зависит от размера частиц порошка и его магнитных свойств; напряженности приложенного намагничивающего поля или индукции в материале контролируемого изделия; формы и величины дефектов, а также их расположения по отношению к поверхности изделия и направлению намагничивания; состояния и формы поверхности контролируемого изделия.

Размеры частиц порошка во много раз сильнее влияют на чувствительность метода, чем магнитные свойства. С увеличением напряженности приложенного поля (до достижения индукции насыщения) возрастает чувствительность метода, проявляющаяся в увеличении количества обнаруживаемых дефектов. При соблюдении оптимальных условий ведения контроля магнитопорошковый метод контроля имеет высокую чувствительность к тонким и мелким трещинам. Он позволяет выявлять поверхностные и подповерхностные дефекты с раскрытием от 0,01 мм и глубиной (высотой дефекта) от 0,05 мм и более. Дефекты округлой формы (например поры) выявляются хуже.

Методом магнитопорошкового контроля хорошо выявляются поверхностные и подповерхностные дефекты типа трещин, непроваров, несплавлений, волосовин, закатов, включений. Могут также выявляться сравнительно крупные внутренние дефекты, расположенные на глубине до 6 мм от поверхности контролируемого изделия. Наиболее четко выявляются дефекты, наибольший размер которых

ориентирован под прямым или близким к нему углом относительно направления магнитного потока.

Если на поверхности контролируемого изделия, кроме полей от дефектов, имеются значительные градиенты магнитных полей структурного или геометрического происхождения (например, наличие усилительного валика сварного шва, чешуйчатость на его поверхности, резкое изменение сечения детали и т. п.), то магнитный порошок интенсивнее скапливается не над дефектами, а в местах со значительными градиентами магнитного поля. Следовательно, по осаждению магнитного порошка на поверхности детали нельзя однозначно судить о наличии дефектов сплошности. Поэтому при контроле сварных швов с усилением или изделий с грубой поверхностью чувствительность магнитопорошкового метода невысока, особенно к внутренним дефектам.

Материалы и аппаратура. В качестве материала для приготовления порошков в основном используют мелко помолотую закись—окись железа (Fe_3O_4) с размером частиц 5—10 мкм. Применение порошков из никеля и кобальта весьма ограничено из-за их дороговизны.

Иногда применяют чистую железную окалину, получаемую при ковке и прокатке, а также стальные опилки, получаемые при шлифовании стальных изделий. Их измельчают в шаровых мельницах и присеивают через сито (3600 отв/см²), превращая в ферромагнитную пудру. Часто для магнитопорошкового контроля применяют технический крокус, представляющий собой отходы химической промышленности при выпуске анилиновых красок.

При контроле деталей различного цвета для лучшей индикации полей дефектов применяют цветные порошки (красный, серебристый, темно-коричневый и др.) Их получают окрашиванием темных порошков или путем отжига по специальной технологии. Очень хорошо видны скопления («рисунки») порошков, специально обработанных для свечения в ультрафиолетовых лучах (люминесценция).

Для приготовления магнитных суспензий чаще всего используют масляно-керосиновые смеси, с соотношением масла и керосина 1 : 1 при 50—60 г порошка на 1 л жидкости. Могут применяться и водные суспензии, например мыльно-водная с содержанием в 1 л воды 5—6 г мыла, 1 г жидкого стекла и 50—100 г магнитного порошка.

При магнитопорошковом методе контроля изделия намагничивают постоянным, переменным или импульсным током, пропускаемым по намагничивающей катушке (соленоиду) или обмотке электромагнита, а также путем пропускания тока через тело контролируемого изделия либо через токопроводящий стержень, коаксиально расположенный внутри пустотелого цилиндрического изделия (например, трубы).

Устройство типа соленоид (рис. 5.29, а) применяют для продольного намагничивания круглых изделий (осей, валов, труб и т. п.). При циркулярном способе намагничивания ток пропускают по телу контролируемого изделия (рис. 5.29, б) или по токопроводящему стержню, на который надета цилиндрическая полая деталь

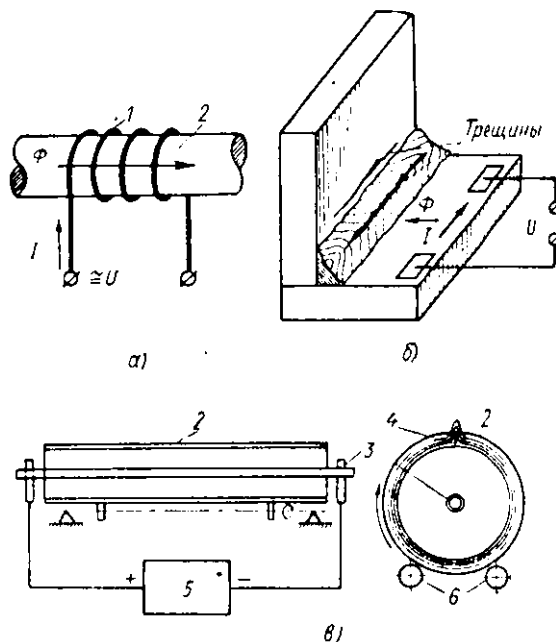


Рис. 5.29. Схемы намагничивания изделий при магнитном порошковом контроле:

а — соленоид; б — пропускание тока через детали; в — пропускание тока через стержень; 1 — соленоид; 2 — контролируемое изделие; 3 — стержень с током; 4 — дефект; 5 — источник тока; 6 — опорные ролики

(рис. 5.29, в). При этом магнитные силовые линии замыкаются в поперечном направлении, определяемом по правилу буравчика. При циркулярном намагничивании хорошо выявляются продольные дефекты.

Помимо указанных способов для намагничивания контролируемых изделий широко применяют переносные или стационарные приставные электромагниты, состоящие из П-образного сердечника — магнитопровода и обмотки (рис. 5.30). Эти намагничивающие устройства более универсальны и менее энергоемки.

Для магнитопорошкового контроля промышленность выпускает переносные и стационарные дефектоскопы. Наиболее распространенные из них — стационарные дефектоскопы УДМ-9000, УМДЭ-10000, УДМ-2500 и магнитные силовые агрегаты (источники питания) МСА-9000, МАС-1000 и др., а также переносные дефектоскопы ДМГ-2, 77ПМД-3М и др. Дефектоскопы комплектуют намагничивающими и размагничивающими устройствами различных типоразмеров.

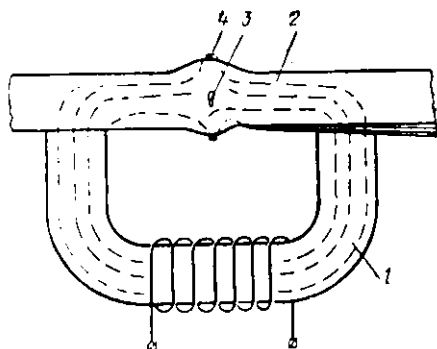


Рис. 5.30. Намагничивание приставным электромагнитом:

1 — магнитопровод; 2 — контролируемое изделие; 3 — дефект; 4 — осажденный порошок

Режимы намагничивания. Выбор способов и оптимальных режимов намагничивания определяется магнитными свойствами контролируемого материала, формой и размерами деталей, минимально допустимыми размерами, характером и предполагаемым расположением дефектов, т. е. условиями контроля.

Контроль можно проводить, покрывая поверхность изделия порошком в процессе намагни-

чивания (в приложенном поле) или нанося магнитный порошок на поверхность предварительно намагниченного до насыщения изделия, т. е. используя остаточную намагниченность.

Первым из указанных способов обычно контролируют изделия из магнитомягких материалов с коэрцитивной силой H_c до 8—10 А/см, а вторым — изделия из сравнительно магнитотвердых материалов с коэрцитивной силой свыше 10—15 А/см и остаточной индукцией не менее 9—10 кГс.

Контролируемые изделия намагничивают постоянным, пульсирующим (импульсным), или переменным полем. При намагничивании постоянным полем внутренние дефекты выявляются лучше, чем при намагничивании переменным. Однако в ряде случаев (например, в цеховых условиях) отдают предпочтение намагничиванию переменным полем. Это объясняется тем, что от сети переменного тока через понижающий трансформатор можно непосредственно получить большую силу намагничивающего тока и создать большую напряженность магнитного поля H . Однако при использовании переменного поля основной магнитный поток под влиянием скин-эффекта, вызываемого вихревыми токами, вытесняется на поверхность металла, вследствие чего сильнее намагничиваются его поверхностные слои и лучше выявляются наружные и подповерхностные дефекты (например, закалочные или усталостные трещины и др.). Это особенно важно учитывать при контроле крупных и толстостенных деталей.

Импульсное униполярное намагничивание наиболее предпочтительно при контроле в режимах остаточной намагниченности изделия. При контроле на остаточной намагниченности применяют следующие четыре режима.

1. Режим отбраковки деталей по грубым дефектам, при котором поле на поверхности деталей около 30 А/см. Этим режимом пользуются для контроля деталей с грубой обработкой поверхности, а также при междуоперационном контроле перед последующей обработкой поверхности деталей.

2. Режим пониженной жесткости, при котором на поверхности детали должно быть около 60 А/см.

3. Стандартный режим, при котором на поверхности контролируемой детали должна быть обеспечена напряженность магнитного поля около 100 А/см.

4. Режим повышенной жесткости, при котором на поверхности детали обеспечивается напряженность поля около 180—200 А/см.

После контроля намагниченные детали часто должны быть размагничены. Если деталь при контроле намагничивалась переменным током, то ее размагничивают в специальных камерах или с помощью специальных электромагнитов (размагничивающих устройств), питаемых переменным током.

При намагничивании деталей постоянным током их размагничивают в постоянном поле с переменным изменением его направления и плавным уменьшением напряженности до нуля. Начальная напряженность размагничивающего поля соленоида устанавливается не-

сколько больше напряженности поля, при котором деталь намагничивалась для контроля.

Эталонирование. Ввиду сложности расчетов и невозможности учесть все существенно влияющие факторы, для определения режимов контроля применяют образцы с эталонными дефектами и специальные «свидетели» намагниченности, которые представляют собой плоские пластинки из материала контролируемых деталей, прикладываемые к поверхности последних во время намагничивания.

Методика контроля. Методика магнитопорошкового метода сводится к следующим основным операциям.

1. Подготовка поверхностей перед контролем. Очистка от загрязнений, окалины, следов шлака после сварки.

2. Подготовка суспензии, заключающаяся в интенсивном перемешивании магнитного порошка с транспортирующей жидкостью.

3. Намагничивание контролируемого изделия.

4. Нанесение суспензии на поверхность контролируемого изделия.

5. Осмотр поверхности изделия и выявление мест, покрытых отложением порошка.

В сомнительных случаях валик порошка удаляют и повторяют операции 3, 4 и 5. После контроля изделие размагничивают.

Магнитопорошковый метод получил весьма широкое распространение. Это обусловлено его основными преимуществами: высокой чувствительностью к тонким и мелким трещинам, простотой методики, оперативностью получения результатов контроля и их наглядностью.

В отечественной и зарубежной практике этот метод применяется для контроля продольных сварных швов труб, выполненных стыковой электроконтактной сваркой, а также для выявления трещин и узких (стянутых) непроваров в стыковых швах трубопроводов, сваренных электродуговыми способами. В обоих этих случаях усиления швов перед контролем снимают.

5.2.2. Магнитографический метод

Принцип метода. Среди магнитных методов дефектоскопии наибольшее распространение для контроля качества сварных швов получил магнитографический метод. Сущность этого метода заключается в намагничивании контролируемого участка сварного шва и прилегающей к нему околошовной зоны с одновременной записью магнитного поля на предварительно размагниченную магнитную пленку (рис. 5.31, а) и последующем считывании полученной на ленте магнитограммы с помощью специальных воспроизводящих устройств магнитографических дефектоскопов (рис. 5.31, б).

На магнитной ленте регистрируются тангенциальные составляющие магнитных полей, содержащие информацию о характере и величине дефектов.

Чувствительность метода. Источником информации о дефекте при магнитографическом контроле служит электрический сигнал,

возникающий в чувствительном элементе — магнитной головке — воспроизводящего устройства. Этот сигнал преобразуется и наблюдается на экране электронно-лучевой трубки дефектоскопа.

На характеристики сигнала (амплитуду, частотный спектр и т. д.) оказывает влияние большое число факторов: режим намагничивания изделия; геометрия поверхности; размеры, форма, глубина залегания и ориентации дефектов; направление намагничивания и считывания информации с ленты; параметры чувствительного элемента — магнитной головки (ширина набора сердечника, величина рабочего зазора, число витков обмотки, наклон рабочего зазора к траектории движения и т. д.); амплитудно-частотные характеристики канала передачи информации от чувствительного элемента до экрана электронно-лучевой трубки; различные помехи и шумы (неровности поверхности изделия, собственные шумы магнитной ленты, наводки и помехи в канале воспроизведения магнитографического дефектоскопа; усиление сварного шва и макронеоднородность материала шва и околошовной зоны).

Несмотря на такое обилие факторов, искажающих первичную информацию, благодаря преобразованию информации о поле в элек-

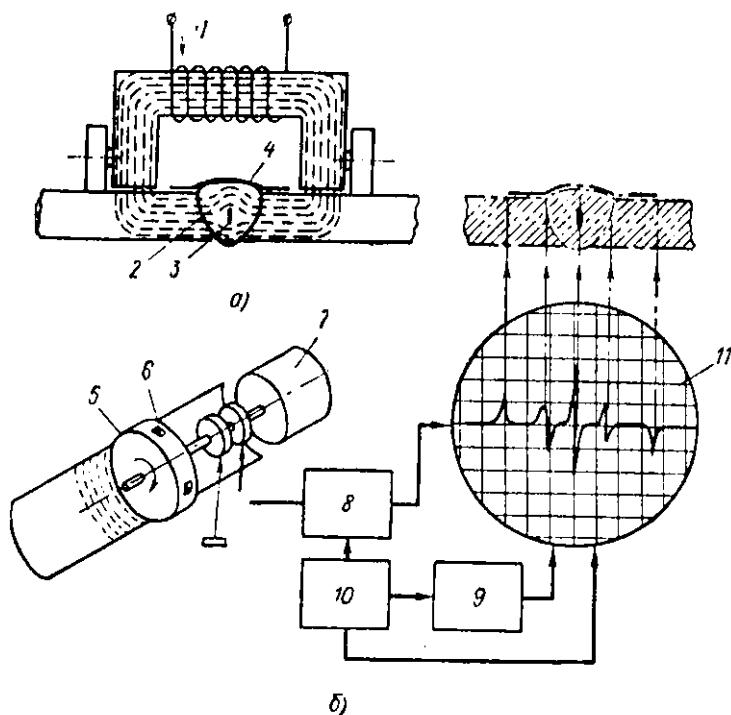


Рис. 5.31. Магнитографический контроль сварки:

1 — намагничивающее устройство; 2 — сварной шов; 3 — дефект; 4 — магнитная пленка; 5 — ротор; 6 — магнитная индукционная головка; 7 — электродвигатель; 8 — электронный усилитель; 9 — генератор развертки; 10 — блок питания; 11 — электронно-лучевая трубка

трический сигнал магнитографический метод обладает значительно более высокой чувствительностью, чем магнитопорошковый.

Регистрация полей рассеяния от дефектов на магнитную ленту проводится только в приложенном магнитном поле, а преобразование информации в электрический сигнал осуществляется по остаточной намагниченности ленты. Такой двухступенчатый процесс позволяет получить максимально возможное количество информации при минимальных ее потерях за счет регистрации полей рассеяния дефектов на магнитную ленту в сильных полях и создания оптимальных условий работы чувствительного элемента — магнитной головки при отсутствии мощного поля внешнего источника.

Магнитографическим методом контроля хорошо выявляются протяженные дефекты (трещины, непровары, цепочки и скопления шлаковых включений и газовых пор), преимущественно ориентированные поперек направления магнитного потока при намагничивании. Гораздо хуже выявляются одиночные шлаковые включения и газовые поры, особенно имеющие округлую форму.

Под чувствительностью магнитографического метода (γ) понимают отношение вертикального размера (глубины) минимально выявляемого дефекта (Δh) к толщине стенки (δ) основного металла контролируемого изделия, т. е.

$$\gamma = \frac{\Delta h}{\delta} 100\%.$$

Наиболее простой и наглядный критерий выявления дефекта минимальных размеров — допустимое отношение амплитуды сигнала A_c от этого дефекта к уровню сигналов от случайных помех (шума) $A_{ш}$. В зависимости от выбора величины этого отношения чувствительность имеет различную величину, так как при постоянных условиях контроля уровень помех в первом приближении одинаков, а амплитуда сигналов от дефектов тем меньше, чем меньше вертикальные размеры дефектов и больше глубина их залегания от поверхности, на которую уложена магнитная лента. При уменьшении допустимого отношения $A_c/A_{ш}$ чувствительность улучшается, однако вероятность уверенного выявления дефекта снижается. Таким образом, приведенное выше определение чувствительности необходимо дополнить строгим указанием условий, при которых производилась оценка чувствительности. Для магнитографического контроля в число этих условий входят вид дефекта, положение его внутри шва, режим намагничивания, применяется магнитная лента, тип дефектоскопа, соотношение $A_c/A_{ш}$. Наиболее трудновываемые дефекты — расположенные в корне шва при одностороннем подходе к изделию.

На чувствительность магнитографического метода сильное влияние оказывают высота и форма усиления, а также состояние его поверхности. Хорошие результаты контроля обеспечиваются, если высота усиления сварных швов не превышает 25% толщины основного металла изделия, с плавным переходом от направленного металла шва к основному, и если неровности (чешуйчатость) на по-

поверхности швов составляют не более 25—30% высоты усиления (но не более 1 мм). Отсюда следует, что наилучшие результаты могут быть получены при контроле сварных швов, выполненных автоматической сваркой под слоем флюса или в среде защитных газов. При контроле сварных швов с грубой чешуйчатостью, выполненных ручной электродуговой сваркой, требуется предварительная подготовка их поверхности путем зачистки и устранения недопустимых неровностей.

Выявляемость продольных дефектов в сварном шве (трещин, непроваров) магнитографическим методом существенно зависит от относительных размеров усиления стыкового шва. Геометрия сварного стыкового шва при сварке плавлением характеризуется шириной шва b , высотой усиления h и проплава h_n , толщиной шва h_Σ , коэффициентом формы усиления $\psi = b/h$. Высоту усиления и превышение толщины сварного шва над толщиной свариваемого металла δ удобнее выразить через относительные размеры $\chi = h_n/h_\Sigma$.

Поле от продольного дефекта в сварном шве будет отличным от поля усилительного валика шва только тогда, когда на участке ленты, прилегающей к поверхности усиления шва, будет записана вся заметно изменяющаяся часть поля от дефекта, а вне этого участка поле изменится незначительно.

Существует некоторое предельное значение коэффициента формы шва $\psi_{\text{пред}}$, при котором теоретически возможно выявление продольного дефекта любого размера. Величина $\psi_{\text{пред}}$ зависит от относительной высоты усиления χ и относительного радиуса кривизны магнитной ленты в переходной зоне $\bar{R} = R/\delta$, который в свою очередь зависит от жесткости магнитной ленты и качества прижима ее к поверхности изделия в процессе контроля. С увеличением χ в пределах 0—0,5, что практически имеет место при автоматической сварке, значение $\psi_{\text{пред}}$ монотонно убывает.

Для каждой толщины свариваемого металла при заданной предельной относительной высоте усиления существует строго определенная ширина усиления b , при которой будут выявлены продольные дефекты минимальных размеров при одностороннем подходе к изделию. На рис. 5.32 представлена зависимость ширины усиления от толщины контролируемого металла δ для разных значений χ при постоянной величине $\bar{R}$. Эта зависимость для средних толщин металла (3—6 мм) весьма близка к линейной. Для выявления дефектов минимального размера в корне шва ширина усиления должна быть в 3—4 раза больше толщины контролируемого металла.

При несоблюдении указанных соотношений минимальный размер дефекта типа продольной трещины, расположенный в корне шва, выявляемый при одностороннем подходе, будет зависеть как от относительной высоты усиления χ , так и от коэффициента формы шва ψ (рис. 5.33). С увеличением χ относительный размер выявляемого дефекта γ становится все более критичным по отношению к величине ψ и при $0 < \psi < 7$ дефекты любой величины (кроме сквозных и выходящих на поверхность) не могут быть выявлены.

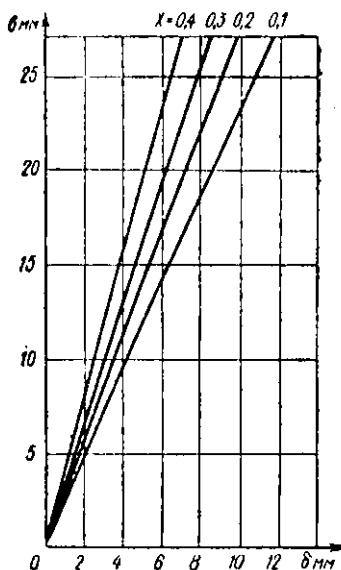
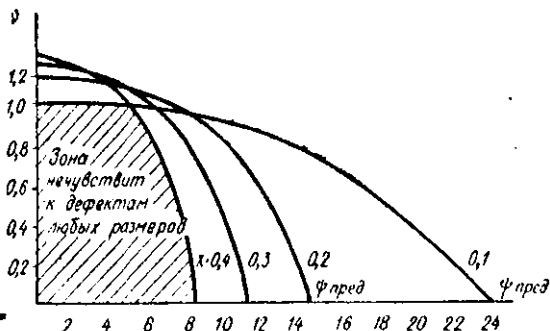


Рис. 5.32. Зависимость ширины усиительного валика шва от толщины контролируемого металла и относительной высоты усиления

Рис. 5.33. Зависимость чувствительности от коэффициента формы шва и относительной высоты усиления



Выявляемость поперечных трещин в сварном шве при намагничивании вдоль шва практически зависит только от чешуйчатости поверхности шва. Современная магнитографическая аппаратура обеспечивает чувствительность метода к внутренним дефектам сварного шва типа трещин и непроваров не хуже 6—8% толщины основного металла. При контроле сварных швов со снятым усилением чувствительность метода повышается до 3—4%. Чувствительность к дефектам типа пор не превосходит 20%. Все данные по чувствительности относятся к дефектам, расположенным в корне шва при одностороннем подходе к изделию и справедливы для толщин до 20 мм. Если дефекты расположены в средней или верхней части шва, данные по чувствительности несколько лучше.

Магнитные ленты. Для хороших результатов магнитографического контроля важное значение имеет равномерный и плотный прижим магнитной ленты к поверхности сварного шва. Основа ленты должна быть достаточно прочной и эластичной, чтобы могла плотно облегать неровную поверхность контролируемого шва. Разработаны специальные магнитные ленты типа МК-1 (на триацетатной основе) и МК-2 (на лавсановой основе) шириной 35 мм, имеющие коэрцитивную силу $H_c = 8 \cdot 10^3$ А/м, остаточную индукцию $B_r = 0,5 \div 0,6$ т и остаточный поток $\Phi_r = 10^{-8}$ Вб. При одинаковых магнитных характеристиках лента МК-2 обладает более высокими физико-механическими свойствами, чем лента МК-1, и может применяться в полевых условиях сварочно-монтажных работ при температурах окружающего воздуха от $+70$ до -60° (-70°) С. Лента типа МК-1 (на триацетатной основе) при отрицательных температурах ниже -30° С теряет эластичность и охрупчивается.

Намагничивающие устройства и источники питания. Наиболее опасные и часто встречающиеся дефекты сварки (трещины, непро-

вары, подрезы, цепочки инородных включений и т. п.) ориентируются в основном вдоль шва. В целях эффективного выявления этих дефектов магнитографическим методом сварные швы намагничивают в поперечном направлении.

Для поперечного намагничивания сварных швов при магнитографическом контроле чаще всего применяют специальные электромагниты постоянного тока, обычно называемые намагничивающими устройствами. Они состоят из П-образного магнитомягкого сердечника (магнитопровода) и обмотки, содержащей 500—600 витков толстого эмалированного провода.

Для контроля протяженных сварных швов применяют подвижные намагничивающие устройства (типа ПНУ) с удлиненными полюсами, опирающимися на четыре немагнитных ролика. С помощью опорных роликов между поверхностью контролируемого изделия и полюсами намагничивающего устройства создается воздушный зазор постоянной величины (2—3 мм), позволяющий электромагниту свободно перемещаться вдоль сварного шва (рис. 5.34, а). Устройства типа ПНУ универсальные, они позволяют контролировать кольцевые сварные швы цилиндрических изделий (например, труб, сосудов, емкостей и т. п.) различного диаметра и плоских стальных конструкций (рулонные заготовки резервуаров, корпуса кораблей и т. п.). Для этой цели намагничивающие устройства ПНУ (или УНУ) комплектуют сменными (фасонными или прямыми) полюсными наконечниками.

Промышленность выпускает несколько типоразмеров намагничивающих устройств ПНУ (ПНУ-М1; ПНУ-М2; УНУ), предназна

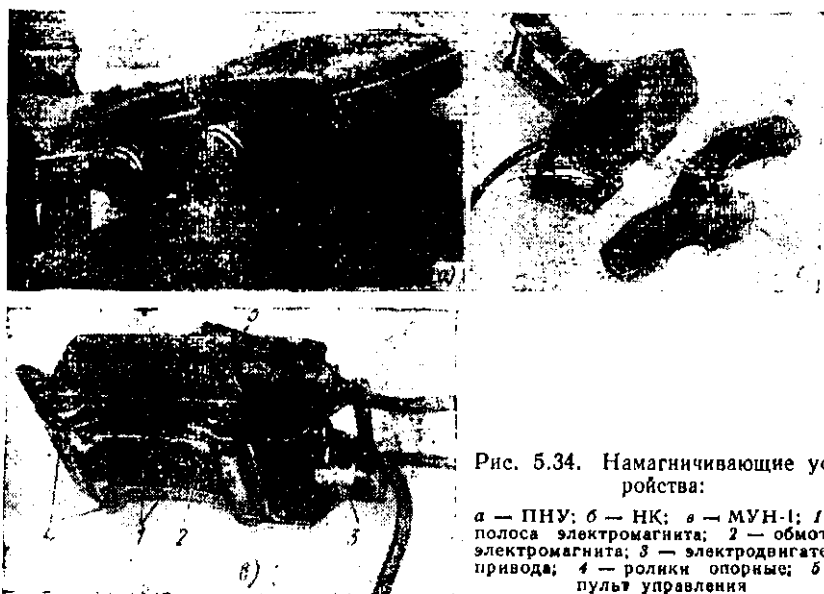


Рис. 5.34. Намагничивающие устройства:

а — ПНУ; б — НК; в — МНУ-1; 1 — полюса электромагнита; 2 — обмотка электромагнита; 3 — электродвигатель привода; 4 — ролики опорные; 5 — пульт управления

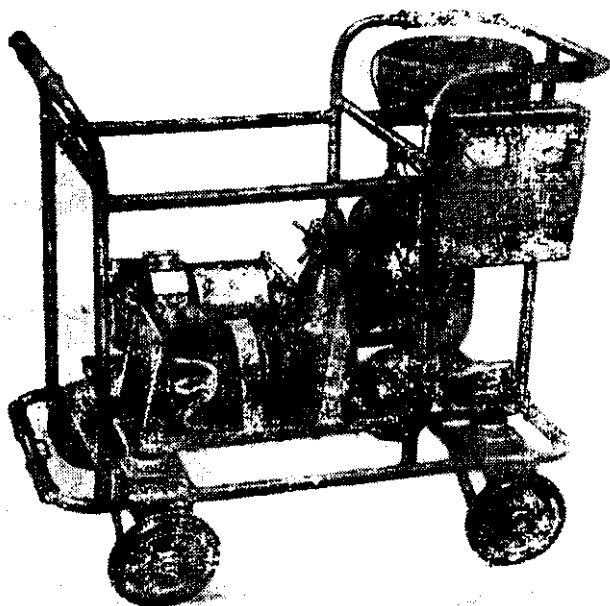


Рис. 5.35. Передвижная автономная станция питания СПА-1

ченных для контроля сварных стыков труб диаметром 150—1200 мм и плоских изделий с толщиной стенки до 16 мм. Для контроля кольцевых сварных швов труб малого диаметра (57—150 мм) с толщиной стенки до 12 мм промышленность выпускает неподвижные намагничивающие устройства (рис. 5.34, б), получившие название намагничивающих вилок типа НВУ-1. Эти устройства также комплектуют сменными полюсными наконечниками с различным радиусом кривизны, которые плотно прижимаются к поверхности труб соответствующего диаметра.

Устройства ПНУ и НВУ обладают намагничивающей силой до 18—20 тыс. ампервитков, достаточной для намагничивания до состояния технического насыщения сварных соединений указанных толщин.

Для магнитографического контроля сварных швов труб большого диаметра (до 1420 мм) и плоских конструкций с толщиной стенки до 18—20 мм разработаны шаговые намагничивающие устройства с механическим приводом (рис. 5.34, в). Они перемещаются вдоль шва шагами по 200 мм. Во время подачи тока в обмотку электромагнита полюса притягиваются к поверхности изделия, что позволяет намагничивать сварные соединения без воздушного зазора. Этим достигается уменьшение потерь магнитодвигательной силы и, как следствие, повышение эффективности намагничивания и чувствительности контроля. Шаговые намагничивающие устройства типа «шагну»

(или МУН-1) также универсальные и комплектуются набором полюсных наконечников.

Все перечисленные выше намагничивающие устройства питаются постоянным током. В зависимости от условий работы для их питания могут применяться различные источники постоянного тока с подходящими электрическими параметрами. Так, например, в заводских и других стационарных условиях для этой цели могут быть использованы выпрямители, имеющие на выходе напряжение 50—60 В и рассчитанные на ток нагрузки 40—50 А. В полевых условиях сварочно-монтажных работ для питания намагничивающих устройств постоянным током применяются переносные автономные станции питания типов СПП-1 или СПА-1, серийно выпускаемые промышленностью. Эти станции питания спроектированы на базе генератора ГСК-1500 и имеют массу не более 40—50 кг при достаточной мощности (рис. 5.35).

В отдельных случаях в качестве источников питания для намагничивающих устройств можно использовать сварочные агрегаты (например, АСДП-500, АСБ-300 и др.).

Дефектоскопы. Для воспроизведения магнитной записи сварных швов применяют магнитографические дефектоскопы, состоящие из считывающего устройства — вращающегося барабана (ротора) с магнитными индукционными головками, электронного усилителя, генератора пилообразного напряжения (генератора развертки) и электронно-лучевой трубки, служащей индикатором (см. рис. 5.31, б).

Промышленность выпускает дефектоскопы, имеющие два вида индикации: импульсную и телевизионную.

В наиболее совершенных дефектоскопах МДУ-2У (рис. 5.36, а) и МГК-1 (рис. 5.36, б) для индикации применена двухлучевая электронная трубка с длительным послесвечением экрана. На одном общем экране двухлучевой трубки или на экранах двух трубок производятся одновременно импульсное изображение сигналов и телевизионное изображение магнитограммы участка контролируемого

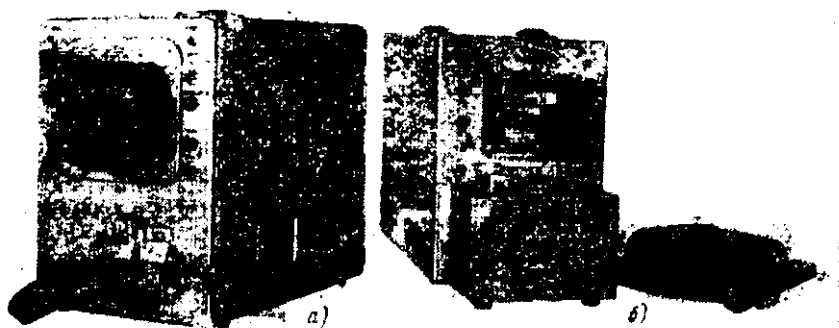


Рис. 5.36. Дефектоскоп:

а — МДУ-24; б — МГК-1

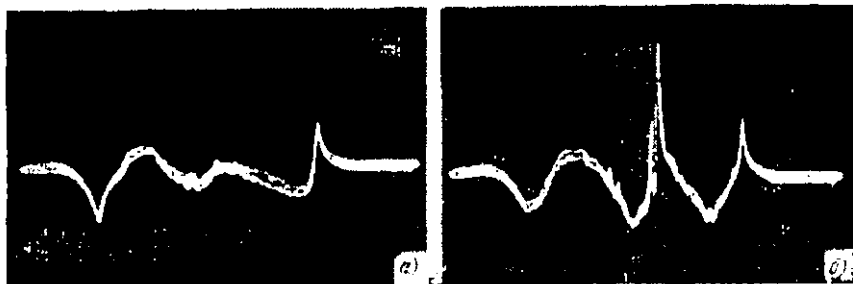


Рис. 5.37. Изображение сигналов от дефектов при импульсной индикации:

а — без дефекта; б — с дефектом

сварного шва, позволяющие определять количественные и качественные характеристики выявляемых дефектов с достаточной наглядностью и точностью. На рис. 5.37 и 5.38 показаны изображения сигналов от некоторых видов дефектов при воспроизведении магнитной записи сварного шва на экранах импульсной и телевизионной индикаций.

Режимы контроля. Чувствительность магнитографического контроля в значительной мере зависит от режима намагничивания и магнитных характеристик применяемой магнитной ленты. Для выбора магнитной ленты с оптимальными характеристиками необходимо знать условия, в которых она будет работать в процессе намагничивания и «записи» дефектов.

При магнитографическом контроле сварных швов изделий, например, из низкоуглеродистых сталей напряженность внешнего магнитного поля (H) на поверхности основного металла (т. е. в околошовных зонах) колеблется в пределах 200—300 А/см в зависимости от выбранного оптимального режима намагничивания. В зоне сварного шва напряженность наружного поля

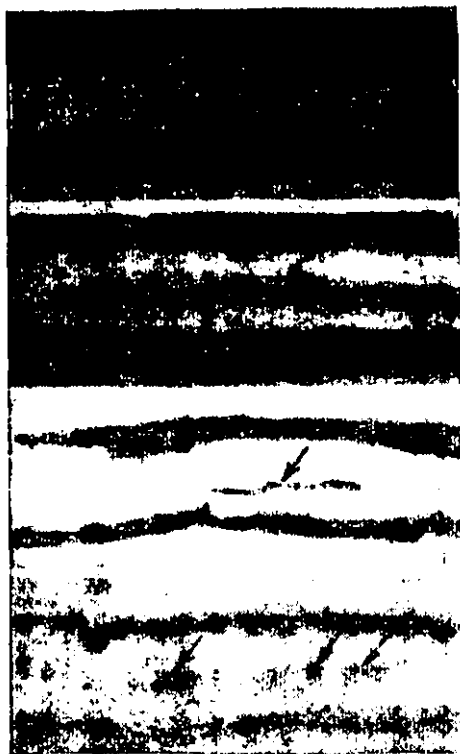


Рис. 5.38. Изображение сигналов от дефектов при телевизионной индикации (стрелкой указаны дефекты)

падает до 100—150 А/см, так как выступающее усиление ослабляет поле внешнего источника (см. рис. 5.17). Поле рассеяния от дефекта (H_d) возникает в виде приращения напряженности магнитного поля над дефектным местом. Экспериментально установлено, что протяженные дефекты с размером по глубине 5—50% толщины материала создают поля рассеяния напряженностью от 400—800 до 1200—1600 А/м, примерно с линейным законом возрастания.

Эталонирование. Оптимальные режимы намагничивания сварных швов в каждом конкретном случае применения метода определяют экспериментально на специальных тест-образцах или эталонах, имеющих недопустимые естественные или искусственные дефекты минимальных допустимых размеров. Дефекты в эталоне должны быть расположены в самом неблагоприятном для выявления месте: в корне шва при одностороннем подходе и в центре шва при двустороннем. Эталон должен быть из того же металла и сварен по той же технологии, что и контролируемое сварное соединение. Определенные экспериментальным путем режимы намагничивания эталона, при которых выявляется недопустимый дефект, заносят в инструкцию по магнитографическому контролю, а магнитную ленту, снятую при оптимальном режиме намагничивания (эталонная магнитограмма), используют для проверки и настройки магнитографического дефектоскопа.

Методика контроля. Методика магнитографического контроля состоит в следующем.

1. Перед проведением магнитографического контроля сварные швы подвергают внешнему осмотру и подготовке. При этом с поверхности контролируемых швов должны быть устранены остатки шлака, брызги расплавленного металла, грязь, снег и пр.

2. Отрезок магнитной ленты соответствующей длины накладывают внатяг на поверхность сварного шва стороной магнитного слоя к нему. Предварительно на одном из свободных концов ленты длиной примерно 100 мм записывают «привязочные» данные (№ шва или детали, клеймо сварщика, дату контроля, режим намагничивания и т. п.).

3. При контроле кольцевых швов цилиндрических изделий (труб, сосудов и т. п.) магнитную ленту плотно прижимают к поверхности шва по всему периметру с помощью эластичного резинового пояса, обычно входящего в комплект намагничивающих устройств. При контроле сварных швов плоских изделий ленту прижимают ко шву специальной эластичной «подушкой», укрепленной с нижней стороны намагничивающего устройства.

4. В зависимости от толщины сварного соединения, его магнитных свойств и типа применяемого намагничивающего устройства устанавливают необходимый режим (ток) намагничивания. При намагничивании сварного шва необходимо следить за тем, чтобы полюса электромагнита во время перемещения вдоль шва были расположены симметрично к нему.

5. По окончании намагничивания шва ленту снимают с него и полученную на ней магнитную запись воспроизводят на магнитогра-

фическом дефектоскопе. Перед воспроизведением магнитограммы контролируемого шва дефектоскоп настраивают по эталонной магнитограмме.

Настройка дефектоскопа заключается в установлении с помощью регулятора «чувствительность» канала импульсной индикации амплитуды сигнала от эталонного дефекта в пределах между двумя плитами, имеющимися на экране импульсной индикации. При этом регулятор «контрастность» канала видеоиндикации устанавливают так, чтобы на экране наблюдалось четкое изображение магнитного отпечатка эталонного дефекта.

Во время воспроизведения записи регистрируются все дефекты, амплитуда или контрастность которых равны или больше, чем у эталонного. Дефектные участки шва размечают на ленте и затем по привязочным знакам размечают дефектные места на сварном шве.

Область применения и перспективы развития метода. Магнитографический метод в основном применяют для контроля стыковых швов, выполненных методами сварки плавлением. С использованием выпускаемой промышленностью намагничивающей аппаратуры этим методом можно контролировать сварные изделия и конструкции из различных сортов листовой стали толщиной до 20 мм.

Магнитографический метод контроля впервые был предложен в Советском Союзе в 1952 г., а его развитие и практическое применение началось с 1953—1954 гг. В начальный период развития этот метод получил применение в основном для контроля качества стыков сварных швов труб при строительстве газонефтепроводов, где он применяется и до настоящего времени в сочетании с методами рентгено-гаммаграфии. При этом на долю магнитографического метода, благодаря его высокой производительности, экономичности и безвредности для обслуживающего персонала, приходится не менее 70% общего объема контроля сварных швов физическими методами.

За последние годы в ряде организаций проведено немало исследований и опытно-конструкторских работ, позволивших непрерывно совершенствовать аппаратуру и методику магнитографического контроля применительно к различным отраслям промышленности. Данный метод контроля может успешно применяться как в технологическом цикле заводского производства, так и в различных монтажных условиях.

5.2.3. Феррозондовый метод

Сущность феррозондового метода контроля заключается в обнаружении магнитных полей дефектов с помощью магнитомодуляционных датчиков-феррозондов.

Для магнитной дефектоскопии обычно применяют феррозонды, собранные по градиентометрической схеме. По сравнению с феррозондом-полюмером, градиентометры в этом случае имеют преимущество, заключающееся в том, что на их показания практически не оказывают влияние посторонние магнитные поля (например, поля соз-

даваемые различными электрическими машинами в условиях производства, поле земли и др.). Напряженность этих посторонних полей может изменяться в широких пределах, однако в малом объеме, занимаемом феррозондом, их градиенты ничтожно малы по сравнению с измеряемыми локальными полями рассеяния от дефектов.

В магнитной дефектоскопии применяют обычно феррозонды небольших размеров длиной 2—10 мм, питающиеся током возбуждения частотой 10—300 кГц. На низших пределах частот работают феррозондовые приборы, предназначенные для выявления относительно грубых дефектов в стальных изделиях с высокими коэрцитивной силой ($H_c \approx 1600 \div 2400$ А/м) и остаточной индукцией ($B_r \approx \approx 6 \div 7$ кГс).

Феррозондовые дефектоскопы, работающие на частотах 100 кГц и выше, очень чувствительны. С помощью таких дефектоскопов в изделиях из магнитномягких материалов могут выявляться поверхностные дефекты (микро- и макротрещины и риски глубиной 0,01 мм и более, тонкие пленки и др.), внутренние дефекты на глубине до 8 мм, а более крупные дефекты на глубине до 15 мм. Этим методом удается обнаруживать трещины глубиной 0,5 мм на внутренней поверхности труб толщиной 6—8 мм. Для обеспечения высокой чувствительности и достоверности феррозондового метода поверхность контролируемых изделий должна иметь хорошую чистоту обработки. Кроме того, на результаты контроля могут влиять структурные неоднородности материала изделия.

Контроль можно проводить как в процессе намагничивания деталей (т. е. в приложенном поле), так и на остаточной индукции, после предварительного намагничивания изделия до насыщения. Контроль в режиме остаточной намагниченности более прост и удобен.

Феррозондовый метод контроля получил достаточно широкое распространение. За рубежом наибольший успех в данной области достигнут в институте Ф. Ферстера в ФРГ, который разрабатывает феррозондовую дефектоскопическую аппаратуру и автоматизированные установки для многих машиностроительных и металлургических заводов.

В отечественной промышленности феррозондовые дефектоскопы (типов ФДП) и установки (типов ФДУ) применяются для контроля сплошности стальных труб, заготовок, прутков, деталей шарикоподшипников и многих других изделий машиностроительных заводов.

В последние годы в ряде организаций страны проводились исследования и разработка феррозондового метода применительно к контролю качества сварных швов стальных изделий. Результаты этих работ указывают на перспективность данного метода для контроля сварных соединений и околошовной зоны. Особенно привлекательны высокая чувствительность метода и возможность автоматизации контроля.

Кроме дефектоскопии, феррозонды находят применение для магнитных измерений, толщинометрии и структуроскопии. С помо-

шью феррозондов можно выявлять ферромагнитные примеси в немагнитных массах и средах, определять степень размагниченности деталей (например, после магнитного контроля).

5.3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ

Электромагнитные вихретоковые методы контроля основаны на регистрации изменения взаимодействия электромагнитного поля и объекта контроля по изменению поля вихревых токов, наводимых в объектах контроля.

5.3.1. Принцип метода

Принцип электромагнитного метода заключается в регистрации изменения полей источника (полезадающей системы) и вихревых токов, наведенных источником в объекте контроля. Воздействие поля вихревых токов на измерительную катушку эквивалентно изменению индуктивного ($X_L = 2\pi fL$) и активного (R) сопротивлений датчик-катушки. Это приводит к изменению составляющих напряжения и сдвигу фаз опорного и измеряемого напряжений, которые можно принять за первичные информативные параметры.

5.3.2. Чувствительность и возможные области использования

Возможности и области применения электромагнитных методов контроля обусловлены факторами, влияющими на взаимодействие поля вихревых токов с полем датчика. Так, например, нарушения сплошности контролируемых изделий служат препятствием для вихревых токов, и их действие аналогично увеличению сопротивления поверхностного слоя металла, что приводит к ослаблению вихревых токов и возникновению соответствующего сигнала в датчике. Метод вихревых токов можно использовать для выявления поверхностных или подповерхностных дефектов (трещин, раковин, неметаллических включений и т. п.), протяженностью более 1,5 мм, диаметром более 0,6 мм и на глубине до 1 мм.

Метод вихревых токов может успешно применяться также для бесконтактного измерения электропроводности металлов изделий. Поскольку электропроводность металлов зависит от их химического состава и структурного состояния, то данный метод может быть использован для сортировки сплавов по маркам (по химическому составу) и для определения качества термической, термохимической обработки деталей. При контроле изделий из ферромагнитных материалов метод вихревых токов основывается на определении изменения свойств, связанных с магнитной проницаемостью.

Кроме того, важный фактор, влияющий на величину вихревых токов и на их взаимодействие с датчиком, — расстояние между последним и поверхностью контролируемого изделия, а также их взаимное расположение, форма и размеры. Эти геометрические

факторы обусловили ряд новых возможностей метода вихревых токов: измерение толщины слоя гальванических, лакокрасочных, теплоизоляционных, клеевых и других изоляционных покрытий и пленок; определение толщины стенки труб, пустотелых деталей и других тонколистовых изделий при одностороннем доступе; контроль диаметра прутков и проволоки. В ряде случаев геометрические факторы существенно затрудняют практическое применение метода. Последнее объясняется тем, что при контроле деталей, например, по свойствам их материала, связанным с электропроводностью, отклонения в размерах деталей (даже в пределах допусков) могут оказывать более сильное влияние на параметры датчика, чем исследуемые свойства материала деталей. На результаты контроля отрицательно могут влиять также одновременно несколько из указанных факторов.

Для устранения влияния мешающих факторов в конструкции современных индукционных дефектоскопов и измерительных приборов применяют различные методы «отстройки», позволяющие значительно повысить чувствительность приборов к исследуемому параметру материала изделий и точность результатов контроля. В этих же целях при контроле изделий из ферромагнитных материалов их подмагничивают в постоянном магнитном поле с помощью специальных электромагнитов.

5.3.3. Аппаратура

Отечественная промышленность серийно выпускает несколько типов электромагнитных дефектоскопов, структуроскопов и измерительных приборов, из которых наиболее широко распространены следующие.

1. Измерители электропроводности типов: ИЭ-1, ЭИ-1М, ИЭ-20 ИЭ-Т и др., применяемые для контроля количества примесей и сортировки немагнитных материалов и сплавов по маркам, а также для выявления наружных дефектов (трещин, прижогов) на изделиях из немагнитных и некоторых магнитных материалов и контроля термической обработки ряда алюминиевых сплавов. Кроме того, данные приборы позволяют измерять толщину слоя гальванических покрытий на стальных деталях.

2. Электромагнитно-индуктивные дефектоскопы ЭМИД-2, ЭМИД-3, ЭМИД-4, ЭМИД-6, ЭМИД-8, предназначенные для контроля стальных изделий (круглых и шестигранных прутков и др.) и позволяющие выявлять трещины, сортировать по маркам и контролировать качество термообработки (методом сравнения с эталонным образцом). Приборы комплектуют набором датчиков различного диаметра.

3. Индукционные дефектоскопы с накладной катушкой ДНМ-500; ДНМ-15, ППД-1, ВД-1; ВД-1ГА (статические) и ДВТ-1, ЭДМ-66 (динамические), предназначенные для контроля деталей и полуфабрикатов из немагнитных и магнитных материалов и сплавов. Прибором ДВТ-1 контролируют детали круглой и цилиндрической формы при вращении их вокруг своей оси. В приборе ЭДМ-66 при-

менен датчик с вращающимися накладными катушками. Этот прибор можно использовать также для контроля зачищенных сварных швов и околошовной зоны.

4. Толщиномеры: ТПН-1; ИДП-3; ЭМТ-2А; ВТ-2; ТПК-2; ЭФИТ-2; ППМ-6; КТП-1а; ТВ-2ч; ТВФ (1—4) и УПДТ-1, предназначенные для измерения толщины лакокрасочных, оксидных, стеклопластиковых, эмалевых и гальванических покрытий на изделиях из немагнитных и магнитных материалов, а также для измерения толщины стенок и разностенности аустенитных труб с толщиной стенки 0,2—5 мм и диаметром 6 мм и более.

Методы вихревых токов позволяют автоматизировать контроль качества изделий в процессе поточного производства. В настоящее время в нашей стране и за рубежом (ФРГ, США, Швеция, Англия и др.) созданы и успешно применяются на ряде заводов установки и линии автоматизированного контроля массовых изделий в потоке.

Методы вихревых токов применительно к контролю качества сварных соединений пока еще мало исследованы и разработаны. Они могут быть применены для фазового и структурного анализа в сварном шве и околошовной зоне. Возможность контроля этими методами дефектов сплошности сварных швов с усилением представляется проблематичной.

КАПИЛЛЯРНЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

6.1. КЛАССИФИКАЦИЯ И ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДОВ

6.1.1. Основные понятия

Задача капиллярной (пенетрационной) дефектоскопии заключается в обнаружении поверхностных дефектов при использовании средств, позволяющих изменить светоотдачу дефектных участков. Тем самым искусственно изменяют контрастность дефектного и неповрежденного мест. Методы капиллярной дефектоскопии используют главным образом для контроля соединений из жаропрочных неферромагнитных сплавов, а также неметаллических материалов, применяемых при изготовлении деталей энергетического, транспортного и специального машиностроения, керамических и металло-керамических деталей радиоэлектронных устройств.

Капиллярная дефектоскопия базируется в основном на следующих явлениях: капиллярном проникновении, сорбции и диффузии, световом и цветовом контрастах. Заполнение дефектных полостей, открытых с поверхности, специальными свето- и цвето-контрастными индикаторными веществами — первый этап капиллярной дефектоскопии. Микроскопическое сечение и макроскопическая протяженность поверхностных дефектов уподобляют их капиллярным сосудам, обладающим своеобразной особенностью всасывать смачивающие их жидкости под действием капиллярных сил.

В качестве жидкостей-пенетрантов, смачивающих полости дефектов, используют растворы органических люминофоров и красителей в смесях с необходимыми добавками. Избыток окрашенных жидкостей удаляют с помощью специализированных очищающих составов различными способами. После этого при освещении детали ультрафиолетовым светом можно четко выявить поверхностный дефект по яркому свечению следов заполняющего его люминесцирующего раствора (люминесцентный метод).

Для красителей, не обладающих способностью люминесцировать, характерно избирательное отражение части видимого спектра. Освещенные детали с дефектом, заполненным красителем, позволяет выявить дефект также косвенно по наличию цветной полосы в зоне дефекта (цветной метод).

Для надежного отыскания дефекта следует возможно большее количество люминофора или красителя извлечь из микрополости

дефекта на поверхность. В этом состоит второй этап контроля — проявление. Эффект регистрации дефектов усиливается при помощи средств, способствующих наиболее полному проявлению индикаторного вещества (люминесцирующего или цветного), в связи с чем такие средства называют проявляющими. Извлечение и локализация индикаторных веществ у кромок дефекта достигаются диффузионными и сорбционными силами проявителей.

6.1.2. Классификация

По свето-колористическим особенностям индикаторных следов дефектов различают три метода капиллярной дефектоскопии: люминесцентный (Л), цветной (Ц), люминесцентно-цветной (Л—Ц).

По принципам образования индикаторных следов дефектов в методах капиллярной дефектоскопии различают три способа проявления.

1. Сорбционный — мокрый и сухой.

2. Растворяющий (диффузионный) с использованием пигментированного или бесцветного лака.

3. Без проявления: а) беспорошковый, б) самопроявляющий.

Люминесцентный метод. Этот метод развивается в трех вариантах проявления: сорбционном, диффузионном и без проявления.

Сорбционный вариант люминесцентного метода — старый и наиболее распространенный (но не наиболее эффективный). На деталь, очищенную от излишков индикаторной жидкости и следов очищающего состава, наносят сорбент в виде порошка («сухой» способ) или в виде суспензии порошкообразного сорбента в жидкости («мокрый» способ). Сорбент выдерживают на контролируемой поверхности заданное время для извлечения следов индикаторного раствора, сохранившегося в дефектах. Время проявления для случая сухого сорбента отсчитывают от момента нанесения, а для случая мокрого сорбента — от момента испарения дисперсионной (жидкой) среды.

Затем контролируемую поверхность осматривают при облучении ультрафиолетовым светом. Люминесценция индикаторного раствора, поглощенного сорбентом, дает четкую и контрастную картину расположения дефектов. Сорбционный вариант метода повышает чувствительность контроля не только за счет свечения участка дефектной поверхности, но и за счет искусственного «расширения» устья дефекта в результате скопления массы частиц сорбента. Это приводит к образованию люминесцирующей индикаторной полосы значительно большей ширины, чем истинная ширина дефекта у поверхности (рис. 6.1).

Растворяющий или *диффузионный* способ проявления использует диффузию люминесцирующего раствора в слой специального лакового покрытия, не обладающего собственной люминесценцией. Этот способ люминесцентной дефектоскопии обеспечивает наибольшую чувствительность к мельчайшим дефектам.

Люминесцентный метод *без проявления* может быть в двух вариантах — беспорошковым и самопроявляющем.

Рис. 6.1. Схема основных операций люминесцентной дефектоскопии:

1 — нанесение жидкости; 2 — снятие жидкости; 3 — нанесение адсорбента (проявление); 4 — освещение (операция очистки на схеме не показана)

Беспорошковый (кристаллофлуорофорный) вариант состоит в погружении детали в раствор органических кристаллов люминофора в летучем растворителе. Если в детали имеется дефект, то вместе с растворителем в него заносится растворенный люминофор. После извлечения детали из индикаторной жидкости растворитель легко испаряется, а люминофор в виде скопления кристаллов остается на краях дефекта. При облучении ультрафиолетовым светом скопления кристаллов ярко люминесцируют, обнаруживая дефект. Чтобы устранить мешающее контролю свечение всей поверхности, ее обрабатывают в специальном растворе ингибитора, гасящем люминесценцию на поверхности, но практически не затрагивающем люминофор в капиллярных полостях дефектов.

Самопроявляющий вариант заключается в том, что после пропитки и очистки деталь нагревают, заменяя проявление. Специальная индикаторная жидкость при нагревании выходит из полости дефекта, затвердевает и образует индикаторную полосу, люминесцирующую под действием ультрафиолетового излучения.

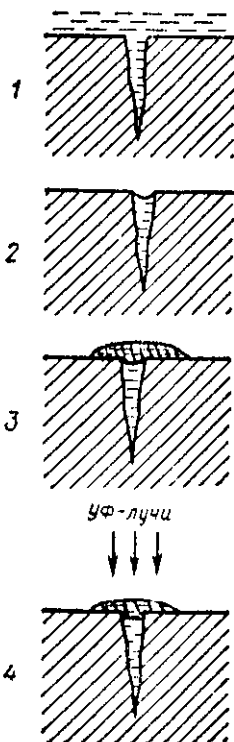
Цветной метод. В цветной дефектоскопии, известной как метод красок, в качестве проявителей применяют порошкообразные сорбенты (как правило, в виде суспензий) и белые проявляющие лаки.

Методика использования метода дана в п. 6.2.2.

Люминесцентно-цветной метод. Этот метод представляет собой сочетание люминесцентного и цветного в диффузионном варианте. Для получения наибольшей чувствительности деталь осматривают в ультрафиолетовом свете, а для пониженной чувствительности в дневном свете.

При этом применяют особые дефектоскопические материалы, именуемые аэро. Используют слабо концентрированный раствор спирто-водорастворимого красного флуорокрасителя в смеси спирта и неионогенного поверхностно-активного вещества. В качестве проявляющего лака применяют флуоресцирующее в ультрафиолетовом свете, быстросохнущее белое пигментированное покрытие. Проявляющее покрытие образует твердый раствор, светящийся в ультрафиолетовом освещении красным светом, а в дневном свете, дающий видимый красный след.

Индикаторная жидкость смывается водой. Для упрощения очистки контролируемых поверхностей любой формы применяют мягкую



воздушно-водяную струю, получаемую распылением воды сжатым воздухом. Для облегчения очистки детали обрызгивают специальным очищающим составом либо погружают в него на 30—60 с. Состав представляет жидкую основу индикаторной жидкости без красителя, но с повышенной вязкостью.

6.2. СРЕДСТВА. МЕТОДИКА И ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ КОНТРОЛЯ

6.2.1. Дефектоскопические материалы

При капиллярном методе используют комплекты материалов, включающие в полном наборе или частично индикаторный пенетрант, очиститель, гаситель, проявитель.

Индикаторные пенетранты разделяют: по признаку состояния — на растворы и суспензии; по признаку колористических свойств — на цветные и ахроматические, люминесцентные и люминесцентно-цветные; по технологическому признаку — на удаляемые растворением органическими растворителями (группа 1), на водосмываемые (группа 2), на водосмываемые после воздействия очистителя (группа 3). Классификационные признаки индикаторных пенетрантов и их характеристика по образованию следа дефекта даны в табл. 6.1.

Очиститель — состав, предназначенный для удаления индикаторного пенетранта с поверхности объекта самостоятельно или в паре с растворителем.

Гаситель — состав, предназначенный для гашения видимой люминесценции остатков соответствующих индикаторных пенетрантов на контролируемой поверхности.

Т а б л и ц а 6.1

Индикаторные пенетранты

Классификационный признак	Характеристика следа дефекта
Ахроматический	Черный, серый. Поглощает рентгеновское излучение электропроводен, ионогенен
Люминесцентный	Испускает видимый свет под воздействием ближнего ультрафиолетового излучения
Цветной	Имеет определенный цветовой тон, при наблюдении в видимом свете
Люминесцентно-цветной	Имеет определенный цветовой тон в видимом свете и испускает видимый свет под воздействием ближнего ультрафиолетового излучения
Химический цвето- или люминесцентно-активный	Люминесцирует в ближнем ультрафиолетовом излучении или имеет определенный цветной тон после химического воздействия с реактивным проявителем
Суспензионный фильтрующий	Скопление окрашенных (цветных или люминесцентных) частиц суспензии в устье дефекта

Проявитель — состав, предназначенный для извлечения из полости дефекта индикаторного пенетранта с целью образования индикаторного следа и создания фона, облегчающего визуальное восприятие изображения дефектов.

Подробные рецепты материалов здесь не приведены, так как они даны в производственных инструкциях.

6.2.2. Аппаратура и методика контроля

Из стационарных дефектоскопов рекомендуются для использования малый дефектоскоп ЛД-4 и большой дефектоскоп ЛДА-3. В качестве переносного комплекта для цветной (красочной) дефектоскопии — набор ДМК-4.

Наиболее простая методика капиллярной дефектоскопии сварных швов заключается в следующем.

При люминесцентном методе контроля на изделие наносят жидкость (чаще всего смесь из 15% трансформаторного масла и 85% керосина), которая светится под действием ультрафиолетовых лучей. Затем на поверхность изделия наносят тонкий слой проявителя-порошка талька или углекислого магния. Через некоторое время порошок удаляют и сварной шов освещают ультрафиолетовым светом кварцевых ламп типа ПРК-2 и ПРК-4 со стеклами УФС-3-4. Дефекты будут видны по их яркому желто-зеленому свечению.

При контроле по методу красок на очищенную поверхность изделия наносят слой подкрашенной проникающей жидкости (чаще всего смесь из 20% скипидара, 80% керосина и 10 г краски «Судан-4» на 1 дм³ жидкости) и выдерживают 15—20 мин. Затем поверхность промывают 50%-ным раствором кальцинированной соды и просушивают. Далее на поверхность шва наносят тонкий слой проявляющей суспензии — раствора каолина в воде или спирте (400—500 г каолина на 1 дм³ жидкости). При просушке краска диффундирует из дефектов и окрашивает каолин в красный цвет. Для лучшей выявляемости дефектов поверхность шва осматривают дважды: через 3—5 мин и через 20—30 мин.

Частицы каолина обладают хорошими сорбционными свойствами, однако водная каолиновая суспензия плохо смачивает металл, поэтому в нее добавляют эмульгатор — моющее средство типа ОП-7.

Методы заполнения дефектных полостей. Известно четыре основных вида пропитки деталей в индикаторных жидкостях: капиллярный, вакуумный, компрессионный, ультразвуковой.

Капиллярная пропитка осуществляется простым погружением объекта контроля в индикаторный раствор либо смазыванием им контролируемой поверхности.

Вакуумная пропитка, основанная на вакуумировании дефектного объекта перед нанесением индикаторной жидкости, предназначена для повышения чувствительности и сокращения в 3—5 раз продолжительности пропитки. При разрежении 10^{-2} мм рт. ст. выявляются более мелкие дефекты, чем при капиллярной пропитке.

Компрессионная пропитка находит применение при отыскании мест течи и также предназначена для повышения чувствительности и производительности контроля.

Для интенсификации пропитки иногда прибегают к подогреву индикаторной жидкости и объекта контроля. Главную роль при этом играет не столько «насосное» действие изменяющихся объемов, сколько температурное изменение капиллярных сил, зависящих от молекулярного строения поверхности жидкости и энергии поверхности раздела системы твердое тело—жидкость.

Ультразвуковая пропитка, благодаря воздействию кавитационного эффекта на границе жидкость—твердое тело, ускоряет процесс заполнения капиллярных полостей дефектов, особенно загрязненных. При ультразвуковой обработке наилучшим образом удаляются остатки одной индикаторной жидкости, обеспечивая повторный контроль того же объекта другой индикаторной жидкостью. Лучшие результаты дает ультразвуковое воздействие низкими частотами порядка 20—22 кГц при мощностях не менее 3 Вт/см³.

Для ориентировочных расчетов проникновения индикаторной жидкости известны приближенные формулы:

для сквозной капиллярной щели

$$h^2 = \frac{c\sigma \cos \theta}{3\eta} \tau$$

для тупиковой (несквозной) капиллярной щели

$$\tau \frac{c^2}{12\eta} = \frac{h^2}{2\rho_k} + \frac{\rho_0 h^3}{3\rho_k^2 h_0} + \frac{\rho_0 (\rho_k + \rho_0) h^4}{4\rho_k^3 h_0^2} + \dots$$

где c — раскрытие капиллярной щели, см; η — вязкость динамическая, пуазы (Г/см·с); σ — коэффициент поверхностного натяжения, дин·см⁻¹ (1 гс/с²), ρ_0 — атмосферное давление, дин/см² (гс/см·с²); 1 атм = 9,81·10⁵ дин/см², ρ_k — капиллярное давление, 1 гс/см·с². Для щели

$$\rho_k = \frac{2\sigma \cos \theta}{c};$$

h_0 — глубина полости дефекта, см, h — глубина проникновения жидкости за время τ , см; τ — время проникновения жидкости, с; θ — угол смачивания, град.

Принятые допущения: клиновидность трещин отсутствует, жидкость не имеет веса, ее вязкость и поверхностное натяжение не меняются, полярные и неполярные жидкости капиллярно равноценны.

Чувствительность контроля. Под чувствительностью метода в данном случае понимают размер минимального по величине (ширина, глубина и длина полости) дефекта, надежно выявляемого в конкретных условиях. Количественной оценкой чувствительности служит вероятность получения заранее задаваемой выявляемости. Выявляемость данного дефекта характеризуется относительным расширением устья дефекта индикаторным следом и относительным контрастом последнего.

Чувствительность капиллярной дефектоскопии ограничивается верхним и нижним пределами размеров дефектов. Верхний предел чувствительности определяется максимальной величиной раскры-

тия протяженного дефекта. Эта величина ограничивает его выявляемость (конкретными дефектоскопическими материалами и технологией) из-за интенсивного вымывания индикаторной жидкости из устья полости дефекта. Нижний предел чувствительности определяется минимальной величиной раскрытия протяженного дефекта. Нижний предел ограничен из-за потери окрашивающей способности весьма малых количеств индикаторной жидкости при данной толщине проявляющего покрытия.

Согласно ГОСТ 18442—73 в зависимости от сочетания методов, способов их реализации, а также используемых дефектоскопических материалов оценку чувствительности можно вести по четырем условным уровням (табл. 6.2.)

Т а б л и ц а 6.2

Шкала оценки чувствительности
капиллярного контроля

Условный уровень чувстви- тельности	Предельные размеры надежно выявляемого де- фекта (вероятность 0,95)		
	Ширина, мкм	Глубина, мкм	Длина, мм
I	Менее 1	До 10	До 0,1
II	До 10	До 100	До 1
III	До 100	До 1000	До 10
IV	От 100 и более	От 1000 и более	От 10 и более

Уровень чувствительности зависит от сочетания свето-колористических, технологических и зрительных условий дефектоскопирования. Глубину зародышевых трещин деформационного происхождения в поликристаллических материалах оценивают обычно величиной $\sim 10^{-3}$ мм. Энергетически устойчивыми (стадия зарождения) эти трещины оказы-

ваются, начиная с глубины 10^{-6} см. Размер пор диффузионного происхождения аналогичен. Из таких микродефектов впоследствии формируется макродефект.

Названные предельные размеры микродефектов поликристаллических тел определяют границу необходимой чувствительности методов дефектоскопии.

Наиболее целесообразно использовать капиллярную дефектоскопию в первую очередь для контроля сварных соединений из немагнитных материалов: сталей аустенитного класса, алюминия, латуни, титана и других, для которых не применимы магнитные методы контроля.

Капиллярную дефектоскопию применяют также для выявления межкристаллитной коррозии. Коррозия выявляется при цветном методе в виде мелкой сетки или сплошного покраснения покрытия на прокорродировавших участках металла (краситель типа «Судан»).

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ
ТЕЧЕИСКАНИЕМ7.1. КЛАССИФИКАЦИЯ, ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
И ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ МЕТОДОВ

Важнейшим эксплуатационным требованием для сварных соединений замкнутых объемов, сосудов и других изделий является сохранение непроницаемости или герметичности.

Герметичность — это способность сварного соединения сохранять в рабочих условиях начальное количество содержащегося в изделии вещества. Степень герметичности обычно измеряют величиной течи (утечки) в единицу времени. Наиболее распространенная причина потери герметичности сварных соединений — сквозные дефекты. Они обычно имеют вид поровых каналов, трещин, непроваров и других пороков. По своему происхождению эти дефекты могут быть первичными и вторичными. Ко вторичным относятся холодные и усталостные трещины, сквозные поры и свищи, образованные под действием агрессивной среды, вибрационной нагрузки и т. п. Обнаружение вторичных дефектов затруднено тем, что при контроле в процессе производства они не выявляются.

Характер движения жидкости или газа через течи зависит от размеров течи, состава среды и перепада давления. Он может быть вязкостным, молекулярно-вязкостным и молекулярным. Каждый из этих режимов течения описывается своими расчетными зависимостями.

Кроме перечисленных видов возможны также диффузионные течи, появление которых обычно связано с дефектами структуры металла (рыхлость и т. п.). Например, при сварке изделий из сплава АМг-6 в околосшовной зоне вследствие высокого градиента температур происходит частичное локальное изменение структуры. Это изменение приводит к появлению диффузионных течей типа межкристаллитной коррозии.

В зависимости от конкретных условий эксплуатации и рабочей среды потеря работоспособности может наступить не из-за разрушения, а вследствие чрезмерной течи в соединениях. С учетом этих условий следует выбирать рабочее тело для испытаний на герметичность — газ или жидкость (схема 7.1).

При контроле герметичности с помощью воздуха или пробных газов используют различные способы индикации первичной инфор-

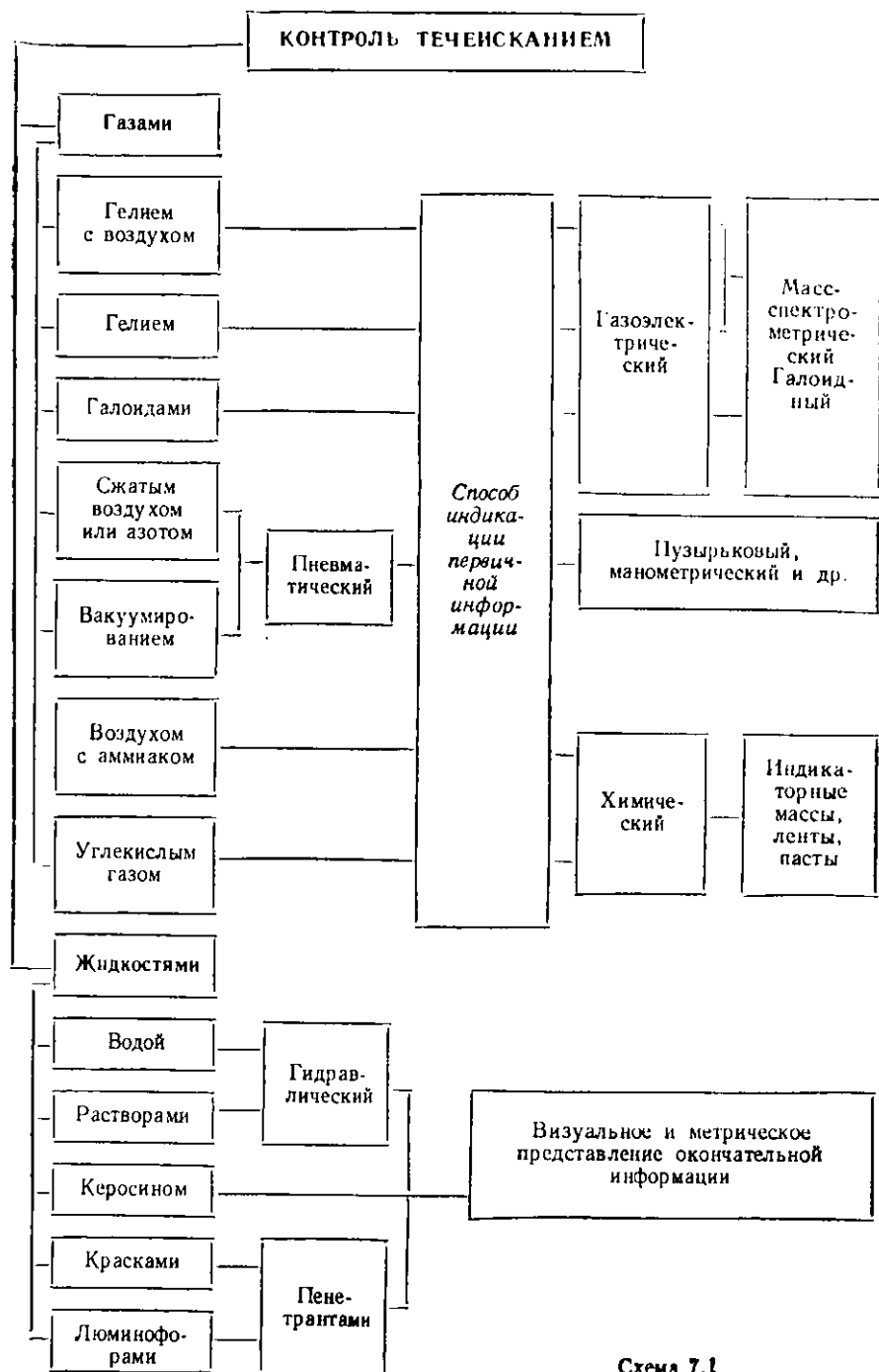


Схема 7.1

мации о наличии течи, которые также указаны на схеме. Каждый из этих способов обеспечивает ту или иную чувствительность контроля. Чувствительность измеряют обычно в единицах величины потоков. Наиболее распространенная единица течи — л·мкм/с, т. е. литр за секунду при давлении 1 мкм рт. ст. Используют и другие размерности, соотношения между которыми приведены ниже:

Используемые единицы	1 л·мм рт. ст./с	1 см ³ ·ат/о	1 см ³ ·ат/ч	1 см ³ ·ат/год
Основная размерность л·мкм/с	10 ⁸	760	0,21	2,5·10 ⁻⁶

Выбор метода контроля течеисканием зависит от класса герметичности, устанавливаемого проектантами. В некоторых отраслях принято три или пять таких классов. Наиболее жесткие требования существуют сейчас в атомной энергетике, где для ответственных соединений допустимая утечка не должна превышать 10^{-7} — 10^{-8} л·мкм/о или до $4 \cdot 10^{-4}$ см³·ат/год. Такую чувствительность контроля обеспечивают современные гелиевые течеискатели ПТИ-6, ПТИ-7 (табл. 7.1). Другие методы течеискания дают меньшую чувствительность, но соответственно выбирают и области их применения.

Для проверки чувствительности течеискателей и тарировки схемы течеискания применяют контрольные течи. Основ-

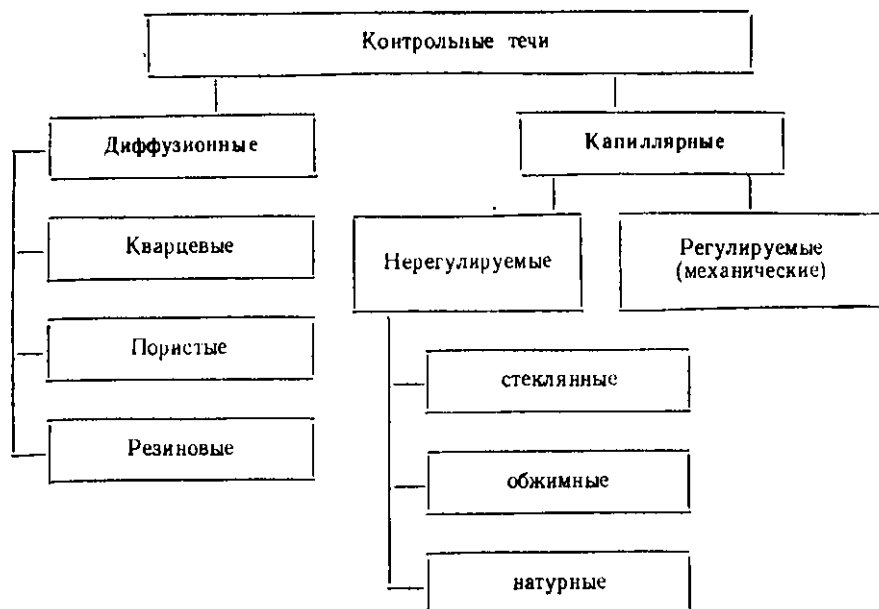


Схема 7.2

ным показателем оценки негерметичности изделий (локальной или суммарной) служит сравнительный анализ результатов, полученных при истечении пробного газа через контрольные течи и через неплотности контролируемых соединений.

Контрольные течи (КТ) могут быть диффузионные и капиллярные (схема 7.2).

Таблица 7.1

Примерная чувствительность методов течеискания

Основные методы	Рабочее тело	Индикация течи	Чувствительность	
			л·мм/с	см ³ ·ат/год
Масс-спектрометрический	Гелий	Увеличение показаний выносного пульта управления (ВПУ)	$1 \cdot 10^{-8}$	$4 \cdot 10^{-4}$
Галоидный	Фреоно-воздушные смеси	То же	$1 \cdot 10^{-4}$	4
Пневматический	Воздух азот (вакуум)	Пузырьки	$5 \cdot 10^{-2}$	2000
Химический	Аммиачно-воздушные смеси, углекислый газ	Пятна на индикаторной массе, ленте, пасте	$5 \cdot 10^{-4}$	20
Гидравлический	Вода	Течь	$5 \cdot 10^{-2}$	2000
Керосиновый	Керосин	Пятна на меловом фоне	$5 \cdot 10^{-3}$	200
Люминесцентно-гидравлический	Вода+пенетрант	Течь и свечение	$5 \cdot 10^{-5}$	2

Работа диффузионных КТ основана на диффузии гелия через пористые материалы. Их рабочий объем заполняется чистым гелием. Конструктивно их выполняют кварцевыми, с пористой проставкой (участок некачественного сварного шва) и из резины. Работа капиллярных КТ построена на истечении пробного газа через капилляр (щель, трещину и т. п.). Эти КТ работают, как правило, под избыточным давлением и конструктивно делятся на нерегулируемые и регулируемые.

7.2 ГАЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕЧЕИСКАТЕЛИ

Газоэлектрические течеискатели позволяют определять очень малые течи, которые не могут быть выявлены никаким другим способом. Однако течеискатели довольно сложны и дороги и поэтому их применяют для особо ответственных изделий, например в атомной энергетике.

Существуют два типа течеискателей: а) масс-спектрометрический (гелиевый) и б) галоидно-электрический (галоидный).

Принцип работы *гелиевых* течеискателей основан на выделении из комплекса газов, поступающих в камеру масс-спектрометра течеискателя, гелия. Этот газ применяют в качестве индикатора.

Попадание гелия в камеру масс-спектрометра обеспечивается присоединением течеискателя или к вакуумированному изделию, или к камере, наполненной гелием, до некоторого избыточного давления, в которую помещают изделие. Увеличение парциального давления гелия в камере масс-спектрометра, вызванное прониканием гелия через дефектное место, фиксируется одновременно выносным стрелочным прибором и звуковым сигналом.

Эффективность контроля герметичности изделий в большой степени зависит от состояния внутренней и наружной поверхности контролируемого изделия. Механические загрязнения (шлак, окалина, абразивная пыль), влага, масла и другие вещества на стенках изделия резко снижают надежность контроля.

Гелий, пройдя через неплотности, попадает в камеру масс-спектрометра, где давление составляет $5 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. (рис. 7.1). Камера масс-спектрометра находится в магнитном поле напряженностью порядка 1,3—1,4 МА/м. Камера имеет латунный корпус, в котором помещены катод, ионизатор, диафрагмы и коллектор ионов. Катод эммитирует поток электронов, которые ионизируют встречающиеся молекулы газа, превращая их в положительные ионы с зарядом e .

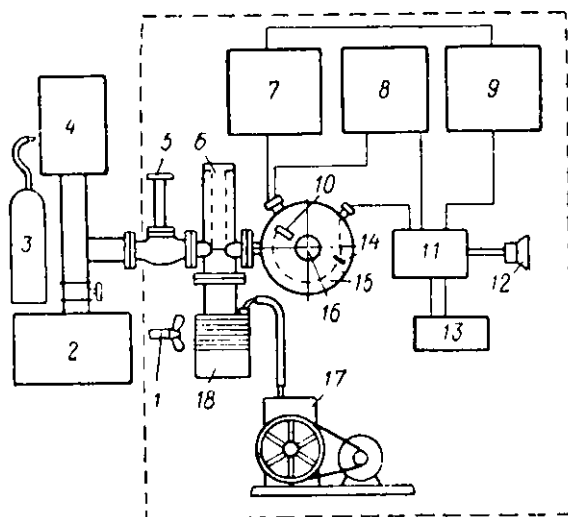


Рис. 7.1. Схема гелиевого течеискателя типа ПТИ:

1 — вентилятор; 2 — вакуум-насос; 3 — гелий; 4 — испытываемый объект; 5 — дроссельный кран; 6 — ловушка; 7 — выпрямитель электроразрядного манометра со стабилизатором тока эмиссии; 8 — генератор; 9 — панель управления; 10 — ионизатор; 11 — усилитель переменного тока; 12 — сирена; 13 — выходной прибор; 14 — коллектор; 15 — камера масс-спектрометра; 16 — электроразрядный манометр; 17 — форвакуумный насос; 18 — диффузионный насос

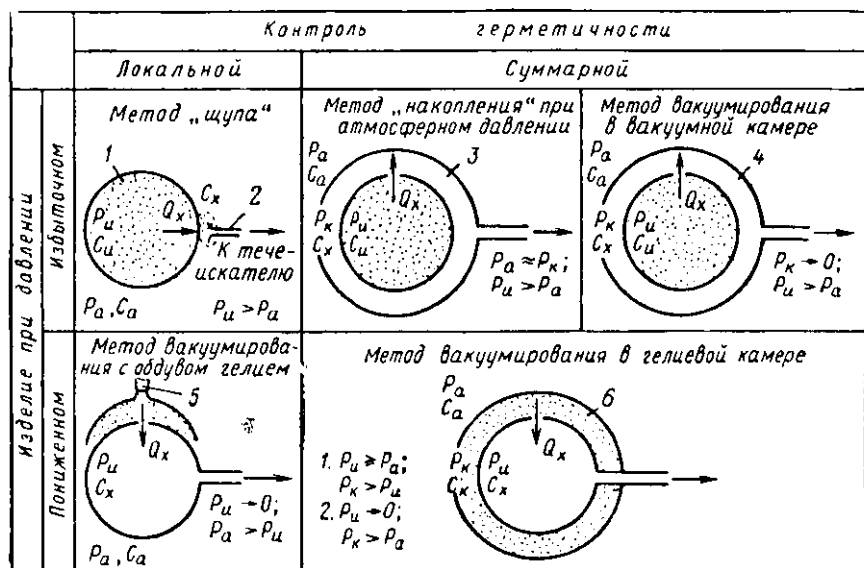


Рис. 7.2. Классификация методов контроля герметичности изделий:

1 — контролируемое изделие; 2 — щуп; 3 — оболочка, ограничивающая объем накопления; 4 — вакуумная камера; 5 — пистолет-обдуватель; 6 — гелиевая камера; $P_{а}, P_{и}, P_{к}$ — давления атмосферное, в изделии и камере соответственно; $C_{а}, C_{и}, C_{к}, C_{х}$ — концентрации контрольного газа в атмосфере, изделии, камере и неизвестная (в камере или изделии) соответственно; $Q_{х}$ — неизвестная величина утечки контрольного газа

Ионы ускоряются напряжением 300—400 В в продольном электрическом поле. Затем ионный пучок попадает в камеру масс-спектрометра и под действием магнитного поля ионы попадают на круговую траекторию. Ионы с разным отношением массы m к заряду e летят по разным радиусам. Диафрагмы выделяют только ионы с определенным m/e , которые попадают на коллектор. Ионный ток усиливается и передается на индикаторы: миллиамперметр и сирену.

Возможно использование вместо гелия водорода или аргона, однако молекула гелия имеет по сравнению с другими газами наименьший размер — около 1,9 Å. Кроме того, концентрация гелия в атмосфере самая наименьшая ($5 \cdot 10^{-4}\%$), поэтому микронеплотности обнаруживаются лучше.

По степени локальности основные методы масс-спектрометрического контроля можно разделить на две группы: методы контроля суммарной негерметичности, позволяющие обнаруживать суммарные натекания во всей конструкции без указания места расположения дефектов, и методы локального контроля, позволяющие определять места расположения дефектов (рис. 7.2). В обеих группах испытание можно вести как при избыточном давлении, так и при пониженном давлении. Принципиальные схемы испытаний показаны на рис. 7.3.

Различают методы: гелиевого щупа, вакуумирования с обдувом гелием наружной поверхности изделия, наложения специальных ка-

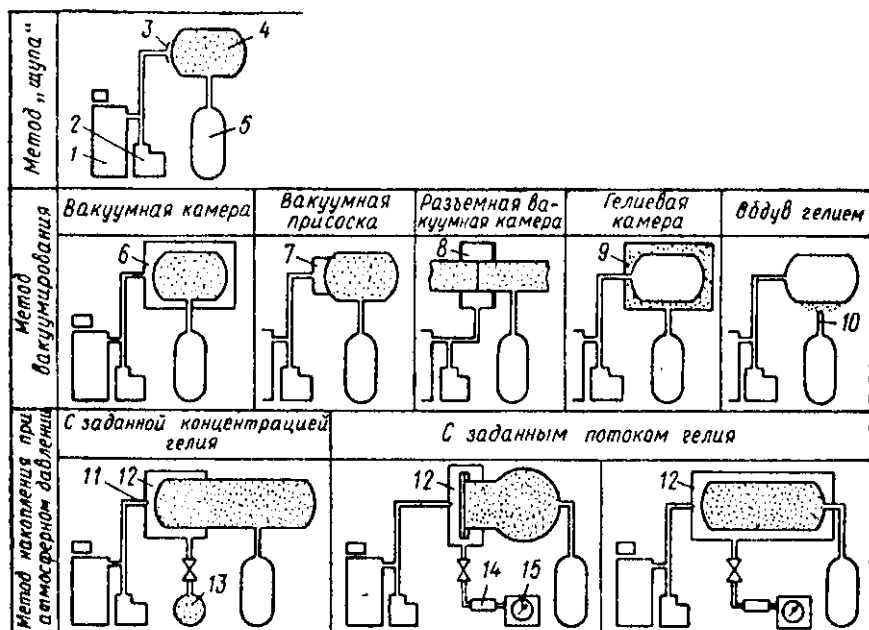


Рис. 7.3. Принципиальные схемы испытаний:

1 — теческатель; 2 — вспомогательная откачная система; 3 — шуп; 4 — объект испытания; 5 — баллон с контрольным газом; 6, 7, 8 — вакуумные камеры; присоски и разъемная камера соответственно; 9 — гелиевая камера; 10 — пистолет-обдуватель; 11 — шуп с иглой Любера; 12 — оболочка ограничивающая объем накопления; 13 — смкость с заданной концентрацией гелия; 14 — контрольная течь; 15 — пневмоульст

мер (камер-муфт) на отдельные участки контролируемого изделия и др.

Сущность метода избыточного давления заключается в том, что испытуемое изделие помещают в газонепроницаемую металлическую камеру, которая соединяется с откачной системой и теческателем (рис. 7.4). В полости камеры создается вакуум, а в изделие под давлением подается гелий. При сквозном дефекте гелий, благодаря разности давлений, проникает в полость камеры и попадает в теческатель, где фиксируется одновременно выносным прибором и звуковым сигналом.

Максимальная чувствительность выявления течей может быть обеспечена при более глубокой откачке воздуха из камеры, в которую помещено изделие, а также при больших избыточных давлениях гелия в изделии и более длительном времени выдержки.

Сущность метода гелиевой камеры заключается в том, что контролируемый объект, подсоединенный к теческателью, помещают в газонепроницаемую камеру (кожух) и вакуумируют до необходимого остаточного давления. Воздух в камере замещают гелием.

В зависимости от требований, предъявляемых к герметичности изделий, применяют следующие режимы: давление гелия 1 кгс/см^2

при концентрации гелия 50—100%, величина остаточного давления в изделии $5 \cdot 10^{-2} + 1 \cdot 10^{-1}$ мм рт. ст.; длительность выдержки 10—30 мин при объеме 0,5—5 м³.

Метод гелиевой камеры по чувствительности уступает методу избыточного давления; при остаточном давлении в изделии $5 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. теческатель ПТИ-6 обнаруживается утечка 0,1 см³·ат/год. Этим методом рекомендуется проверять изделия, имеющие объемы более 0,5 м³, создание вакуума в которых не представляет больших трудностей.

Наиболее эффективный и удобный метод обнаружения места течи в изделиях — метод гелиевого шупа, широко применяемый в производственных условиях. Испытуемое изделие наполняют гелием до давления, выше атмосферного, после чего наружную поверхность проверяют специальным шупом-улавливателем, соединенным вакуумным резиновым шлангом с теческателем. Благодаря разности давлений гелий проникает через неплотность и через шуп в шланг попадает в камеру масс-спектрометра теческателя.

Шуп (рис. 7.5) представляет собой натекаль, регулируемый на расходы 0—20 см³/с. Давление в шланге, соединяющем шуп с теческателем, составляет около 10^{-1} мм рт. ст. Конструкция насадки шупа позволяет установить точное место расположения течи в изделии. Установка, применяемая для контроля при помощи гелиевого шупа, приведена на рис. 7.6. При давлении гелия в изделии, равном 6 кгс/см², и при скорости перемещения шупа по поверхности не более 30 см/мин достигается чувствительность, позволяющая обнаружить с помощью теческателя ПТИ-6 натекания порядка 0,08 см³·ат/год.

При методе обдувки гелием наружной поверхности изделия из него откачивают воздух, а затем его подсоединяют к теческателью. После этого наружную поверхность изделия обдувают струей гелия. Наличие неплотности фиксируется теческателью.

Рабочие остаточные давления при контроле обдувкой от $10^{-1} \div 10^{-4}$ мм рт. ст. Скорость перемещения обдувателя около

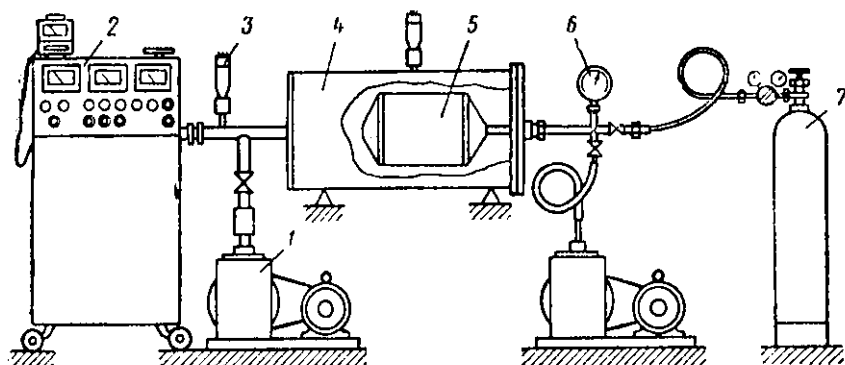


Рис. 7.4. Схема установки для контроля методом избыточного давления:

1 — насос вакуумный; 2 — теческатель; 3 — лампа термолучевая; 4 — камера; 5 — испытуемое изделие; 6 — мановакуумметр; 7 — баллон

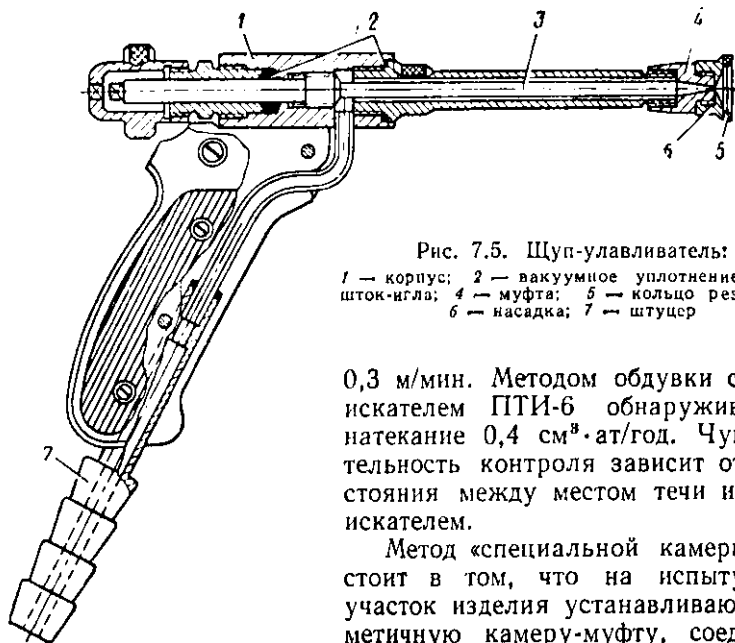


Рис. 7.5. Щуп-улавливатель:

1 — корпус; 2 — вакуумное уплотнение; 3 — шток-игла; 4 — муфта; 5 — кольцо резиновое; 6 — насадка; 7 — штуцер

0,3 м/мин. Методом обдувки с теческисателем ПТИ-6 обнаруживается натекание 0,4 см³·ат/год. Чувствительность контроля зависит от расстояния между местом течи и теческисателем.

Метод «специальной камеры» состоит в том, что на испытуемый участок изделия устанавливают герметичную камеру-муфту, соединенную с откачной системой и теческисателем. Камеру откачивают до необходимого вакуума, а в изделие, вакуумированное одновременно с камерой, под давлением подается гелий. Время выдержки не менее 3 мин. Этим методом можно определять натекание до 0,04 см³·ат/год при контроле трубопроводов и изделий небольшого диаметра.

Представляют интерес методы контроля герметичности после него сварного шва изделия, т. е. такого шва, после заварки которого объем становится замкнутым. Применяют два варианта этого метода: а) с заполнением гелия закрываемого объема

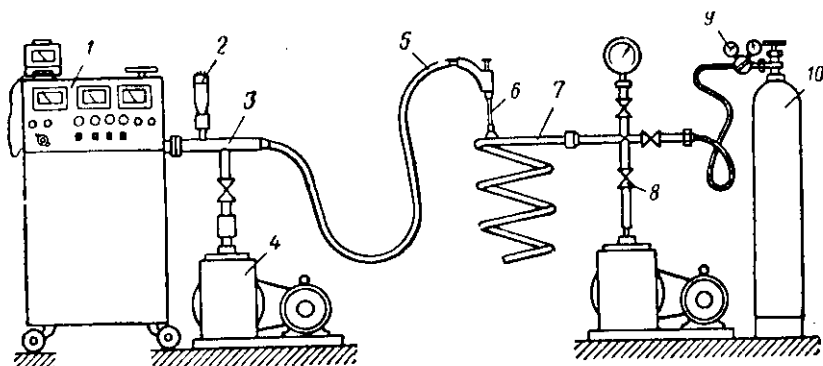
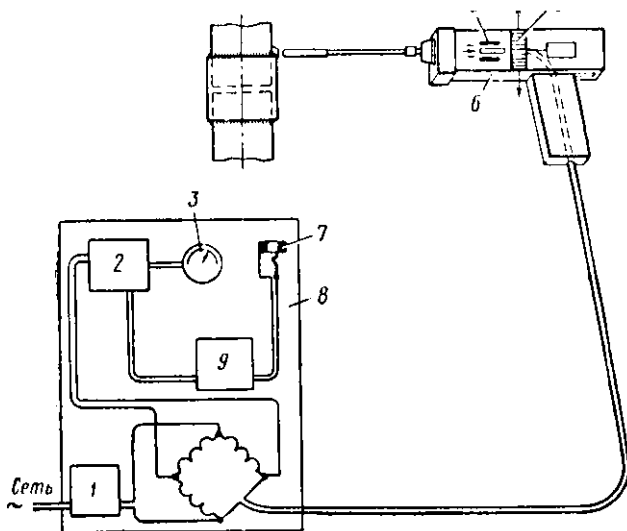


Рис. 7.6. Установка для контроля методом щупа:

1 — теческисатель; 2 — лампа термопарная; 3 — тройник; 4 — насос; 5 — шланг; 6 — щуп; 7 — изделие; 8 — вентиль; 9 — моноваккуумметр; 10 — баллон с гелием

Рис. 7.7. Схема галоидного теченскаателя типа ГТИ:

1 — стабилизатор напряжения; 2 — усилитель; 3 — миллиамперметр; 4 — электроды; 5 — вентиль; 6 — выносной щуп; 7 — телефон; 8 — измерительный блок; 9 — генератор звуковых колебаний



и заваркой последнего сварного шва в потоке гелия и б) с выдержкой в атмосфере гелия.

По схеме галоидного теченскаателя (рис. 7.7) в испытуемый сосуд подают воздух в смеси с галоидным газом (фреон, SF_6 , CCl_4 , хлороформ и т. п.) под давлением 0,2—0,6 ат. Смесь проходит через неплотности и прогоняется через межэлектродный промежуток щупа. Анод щупа нагрет до температуры 800—900° С. Ионы галоидного газа имеют высокий отрицательный потенциал. Попадая в щуп, они вызывают резкое увеличение потока положительных ионов с анода, что приводит к значительному изменению ионного тока. Индикаторами служат миллиамперметр и телефон. Применяют установки ГТИ-2, ГТИ-3 ВАГТИ-4. Чувствительность галоидного теченскаателя позволяет обнаруживать утечки 4—20 см³·ат/год или до 10⁻⁴ л·ммк/с.

Перед испытанием галоидным теченскаателем изделия проверяют менее чувствительными методами — гидравлическими и пневматическими с опрессовкой азотом или воздухом. После устранения грубых течей аппарат вакуумируют до давления 30—40 мм рт. ст. Затем подают под давлением фреон или смесь фреона с воздухом или азотом, взятых в отношении 1 : 10. При испытании предусматривают отсос воздуха со скоростью 0,2—0,3 м/с, а также возможность откачки фреона за пределы цеха.

7.3. ПРОЧИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ТЕЧЕИСКАНИЕМ

7.3.1. Пневматические испытания

Испытания сжатым воздухом. Окончательные испытания сжатым воздухом проводят для контроля общей герметичности сосудов. Негерметичность определяют по спаду давления (манометрическая

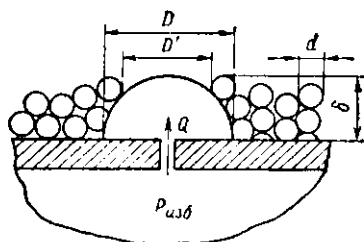


Рис. 7.8. Схема формообразования пузыря в месте дефекта:

D , D' — фактический и видимый диаметр зафиксированного пузыря; Q — величина потока пробного газа; d — диаметр элементарной ячейки пенной массы; δ — толщина слоя пенной массы

индикация) при выдержке в течение 10—100 ч. Испытательное давление обычно 1,0—1,2 от рабочего. Испытания под высоким давлением воздуха весьма опасны, поэтому их проводят редко и со строгим учетом требований безопасности.

Неплотности можно определять с помощью сжатого воздуха, применяя разные способы индикации течей, например пузырьковый.

Способ мыльной пены. Изделие наполняют воздухом (или азотом) до установленного ТУ давления и обмазывают мыльной водой. Дефекты выявляют по появлению пузырьков.

Дефекты можно также определять, обдувая шов воздухом из шланга под давлением около 4 ат. Можно обнаружить поры диаметром до 10^{-3} — 10^{-4} мм (в зависимости от давления).

При контроле ответственных изделий вместо мыльных растворов применяют специальные деформирующиеся массы. Используют пенные индикаторы, имеющие чувствительность $1 \cdot 10^{-1}$ — $5 \cdot 10^{-2}$ л·мкм/с и дисперсные массы с чувствительностью до 10^{-3} л·мкм/с. Основной пенного индикатора служит моющее средство типа «Экстра» (10%) и влагоудерживающий компонент — глицерин (до 90%) с хромпиком (0,01%). В дисперсную массу добавляют наполнители — двуокись титана (5%) и каолин (10%), а также краситель (метилен) и ингибитор.

Для выявления локальной течи необходимо, чтобы видимый диаметр зафиксированного пузыря превышал диаметр элементарной ячейки пенной массы не менее чем в 3 раза, т. е. $D' \geq 3d$ (рис. 7.8). Время формообразования и роста зафиксированного пузыря ограничивается живучестью пенной массы, включающей в себя и время высыхания.

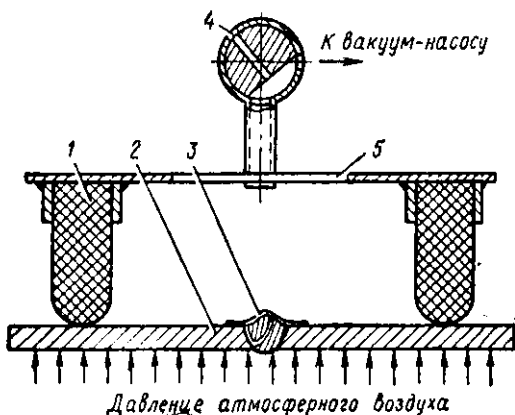
Чувствительность метода можно определить по выражению

$$Q = \pi D^3 p / 12\tau.$$

Или, принимая давление в ячейке $p = 1$ ат, и учитывая геометрию ячеек,

$$Q = \pi \sqrt{(9d^2 + 4\delta^2)^3} / 12\tau.$$

Рис. 7.9. Схема испытаний на вакуумированием:



1 — резиновая прокладка; 2 — мыльная пленка; 3 — мыльный пузырек; 4 — трехходовой кран; 5 — плексиглас

Время выдержки изделий под давлением 1—5 ат и при видимых диаметрах пузырей $D' = 1,5 \div 3,0$ мм составляет 5—10 мин.

Способ погружения. Изделие наполняют воздухом до небольшого избыточного давления (0,3—3,0 ат) и погружают в воду. Негерметичность определяют также по выходящим пузырькам воздуха (отсюда название «аквариум»). Обнаруживаемая утечка ~ 2000 см³ ат/год или $5 \cdot 10^{-3}$ л·мкм/с.

Способ вакуумирования. [Вакуумирование — один из видов пневматических испытаний, но перепад давлений создают не избыточным давлением, а откачкой. На изделие накладывают камеру с прозрачным верхом (рис. 7.9). Перед установкой камеры швы смачивают мыльным раствором (30 г мыла на 1 л воды). Затем в камере создается вакуум около 0,1—0,6 ат (100—500 мм рт. ст.). Дефекты выявляются в виде пузырьков. При использовании высокопроизводительных вакуум-насосов скорость контроля достигает 100 м/ч. Обнаруживают поры диаметром до 10^{-3} мм. На производстве используют рычажные и механизированные вакуум-тележки (конструкции ИЭС им. Е. О. Патона) для контроля герметичности стыковых и нахлесточных соединений плоских сварных элементов (полотнищ рулонированных резервуаров и т. п.).

7.3.2. Химическая индикация течей

Химические методы контроля герметичности изделий основаны на использовании химических реакций для индикации течей. На контролируемые стыки наносят индикаторный слой массы, пасты или накладывают индикаторную ленту (бумажную, марлевую и т. п.). В изделии создается избыточное давление пробного газа. Пробный газ (аммиак, CO₂ и их смеси с воздухом или азотом) проникает через неплотности шва и, вступая в химическую реакцию с индикатором, образует пятна.

Способ контроля воздухом с добавлением аммиака (предложен С. Т. Назаровым) заключается в том, что швы испытуемого изделия покрывают бумажной лентой, смоченной 5%-ным раствором азотно-кислой ртути или раствором фенолфталеина. Затем в сосуд подается воздух в смеси с 1—10% аммиака. Аммиак, проникая через неплотности, действует на бумагу и оставляет на ней черные или фиолетовые пятна, фиксируя дефекты (рис. 7.10). Бумагу выдерживают обычно 1—15 мин. Способ обладает значительно более высокой чувствительностью и большей производительностью, чем испытания с мыльной водой. В зависимости от времени выдержки чувствительность может достигать до 20 см³·ат/год, т. е. $5 \cdot 10^{-4}$ л·мкм/с.

Желеобразные массы, применяемые для контроля герметичности с аммиаком, включают: индикатор креозоловый красный, водорастворимый и спирторастворимый (по 0,007%), агар и спирт (по 1%) глицерин (10%) и дистиллированную воду (остальное). Эта масса и воздушно-аммиачная смесь не оказывают коррозионного действия на алюминиевые и жаропрочные сплавы.

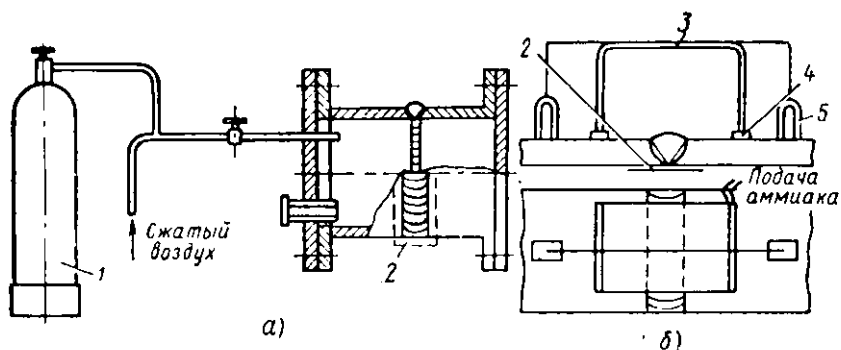


Рис. 7.10. Схема определения непроницаемости швов с помощью аммиака:
 а — в закрытых сосудах; б — в открытых сосудах; 1 — аммиак; 2 — бумага;
 3 — иллиты; 4 — резина; 5 — магнит

При использовании CO_2 простейшая индикаторная масса имеет состав (в массовых частях): дистиллят-40, агар-1, фенолфталеин — 0,15, безводная сода — 0,01. Места негерметичности фиксируются бесцветными пятнами на малиновом фоне массы. Чувствительность $4 \cdot 10^{-2}$ л·мкм/с. При других составах индикаторных масс чувствительность может быть повышена до 10^{-3} л·мкм/с.

7.3.3. Гидравлические испытания

Эти испытания обычно проводят с целью проверки как плотности, так и прочности сварных швов. Они менее опасны, чем пневматические испытания, так как жидкость мало сжимаема и течь ведет сразу к падению давления без взрыва. Способ гидравлических испытаний, время выдержки, величина необходимого давления и допустимые утечки устанавливаются ТУ на данное изделие.

Испытания проводят с полным или частичным заливом водой, с полным заливом и дополнительным давлением от напорной трубки, с полным заливом и созданием давления около 1,5—2 от рабочего (и более). Изделие выдерживают требуемое время, затем обстучивают молотком и осматривают. Течи выявляются в виде струек и потений.

Открытые сосуды и корпуса можно испытывать, обливая их струей воды из брандспойта с достаточным давлением. При этом обнаруживаются неплотности диаметром около 10^{-3} мм. Чувствительность около $2000 \text{ см}^3 \cdot \text{ат}/\text{год}$.

Для повышения чувствительности контроля используют водные растворы, обладающие повышенной проникающей способностью, а также растворы с радиоактивными добавками. В последнем случае радиационные индикаторы позволяют выявить мелкие течи.

7.3.4. Испытания керосином и пенетрантами

Испытаниям швов керосином подвергают открытые сосуды: резервуары, цистерны и другие изделия. Способ основан на высокой проникающей способности керосина. Процесс проникнове-

ния жидкости в капилляры-трещины, поры и т. п. приближенно выражают формулой

$$l = \sqrt{\tau \frac{\sigma}{2\eta} \cos \theta} = \sqrt{\tau \cos \theta} \sqrt{\frac{\sigma}{2\eta}},$$

где l — расстояние, проходимое жидкостью по трещине, поре и т. п. в течение времени τ ; σ , η , θ — поверхностное натяжение, вязкость и угол смачивания, $\sqrt{\frac{\sigma}{2\eta}}$ — коэффициент проникновения (составляющий для воды 60, бензина 47, керосина 42, спирта $30 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1/2}$).

По формуле можно определить расстояние, проходимое жидкостью в глубину дефекта или необходимое время. Большое влияние на проникновение жидкости в капилляр оказывает также ее полярность. Предпочтительнее неполярные жидкости, не образующие неподвижных адсорбционных пленок на стенках неплотности — керосин, бензин, спирт.

Практически для обнаружения неплотностей швов их покрывают меловой краской со стороны, доступной для осмотра (и устранения дефектов). Зетам шов с другой стороны смачивают керосином и выдерживают необходимое по расчету время (15—60 мин). Обнаруживают неплотности минимальным диаметром порядка $(15—20) \cdot 10^{-5} \text{ мм}$.

Дефекты выявляются на окрашенной мелом стороне в виде ржавых полос и пятен. Следует избегать смачивания изделий водой, так как из-за полярности ее молекул уменьшается выявляемость дефектов. Изделия перед контролем следует высушить.

Использование пенетрантов-красок и люминофоров методически аналогично их применению при капиллярном контроле (см. гл. VI). Отличие заключается в том, что пенетрант добавляется в состав пробной жидкости и позволяет при ее прохождении через сквозной дефект выявить его с большей чувствительностью.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ СВАРКИ

8.1. ПРИМЕНЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ И ВЫБОРОЧНЫЙ КОНТРОЛЬ

8.1.1. Задачи и возможности статистического управления качеством

Основные определения. Применение статистических методов управления качеством продукции направлено на совершенствование системы контроля и его организации. Статистические методы не должны заменить другие методы и средства контроля, но могут в значительной степени повысить его эффективность, достоверность и экономичность.

Согласно ГОСТ 15467—70 термин контроль качества продукции — это «проверка соответствия показателей качества продукции установленным требованиям». Более общим термином «управление качеством продукции» определено: «установление, обеспечение и поддержание необходимого уровня качества продукции при ее разработке, производстве и эксплуатации или потреблении, осуществляемое путем систематического контроля качества и целенаправленного воздействия на условия и факторы, влияющие на качество продукции».

Наряду с термином контроль качества находит применение термин статистический контроль. В отношении области применения в литературе различают два основных вида статистического контроля: статистическое регулирование качества (техника контрольных карт), т. е. текущий контроль производственного процесса методами математической статистики и *математико-статистические выборочные методы*.

Согласно ГОСТ 15895—70 термин текущий контроль заменен термином *статистическое регулирование технологического процесса*, который определяется как «корректировка параметров технологического процесса изготавливаемой продукции для технологического обеспечения требуемого качества и предупреждения брака».

Сварные соединения в общем цикле изготовления продукции обычно можно считать полуфабрикатами. Для полуфабрикатов согласно общей теории управления качеством наиболее целесообразно развитие активного предупредительного, а не пассивного приемочного контроля. Поэтому основное внимание нами в дальнейшем обращено на вопросы, связанные со статистическим регулированием качества.

В сварочном производстве до последнего времени преобладает приемочный контроль (инспекция), а статистические методы только

начинают применять. В машиностроении эти методы получили распространение при анализе результатов измерений геометрических параметров деталей и в теории взаимозаменяемости.

Случайные и систематические факторы качества. В гл. I перечислены основные технологические и конструктивные факторы качества сварных соединений (см. схему 1). По характеру воздействия на процесс сварки технологические факторы могут быть как случайными, так и систематическими. Конструктивные факторы носят в основном только систематический характер, связанный с долговременным изменением таких параметров, как марка или плавка материала, конструкция стыка и т. п.

Случайные факторы, носящие непостоянный характер, могут приводить к появлению в сварных соединениях случайных дефектов. Систематические факторы приводят соответственно к появлению систематических дефектов. Появление случайных дефектов при устойчивом технологическом процессе может быть описано статистическими распределениями.

Обратные связи активного контроля. Система контроля должна обеспечивать обратную связь от контролеров к технологам. Любой контроль, имеющий обратную связь с технологией, можно назвать активным контролем. Активный контроль качества сварных изделий должен быть функциональным, т. е. давать ответы на вопрос: как, когда и кем выполнена контролируемая работа (рис. 8.1).

Целесообразно ввести понятие о двух основных видах обратных связей «контроль—сварка» от этапа контроля к технологии сварки: автоматической и информационной. Информационные обратные связи могут использовать три канала воздействия: технический, экономический и психологический.

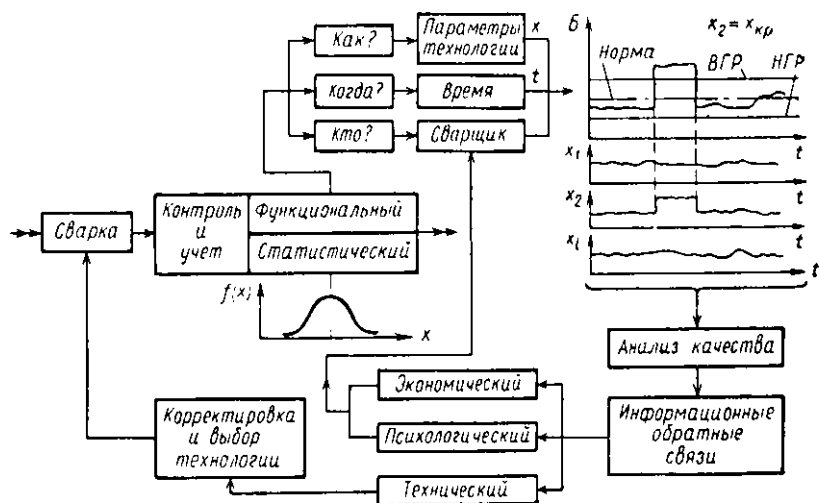


Рис. 8.1. Схема применения статистического регулирования технологического процесса сварки

При автоматической обратной связи возмущения, вызванные нарушением процесса или внешними условиями, воздействуют на параметры технологических операций автоматически, без участия человека, только посредством следящих систем. Однако автоматические системы обратной связи еще мало применяют и они не везде пригодны. Они обычно сложны, дороги и не всегда достаточно надежны в эксплуатации (см. гл. II).

Поэтому в большинстве случаев предпочтительнее использовать информационные связи «контроль—сварка». При хорошей оперативной связи информация о качестве процесса или сварного соединения поступает к технологам по *техническим* каналам через оператора-контролера к сварщику непосредственно в процессе сварки или с небольшим запаздыванием. Действенность информационной обратной связи естественно зависит от времени между заваркой соединения и получением сведений о его качестве, от качества самой информации, а также от комплекса организационных и технических мер, принимаемых технологами для ликвидации причин брака. Эти факторы определяются, в свою очередь, техническим уровнем контрольно-регистрирующей аппаратуры и уровнем организации контроля.

Увеличение оперативности контроля можно достичь применением комплексных испытаний изделий. Например, сочетание быстрого ультразвукового метода контроля или магнитографии с рентгеновским контролем позволяет оперативно проверять все необходимые швы. При этом лишь отдельные сомнительные участки подвергают просвечиванию для уточнения вида дефекта и получения документа.

При любом виде контроля существует также *психологическая* обратная связь, которая воздействует на оператора-сварщика самим фактом контроля, величиной его объема и жесткостью применяемых норм отбраковки. При выборочном контроле важна случайность выбираемого участка контроля, иначе оператор может по-разному выполнять швы «под рентген» и неконтролируемые соединения.

Экономическая обратная связь обеспечивается поощрительной системой оплаты за качество работ. Для ее реализации необходима четкая система доплат за высокое качество работы. Такую систему можно применять только при наличии дифференцированной шкалы оценки качества сварных соединений, например трех- или пятибалльной.

Обычно контроль качества сварки должен включать функции: приемочную — обнаружение дефектных сварных соединений (их отбраковку) и предупредительную — анализ результатов контроля для предупреждения появления дефектов. Обе эти задачи решаются одновременно. Причем, основное внимание обращается на приемочный контроль, который завершается вырубкой и исправлением дефектов.

К вопросу получения сварных соединений высокого качества иногда подходят с двух позиций: а) требования бездефектности; б) нормирования допустимых дефектов. Эти позиции не исключают, а дополняют одна другую. Бездефектность должна реализовываться

именно как программа обеспечения заданного оптимального уровня качества. Этот уровень должен быть обоснован конструктивно, технологически и экономически.

В 50-е годы получила известность система бездефектного труда, разработанная в СССР. После 1960 г. в США, Японии, ФРГ и других странах широко распространилась так называемая программа «нуль дефектов». О том, какое большое значение придается этой программе, свидетельствует тот факт, что в США программа Zero Defects—ZD рекомендована всем оборонным предприятиям. Фирмам, не принявшим программу, выполнение оборонных заказов не поручают. Особенно широко программа ZD принята в ракетостроении.

Однако программу бездефектного труда нельзя путать с требованием достижения бездефектных швов. Последнее время в сварочном производстве наблюдается недостаточное обоснованное ужесточение норм допустимых дефектов и увеличение объемов контроля. Некоторые специалисты считают, что жесткие нормы и 100%-ный контроль — главная гарантия качества. Следует иметь в виду, что завышенные требования связаны обычно с удорожанием продукции. Кроме того, и это главное, они могут приводить в конечном счете к потере качества и надежности изделий. Например, требование «абсолютно чистых» сварных швов, без единой поры или включения, как правило, не оправдано. В большинстве случаев отдельные мелкие включения не влияют на работоспособность соединений. В то же время, вырубка включений и повторная заварка швов часто приводит к новым более опасным дефектам, таким как ухудшение структуры, повышенные остаточные напряжения и деформации, склонность к хрупкости, трещинообразованию и коррозии. Эти дефекты трудно выявляются средствами неразрушающего контроля, но сильнее всего отражаются на работоспособности соединений.

Таким образом, требование бездефектности для сварных соединений следует понимать как требование отсутствия недопустимых дефектов, а не полного отсутствия любых дефектов вообще.

Задачи управления качеством сварки. Общие цели статистического управления качеством ясны из определения, данного в ГОСТ 15467—70. Применительно к сварным соединениям статистическое управление базируется на получении информации от использования существующих на производстве методов контроля качества. Структура статистического управления включает в себя контроль исходных материалов, контроль технологии (режимов и условий) сварки, разрушающие и неразрушающие испытания сварных соединений (схема 8.1). Результаты разрушающих испытаний позволяют оценить прочность или производственно-технологическую (т. е. потенциальную) надежность сварных соединений до начала эксплуатации. Результаты неразрушающих испытаний сварных соединений используют главным образом для контроля качества технологии сварки (см. схему формирования качества в гл. 1).

С помощью статистических методов информацию о качестве обрабатывают, анализируют и на этой основе производят оценку качества технологического процесса сварки и качества получаемых соединений.

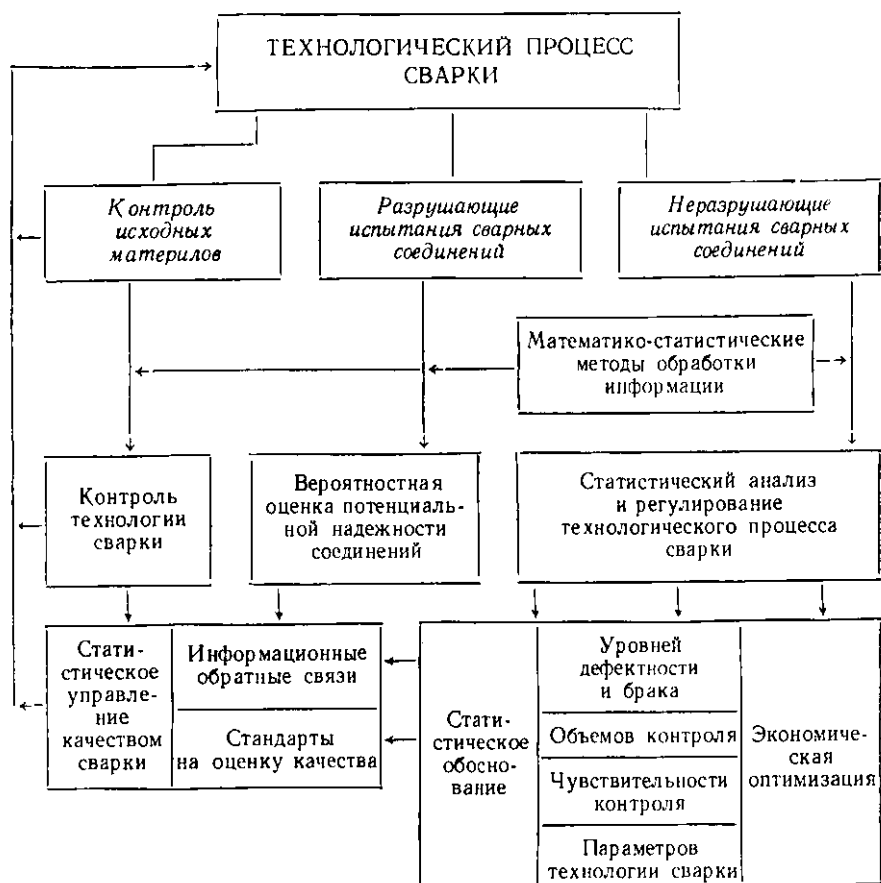


Схема 8.1

Систематический и оперативный контроль соединений позволяет обеспечить статистическое регулирование технологического процесса, а также обосновать оптимальные уровни дефектности, брака, объемов и чувствительности контроля, параметров технологии сварки. Для действенности системы статистического управления необходимо наличие норм и стандартов по оценке качества на всех этапах технологического процесса (см. схему 8.1).

8.1.2. Особенности использования математических методов

Элементы сварной продукции. Для возможности применения статистических методов необходимо использовать понятия об элементе контролируемой продукции, партии и выборке.

Единица сварной продукции — это сварной элемент-изделие, соединение, стык, сварная точка или наименьший участок протяжен

ного сварного шва, который можно контролировать, анализировать, испытывать, а также исправить или отбраковать.

Последние два действия, добавленные к общему (по ГОСТ 15895—71) определению для приемочного контроля швов весьма существенны. С одной стороны, дефект на небольшом участке шва obviously не может быть исправлен локально — требуется вырубка и переварка всего участка шва или отбраковка изделия целиком. С другой — единственный участок шва желательно выбирать наименьшим с тем, чтобы вырубка была короткой, а число статистических элементов — наибольшим.

Для протяженных швов целесообразно принимать длину единичного участка $\Delta L = 10\delta$, где δ — толщина свариваемого листа. Однако, практически, по традиции, за длину участка при любом методе контроля пока принимают длину одного рентгеновского снимка, $\Delta L \leq 400$ мм, которая часто оказывается больше 10δ . Такое завышение длины участка может приводить к неправильной оценке доли брака. Поэтому при сравнении статистических данных следует учитывать величину контролируемых элементов.

Партия продукции — совокупность единиц однородной продукции, изготовленной за ограниченный период времени по одной технической документации. Партию достаточно большого объема N можно рассматривать условно как генеральную совокупность единиц продукции, объединенных общим признаком.

Выборка или проба — определенное число единиц штучной продукции или часть нештучной продукции, взятой из исследуемой совокупности. Объем выборки n может быть обоснован статистически (см. § 8.2).

Контроль по *качественному* признаку — контроль, при котором единицы продукции подразделяют на несколько групп качества. В частном случае, при контроле по *альтернативному* признаку, это две группы: годные и дефектные (негодные). Решение о контролируемой совокупности принимают в зависимости от числа дефектных единиц продукции, обнаруженных в выборке или пробе. Альтернативный признак контроля — пока основной при рентгеновской, ультразвуковой, магнитной и других видах дефектоскопии сварных соединений.

Контроль по *количественному* признаку — это контроль, при котором у единиц продукции измеряют числовые значения одного или нескольких показателей, а решение о контролируемой совокупности принимают в зависимости от этих значений. Например, испытание сварных образцов на прочность является контролем по количественному признаку — пределу прочности σ_b , кгс/мм².

Обычно случайные величины разделяют на дискретные и непрерывные. Появление того или иного значения случайной величины в результате массовых испытаний рассматривается как случайное событие. Отношение числа m случаев появления события A , например дефектов, к числу n испытаний называется частотой или относительной частотой: $W(A) = m/n$. При большом числе испытаний

частость будет колебаться около некоторого постоянного числа, которое называют вероятностью $P(A)$ или $\text{Вер}(A)$ — появления события A , причем $0 \leq P(A) \leq 1$.

Законы распределения случайных величин. Приводимые здесь сведения лишь кратко знакомят читателя с использованием статистических методов. При дальнейшем изучении материала следует пользоваться рекомендуемой литературой.

Зависимость между значениями случайной величины x и вероятностью $P(x)$ их появления устанавливается законами распределения. Эти законы можно использовать в дифференциальной форме, как плотность распределения (иначе — плотность вероятности) $f(x)$ или в интегральной форме, как функцию распределения — накопленную (кумулятивную) вероятность $F(x)$. Причем $f(x)$ — производная функции распределения, т. е. $f(x) = F'(x)$. В свою очередь, $F(x) = \text{Вер}(X \leq x)$. Графики и формулы основных статистических законов распределения, используемых далее при анализе качества сварных соединений, даны в табл. 8.3.

Закон распределения исчерпывающе и полностью описывает случайную величину. В тех же случаях, когда необходимо в сжатой форме выразить существенные особенности распределения или неизвестен его закон, используют числовые параметры случайных величин.

Важнейшие параметры — характеристика центра распределения $M(X)$ — математическое ожидание или среднее значение $\bar{x}$ случайной величины и медиана $\tilde{x}$. Эмпирическое среднее арифметическое значение по результатам измерений $x_1, x_2, \dots, x_n$ равно:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (8.1)$$

Медиану находят как центр упорядоченного вариационного ряда значений величины x . Она делит площадь под кривой плотности распределения пополам. Кроме $\bar{x}$ и $\tilde{x}$ иногда используют третью характеристику центра — моду, которая соответствует наибольшей вероятности значений x .

Отклонение (рассеяние) единичных значений случайной величины относительно центра группирования полнее всего характеризуется дисперсией $D(X)$ или средним квадратическим отклонением σ . Причем $D(X) = \sigma^2$, а σ или ее эмпирическое значение S определяют по формуле

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2. \quad (8.2)$$

При использовании счетной машины удобно вычислять дисперсию по уравнению

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \bar{x}^2. \quad (8.3)$$

В технике σ (или S) часто называют стандартным отклонением или стандартом.

Часто вместо σ и S используют легко вычисляемую меру рассеяния — размах ω , т. е. разность между крайними значениями вариационного ряда $\omega = x_{\max} - x_{\min}$. Причем связь между средним размахом $\bar{\omega}$ как оценкой $\hat{\sigma}$ для генерального значения σ видна из формулы

$$\hat{\sigma} = \bar{\omega}/d_n.$$

Коэффициент d_n определяют в зависимости от n :

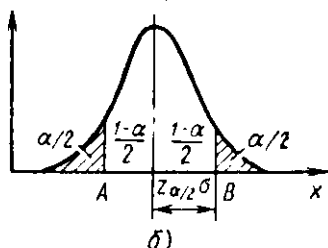
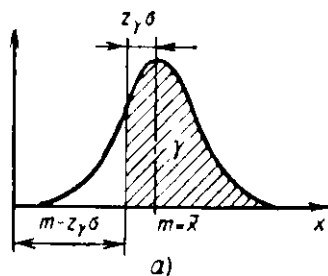
Выборка n	2	3	5	7	9	11
Коэффициент d	1,13	1,7	2,3	2,7	2,97	3,17

Использование размаха, как показателя рассеяния эффективно только при малых выборках: $n \leq 12$.

Коэффициент вариации — это отношение среднего квадратического отклонения к средней арифметической, выраженное в процентах: $V = S/\bar{x}$. Наиболее наглядными представлениями эмпирического распределения случайных величин служат полигон

Рис. 8.2. Кривые плотности нормального распределения и схемы, поясняющие определение:

a — квантили z_γ		b — квантили $z_{\frac{\alpha}{2}}$		
z_γ	$\gamma\%$	$z_{\frac{\alpha}{2}}$	$(1 - \alpha)\%$	$\alpha\%$
1,0	84,0	$\pm 1,00$	68,26	31,74
1,3	90,0	$\pm 1,96$	95,00	5,00
1,65	95,0	$\pm 2,00$	95,44	4,56
2,0	97,7	$\pm 2,58$	99,00	1,00
2,33	99,0	$\pm 3,00$	99,73	0,27
3,00	99,86	$\pm 3,29$	99,90	0,10
3,09	99,9			



или гистограмма интервального ряда частот и аппроксимирующая их кривая плотности вероятностей $f(x)$. Близость эмпирической кривой к тому или иному теоретическому закону распределения проверяется критериями согласия, а также с помощью вероятностных бумаг.

Нормальный закон распределения (закон Гаусса) занимает среди других законов особое положение. Он чаще всего встречается на практике и является предельным законом, к которому приближаются другие законы распределения. В теории вероятностей доказывается (теорема Ляпунова), что сумма достаточно большого числа независимых или слабо зависимых случайных величин, подчиненных какому угодно закону распределения, приближенно подчиняется нормальному закону.

Плотность вероятностей нормального закона с математическим ожиданием $m \approx \bar{x}$ и дисперсией σ^2 имеет вид (рис. 8.2):

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}. \quad (8.4)$$

Функция распределения $F(x)$ (рис. 8.3) при замене переменной $\frac{x-m}{\sigma} = z$ приводится к виду, выражаемому через табличный интеграл вероятностей $\Phi^*(x)$:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{x-m}{\sigma}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz;$$

$$\Phi^*(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{z^2}{2}} dz,$$

причем, $F(x) = \Phi^*\left(\frac{x-m}{\sigma}\right) = \Phi^*(z)$.

Иногда в таблицах дается интеграл Лапласа $\Phi(x)$, для которого нижний предел интегрирования составляет 0 вместо $-\infty$. Тогда

$$\Phi(x) = \Phi^*(x) - 0,5.$$

Для вероятности попадания случайной величины на участок от A до B , выражаемой как площадь под кривой $f(x)$, имеем

$$P(A < X < B) = F(B) - F(A) = \Phi^*\left(\frac{B-m}{\sigma}\right) - \Phi^*\left(\frac{A-m}{\sigma}\right) =$$

$$= \Phi^*(z_B) - \Phi^*(z_A).$$

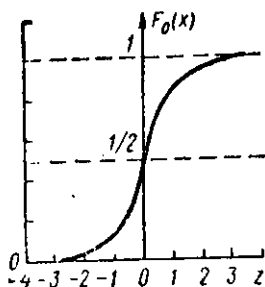


Рис. 8.2, а. Кривая нормальной функции распределения

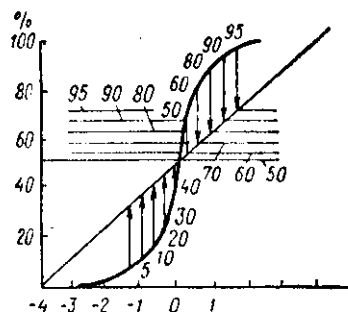


Рис. 8.2, б. Построение вероятностной сетки нормального распределения

На рис. 8.2, а показаны наиболее употребляемые на практике значения вероятностей $\gamma\%$, соответствующие площади от $x = z_{\gamma}\sigma$ до ∞ , а на рис. 8.2, б — значения вероятностей $(1 - \alpha)$ и $\alpha\%$, соответствующие симметричной относительно m площади от $[+z_{\alpha/2}\sigma]$ до $[-z_{\alpha/2}\sigma]$. При этом следует иметь в виду, что вся площадь под кривой равна 1. В математической литературе принято буквой α обозначать уровень значимости, выражаемый остатками площади под кривой за ординатой z_{α} при двусторонней оценке вероятности $\alpha/2$, а буквой γ — основную часть площади при односторонней оценке вероятности.

Вероятностные бумаги позволяют существенно упростить обработку статистических данных. Интегральная кривая нормального распределения показана на рис. 8.3. Изменив соответствующим образом масштаб по оси ординат (рис. 8.4), можно получить из S-образной интегральной кривой прямую линию. Такой график с измененным масштабом называется вероятностной сеткой или бумагой. Подобные сетки можно использовать и для других распределений (экспоненциального, Вейбулла и т. п.). Откладывая накопленные относительные частоты на оси ординат, а значения признака по

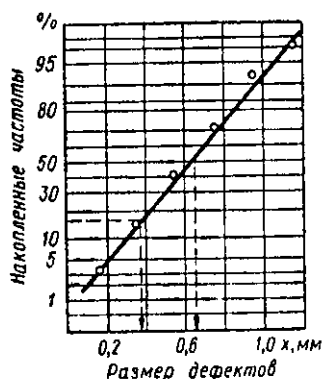


Рис. 8.5. Распределение дефектов, полученное на вероятностной бумаге: поры размером x , в кольцевых швах аргоно-дуговой сварки на стали 12Х18Н9Т толщиной 2 мм

интервалам на оси абсцисс, получают серию точек (рис. 8.5). Если эти точки оказываются примерно на одной прямой, то тем самым производится проверка совпадения эксперимента с выбранным теоретическим законом его описания.

Контрольные карты используют для статистического регулирования качества. Они позволяют наглядно отразить ход производственного процесса на диаграмме и таким образом выявить нарушения технологии. Различают контрольные карты по измеримым (количественным) и неизмеримым (качественным) признакам. Виды карт зависят от назначения продукции и характера технологии. Дадим краткую характеристику карт.

Основными видами контрольных карт по количественному признаку являются:

карты средних значений (карта $\bar{x}$), карта индивидуальных значений, карты медиан и комбинированные карты. Последние различаются как карты $\bar{\bar{x}}/S$, $\bar{\bar{x}}/R$ и $\bar{\bar{x}}/\bar{R}$, (S — стандартное отклонение, R — размах, $\bar{\bar{x}}$ — медиана, причем косая черта не означает деления).

На контрольных картах (рис. 8.6) наносят границы регулирования, в пределах которых с заданной вероятностью должны находиться значения изучаемых величин. Например, при нормальном распределении случайной величины в пределах трехсигмовых границ лежит $\sim 99,73\%$ всех ее значений. Отсюда следует, что почти все выборочные средние $\bar{x}$, полученные из генеральной совокупности с математическим ожиданием m и средним квадратическим отклонением σ , приходятся на область, ограниченную:

$$m \pm 3\sigma/\sqrt{n} \text{ или } m \pm A\sigma.$$

Эти границы называют границами регулирования карт средних значений $\bar{x}$ при уровне значимости $\alpha = 0,27\%$. Возможны также и другие уровни значимости, например $\alpha = 1\%$ или 5% , тогда вместо цифры 3 в числителе коэффициента A будет 2,58 или 1,96. Это соответствует значениям z_α и α , указанным в таблице к рис. 8.2, б.

По качественным признакам различают обычно карты p (p — процент или доля брака в партии, иногда обозначаемая также бук-

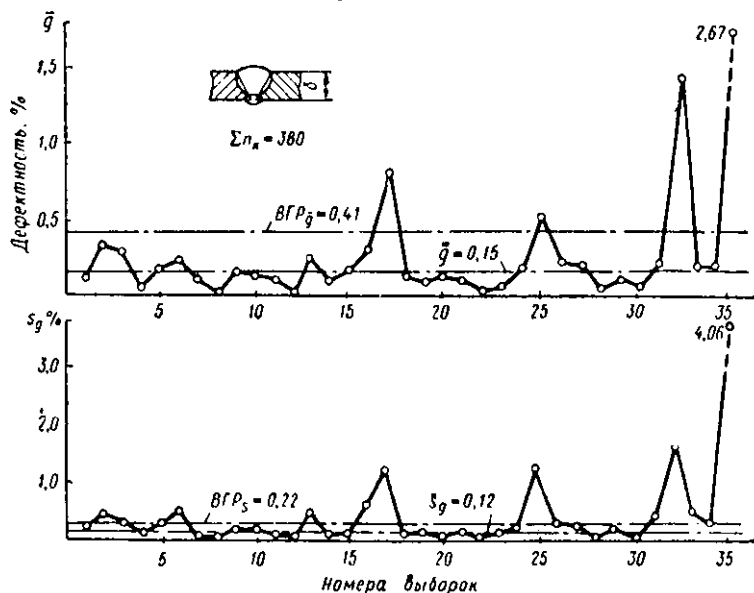


Рис. 8.6. Контрольная карта типа $\bar{x}/S$, примененная для анализа изменения дефектности g стыковых швов листовой низколегированной стали толщиной 10—14 мм, сваренных вручную (РД). Общее число контролируемых образцов $\sum n_k = 380$. Выборка $n \approx 10$. g — среднее по всем выборкам

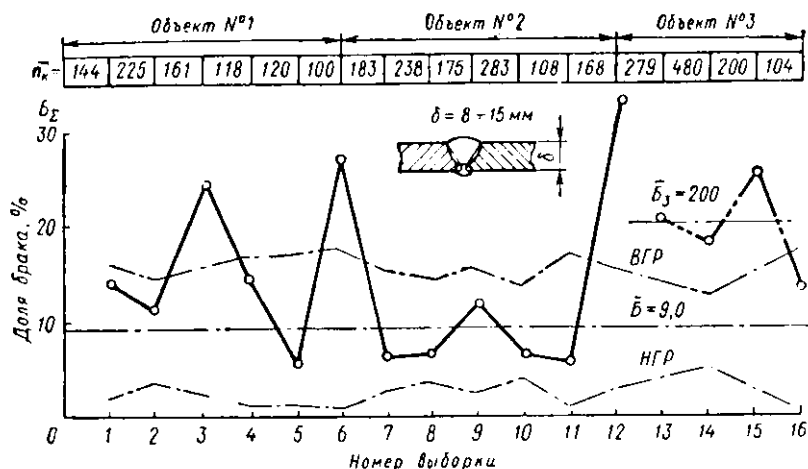


Рис. 8.7. Контрольная карта типа p . Показана диаграмма изменения уровня брака B_{Σ} (суммарно по всем видам дефектов). $\sum n_k = 3085$. Выборка $n \approx 100$. Сварка под флюсом

вой B); карты c (c — число дефектов в единице продукции), карты np и u ($u = c/n$ — число дефектов, деленное на число единиц). Обозначения карт даны по стандартам ГДР на статистический контроль качества.

Пример диаграммы, соответствующей карте p , дан на рис. 8.7. Для сварных соединений наиболее удобны карты p и np . Долю брака $B = p$ или долю дефектности q вычисляют, как отношение числа бракованных n_B или дефектных n_q элементов к общему числу n , проконтролированных: $B = n_B/n_k$; $q = n_q/n_k$.

Верхнюю и нижнюю границы регулирования (ВГР и НГР) определяют при биномиальном распределении доли брака p :

$$\text{ВГР; НГР} = p \pm 3\sqrt{p(1-p)/n} \quad (8.5)$$

или при Пуассоновском распределении параметра np :

$$\text{ВГР; НГР} = np \pm 3\sqrt{np}. \quad (8.6)$$

Границы регулирования на рис. 8.7 непостоянны, поскольку объемы выборок несколько изменялись по объектам.

При ведении контрольных карт выход регулируемого параметра из подконтрольного состояния — т. е. за границы ВГР или НГР служит сигналом для корректировки технологии. Иногда используют несколько контрольных границ (1-ю, 2-ю и т. д.), с которыми связывают степень регулирования технологического процесса. Первые границы используют обычно как предварительные, а последующие как окончательные.

8.1.3. Особенности выборочного контроля

Планом контроля согласно ГОСТ 15895—70 называют совокупность данных о виде контроля, объеме контролируемой партии продукции, выборке или проб, контрольных нормативах и решающих правилах.

Выборочный контроль можно проводить по одному из многочисленных вариантов планов контроля, имеющихся в литературе. Однако на практике размеры партий свариваемых соединений обычно малы ($N \leq 100$), поэтому в сварочном производстве пока находят применение только «жесткие» статистически не обоснованные планы контроля. Объем выборки n задают обычно нормами в каком-то определенном проценте к объему партии N сваренных изделий ($n/N\%$). От качества технологического процесса и размера партий такие нормы не зависят. Например, для некоторых корпусных конструкций объем выборки по правилам контроля составляет: для I категории швов — 20%, для II — 5%, для III — 2% протяженности швов.

Назначение выборки, как $n/N\%$ не может служить статистически обоснованным решением плана контроля. Кроме того, выборку в сварочном производстве часто устанавливают «преднамеренно». В такой выборке участки контроля назначают с определенной тенденцией, приводящей к повышению или понижению вероятности отбора дефектных единиц. Например, согласно чертежам или указаниям ОТК просвечивают все места пересечения швов или швы, сваренные в затрудненных условиях и т. п. Преднамеренная выборка обуславливает разное качество выполнения сварщиками контролируемых и неконтролируемых швов, поэтому психологическая обратная связь срывается не всегда.

Наиболее целесообразны в сварочном производстве статистические планы одноступенчатого контроля, а также контроль с корректируемым планом, последовательный и непрерывный.

Одноступенчатый контроль по альтернативному признаку. По результатам контроля все изделия разбивают на две группы: годные и негодные (дефектные). Основная характеристика качества партии объемом N — доля q дефектных единиц M в этой партии: $q = M/N$.

При планировании контроля оговаривают два уровня входного качества — доли дефектных единиц продукции в партии, поступившей на контроль: q_0 — приемочный уровень качества, q_m — браковочный уровень качества. Причем $q_0 \leq q_m$.

Возможные ошибки контроля оценивают значениями риска β — потребителя (заказчика) и риска α — поставщика (изготовителя). Под риском потребителя β понимают вероятность приемки партии, обладающей браковочным уровнем качеством q_m . Под риском поставщика α понимают вероятность забраковки партии годных сварных соединений, обладающей приемочным уровнем качества q_0 .

Процедура контроля состоит в том, что из представленных на контроль партий объемом N извлекается случайная выборка объ-

емом n . Случайной называют выборку, при составлении которой для любой единицы продукции контролируемой совокупности обеспечивается равная вероятность быть отобранной и включенной в выборку. Решающие правила состоят в том, что по результатам контроля выбирают два варианта решения. Либо всю партию N бракуют, если действительное число дефектных участков m в выборке n окажется больше заданного приемочного числа C ($m > C$). Либо эту же партию принимают, если $m \leq C$.

Таким образом, в общем виде объем выборки зависит от многих переменных: $n = n(q_0, q_m, N, C, \alpha, \beta)$. Причем влияние каждой составляющей на объем выборки не равноценно.

Эффективность плана однократной выборки определяется оперативными характеристиками, которые представляют зависимость между вероятностью приемки партии продукции $P(q)$ и долями дефектных элементов q при заданной паре значений n и C (рис. 8.8). Тогда $P(q) = f(q, n, C)$.

Идеальная оперативная характеристика соответствует случаю сплошного контроля.

Распределение $P(m, n)$ случайного числа дефектных участков в выборке объемом n , взятой без возвращения из партии объемом N , что часто выполняется при контроле сварных соединений, подчиняется гипергеометрическому закону. Причем вероятность обнаружения в выборке дефектных участков не более заданного числа C определяется выражением:

$$P(q) = \text{Вер}(m < C) = \sum_{m=0}^C P(m, n).$$

В том случае, если N и q установлены, число дефектов в партии $M = Nq$. Для наиболее распространенных планов, когда приемочное число $C = 0$, расчеты упрощаются.

С учетом условия $n \leq 0,1N$ гипергеометрическое распределение с достаточной для практики точностью можно заменить биномиальным. В нем n не связывается с объемом партии, что позволяет еще проще рассчитывать планы контроля. Если величина $q \leq 0,1$, то биномиальное распределение, в свою очередь, может быть заменено распределением Пуассона. В определенных пределах величин n и q применим также нормальный закон (рис. 8.9).

Если вероятность приемки партии с долей дефектности q_m есть риск заказчика β , а вероятность забракования партии с долей дефектности q_0 есть риск изготовителя α , это можно записать в виде:

$$P(q_0) = 1 - \alpha; P(q_m) = \beta.$$

Обычно величины β и α достаточно малы и на практике их принимают в пределах 0,05—0,15. По ГОСТ 16493—70 принято два значения для β (0,10 и 0,05). Однако эти значения не всегда приемлемы в сварочном производстве.

Последовательный контроль отличается тем, что здесь объем контроля заранее вычислить нельзя, так как он зависит от качества партии.

Возможны три решения: 1) партия принимается (А), 2) партия бракуется (Б), 3) контроль продолжается.

Это можно иллюстрировать на графике (рис. 8.10) прямыми линиями, соответствующими решениям 1, 2, 3 и минимальному числу $n_{\min}$ контрольных изделий. Регистрация дефекта соответствует на графике скачку на одну ступеньку и линия приемки удаляется. Последовательный контроль обеспечивает для годных партий наименьший объем контроля $n_{\min}$, а для негодных — достоверные сведения об их засоренности. Трафареты подобных графиков рассчитывают и рисуют заранее. После заполнения контролером эти графики служат наглядным документом о качестве продукции.

Контроль по количественному признаку. Наиболее распространенным следует считать случай, когда известна генеральная дисперсия $D = \sigma^2$ изучаемой характеристики X (по предварительным данным). Объем выборки будет зависеть от σ^2 , а также от допустимой дисперсии результата S_x^2 , т. е. от требуемой точности оценки. Известно, что при объеме партии N среднее $\bar{x}$ выборки объема n имеет дисперсию S_x^2 , в n раз меньшую, чем генеральная дисперсия

$$S_x^2 = \frac{\sigma^2}{n} \left(\frac{N-n}{N-1} \right) \approx \begin{cases} \text{при} \\ N > 10n \end{cases} \approx \frac{\sigma^2}{n} \text{ или } n = \sigma^2 / S_x^2. \quad (8.7)$$

Здесь объем партии не учитывается, если она достаточно велика (тогда, когда $N \geq 10n$). Из формулы видно, что выборка тем меньше,

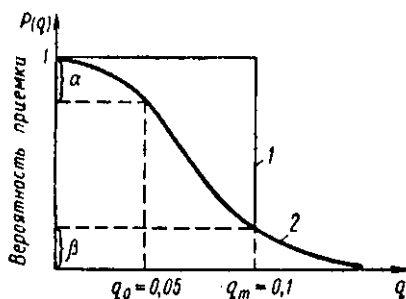


Рис. 8.8. Оперативные характеристики контроля:

1 — сплошной; 2 — выборочного одноступенчатого (значения q_0 и q_m даны условно)

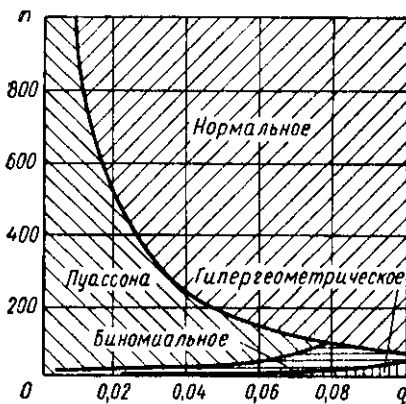


Рис. 8.9. Примерные области использования статистических распределений $P(n, q)$ в зависимости от доли дефектности q и объема выборки n

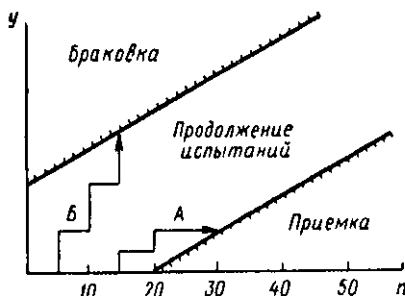


Рис. 8.10. Схема последовательного контроля

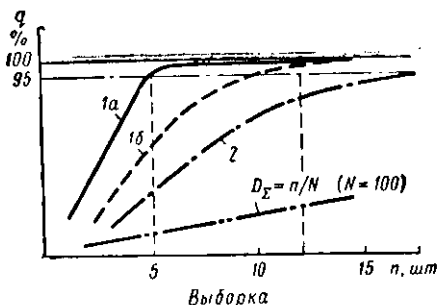


Рис. 8.11. Примерный вид зависимостей между объемом выборки и получаемой информацией о доли дефектных соединений (1а, 1б) и по качественному (2) признакам

Расчеты показывают, что выборка при контроле по количественным признакам может быть значительно меньше (3—10 образцов), чем при альтернативном контроле, где n обычно более 30—50 образцов. На рис. 8.11 дан примерный вид зависимости между объемом выборки n при $N \geq 10n$ ($N \approx 100$) и получаемой информацией о суммарной дефектности D_Σ сварных соединений. Кривые 1а и 1б показывают информацию, получаемую при контроле по количественному признаку с малым σ ($\sigma = \sigma_a$) и большим ($\sigma = \sigma_b$) стандартным отклонением в генеральной совокупности. Кривая 2 соответствует контролю по альтернативному признаку. Внизу для сравнения показана линия пропорционального роста информации (которую ошибочно предполагают при процентном отборе). Из примера видно, что для получения одной и той же достоверности контроля (~95%) при количественной оценке требуется $n = 5$, а при альтернативной $n \geq 16$ образцов. Под достоверностью мы имеем в виду процент совпадений результатов контроля с реальной засоренностью партии.

Точность и надежность выборочных оценок. Используя тот или иной план выборочного контроля, очень важно знать, какова достоверность этого контроля. При существующих в настоящее время правилах контроля такая характеристика неизвестна. Согласно инструкциям объем контроля задан однозначно и должен составлять обычно: 2; 5; 10; 20; 50; 100%. Из рис. 8.11 видно, что объем контроля и его достоверность отнюдь не синонимы. Достоверность, как правило, не прямо пропорциональна объему контроля, а растет по некоторой «кривой насыщения». Ниже показано, как может быть рассчитана достоверность при статистическом обосновании объемов контроля.

Оценка по количественному признаку. Используемые в формуле (8.7) оценки $(\bar{x}, S^2)$ — точечные. При выборке малого объема точечная оценка может существенно отличаться от оцениваемого параметра. Поэтому при небольших выборках следует пользоваться

чем меньше генеральная дисперсия σ^2 и чем грубее оценка, т. е. больше допустимая дисперсия S_x^2 .

Генеральная дисперсия контролируемого параметра σ^2 может служить характеристикой устойчивости (качества) технологического процесса. Например, по данным предварительных испытаний образцов установлено, что для тавровых сварных соединений стандартное отклонение $\sigma = 4 \div 5$ кгс/мм². Если требуемая точность $S_{\bar{x}} = 2$ кгс/мм², то необходимое число испытаний при $\sigma = 5$, $n = (5)^2/(2)^2 = 25/4 = 6$ образцов, при $\sigma = 4$, $n = 16/4 = 4$ образца.

интервальными оценками, которые позволяют обусловить точность и надежность оценок.

Точность оценки характеризуется величиной интервала δ , который «накрывает» неизвестный параметр с заданной надежностью.

Во многих практических приложениях, в том числе при анализе качества сварных соединений, можно принять, что количественный признак X генеральной совокупности распределен нормально, причем среднее квадратическое отклонение σ этого распределения известно из так называемой истории качества. Требуется оценить неизвестное математическое ожидание $M(x) = m$ по выборочной средней $\bar{x}$.

Если случайная величина X распределена нормально, то выборочная средняя $\bar{x}$, полученная по независимым наблюдениям, также распределена нормально. Параметры распределения таковы

$$M(\bar{x}) = m; \quad \sigma(\bar{x}) = \sigma / \sqrt{n}.$$

Необходимо, чтобы при контроле выполнялось соотношение

$$\text{Вер}(|\bar{x} - m| < \delta) = p,$$

где p — заданная надежность (доверительная вероятность).

Вероятность осуществления неравенства выражается через табличную функцию Лапласа $\Phi(z)$ следующим образом:

$$p = \text{Вер}(|\bar{x} - m| < \delta) = 2\Phi(\delta \sqrt{n}/\sigma) = 2\Phi(z),$$

причем

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-z'^2/2} dz';$$

$$z = \delta \sqrt{n}/\sigma; \quad \delta = z\sigma/\sqrt{n}; \quad n = z^2\sigma^2/\delta^2. \quad (8.8)$$

Анализ формул показывает: 1) при возрастании объема выборки n число δ убывает и, следовательно, точность оценки увеличивается, 2) увеличение надежности оценки $p = 2\Phi(z)$ приводит к увеличению z , а следовательно, и к возрастанию δ . Другими словами, увеличение надежности оценки влечет за собой (при $n = \text{const}$) уменьшение ее точности.

Пример 8.1. Определим число n необходимых испытаний для оценки по критерию хрупкой прочности $X = K_Q$ сварных соединений. Из опытов известны примерные величины среднего, дисперсии, а следовательно и коэффициента вариации.

$$\bar{x} = 200; \quad \sigma(x) = 50; \quad V = \frac{\sigma}{x} = 0,25.$$

Требуемую точность δ оценки средних значений K_Q примем равной 20 (т. е. $\delta = 10\% x$). Ее надежность положим 90%, $2\Phi(z) = p = 0,9$. Найдем z по таблицам (приложение 1). Зная, что $\Phi(z) = 0,45$, имеем $z_p = 1,64$. Далее определяем n по формуле (8.8):

$$n = \frac{1,64^2}{20^2} \cdot 50^2 \approx \frac{2,7}{4 \cdot 10^2} 25 \cdot 10^2 \approx 15 \text{ образцов.}$$

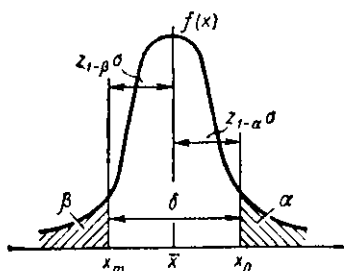


Рис. 8.12. Соотношение вероятностей α -ошибков первого рода (риск производителя) и β -ошибков второго рода (риск потребителя); δ — участок неопределенности

Если при той же надежности оценки $p = 0,9$ задать, например, требуемую точность на 20, а $\delta = 40$ или 50, то получим $n = 3$ или 5. Если требуемую надежность повысить до $p = 0,95$ или $p = 0,99$, то соответственно $Z_p = 1,96$ или 2,58. Тогда при той же точности δ число требуемых испытаний n вырастет примерно в 1,5 или 3 раза.

Обычно при испытании хрупкой, а часто и вибрационной прочности оценку качества ведут по трем — пяти сварным образцам. Из приведенного выше примера видно, что точность таких оценок очень низка. При надежности 90% точность δ примерно соответствует величине одного стандартного отклонения, т. е. $\delta \approx \sigma$. Для резуль-

татов хрупких и усталостных испытаний характерен гораздо больший разброс, чем при статике. Из приведенной ниже табл. 8.1 видно, что коэффициенты вариации $V = \sigma/\bar{x}$ для предела прочности сталей обычно близки к 5—10%. Для хрупкой и усталостной прочности вариация достигает 20—50, а иногда даже 100%. Слишком большой разброс результатов испытаний свидетельствует также о недостаточно высокой свариваемости данного металла. Для достоверной оценки качества при больших σ и V необходимо не 3—5, а не менее 10—15 или даже 30 образцов.

Во многих практических задачах оценки объемов контроля «интервал неопределенности» δ удобнее рассматривать как несимметричный (рис. 8.12). При этом исходят из двух критических условий: 1) статистическая гипотеза о равенстве $\bar{x} = \bar{X}$ верна, если $x < -z_{1-\beta}\sigma/\sqrt{n}$ и 2) гипотеза неверна, если $x > z_{1-\alpha}\sigma/\sqrt{n}$. Тогда вероятность α -ошибки первого рода (отклонение правильной гипотезы) называют риском поставщика (изготовителя), а вероятность β -ошибки второго рода (принятие неверной гипотезы) называют риском потребителя (заказчика). При учете этих двух рисков число испытаний определяют по формуле, вытекающей из формулы (8.8). Подставляя $z_p = z_{1-\beta} + z_{1-\alpha}$, получаем

$$n = (z_{1-\beta} + z_{1-\alpha})^2 \sigma^2 / \delta^2. \quad (8.9)$$

Пример 8.2. Определим число n необходимых испытаний на статическую прочность образцов сварных соединений из листовой низкоуглеродистой стали. Примем браковочный уровень качества (прочности) $x_m = 40$ кгс/мм².

Примечный уровень качества примем $x_0 = 44$ кгс/мм².

Тогда можно определить участок неопределенности δ или требуемую точность, как разность $x_0 - x_m$. Для стали Ст3 генеральное среднееквадратическое отклонение $\sigma = 4$ кгс/мм². Зададимся рисками $\alpha = 0,1$, $\beta = 0,05$. Тогда по таблицам приложения

$$z_{1-\alpha} = z_{0,9} = 1,28; \quad z_{1-\beta} = z_{0,95} = 1,64.$$

По формуле (8.9) определим объем выборки n :

$$n = (1,64 + 1,28)^2 \cdot 4^2 / 4^2 = 9 \text{ образцов.}$$

Если $\alpha = \beta = 0,1$, как это часто принимают в статистических расчетах, то получим $n = 6-7$ образцов.

При большой экспериментальной или производственной статистике можно рассматривать долю B забракованных (вырубленных) швов как количественный признак, имеющий среднее $\bar{X}$ и генеральную дисперсию σ^2 . Тогда, пользуясь формулами (8.7) и (8.8), можно получить выражение, связывающее объем выборки n не только с параметрами σ ; z ; δ , но также с величиной партии N :

$$n = Nz^2\sigma^2/(N\delta^2 + z^2\sigma^2). \quad (8.10)$$

Подобная же зависимость может интерпретироваться формулой другого вида

$$n = \frac{(z_\alpha/\delta)^2 B(1-B)}{1 + (z_\alpha/\delta)^2 B(1-B)\eta}, \quad (8.11)$$

где $\eta = n/N$, а дисперсию σ^2 определяют по формуле для гипергеометрического распределения:

$$\sigma^2 = \frac{N-n}{N-1} nB(1-B).$$

Пример 8.3. По результатам неразрушающего рентгеновского контроля за большой период установлено, что средняя вырубка швов корпусных конструкций составляла 6—25%, а стандартное отклонение 10—20%. Объем контроля был 2—20%, причем партия составляла 20—100 единиц. Проведенные расчеты достоверности контроля по формулам (8.10), (8.11) показали, что для партий объемом $N > 50$ и с достаточно большой долей брака $B \geq 0,15 \div 0,25$, доверительная вероятность $p = 0,90 \div 0,95$, и точность оценки $\delta \approx 0,25B$ может быть достигнута только при выборках $\eta = n/N = 30 \div 35\%$ и более. При выборках $\eta \leq 20\%$ (как это требуется по нормам ПК) достоверность падает до 50% и ниже. Уменьшение доли брака B , уменьшение размера партии $N \leq 50$, а также увеличение дисперсии σ^2 еще резче снижает достоверность контроля.

Расчет достоверности и объемов неразрушающего контроля при альтернативной оценке дефектограмм по формулам (8.10)—(8.11) нормального распределения применим только при достаточно больших партиях продукции ($N > 100$). В реальных заводских условиях контроль обычно ведут малыми партиями ($N \leq 50 \div 100$), поэтому приведенная в примере 8.3 оценка хотя и наглядная, но слишком приближенная.

Оценка по альтернативному признаку. В общем случае (при $N \leq 50 \div 100$) оценку достоверности контроля сварных конструкций следует производить исходя из гипергеометрического распределения:

$$P(q, n, D, N) = C_{D-d}^d C_{N-D}^{n-d} / C_N^n,$$

где $q = D/N$; D, d — число бракованных участков в партии и в выборке.

Пример 8.4. Расчет рисков α и β проведем для $N = 50$ и $q_{ср} = 0,1$. При этом объем выборки примем равным 20% N , т. е. $n = 10$. Это соответствует максимальному объему контроля по инструкции.

Примем также $q_0 \leq 0,04$ (при этом $D \leq 2$); $q_m \geq 0,16$ (при этом $D \geq 8$); приемочное число $C = 1$ (допустим один дефектный элемент).

Определим значения вероятностей

$$P(d=0) = \frac{\binom{2}{0} \binom{48}{10}}{\binom{50}{10}} = 0,63; \quad P(d=1) = \frac{\binom{2}{1} \binom{48}{9}}{\binom{50}{10}} = 0,32.$$

$$\alpha = 1 - P(q_0) = 1 - [P(d=0) + P(d=1)] = 1 - (0,63 + 0,32) = 0,05.$$

$$\beta = P(q_m) = \frac{\binom{8}{0} \binom{42}{10} + \binom{8}{1} \binom{42}{9}}{\binom{50}{10}} = 0,49.$$

Из расчета видно, что при существующих нормах «процентного отбора» для малого N риск потребителя ($\beta \approx 0,5$) недопустимо велик. Условную достоверность можно подсчитать по формуле $D_y = 1 - (\alpha + \beta) = 1 + 0,55 = 0,45$. Она оказывается для данного примера слишком низкой, что подтверждает результаты расчетов по формулам (8.10) и (8.11). Характеристикой точности альтернативной оценки качества может служить также интервал неопределенности. Для данного примера: $\delta = q_m - q_0 = 0,16 \div 0,04 = 0,12$.

Расчет достоверности с оценкой отдельно рисков α и β более ценен, чем приближенный расчет по формулам нормального распределения. Вместо гипергеометрического при соответствующих условиях ($N \gg n$ и др.) можно использовать биномиальное и Пуассоновское распределения, для которых имеются более простые формулы и готовые таблицы для расчета вероятностей [13].

8.2. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА СОЕДИНЕНИЙ ПРИ РАЗРУШАЮЩИХ ИСПЫТАНИЯХ

8.2.1. Относительные статистические показатели качества

Результаты разрушающих испытаний служат не только для контроля качества, но и для оценки несущей способности сварных соединений. Поэтому для выбора унифицированного критерия необходим учет существующих детерминированных и вероятностных систем оценки несущей способности и коэффициентов запаса сварных соединений. Известны методики расчетов соединений по допускаемым напряжениям, по предельным состояниям, а также с использованием вероятностных критериев неразрушимости. Кроме того, в существующей практике прочность сварного соединения по отношению к основному металлу оценивают некоторым коэффициентом ослабления Q . Для стальных стыковых соединений при статической растягивающей нагрузке $Q = 1,0$ или $0,9$, причем $1,0$ соответствует более высокому уровню технологии.

Известно, что показатели качества металла из-за его неоднородности — случайные величины, распределенные обычно по закону, близкому к нормальному. Качество сварного соединения также может быть принято как нормально распределенная величина.

С учетом этих замечаний и согласно описанной в гл. I модели (см. рис. 1.1) вероятностный критерий оценки качества сварных соединений следует выбирать, исходя из условия равнонадежности соединения и основного металла. Статистический показатель качества Q_γ с заданной вероятностью γ характеризует относительную величину параметра качества сварного соединения W в сравнении с исходным параметром R , отражающим качество (прочность) основного металла.

В общем случае, для произвольно распределенных величин R и W показатель Q_γ выражают как отношение

$$Q_\gamma = W_\gamma / R_\gamma, \quad (8.12)$$

где W_γ и R_γ — гамма-процентные характеристики W и R , т. е. значения качества, соответствующие вероятности γ реализации его значений (рис. 8.13). Для нормально распределенных величин W и R предложены формулы:

$$Q_\gamma = \frac{W_\gamma}{R_\gamma} = \frac{\bar{W} - z_\gamma S_W}{\bar{R} - z_\gamma S_R} \quad (8.13)$$

или

$$Q = Q_{\gamma 50} \frac{1 - z_\gamma V_W}{1 - z_\gamma V_R}, \quad (8.14)$$

где $\bar{W}$, $\bar{R}$ — средние арифметические значения, S_W , S_R — средние квадратические отклонения, $z_\gamma = z_{\gamma W} = z_{\gamma R}$ — квантили N -распределения, $V_W = S_W / \bar{W}$; $V_R = S_R / \bar{R}$ — коэффициенты изменчивости W и R ; $Q_{50\%} = \bar{W} / \bar{R}$ — величина Q_γ , рассчитанная по средним значениям ($\bar{W}$, $\bar{R}$) и соответствующая $\gamma = 50\%$.

Формулы (8.12)–(8.14) учитывают условие равновероятной прочности W и R :

$$\text{Вер} | W > W_\gamma | = \text{Вер} | R > R_\gamma | = \gamma$$

или в интегральной форме

$$\int_{W_\gamma}^{\infty} f(W) dW = \int_{R_\gamma}^{\infty} f(R) dR,$$

где $f(W)$ и $f(R)$ — плотности распределений W и R .

Таким образом, W_γ и R_γ соответствуют равновеликим площадям под кривыми распределений $f(W)$ и $f(R)$.

Вероятность γ (или z_γ) при расчетах Q_γ следует выбирать, исходя из заданной (по ГОСТ или ТУ) для основного металла величины $R_\gamma =$

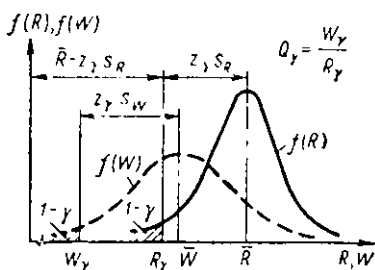


Рис. 8.13. Схема расчета Q_γ — относительного статистического показателя качества сварных соединений

$= R_{\text{ГОСТ}}$. Однако следует иметь в виду, что из-за неоднородности металла разных партий, вероятности γ_R (и квантили z_γ), соответствующие $R_{\text{ГОСТ}}$ для разных марок сталей весьма различаются ($z_\gamma = 1,65 \div 3,09$ и более). Вероятностные характеристики прочности и размеров сортамента некоторых сталей и сплавов приведены в табл. 8.1 и 8.2.

Таблица 8.1

Вероятностные характеристики прочности некоторых металлов

Металл	По ГОСТ		Из эксперимента			
	$\delta_{\text{ном.}}$ мм	$\sigma_{\text{в.}}$ кгс/мм ²	Число образцов	$\bar{X} = \bar{\sigma}_{\text{в.}}$ кгс/мм ²	$S_{\text{в.}}$ кгс/мм ²	$V = \frac{S}{\bar{X}}$ %
Ст3	2,6—3,0	38—47	20 336	41,42	3,07	7,40
20кп	4,1—5,0	35—50	9 990	39,73	3,28	8,25
Ст4	2,0—3,0	42—52	2 969	45,17	3,33	7,37
12X18H10T	0,8—4,0	54	21 651	63,72	3,60	5,65
AMг6M	1,5	32	2 939	32,72	0,76	2,33

Таблица 8.2

Вероятностные характеристики размеров и сортамента некоторых металлов

Металл	По ГОСТ		Число образцов	$\bar{X} = \bar{\delta}$, мм	$S_{\text{мм}}$	$V = \frac{S}{\bar{X}}$, %	Границы 95%-ного дове- рительного интервала, мм
	$\delta_{\text{ном.}}$ мм	$\delta_{\text{млп.}}$ мм					
20кп	1,5	—	619	1,527	0,065	4,26	1,522—1,532
12X18H10T	0,8	0,70	3708	0,810	0,030	3,68	0,806—0,814
AMг6M	1,5	1,28	3312	1,385	0,027	1,95	1,384—1,386

Если величина $W_\gamma = W_{\text{ГОСТ}}$ известна, то значение z_γ определяем из условия

$$R_\gamma = \bar{R} - S_R z_\gamma,$$

в $\bar{R}$ и S_R находим по кривой распределения $f(R)$. Затем полученное z_γ подставляем в уравнение

$$W_\gamma = \bar{W} - S_W z_\gamma,$$

откуда определяем W_γ и Q_γ .

Если стандартные нормативные значения R_γ для основного металла неизвестны, то вероятность γ может быть назначена, исходя из желаемой точности получения оценок Q_γ . При этом практически, например, могут быть приняты значения γ и z_γ :

$\gamma\%$	50	84	90	95	97,7	99,0	99,86	99,90	99,99
z_γ	0	1,0	1,3	1,65	2,0	2,33	3,0	3,09	3,8

Значения $Q_y = Q_y^{\text{густ}}$ для больших (генеральных) совокупностей являются не случайными, а детерминированными величинами. Их целесообразно использовать как нормативные значения при расчетах прочности и приемочном контроле качества сварных соединений. Однако для производственного регулирования технологических процессов можно определить $Q_y^* = Q_y^{\text{выб}}$ по выборочным характеристикам W и R .

Для объемов выборки $n \leq 12$ предложена приближенная формула

$$Q_y^* = \frac{\tilde{W} - \omega_W}{\tilde{R} - \omega_R}, \quad (8.15)$$

где $\tilde{W}$, $\tilde{R}$ — медианы, ω_W ; ω_R — размахи значений W и R .

Принято $z_y = d_n$, а $n_W = n_R = n$, где d_n — коэффициент, зависящий от объема выборки n (см. стр. 262).

В расчетах прочности, например, по методу допускаемых напряжений коэффициент запаса k для сварного соединения с учетом Q_y определяют по формуле $k = k_{Q_y}$ (k — коэффициент запаса для основного металла).

Иногда исходя из условий эксплуатации важно учитывать несколько i -тых вариантов доминирующих отказов. Тогда показателем надежности сварного соединения будет некоторый комплексный коэффициент ослабления K_n , равный произведению Π i -тых значений Q_y а соответствующими корректирующими коэффициентами $\Phi(r_i)$, учитывающими корреляционную связь и удельный вес показателей Q_i :

$$K_n = \prod_{i=1}^n Q_{yi} \Phi(r_i).$$

Пример 8.5. Определение коэффициента Q_y стыковых соединений для стали 12Х18Н9Т толщиной $\delta = 10$ мм.

Из опытов имеем характеристики случайной величины W предела прочности σ_B сварного шва ($\sigma_{св}$): $\tilde{W} = \bar{\sigma}_{св} = 62$ кгс/мм², $S_W = S_{св} = 3,3$ кгс/мм², и характеристики случайной величины R — предела прочности σ_B основного металла ($\sigma_{о.м}$): $\tilde{R} = \bar{\sigma}_{о.м} = 63$ кгс/мм², $S_R = S_{о.м} = 2,6$ кгс/мм².

Определяем квантиль z_y и γ исходя из браковочного минимума для основного металла по ГОСТ, где $\sigma_{B \text{ ГОСТ}} = R_y = 55$ кгс/мм²:

$$z_y = \frac{\tilde{R} - \sigma_{B \text{ ГОСТ}}}{S_R} = \frac{63,0 - 55,0}{2,6} = \frac{8,0}{2,6} \approx 3,09.$$

В приложении 1 находим $\gamma = 0,999$. Вычисляем Q_y и $Q_{50\%}$, считая $z_y = 3$.

$$Q_y = \frac{\tilde{\sigma}_{св} - z_y S_{св}}{\sigma_{о.м} - z_y S_{о.м}} = \frac{62 - 3 \cdot 3,3}{63 - 3 \cdot 2,6} \approx 0,95; \quad Q_{50\%} \approx 1.$$

Поскольку обычно $S_W > S_R$, то $Q_y \ll Q_{50\%}$.

Для нормирования показателя Q_y целесообразно использовать классы равновероятного качества

Классы	1	2	3	4	5
Норма Q_y	1,0—0,9	0,9—0,8	0,8—0,7	0,7—0,6	Менее 0,6

Сравнивая полученные при производственном контроле значения Q_y с нормой, можно делать выводы о качестве технологии, оборудования, квалификации сварщика и т. д. Для статистического регулирования технологии можно также использовать показатель W_y , задаваясь определенной вероятностью γ .

8.3. ОЦЕНКА ДЕФЕКТНОСТИ СОЕДИНЕНИЙ

8.3.1. Статистические показатели распределения дефектов

Выше была показана методика статистического регулирования технологии сварки по доле брака B (см. рис. 8.7). Однако при альтернативной оценке дефектограмм значительную часть информации о дефектах не учитывают. А следовательно, сужаются и возможности действенного регулирования качества сварки. Кроме того, достоверная оценка качества возможна только при больших выборках, когда $n \gg 100$ или $np \gg 5$, но большие выборки понижают экономичность и оперативность контроля.

Для перехода от альтернативных к количественным оценкам необходимо систематически исследовать число и характер появляющихся дефектов, а также уровень засоренности дефектами сварочной продукции. Для сбора и обработки этих данных необходимы специальные карты учета (см. гл. X, приложение 2—4) и статистические показатели дефектности.

К статистическим показателям дефектности относятся: дефектность в контролируемом элементе g и уровень q дефектности в партии (см. табл. 1.4).

Дефектность элемента определяется как $g = S/S_p$, где $S = \sum \Delta S$ — относительная суммарная площадь дефектов данного вида (или типа) в расчетном сечении S_p соединения. При наличии разных видов или типов дефектов эквивалентная дефектность $g_e = \sum g_i r_i$ (причем $r_i = g_i/g_i$ — коэффициент приведения любых i -тых дефектов к эквивалентным). За эквивалент удобно принять дефектность элемента, имеющего только поры, тогда $g_e = g_n$ и для пор принимаем $r_n = 1$.

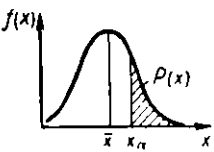
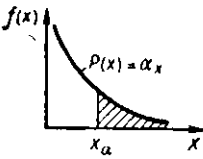
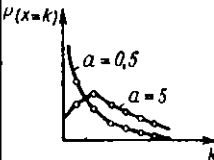
В п. 8.3.2 показано, как можно определять коэффициенты приведения из дефектологических исследований. Однако на практике пока коэффициенты r_i назначают эмпирически, и они присутствуют в нормах, хотя и в неявной форме.

Таблица 8.3

**Физические и статистические модели для анализа качества
сварных соединений**

Обозначения: Вер $(X \leq x) = F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx$; Вер $(X > x) = P(x) = 1 - F(x)$;

$f(x)$ — плотность вероятности

Физические модели	Форма кривой $f(x)$	Основные статистические модели
Качество (прочность) основного металла $f(R)$ и соединения $f(w)$ Критерий неразрушимости		Нормальное распределение (Гаусса) $f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-(x-\bar{x})^2/2\sigma^2};$ $M_x \approx \bar{x};$ $D_x = \sigma^2$
Размеры обнаруженных дефектов $f_0(x)$ при коэффициенте выявляемости, меньшем единицы. Время или длина бездефектной сварки		Распределение Вейбулла $f(x) = \frac{\gamma}{\beta} x^{\gamma-1} \exp(-x^\gamma/\beta);$ $P(x) = \exp(-x/\beta);$ $M_x = b_m \beta^{1/\gamma};$ $\sqrt{D_x} = C_m \beta^{1/\gamma}.$ Возможны N — усеченное, N — логарифмическое, гамма-распределения и др.
Размеры $f_p(x)$ реальных дефектов или относительные площади дефектов $f_p(g)$; междефектные длины $f(l)$		Экспоненциальное распределение $f(x) = \lambda e^{-\lambda x}; M_x = 1/\lambda;$ $P(x) = e^{-\lambda x}; D_x = 1/\lambda^2$
Число D дефектных элементов в партии $P(D)$. Число дефектных элементов в выборках — $P(d, n, C)$, где C — приемочное число		Распределение Пуассона $P(k) = \frac{a^k}{k!} e^{-a}; M_x = a;$ $a = nq; D_x = a$ Возможны биномиальное и гипергеометрическое распределения

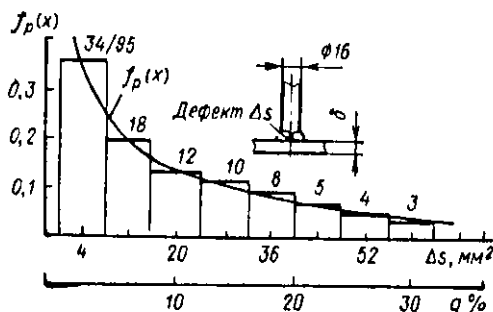


Рис. 8.14. Гистограмма и плотность распределения дефектов-включений по величине их абсолютной ΔS и относительной g площади в расчетном сечении тавровых сварных соединений стержень—пластина

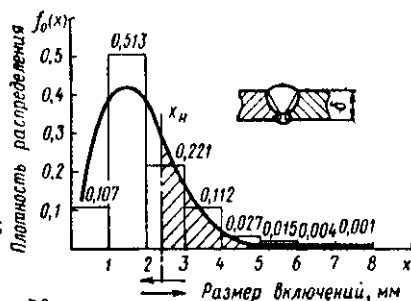
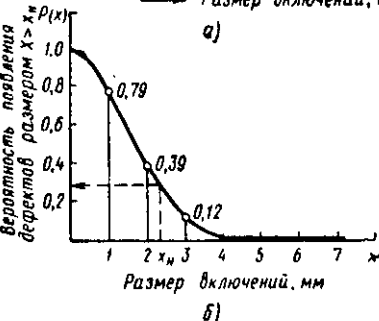


Рис. 8.15. Статистическое распределение размеров дефектов-включений в стыковых швах низколегированной стали толщиной 10—28 мм, выявленных по рентгенограммам: а — гистограмма и плотность распределения; б — функция распределения вероятностей обнаружения дефектов размером более заданной нормы. Сварка под флюсом



Исходя из физических особенностей появления сварочных дефектов-включений (пор и шлаков), распределение их по размерам должно в большинстве случаев отвечать экспоненциальному закону (табл. 8.3). В соответствии с моделью, данной в п. 8.3.2, обнаруженные дефекты распределены по нормальному закону или по закону Вейбулла, что связано с пониженной выявляемостью мелких дефектов. Числа появления дефектов или дефектных элементов распределяются (при малой их доле) по закону Пуассона, так называемому закону редких событий.

Указанные выше теоретические распределения подтверждены экспериментально: а) по результатам вскрытия реальных дефектов при разрушающих испытаниях сварных соединений, б) по анализу рентгеновских и гамма снимков, в) по результатам ультразвукового контроля.

Расчеты вероятностей появления дефектов можно вести с помощью вероятностных бумаг распределения Вейбулла, которое удобно тем, что при параметре формы $\gamma = 1$, оно превращается в экспоненциальное. Соответствие эмпирических данных теоретическим распределениям проверяется критериями согласия (Пирсона и др.).

Пример 8.6. Анализ распределения величины дефектов-включений проведен по результатам вскрытия около 500 ($\sum n_k = 500$) сварных стыков тавровых соединений стержень—пластина (рис. 8.14). Сварка дуговая под флюсом. Из всех проконтролированных (разорванных при испытаниях) соединений дефектных оказалось $n = 95$. По результатам замера площадей дефектов построена гистограмма частостей $f_i = n_i/n$ появления соединений n_i с дефектами разной площади ΔS .

Гистограмма аппроксимирована по вероятностной сетке экспонентой с плотностью вероятностей $f_p(x)$:

$$f_p(x) = \lambda e^{-\lambda x} = 0,07e^{-0,07\Delta S}.$$

Пример 8.7. Распределение размеров дефектов-включений исследовали в стыковых кольцевых швах обечаек, сваренных способом АДФ на стали 16ГГ толщиной

10—28 мм. По результатам анализа 5700 рентгеновских дефектограмм, выполненных с чувствительностью около 2%, построена гистограмма. Аппроксимирующая функция имеет вид распределения Вейбулла (рис. 8.15, а) с плотностью $f_0(x)$:

$$f_0(x) = \frac{\gamma}{\beta} x^{\gamma-1} \exp\left(-\frac{x^\gamma}{\beta}\right) = \frac{x}{2,1} \exp\left(-\frac{x^2}{4,2}\right).$$

Математическое ожидание $M(X) = 1,8$ мм, стандартное отклонение $\sigma(X) \approx 1$ мм.

Для удобства оценки вероятностей появления дефектов, больших заданного размера x_n , построена интегральная кривая (рис. 8.15, б):

$$P(x) = 1 - F(x) = \text{Вер}(X > x_n) = \int_{x_n}^{\infty} f_0(x) dx.$$

8.3.2. Обоснование норм допустимости дефектов

Расчетная модель. Вероятность производственной потери качества (надежности) сварных соединений может быть определена на основании результатов неразрушающего контроля качества (дефектоскопии) и специальных исследований, позволяющих установить связь между сигналами от дефектов, реальными дефектами и их влиянием на эксплуатационную надежность (работоспособность).

В общем случае упрощенная (качественная) модель оценки вероятности $\Delta\varphi(x)$ потери качества для данного вида и размера дефектов в интервале от x до $x + \Delta x$ может быть представлена следующим образом (буква x для краткости опущена):

$$\Delta\varphi = \varphi_p \varphi_v, \quad (8.16)$$

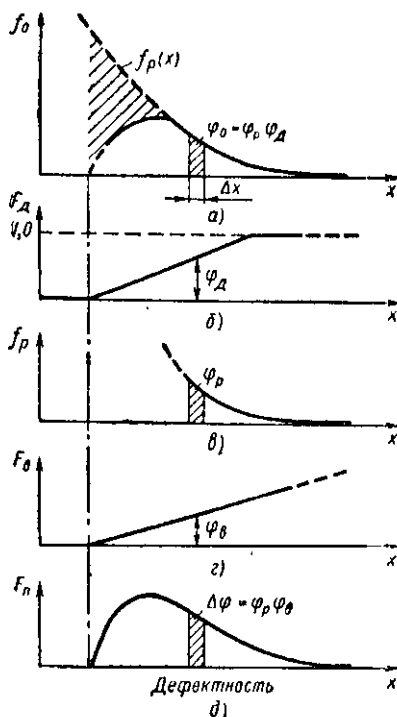
где $\varphi_p(x)$ или φ_p — вероятность наличия реальных дефектов в соединении (рис. 8.16); $\varphi_v(x)$ — вероятность влияния дефектов на потерю работоспособности.

В то же время вероятность обнаружения дефектов $\varphi_0(x)$, полученная по дефектограммам, связана с реальной дефектностью $\varphi_p(x)$ функцией выявляемости или достоверности контроля $F_d(x)$. Для конкретных значений $\varphi_d(x)$ имеем:

$$\varphi_0 = \varphi_p \varphi_d. \quad (8.17)$$

Рис. 8.16. Вероятностная схема оценки производственной потери качества сварных соединений:

а — обнаружение дефектов; б — чувствительность контроля; в — реальные дефекты; г — влияние дефектов; д — вероятность потери качества



Как показывает теория и подтверждает эксперимент, плотность распределения реальных дефектов $f_p(x)$ часто выражается экспонентой. Плотность $f_o(x)$ для обнаруженных дефектов оказывается при малых x как бы «усеченной» за счет кривой выявляемости $F_d(x)$. Например, при логарифмическом законе выявляемости, когда $F_d(x) = ax$, плотность $f_o(x)$ близка к закону Вейбулла (см. рис. 8.15).

Если при данных значениях параметра дефектности x , характеризующего вид, интенсивность и размеры дефектов, выявляемость $\varphi_d \approx 1$, то $\varphi_p = \varphi_o$ и можно говорить сразу о плотности вероятности появления дефектов $f_p(x)$. Это соответствует ступенчатому варианту функции $F_d(x)$. Функция плотности вероятностей потери качества из-за наличия дефектов, получается как сочетание $f_p(x)$ и $F_v(x)$. По форме она также оказывается близкой к распределению типа Вейбулла.

Если контроль сплошной (100%-ный) и все швы с недопустимыми дефектами исправляют или отбраковывают, то после контроля $\varphi_p = 0$ и $\Delta\varphi = 0$. Если контроль выборочный (3; 10; 20% и т. п.), то в общем случае значение $\varphi_p(x) \neq 0$, и оно может быть определено из распределений $f_o(x)$, если известны выявляемость F_d и достоверность выборочных оценок. Однако часть обнаруженных дефектов может не влиять на работоспособность соединения. Например, как указано в гл. I, для пластичных металлов отдельные поры суммарной площадью до 5—10% расчетной площади шва практически не влияют на статическую прочность. В этом случае $\varphi_v = 0$ и опять потеря $\Delta\varphi = 0$.

Может иметь место случай, когда $\varphi_d = 0$. Это значит, что данным методом дефектоскопии дефекты не обнаруживаются и метод не годен для оценки качества и надежности заданных сварных соединений.

В тех случаях, когда дефектоскопия неприменима (например, при контроле сварных соединений сложной конфигурации или соединений в микроэлектронике и т. п.) выборочные разрушающие испытания проводят непосредственно на производственных образцах или образцах-свидетелях.

Критерии оценки. Разработка системы расчета обоснованных норм сварочных дефектов—важная задача, поскольку от принятых норм зависит, с одной стороны, несущая способность сварных конструкций, а с другой—доля брака на производстве. До последнего времени эмпирически считалось, что нормы допустимых дефектов определяются только одним фактором—влиянием этих дефектов на работоспособность или прочность конструкций. Однако это справедливо главным образом только для критических (по терминологии ГОСТ 17102—71) дефектов, например для трещин, которые обычно считают недопустимым дефектом. В то же время анализ правил контроля показал, что нормы малозначительных дефектов (отдельных пор, шлаков, непроваров) могут для одних и тех же типов соединений отличаться в несколько (иногда в десятки) раз.

Обоснование норм допустимости малозначительных дефектов следует связывать одновременно с двумя факторами: во-первых,

с возможным влиянием дефектов на работоспособность соединений, а, во-вторых, с вероятностью появления этих дефектов при данном уровне технологии сварки.

Исходя из этого система, критерии и величины норм допустимых дефектов должны быть направлены на решение комплексно двух задач: 1) обеспечения гарантированной вероятности для заданного уровня работоспособности соединения; 2) обеспечения гарантированной вероятности отсутствия (при данной технологии) дефектов недопустимого размера или вида.

Для решения первой задачи в нормах указывают размеры, природу (вид), геометрию (тип) дефектов и стремятся учесть конструктивно-эксплуатационные характеристики влияния на работоспособность соединения отдельных дефектов (см. гл. I). Вторая задача связана с предупредительным текущим контролем, для которого согласно ГОСТ 15895—70 рекомендован термин—статистическое регулирование технологического процесса. Для решения второй задачи нет необходимости в детерминированной оценке каждого отдельного дефекта. Однако в то же время требуется интегральный показатель, учитывающий уровень дефектности при данной технологии.

Указанный выше критерий g — дефектность контролируемого элемента — учитывает одновременно величину, количество, виды и типы дефектов путем их приведения к эквивалентной относительной площади (эквивалентной длине или другому аналогичному показателю). Этот критерий принципиально пригоден для радиационных, ультразвуковых и магнитографических методов контроля.

В основу определения величины норм допустимых дефектов целесообразно положить две расчетные модели: технологическую и эксплуатационную, используемые одновременно. Соответственно этим моделям рассмотрим две вероятностные характеристики дефектов, полученные опытным путем:

$$1) \varphi_{рн} = \text{Вер}(X > x_n); \quad 2) \Delta\varphi_n = \text{Вер}(W < w_n),$$

где $\varphi_{рн} = \alpha_n$ — нормативная вероятность появления из общего числа дефектов (или дефектных участков) дефектов с размерами X , большими некоторого нормативного размера x_n (рис. 8.17, а); $\Delta\varphi_n$ — нормативная вероятность потери работоспособности W соединением ниже некоторого нормативного уровня w_n из-за наличия дефектов размером x (рис. 8.17, б).

Условия расчета норм по каждой модели имеют вид: 1) технологическая модель $\varphi_p \leq \varphi_{рн}$; 2) эксплуатационная модель $\Delta\varphi \leq \Delta\varphi_n$.

Ниже дан пример для сварных тавровых соединений стержень—пластина. Он наиболее прост в методическом отношении, так как встречаются обычно дефекты одного вида площадью ΔS .

Пример 8.8. Частоты появления дефектов разной площади получены по результатам вскрытия испытанных стыков. Они аппроксимированы экспонентой с плотностью распределения $f_p(x)$ (см. рис. 8.14):

$$f_p(x) = 0,07 \exp(-0,07x).$$

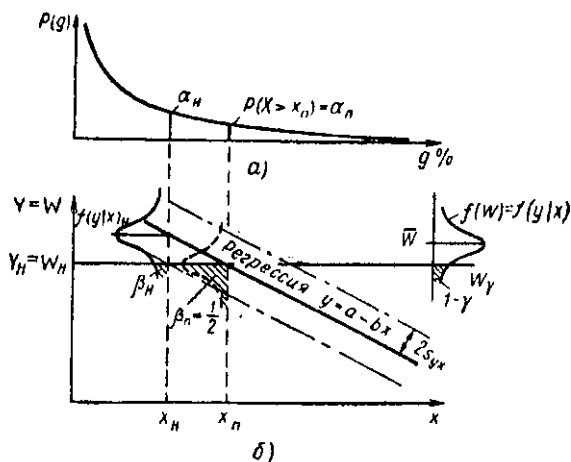


Рис. 8.17. Схема вероятностного определения нормативного x_n и порогового x_n размера дефектов:

a — вероятности появления дефектов; b — влияние дефектов на прочность соединений

Влияние дефектов относительной площадью $g = X$ на прочность $\sigma_B = Y$ выражено линейной регрессией вида $Y = a - bX$, а также условными распределениями $f(y/x)$ (рис. 8.17, б). Напомним, что условным распределением $X - Y$ при рассмотрении системы случайных величин (X, Y) называют распределение составляющей X при фиксированном $Y = y_l$. Аналогично для $f(y/x)$.

Пересечение линии регрессии и нормативного уровня прочности сварного соединения $w_n = w_y$ соответствует так называемому пороговому размеру x_n дефекта. Для $X = x_n$ вероятности влияния и невлипания дефекта на прочность соединения равны 0,5, что хорошо видно из кривых $f(y/x)$. Нормативный уровень $w_n = w_y$ соответствует вероятности γ для реализации значений прочности сварных соединений. Значение γ выбрано исходя из условия равнонадежности основного металла, имеющего распределение прочности $f(R)$ и сварного соединения: $\gamma_w = \gamma_R = \gamma$ (см. п. 8.2).

Для конкретных соединений (сварка под флюсом, стержень диаметром 16 мм из стали класса А111) имеем регрессию $\sigma_B = W = 61 - 43g$ при коэффициенте корреляции $r_{XW} \approx -0,8$.

Пороговая величина x_n составляет $g_n = 0,1 = 10\%$, а $\Delta S_n = 20 \text{ мм}^2$.

Расчет по эксплуатационной модели [формула (8.16)] для порогового размера дефекта дает следующее:

$$\Delta \Phi_n = \Phi_B \Phi_P = P_1 P_2 P_3 = \beta_n \alpha_n q_\Sigma = 0,5 \cdot 0,25 \cdot 0,1 \approx 0,012.$$

где $P_1 = \beta_n = 0,5$, $P_2 = \alpha_n = \exp(-0,7 \Delta S_n) = (-0,07 \cdot 20) = 0,25$, $P_3 = q_\Sigma$ — доля дефектности по всем возможным размерам дефектов. Для данной технологии $q_\Sigma = \text{const} = 0,1$.

Расчет по технологической модели дает вероятность появления дефектов:

$$\Phi_{\text{рп}} = P_2 P_3 = \alpha_n q_\Sigma = 0,25 \cdot 0,1 = 0,025.$$

Таким образом, если принять норму $x_n = x_n$, то вероятность получения соединений с прочностью ниже 56 кгс/мм^2 w_n — будет около 1%. В то же время по выявленным при контроле недопустимым дефектам доля брака составит 2,5%.

При назначении норм следует учитывать экономически оптимальный вариант, когда сумма технологических затрат T на предотвращение дефектности и эксплуатационных $\mathcal{E}$ — на ликвидацию дефектности и ее последствий будет наименьшей (рис. 8.18). На рисунке условно показаны два варианта изменения эксплуатационных зат-

рат $\mathcal{E}'$ и $\mathcal{E}''$. При варианте $\mathcal{E}'$, когда ущерб от дефектности сравнительно мал, экономически оптимальный уровень нормативной дефектности $x_n = x_2$. Если же ущерб $\mathcal{E}''$ резко растет, то $x_n < x_2$.

Практически, к расчетам $T + \mathcal{E}_{\min}$ не всегда имеются данные, поэтому, принимая эксплуатационную модель расчета, удобно использовать понятия запаса норм η . Запас по размеру η_x есть отношение порогового (критического) размера к нормативному, а запас по вероятности η_p — отношение критической потери работоспособности к нормативной:

$$\eta_x = x_n / x_k;$$

$$\eta_p = \Delta \varphi_n / \Delta \varphi_k = \alpha_n \beta_n / \alpha_k \beta_k.$$

Например, при запасе $\eta_x = 2$, $x_n = 5\%$, $\Delta S_n = 8 \text{ мм}^2$, $P_2 = \alpha_n = \exp(-0,07 \times 8) = 0,5$. Доля брака $B = 5\%$.

В то же время x_n , при установленном из опыта $S_{xy} = \text{const}$ соответствует примерно двухсигмовому отклонению $2S_{yx}$ от линии регрессии, поэтому $P_1 = \beta_n = 0,02$.

Получаем $\eta_p \approx 12$, а $\eta_p / \eta_x = 6$.

Таким образом, оценка запаса по вероятности значительно эффективнее, чем оценка запаса по размеру. Часто по расчету можно установить, что существующие нормы дефектов отвечают неравенству $x_n \ll x_k$, т. е. запасы велики, например $\eta_p > 50 + 100$ или $\eta_x > 5 + 10$. Тогда эти нормы следует условно считать технологическими. Если x_n и x_k одного порядка, то нормы — эксплуатационные.

Рассмотренный пример вероятностных моделей обоснования норм дефектов разработан для статических нагрузок и пластичных материалов. Однако эти же модели могут быть с некоторыми коррективами применимы и для «особых» условий нагружения.

По эксплуатационной модели нормирования дефектов легко определить также коэффициенты приведения (рис. 8.19). Например, определим его для тавровых соединений. Приняв для центрально расположенных дефектов (линия 1), как наименее опасных, коэффициент приведения $r_1 = 1$, получаем для краевых дефектов (линия 2) коэффициент приведения r_{21} как отношение пороговых размеров 1 и 2-го типов дефектов:

$$r_{21} = x_{21} / x_{22} = 20 / 10 = 2.$$

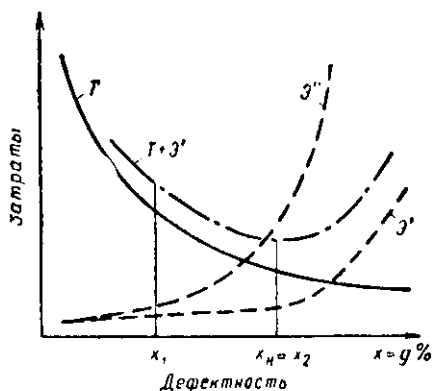


Рис. 8.18. Схема выбора экономически оптимального варианта норм допустимых дефектов исходя из анализа технологических (T) и эксплуатационных ($\mathcal{E}$) затрат

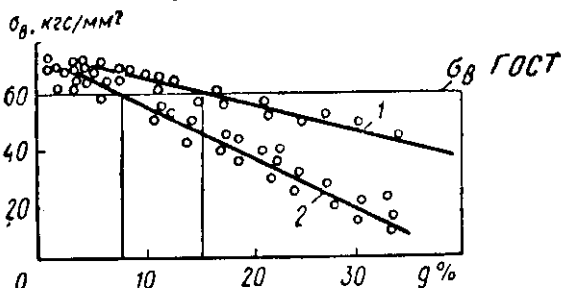


Рис. 8.19. Схема определения коэффициентов приведения конкретных дефектов к эквивалентным

8.3.3. Система оценки дефектности

До последнего времени в ряде отраслей отечественной промышленности используют трехбалльную систему для оценки дефектов сварных швов по рентгенограммам. В этой системе баллом 3 оценивают соединения, в которых не обнаружено признаков непроваров, трещин, а имеются в небольшом количестве только отдельные поры и шлаковые включения диаметром до 1—2 мм (например, одна пора на 100 мм шва). Балл 3 обычно называют «проходным».

Балл 2 соответствует сварным швам, в которых не обнаружены трещины и непровары по кромкам. Непровары в корне шва, поры и шлаки нормируют в зависимости от характера изделия. Сварные швы, оцененные баллом 2, считаются обычно приемлемыми без исправления.

Балл 1 соответствует соединениям, в которых обнаружены трещины, а также непровары, поры и шлаки в количестве, превышающем норму. Сварные швы, оцененные баллом 1, обычно подлежат исправлению и повторному контролю.

Стандарты на указанную трехбалльную систему отсутствуют. Она в той или иной мере отражена в отраслевых правилах контроля (ПК), инструкциях или технических условиях (ТУ) на сварку изделий. В ряде отраслей принята фактически двухбалльная система оценки дефектограмм: годен—негоден. Анализом отечественных и зарубежных норм установлено, что требования к допустимости дефектов для одних и тех же видов изделий в разных отраслях отличаются иногда в несколько раз. Это часто приводит к необоснованной вырубке швов с малозначительными дефектами. Поэтому в ряде стран разрабатывают многобалльную систему оценки дефектов по ступеням (баллам) дефектности.

Представляет интерес система норм, указанных в баллах I—IV стандарта TGL 10646 (ГДР), который принят в настоящее время во всех странах СЭВ для оценки рентгенограмм. Качество при этом оценивают в каждом виде дефектов по четырем ступеням размеров и четырем ступеням частоты или длины дефектов (табл. 8.4). Раз-

Т а б л и ц а 8.4
Ступени размеров и частот (длин) дефектов
по стандарту TGL 10646 (ГДР)

Степень	Размер дефектов (% δ)	Частота дефектов (% от ΔL)
1	До 10, но ≤ 3 мм	До 5 (до 10)
2	Св. 10 до 20, но ≤ 5 мм	Св. 5 до 10 (10—20)
3	Св. 20 до 30, но ≤ 7 мм	Св. 10 до 25 (20—30)
4	Св. 30	Св. 25 (св. 30)
$\Delta L = 10\delta$, но $100 \leq \Delta L \leq 300$		
Примечание. В скобках даны значения, указанные в последней редакции стандарта TGL 10646—72		

личные комбинации ступеней в зависимости от вида дефектов определяют балл качества сварного шва (табл. 8.5), с 1 по 5. Первая цифра означает ступень размера, вторая—частоты (длины) дефекта, например, 23, 12, 31 и т. п.

Таблица 8.5

Система оценки качества швов по стандарту TGL 10646

Дефекты	Балл качества				
	1	2	3	4	5
<i>Aa, Ab, Ba, Bc</i>	11	12 21	13 22 31	23 32	Остальное
<i>Ao</i>	—	11	12 21	13 22 31	Остальное
<i>Bb</i>	—	—	11 12 21	13 22	Остальное
<i>C</i>	—	—	—	11	Остальное
<i>Da</i>	—	11 12 21	13 22	23 14	Остальное
<i>Db</i> в одностороннем шве	—	—	11	12 21	Остальное
<i>Db</i> в двустороннем шве	—	—	11 12	13 21 22	Остальное
	—	—	—	—	—
$q = S/S_p, \%$	0,5	1,0	2,0	4,0	Рассчитано для $\delta = 10-30$

Анализ норм TGL (ГДР), норм «Бойлер-кода» (ASME — США) и др. показал, что в структуре норм заложены следующие примерные значения коэффициентов приведения (обозначения дефектов даны по стандартам стран СЭВ):

а) единичные округлые поры — $r_{Aa} = 1$; б) цепочки, скопления пор, вытянутые поры — $r_{Ab} r_{Ac} = 0,65 \div 2$; в) шлаки округлые —

$r_{Ba} = 0,5 + 1,5$; г) шлаки вытянутые $r_{Bb} = 0,65 + 2,3$; л) несплавления по кромкам $r_C = 5 + 8$; е) непровар в одностороннем шве $r_{Da} = 5 + 3$; ж) непровар в двустороннем шве $r_{Db} = 0,15 + 2,7$.

Таким образом, коэффициенты приведения r_i в отраслевых правилах (ПК) могут пока назначаться с учетом этих рекомендаций. По мере накопления данных исследований следует уточнять значения коэффициентов приведения для конкретных дефектов, изделий и условий производства.

Рассматривая вопрос о системе оценки дефектности сварных соединений, необходимо иметь в виду особенности выборочного контроля в сварочном производстве.

Традиционно установилось представление о том, что существующие выборочные (2—20%) испытания сварных швов служат для приемочного контроля. По его результатам систематически исправляют (вырубают) швы с недопустимыми дефектами. Причем доля вырубки (брак) составляет часто от объема сварки до 5—10% и даже более. Исходя из статистической модели контроля, вырубка дефектов при выборочном контроле соединений, как правило, нецелесообразна по следующим соображениям. Во-первых, в неконтролируемой части швов (которая составляет соответственно 98—80%) остается при стабильной технологии тот же уровень дефектности, что и в выборке. Во-вторых, как показали исследования, большинство норм допустимости дефектов технологические, а не эксплуатационные.

Например, запас норм по размерам включений обычно более, чем десятикратный, поскольку пороговая площадь включений и пор составляет 5—10% от S_p , а норма — обычно менее 1—0,1%.

Следовательно, основной задачей выборочного контроля должно быть статистическое регулирование технологического процесса сварки, т. е. осуществление предупредительных функций. По результатам такого контроля следует принимать решения о корректировке технологии, изменении объемов контроля, поощрении операторов и т. п. В случае появления недопустимых дефектов (трещин и трещиноподобных несплошностей) следует переходить к сплошному контролю.

Дальнейшие разработки и применение многобалльной системы ступеней дефектности позволяет: а) уменьшить имеющуюся в отечественных и зарубежных ПК неравнозначность норм допустимых дефектов, применяемых в разных отраслях и при разных методах дефектоскопии; б) снизить необоснованные исправления швов из-за малозначительных дефектов (пор, шлаков и т. п.); в) уточнить объемы выборочного контроля благодаря уменьшению уровня дефектности и за счет перехода (при той же информативности) от альтернативного («да — нет») к количественному признаку оценки дефектограмм, с учетом $\bar{g}$ и S_g ; г) облегчить введение автоматической расшивки дефектных снимков и отбраковки сварных соединений; д) обеспечить четкий порядок доплат сварщикам «за балльность», т. е. за высокое качество работ.

8.3.4. Вероятностная оценка выявляемости дефектов

Условимся понимать термин — достоверность контроля, как степень соответствия замеренных величин (сигналов) их реальным значениям (дефектам). Это определение качественное. Количественно необходимо установить корреляцию «сигналы—дефекты». Если эта корреляция тесная, то можно говорить о высокой достоверности контроля. На достоверность контроля влияют две основные составляющие. Первая — статистическая выявляемость дефектов данным методом испытаний при сплошном контроле. Условно назовем ее достоверностью метода и обозначим V . Вторая составляющая P — точность и надежность выборочных оценок (достоверность системы).

Общая достоверность контроля соответствует произведению этих вероятностей:

$$D = VP.$$

В основу вероятностной оценки выявляемости дефектов может быть положена первая часть описанной выше теоретической модели. Согласно этой модели вероятность Φ_0 обнаружения дефектов с параметром x может быть представлена как произведение вероятностей: $\Phi_0 = \Phi_D \Phi_D$ [см. формулу (8.17)]. Плотность распределения $f_D(x)$ появления реальных дефектов часто может быть описана экспонентой (рис. 8.20, а).

Вероятность обнаружения дефекта с параметром x_A можно рассчитать исходя из корреляционных полей «сигнал—дефект» условного распределения с плотностью $f_D(x) = f(x/y)$ (рис. 8.20, б). Это распределение получают как результат обработки гистограммы частот появления сигналов от дефекта с параметром (размером) x_A . Обычно имеется много независимых случайных причин к тому, чтобы зарегистрировать дефект размером x_A при данной настройке чувствительности контроля y_A как дефект большего или меньшего размера. Поэтому следует ожидать нормального распределения ошибок контроля со средним $\bar{x}_A$ и дисперсией $S_{x_A}^2 = S_x^2$. Тогда кривую выявляемости данного дефекта можно рассматривать как интегральную функцию распределения $F(x/y)$.

Результаты статистической обработки корреляционного поля

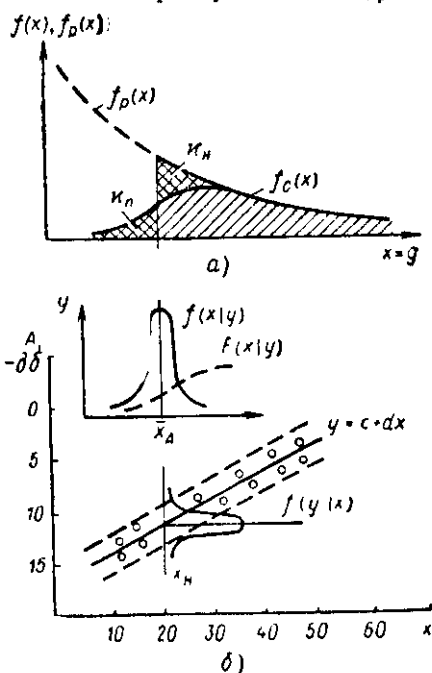


Рис. 8.20. Схема вероятностной оценки выявляемости дефектов — (а); корреляционная связь сигналы—дефекты, условные распределения $f(x/y)$ и $f(y/x)$ — (б)

«сигналы—дефекты» позволяют обычно рассчитать уравнение линейной регрессии $Y = C + dX$, которая в определенных пределах значений x приближенно отражает связь $Y(X)$.

Композиция распределения $f_p(x)$ кривой выявляемости $F_p = F(x/y)$ дает кривую плотности распределения обнаруженных дефектов $\bar{f}_0(x)$. Можно принять для простоты рассуждений, что нормативное значение x_n совпадает с центром x_A распределения $f(x/y)$. Тогда, рассматривая рис. 8.20, можно выделить следующие три пло-

щадки под кривой $f_p(x)$: 1) $\alpha_x = \int_x^{\infty} f_p(x) dx$ — вероятность появления реальных дефектов с параметром $X \gg x_n$; эта вероятность соответствует всей площади под кривой $f_p(x)$ правее ординаты x_n ; 2) κ_n — вероятность недобраковки; 3) κ_n — вероятность перебраковки.

В соответствии с введенными обозначениями статистическую выявляемость дефектов в общем случае можно определить по формуле:

$$V = \frac{\alpha_x - \kappa_n}{\alpha_x + \kappa_n} = \frac{F_n}{F_n}$$

Если желательно вести контроль без существенной недобраковки, то запас по чувствительности $\Delta x = x_n - \bar{x}_A$ должен быть не менее трехсигмового разброса кривой выявляемости: $\Delta x \geq 3S_x$.

Полагая $\kappa_n = 0$, имеем формулу для статистической выявляемости при перебраковке V_n :

$$V_n = \frac{\alpha_x}{\alpha_x + \kappa_n} = \frac{1}{1 + \frac{\kappa_n}{\alpha_x}}.$$

Аналогично, при загрузлении (отрицательном запасе) чувствительности — $\Delta x = \bar{x}_A - x_n$ так, что $\Delta x \geq 3S_x$, $\kappa_n = 0$. Тогда статистическую выявляемость при недобраковке V_n определим по формуле

$$V_n = \frac{\alpha_x - \kappa_n}{\alpha_x} = 1 - \frac{\kappa_n}{\alpha_x}.$$

Величины κ_n/α_x и κ_n/α_x представляют собой соответственно значения относительной недобраковки и перебраковки изделий. Их можно использовать как самостоятельные оценки, подобные рискам производителя α и потребителя β при выборочном контроле.

Из рассмотренной схемы видно, что даже сплошной контроль, как правило, не дает стопроцентного выявления всех дефектов при чувствительности контроля, соответствующей нормативному размеру (параметру) дефектов. Чем больше разброс кривой выявляемости

тем ниже достоверность контроля. Увеличить достоверность контроля при большом разбросе (дисперсии) кривой выявляемости можно лишь увеличивая запас чувствительности контроля Δx . Но этот путь, как правило, связан с еще большим ростом дисперсии за счет различных помех при контроле.

Рассматривая пути улучшения достоверности контроля за счет увеличения статистической выявляемости дефектов, следует иметь в виду, что радиографический контроль ведут обычно на предельной чувствительности, т. е. $\bar{x}_A^R = \text{const}$ для данного соединения. В то время как ультразвуковой контроль ведут на поисковой или браковочной чувствительности, которую можно существенно изменять, т. е. $\bar{x}_A^{уз} = \text{var}$.

Достоверность контроля и статистическую выявляемость дефектов правильнее всего оценивать как вероятность принятия безошибочных решений.

Для оценки достоверности, исходя из числа дефектных изделий, по альтернативному признаку удобно использовать т. н. «матрицу достоверности» (табл. 8.6). В этой матрице могут быть представлены

Таблица 8.6

Матрица достоверности для альтернативного сравнения методов контроля по числу проверенных изделий

Методы контроля и оценка его результатов для n_{Σ} образцов $n_{\Sigma} = n_r + n_n + n_{\alpha} + n_{\beta}$		Эталонный метод	
		число годных	число негодных
Пробный метод	Число годных	n_r безусловно годные	n_{β} недобраковка, ошибка II рода
	Число негодных	n_{α} перебраковка, ошибка I рода	n_n безусловно негодные

не все проверенные изделия, а только те изделия (стыки), в которых обнаружены какие-либо дефекты, как допустимые (годные изделия), так и недопустимые (негодные изделия). Матрицу для совокупности только дефектных элементов правильнее называть «матрицей выявляемости».

Из табл. 8.6 видно, что имеется четыре варианта сочетания решений: два с совпадающими решениями n_r и n_n и два — с несовпадающими n_{α} и n_{β} . Пример заполнения матрицы и формулы расчета достоверности приведены в приложении 9.

ОЦЕНКА СВАРИВАЕМОСТИ И МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

9.1. ОЦЕНКА СВАРИВАЕМОСТИ МЕТАЛЛОВ

9.1.1. Понятие свариваемости

Под **свариваемостью** понимают способность однородных или разнородных металлов и сплавов образовывать работоспособные сварные соединения с применением различных способов сварки и сварочных материалов. Свариваемость оценивают степенью соответствия свойств сварного соединения одноименным свойствам основного металла и вероятностью образования в металле соединения пор, включений, трещин и прочих дефектов. Хорошо свариваемые металлы претерпевают воздействие термического цикла сварки без заметного ухудшения свойств сварного соединения и образования указанных выше дефектов. Трудно и ограниченно свариваемые металлы для этого требуют применения специально выбранных способов и режимов сварки, а также различных технологических мероприятий, таких как подогрев, немедленный отпуск после сварки и др. Существуют металлы, особенно разнородные их сочетания, которые не образуют работоспособных соединений никакими способами сварки даже с применением технологических мероприятий. Такие металлы относят к категории несвариваемых.

Количественной оценкой свариваемости служат числовые показатели некоторой совокупности свойств сварного соединения, взятые в сравнении с подобными свойствами основного металла. В эту совокупность включают свойства, которые обеспечивают сварным конструкциям определенного типа технологическую прочность при изготовлении выбранным способом и технологией сварки и эксплуатационную надежность в условиях заданных режима нагружения, окружающей среды и температуры. Для определения показателей свариваемости применяют испытания с помощью специальных проб и методов. При этом возможно получение показателей свариваемости для заданных условий или определение диапазона условий, при которых эти показатели имеют максимальные значения.

9.1.2. Показатели технологической прочности

Под *технологической прочностью* понимают способность металлов сохранять свою сплошность без разрушения в процессе технологической обработки с помощью сварки. Технологическую проч-

ность металлов при сварке можно оценивать показателями сопротивляемости и стойкости против образования трещин. Сопротивляемость образованию трещин определяют машинными испытаниями сварных образцов в условиях приложения внешних нагрузок. Она характеризует технологические свойства металла в различных зонах сварного соединения. Стойкость против образования трещин, определяемая с помощью технологических проб, — это комплексная характеристика, зависящая от технологических свойств металла и величины сварочных деформаций и напряжений в сварном образце пробы.

Показатели технологической прочности применяют для сравнительной оценки металлов. Вероятность образования трещин при сварке конструкций можно определить только после корреляции результатов испытаний на технологическую прочность и поведением металлов в производственных условиях и установления допустимых значений показателей.

Методы машинных испытаний. Испытания на образование горячих трещин по методу ЛТП-1 заключаются в деформировании растяжением образцов в процессе их сварки и затвердевания металла шва с помощью испытательной машины (рис. 9.1). Испытанию подвергается серия сварных образцов (рис. 9.2) при последовательном увеличении от образца к образцу скорости деформации. Минимальная скорость деформации, при которой образуются трещины в шве или околошовной зоне, служит количественным показателем сопротивляемости металлов их образованию. На образование горячих трещин испытывают все без исключения металлы и сплавы.

Испытание на образование холодных трещин по методу ЛТП-2 заключается в нагружении серии образцов непосредственно после сварки внешними различными по величине длительно действующими

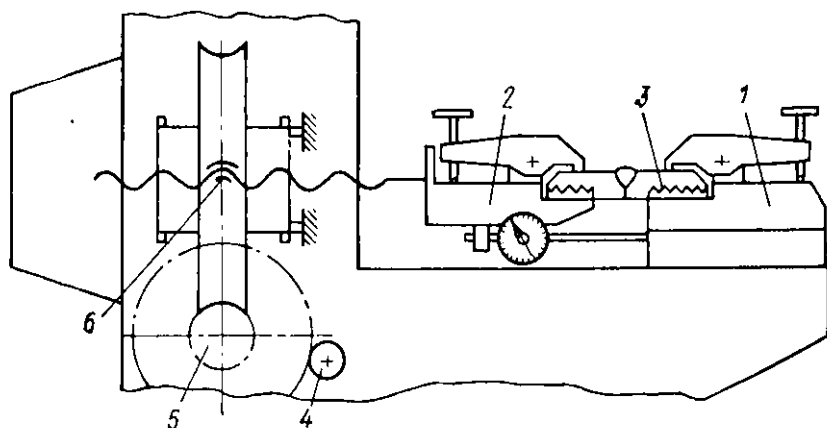


Рис. 9.1. Схема машины ЛТП-6 для испытаний на горячие трещины при сварке:

1, 2 — неподвижный и подвижный захваты; 3 — свариваемый образец; 4 — механический привод

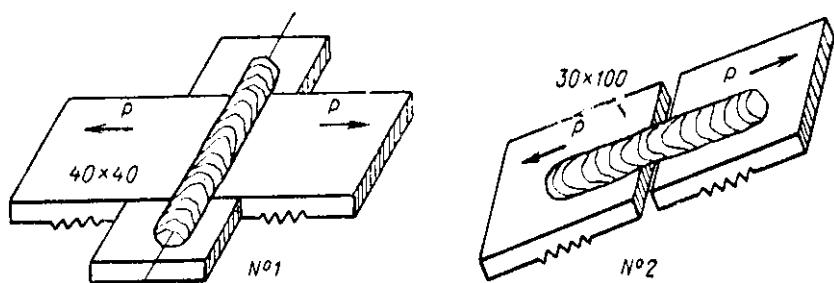


Рис. 9.2. Схема образцов для испытаний на горячие трещины:

1 — вдоль шва; 2 — поперек шва

постоянными нагрузками. Для испытания образцов (рис. 9.3) применяют испытательные машины и установки (рис. 9.4), в которых для создания постоянного усилия используют грузы, упругие элементы и другие устройства. Минимальное растягивающее напряжение от внешней нагрузки, при котором происходит образование трещин в околошовной зоне или сварном шве после испытания в течение установленного периода времени (для стали — 20 ч), служит количественным показателем сопротивляемости материала их образованию. На образование холодных трещин испытывают металлы, претерпевающие при сварке фазовые превращения в твердом состоянии. К таким материалам относятся перлитные, мартенситные, высокохромистые ферритные стали, ряд титановых, алюминиевых и некоторых других сплавов.

Технологические пробы. Пробы на образование горячих трещин представляют собой испытание путем сварки образцов, конструкция которых обеспечивает интенсивное развитие сварочных деформаций при температурах затвердевания шва.

Проба с набором образцов (проба ЛТП) согласно РС СЭВ 3641—72 предусматривает сварку образцов различной ширины (рис. 9.5), которая принимает значения 4, 6, 8, 12, 16 и 20δ — толщин испытываемого металла. Сварку начинают с образцов минимальной

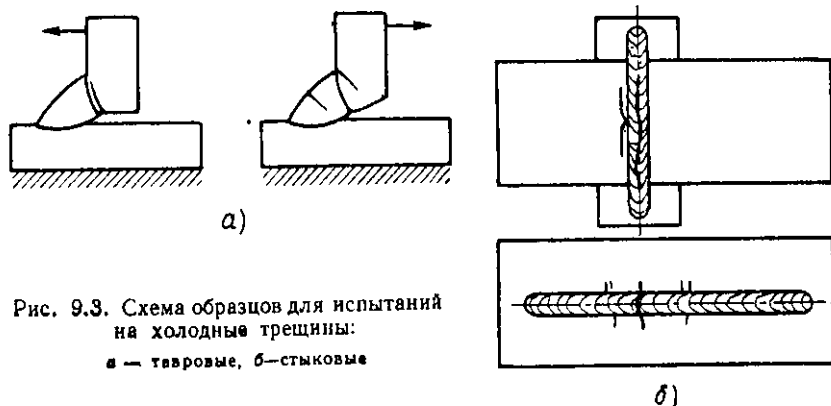
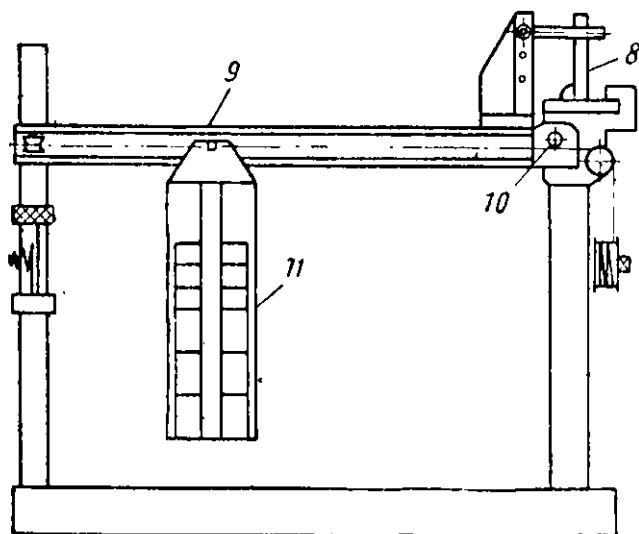


Рис. 9.3. Схема образцов для испытаний на холодные трещины:

а — тавровые, б — стыковые

ширины и продолжают на образцах возрастающей ширины до тех пор пока трещины в сварном шве перестанут образовываться. Необходимое условие работы пробы — полное проплавление перемычки в корне разделки. В этом случае половинки образца пробы вследствие неравномерного распределения температур при нагреве и сравнительно небольшой жесткости интенсивно деформируются, раскрывая кромки сварного шва и вызывая образование трещин.

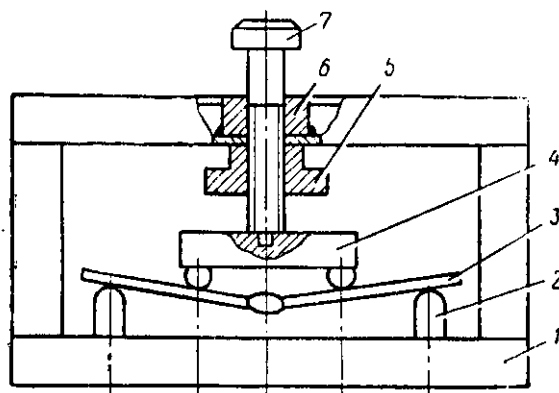
За количественный показатель стойкости против образования трещин принимают минимальную ширину образца, в котором уже не образуется трещин. Наличие трещин определяют визуально на поверхности шва и по его излому, где за горячую трещину прини-



а)

Рис. 9.4. Установки для испытаний на холодные трещины:

а — ЛТП2-3 для тавровых образцов; б — ЛТП2-6 для стыковых образцов; 1 — жесткая скоба; 2 — опоры; 3 — сварной образец; 4 — пуансон; 5 — фиксирующая прогиб образца гайка; 6 — направляющая втулка; 7 — шток; 8 — сварной образец; 9 — рычаг нагружения; 10 — ось; 11 — кассета с грузом



б)

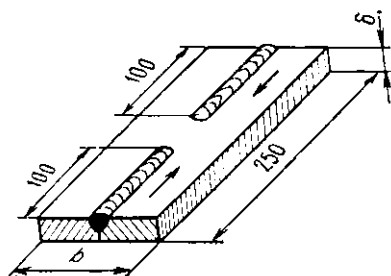


Рис. 9.5. Проба с набором образцов разной ширины b

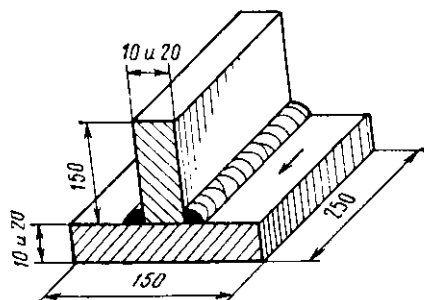


Рис. 9.6. Тавровая проба

мают окисленные участки, имеющие междендритный характер разрушения.

Тавровая проба согласно РС СЭВ 3641—72 проводится путем сварки таврового образца (рис. 9.6), стенку которого прикрепляют к полке только одной прихваткой в начале шва. Это позволяет стенке во время сварки легко поворачиваться (особенно при наложении первого шва), что вызывает деформацию и, как следствие этого, образование трещины в корне шва. После наложения двух швов по обе стороны стенки и их визуального осмотра полку с обратной стороны вдоль продольной оси между швами разрезают механическим способом. Разрезанные части полки отгибают для установления наличия трещин в изломе шва.

Испытание тавровой пробы дает качественную оценку металлов: при отсутствии трещин их считают стойкими против образования трещин, при наличии трещин — склонными к их образованию.

Пробы на образование холодных трещин предусматривают сварку образцов, конструкция которых обеспечивает высокий уровень остаточных сварных напряжений.

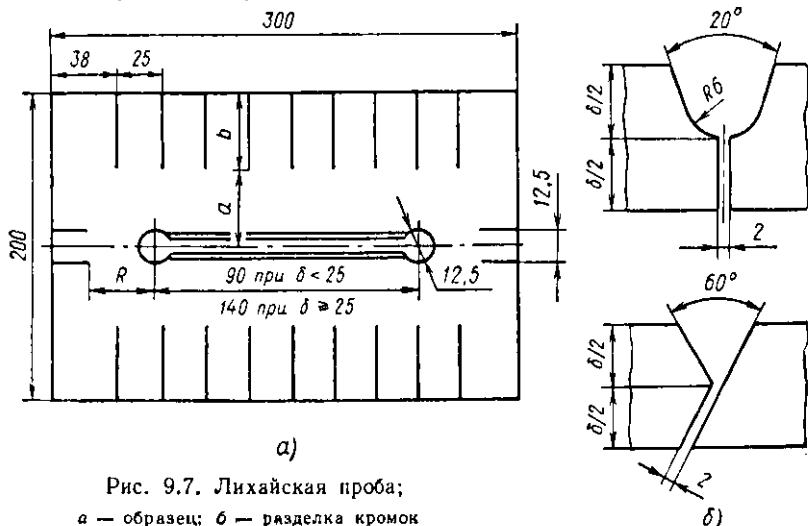


Рис. 9.7. Лихайская проба;
а — образец; б — разделка кромок

Лихайская проба состоит в сварке плоского образца, имеющего в центре разделку в виде щели (рис. 9.7). Необходимое условие испытания — сварка с непроваром корня шва. Высокий уровень напряжений обеспечивается жестким закреплением шва и концентратором напряжений в его корне. Трещины при испытании возникают в корне соединения либо в металле шва, либо в околошовной зоне в зависимости от формы разделки прямой или косой соответственно (рис. 9.7, б). Уровень напряжений регулируется за счет различной длины прорезей на краях пластины.

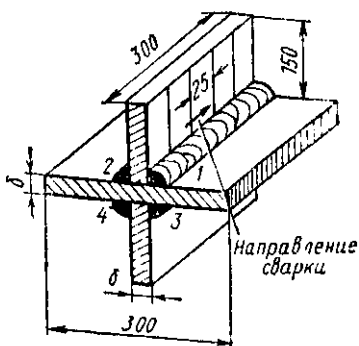


Рис. 9.8. Крестовая проба (1 — 4 — порядок сварки швов)

Косая разделка применена впервые в японской пробе «Тэккен».

За количественный показатель стойкости против образования трещин принимают глубину прорезей b , при которых еще не образуется трещина.

Крестовая проба согласно РС СЭВ 4102—73 заключается в сварке двойного таврового образца (рис. 9.8) четырьмя последовательными угловыми швами. Каждый следующий шов укладывают после полного охлаждения предыдущего. По мере сварки каждого шва возрастает жесткость их закрепления, ускоряется отток теплоты и повышается общее насыщение сварного соединения водородом. Наиболее вероятно образование трещин в третьем шве и его зоне термического влияния. Через четверо суток после сварки из центральной части образца вырезают три поперечных темплета шириной по 25 мм, из которых изготовляют металлографические шлифы. Шлифы исследуют при 10-кратном увеличении на наличие трещин.

При испытании крестовой пробы получают качественную оценку металлов, относя их к стойким или склонным к образованию трещин в зависимости от отсутствия или наличия трещин на шлифах. Иногда усложняют испытание, изменяя исходную температуру образца путем охлаждения углекислотой или подогревом. В этом случае за количественный показатель стойкости против трещин принимают начальную температуру образца, при которой уже трещины не образуются.

9.1.3. Валиковая проба

Валиковую пробу согласно ГОСТ 13585—68 применяют для оценки изменений механических свойств основного металла в околошовной зоне, вызванных термическим циклом дуговой сварки. Сущность пробы заключается в наплавке валиков на составные пластины исследуемой стали (рис. 9.9) при различной погонной энергии (q/v), обуславливающей различную скорость охлаждения, и последующем определении ударной вязкости, угла изгиба, твердости, микроструктуры и других показателей околошовной зоны (см. 9.2).

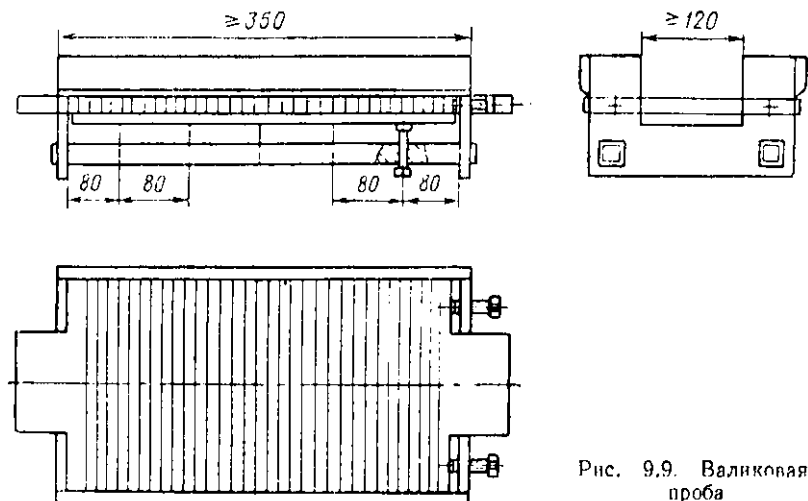


Рис. 9.9. Валиковая проба

После охлаждения образца снимают усиление шва до поверхности пластины методом, исключаящим ее нагрев. Из брусков, составляющих пластину, изготовляют образцы для механических испытаний и шлифов. По результатам испытаний в соответствии с требованиями к механическим свойствам и микроструктуре околошовной зоны сварных соединений из исследованной стали устанавливают интервал допустимых скоростей охлаждения, по которым расчетным путем с учетом типа соединения и толщины стали определяют режим сварки.

9.2. МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ

Механические испытания определяют прочность и надежность работы сварной конструкции. Основные методы определения механических свойств сварного соединения и его отдельных зон устанавливает ГОСТ 6996—66. Последний предусматривает статические и ударные испытания при нормальных, а в некоторых случаях при пониженных или повышенных температурах.

Для сварных соединений ответственных конструкций, изготовленных из высокопрочных материалов или предназначенных для работы в условиях отрицательных температур и вибрационных нагрузок, дополнительно проводят испытания на стойкость против хрупкого разрушения и усталостную прочность.

9.2.1. Статические испытания

К статическим можно отнести испытания: а) различных участков сварного соединения и наплавленного металла на растяжение; б) сварного соединения на растяжение; в) сварного соединения на изгиб.

Испытания на растяжение. Испытание проводят на образцах, вырезанных непосредственно из контролируемой конструкции или специально контрольных соединений, сваренных в соответствии с определенными техническими условиями.

Для испытаний участков сварного соединения и наплавленного металла применяют пятикратные круглые образцы диаметром рабочей части 3—10 мм, вырезанные вдоль оси сварного шва в соответствующей зоне соединения и из многослойной наплавки на пластину. При испытании определяют предел текучести ($\sigma_{0,2}$), временное сопротивление (σ_b), относительное удлинение (δ) и относительное сужение после разрыва (ψ).

Испытание сварного соединения, как правило, проводят на плоских или трубчатых образцах соответственно для стыковых соединений листов и труб. Толщина образцов равна толщине основного металла. Усиление шва снимают механическим способом до уровня основного металла. Испытания с использованием таких образцов служат для определения временного сопротивления наиболее слабого участка сварного соединения. Для определения временного сопротивления металла шва испытывают подобные образцы, на которых предусмотрено уменьшение сечения в центре шва.

Испытания на изгиб. Испытания проводят на плоских образцах, вырезанных из стыковых соединений. Толщина образца равна толщине основного металла. Усиление шва снимается механическим путем до уровня основного металла. Испытание проводят путем изгиба образца, помещенного на двух опорах, с помощью оправки. Диаметр оправки равен двум толщинам образца, а расстояние между опорами 2,5—3 диаметрам оправки. При испытании определяют угол изгиба (α) при образовании первой трещины в растянутой зоне образца. Угол изгиба характеризует пластичность сварного соединения в целом.

Испытание на стойкость против хрупкого разрушения. Хрупким называется разрушение, при котором пластические деформации перед наступлением разрушения относительно малы по сравнению с упругими. Оно связано с действием максимальных растягивающих напряжений и происходит по плоскостям, перпендикулярным направлению этих напряжений, путем отрыва. Стойкость металлов против хрупкого разрушения зависит от его сопротивления отрыву. Хрупкое разрушение характерно для условий работы, при которых тормозится процесс развития пластической деформации, так, например, при наличии острых концентраторов, отрицательных температурах и других условиях. Опасность хрупкого разрушения заключается в том, что оно возможно при сравнительно невысоких средних напряжениях и сопровождается лавинообразным распространением трещины через все сечение конструкции.

Стойкость против хрупкого разрушения согласно РС СЭВ 3642—72 оценивают по критерию вязкости разрушения k_{Ic} , определяемому путем испытаний статическим изгибом образца специально выбранных размеров с надрезом, в вершине которого имеется искусственно созданная усталостная трещина (рис. 9.10). Образец

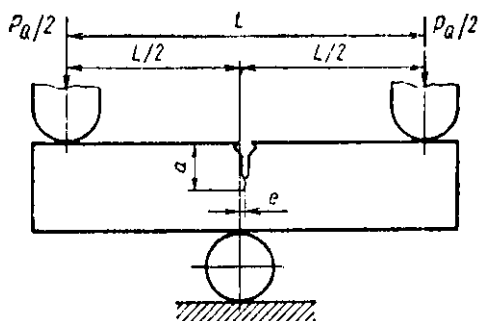


Рис. 9.10. Образец и схема испытания на вязкость разрушения

нагружают до момента, когда начинается нестабильное * развитие трещины и ее длину увеличивают на величину, составляющую около 2% суммарной длины надреза и исходной трещины. Показатель k_{10} ($\text{кгс} \cdot \text{мм}^{-3/2}$) рассчитывают по величине нагрузки (P_Q) и окончательной суммарной длине надреза и трещины (a). $k_{10} = f(P_Q, a^{1/2})$.

Показатель k_{10} представляет собой коэффициент интенсивности напряжений, со-

ответствующих началу развития хрупкой трещины. Эти напряжения зависят от длины трещины и не могут быть приняты за константу металла, характеризующую его стойкость против хрупкого разрушения. Показатель k_{10} , величина которого определяется с учетом длины трещины, представляет константу сопротивления металла отрыву и принят за критерий стойкости против хрупкого разрушения.

2.2. Динамические испытания

Ударный изгиб. Испытания проводят на квадратных или прямоугольных образцах с односторонним надрезом с радиусом закругления в вершине 1,00 или 0,25 мм. В зависимости от назначения испытания надрез располагается на оси сварного шва, зоне сплавления и зоне термического влияния. При испытании определяют ударную вязкость металла в заданной зоне соединения как отношение работы, затраченной на излом образца, к площади его поперечного сечения в месте надреза до испытания.

Усталостные испытания. Испытаниями на усталостную прочность определяют способность металла сопротивляться действию переменных нагрузок при изгибе, растяжении и кручении. Переменные нагрузки характеризуются амплитудой изменения напряжений и в зависимости от этого могут иметь симметричный, асимметричный и пульсирующий циклы. Испытания проводят на цилиндрических или плоских образцах специальной формы и размеров, вырезанных поперек сварного соединения, в условиях осевого нагружения. При испытаниях определяют предел выносливости, т. е. наибольшее напряжение, которое может вынести образец без разрушения при заданном числе циклов (базы) испытаний. Для сварных соединений база испытаний составляет $(2 \div 10) 10^6$ циклов. Подробно динамические испытания рассмотрены в курсе сварных конструкций.

* Предшествующее лавинному распространению трещины.

9.2.3. Металлография и химический анализ

Макроструктура. Макроструктуру изучают на шлифах и изломах сварного шва при увеличении до 20 раз. Темплеты для шлифов вырезают поперек или в плоскости сварного шва и изготавливают соответственно поперечные и послойные шлифы путем шлифования и травления темплетов реактивами, выбираемыми в соответствии с видом металла и назначением исследования. На макрошлифах выявляют границы шва и зоны термического влияния, слоистость основного металла, макроскопическое строение сварного шва (форму, размеры и направление кристаллитов, ликвационные зоны и усадочную рыхлость), а также дефекты в сварном шве (несплавления, непровары, неметаллические включения, газовые поры и трещины).

По виду излома определяют соотношение площадей, имеющих вязкий и кристаллический характер разрушения. Это соотношение используют как качественный показатель пластических свойств сварного шва. На изломе также выявляют дефекты сварного шва: раковины, поры, непровары, трещины и включения.

Для выявления ликваций серы в основном металле и сварном шве применяют метод отпечатка по Бауману. На макрошлиф накладывают засвеченную фотобумагу, предварительно выдержанную в 5%-ном растворе серной кислоты. Через 3—5 мин бумагу снимают и фиксируют. Желто-коричневые пятна соответствуют участкам сечения с повышенным содержанием серы.

Микроструктура. Микроструктуру исследуют на полированных и травленных реактивами шлифах при увеличении 50—2000 раз. На микрошлифах определяют микроструктуру шва и околошовной зоны (вид и соотношение структурных составляющих, наличие и распределение карбидов, нитридов, сульфидных и оксидных включений), размеры зерна, а также выявляют микроскопические трещины и поры.

Твердость. Макротвердость определяют на макрошлифах с помощью приборов для измерения макротвердости по Виккерсу, Роквеллу или Бринеллю. Измерения проводят на поперечных шлифах сварного соединения в двух взаимно перпендикулярных направлениях: по оси шва и вдоль линий, параллельных верхней и нижней поверхности листа. Результаты представляют в виде графика изменения твердости по сечению (рис. 9.11). Макротвердость служит для оценки степени закалки зон сварного соединения и неравномерности механических свойств по его сечению.

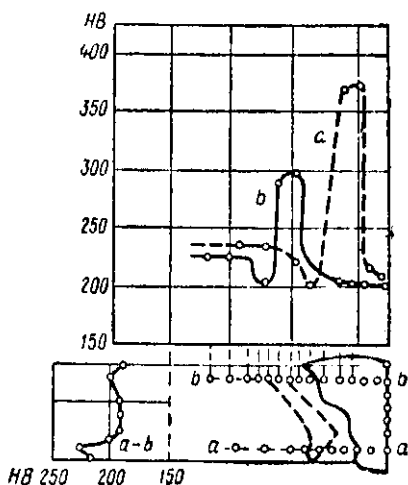


Рис. 9.11. Распределение твердости по сечению сварного соединения закаливающейся стали

Микротвердость определяют на микрошлифах с помощью прибора ПМТ. Измеряют твердость отдельных составляющих микроструктуры. Это служит дополнением к металлографическому анализу при установлении типа структурных составляющих.

Химический анализ. Химический анализ проводят для контроля состава основного металла, металла шва (в центре и зоне сплавления) и сварочных материалов (проволоки или наплавленного металла). Пробы отбирают в виде стружки по ГОСТ 7122—54. Химический анализ служит для отбраковки материалов по составу, а также установления причин появления дефектов в сварном соединении.

9.2.4. Коррозионные испытания

Испытания проводят для определения коррозионной стойкости сварного соединения или отдельных его зон при работе в различных средах (во влажном загрязненном воздухе, воде, кислотах, щелочах и их растворах и т. п.). Различают испытания на общую (равномерную и неравномерную) и местную коррозию. Общая коррозия характерна для углеродистых и низколегированных сталей, местная — для аустенитных и аустенитно-ферритных сталей. Испытания проводят путем выдержки образцов заданных размеров в определенной коррозионной среде в свободном состоянии или под напряжением. Испытания регламентированы ГОСТ 13819—68 и 6032—58.

Основные методы оценки стойкости против коррозии: 1) весовой по потере веса k_w [гс/м²·год] и уменьшению толщины k_d [мм/год] (общая равномерная коррозия); 2) профилографический по глубине поражения (общая сосредоточенная и местная коррозия); 3) механических испытаний на растяжение и изгиб по сравнению прочностных и пластических свойств до и после коррозионных испытаний (общая сосредоточенная и местная коррозия); 4) макро- и микроисследования через установленные интервалы времени по характеру растрескивания (местная межкристаллическая и ножевая под напряжением коррозия).

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СВАРКИ

10.1. ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНТРОЛЯ

10.1.1. Критерии оценки

Основная задача управления качеством продукции состоит в обеспечении необходимого уровня качества. Выше указано, что контроль качества сварки должен быть направлен, в первую очередь, на совершенствование технологии. Поэтому экономической оценке подлежат два фактора: 1) эффективность введения (или замены) тех или иных контрольных операций; 2) эффективность перехода на иной (более высокий) уровень качества продукции.

Общая методика экономических расчетов при замене и введении новых технологических или контрольных операций не отличается от обычных методик, изложенных в соответствующих учебниках по экономике и организации производства. Поэтому здесь мы подробно не останавливаемся на этих вопросах, а даем только примеры расчетов.

В то же время, при расчетах обоих факторов весьма важна правильная оценка ущерба от допущенного брака или слабого контроля качества продукции. Исходя из этого целесообразно рассматривать два критерия оценки ущерба.

Линейный и обобщенный ущерб от брака. Уровень качества сварной продукции по результатам контроля принято оценивать долей брака (B). Выход готовой продукции в этом случае может быть оценен так называемым линейным показателем годности или просто долей годности: $\Gamma = 1 - B$, причем $0 \leq \Gamma \leq 1$.

Показатель годности рационален лишь тогда, когда относительный ущерб Y_d от брака постоянен или пропорционален проценту брака, т. е. имеется линейная зависимость $Y_d = kB$ (рис. 10.1), где Y_d определяют, как отношение:

$$Y_d = \frac{\text{стоимость исправления брака}}{\text{стоимость сварки и контроля}} = \frac{C_B}{C_{CK}}.$$

Если незначительный брак ведет к выводу из строя дорогостоящего изделия, т. е. зависимость ущерба Y от брака B нелинейная, следует использовать обобщенный (интегральный) показатель годности Γ_o , причем $\Gamma_o = 1/Y_o$. Тогда обобщенный относительный ущерб Y_o может оцениваться как отношение

$$Y_o = \frac{\text{затраты на ликвидацию последствий брака}}{\text{стоимость сварки и контроля}} = \frac{C_{пБ}}{C_{CK}}.$$

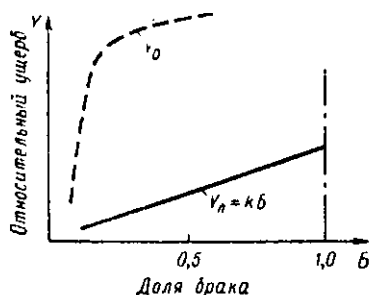


Рис. 10.1. Зависимость линейного $U_{\text{л}}$ и обобщенного $U_{\text{о}}$ показателей относительного ущерба от доли брака B

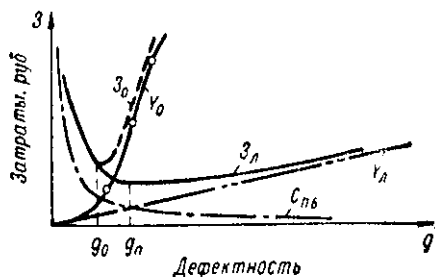


Рис. 10.2. Схема сравнения минимальных затрат Z на ликвидацию последствий брака при учете линейного $U_{\text{л}}$ и обобщенного $U_{\text{о}}$ ущерба

Данные по обобщенному ущербу $U_{\text{о}}$ должны собираться на основе статистики аварий или результатов обследований. Эти данные могут также заранее приближенно оцениваться проектантами.

Поскольку аварии — случайные события, то ущерб $U_{\text{о}}$ будет корреляционным показателем, справедливым только для данной конкретной группы сварных изделий. Величины $U_{\text{о}}$ и $G_{\text{о}}$ исключительно важны при обосновании более совершенной (но иногда более дорогостоящей) технологии сварки и контроля изделий или новой системы организации службы контроля качества.

Например, с учетом затрат на ликвидацию последствий брака $C_{\text{пб}}$ и $U_{\text{о}}$ нормы допустимых дефектов сварных соединений могут быть уменьшены от $g_{\text{д}}$ до $g_{\text{о}}$. Это видно из сравнения общих затрат Z на сварку, контроль и исправление последствий брака в случае расчета минимальных затрат по линейному $U_{\text{л}}$ и интегральному относительному $U_{\text{о}}$ ущербу (рис. 10.2).

Показатель обобщенного ущерба может служить критерием для обоснования категории ответственности сварных изделий (или соединений), а следовательно, и для экономического обоснования дополнительных затрат на совершенствование технологии, контроль и улучшение качества.

Примерные расчеты ликвидации последствий брака в ряде отраслей позволяют временно рекомендовать следующую шкалу категорий ответственности в зависимости от возможного относительного ущерба:

Относительный ущерб	До 10	До 10 ¹	До 10 ²	До 10 ³	Более 10 ⁴
Категория ответственности соединений . . .	1	2	3	4	5

Таким образом, если при десятках рублей технологических затрат на сварку возможны потери от исправления последствий

брака на 10—100 р., то это малоответственные соединения (1-й категории). Если же при десятках рублей технологических затрат возможны потери из-за брака и ликвидации его последствий в миллионы рублей, то такие соединения следует относить к категории высокоответственных.

Применение количественной шкалы для установления категории ответственности сварных изделий позволяет обосновать выбор контроля, но в то же время требует анализа экономичности контрольных операций и оценки стоимости качества.

10.1.2. Примеры экономических оценок

Суммарные затраты Z_{Σ} на контроль стыка или участка шва должны включать:

$$Z_{\Sigma} = Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5 + Z_6 + Z_7,$$

где $Z_{1,2}$ — стоимость амортизации (1) оборудования и его ремонта (2); $Z_{3,4}$ — стоимость материалов (3) и электроэнергии (4); Z_5 — стоимость транспортировки деталей; Z_6 — зарплату (основную, дополнительную и начисления); Z_7 — затраты на обеспечение безопасности окружающих.

Пример 10.1. Оценка экономичности перехода от разрушающего контроля (РК) к неразрушающему ультразвуковому контролю (УЗК).

Изделия — закладные детали с тавровыми соединениями «стержень—пластинка» (см. пример в главе VIII).

Исходные данные: объем выпуска по заводу 200 тыс. деталей в месяц, масса детали 1,5 кг.

Средний объем контроля: РК — 3% (6000), УЗК — 10% (20 000).

Производительность контроля в смену:

$$П = \frac{t_{см}}{t_m + t_v/0,8},$$

где $t_{см}$, t_m , t_v — сменное (492 мин), машинное и вспомогательное время; 0,8 — коэффициент загрузки оборудования (принят одинаковым для РК и УЗК).

Время на контроль: $t_m^{РК} = 4$ мин; $t_v^{РК} = 5,5$ мин, $t_m^{УЗК} = 3$ мин; $t_v^{УЗК} = 1$ мин.

Тогда $П_{РК} = 492/(4 + 7) = 44$ стыка; $П_{УЗК} = 492/(3 + 1) = 123$ стыка.

В месяц, за 21,4 смены, получаем: для РК 941 стыка; для УЗК 2632 стыка.

Стоимость оборудования: для РК — машина ГМС-5 8500 руб. Срок службы 10 лет. Для УЗК — дефектоскоп УДМ-3, 800 руб. Срок службы 5 лет.

Стоимость оборудования на один стык составляет: $Z_1^{РК} = 8500 \cdot 100/10 \cdot 941 \cdot 12 = 7,5$ коп.; $Z_1^{УЗК} = 800 \cdot 100/5 \cdot 2632 \cdot 12 = 0,5$ коп.

Стоимость ремонта за год: для РК 20 руб.; для УЗК 40 руб. или в пересчете на 1 стык: $Z_2^{РК} = 2$ коп.; $Z_2^{УЗК} = 1,5$ коп.

Стоимость материалов при разрушающем контроле.

Масса деталей, идущих в отход: 1,5 кг · 6000 = 9000 кг.

Стоимость этих деталей около 250 руб. за тонну, т. е.: 9000 · 0,25 = 2250 руб. в месяц или $Z_3 = 37$ коп. на 1 стык. $Z_3^{УЗК} = 0,2$ коп на 1 стык (вспомогательные материалы). Затраты Z_4 , Z_5 , Z_7 малы.

Основная зарплата (03) оператора-контролера 160 руб., что в расчете на 1 стык составляет: для РК — 16000/941 ≈ 17 коп.; для УЗК — 16000/2632 ≈ 6 коп. Дополнительная зарплата (ДЗ) составляет 15% основной и отчисления в соцстрах (СО) 8% от (ОЗ + ДЗ). Цеховые накладные расходы (НР) ≈ 120% основной зар-

Т а б л и ц а 10.1

Структура затрат на контроль сварных деталей

Метод контроля	Затраты на 1 стык, коп.									Затраты, руб.	
	Оборудование		Зарплата — Z_1					Z_2 , материалы	Итого Z_{Σ}	За месяц	За год
	Z_1	Z_2	OZ	$ДЗ$	HP	CO	Всего				
УЗК РК	0,5 7,5	1,5 2,0	6 17	1 2	7 20	0,6 1,6	14,6 40,6	0,2 37,0	16,8 77,6	3360 4650	40 400 56 400

платы. С учетом числа контролируемых в месяц стыков (для РК — 6000, для УЗК — 20 000) затраты указаны в табл. 10.1.

Таким образом, в данном примере экономия за 1 год по заводу средней мощности при переходе от 3%-ного разрушающего на 10%-ный ультразвуковой контроль составила около 16 000 руб.

Для проведения подобных оценок в каждой отрасли и на каждом предприятии необходимо иметь подробные расчеты стоимости контроля единицы продукции по всем видам испытаний. Примерные значения затрат для неразрушающего контроля стыковых сварных швов даны ниже.

Пример 10.2. Оценка затрат на контроль.

По результатам ряда исследований отраслевых НИИ рассчитаны ориентировочные затраты на контроль в заводских условиях стыковых швов стальных листовых конструкций толщиной 10—30 мм (табл. 10.2). Рентгенографию (Рг) проводили по участкам $\Delta L = 300$ мм, а при ультразвуковой и магнитографической (МГД) дефектоскопии (УЗд) участок $\Delta L = 1$ м.

Т а б л и ц а 10.2

Затраты на контроль швов разными методами

Метод контроля	Затраты на 1 контролируемый участок, коп.							Затраты на 1 м шва, руб.	Время контроля 1 м шва, мин
	$Z_1 + Z_2$	Z_3	Z_4	Z_5	Z_6	Z_7	Z_{Σ}		
Рг	26	7	0,10	8	40	15	96	3,3	65
УЗд	3	4	0,03	12	50	0	69	0,7	15
Шлифы	0,1	7	0,20	4	21	0	32	—	10 — на 1 шлиф
МГд	3	7	0,03	—	24	0	34	0,34	5

Пример 10.3. Оценка экономии от обоснования норм и уменьшения вырубки малозначительных дефектов.

Исходные данные: 1) объем сварки на заводе: $L_{св} = 50\,000$ м швов. Сварка дуговая; $\delta = 10 \div 12$ мм; 2) объем контроля $L_K = 20\% L_{св}$; $L_K = 10\,000$ м или 25 000 уч/год ($\Delta L = 400$ мм); 3) уровень брака $B_{\Sigma} = 13\%$, в том числе по малозначительным дефектам $B' = 8\%$; 4) существующие нормы $\Delta' = 1,0$ мм, $n' = 5$ шт. или дефектность на контролируемом участке, $g' = 0,4\%$ S_p ; 5) новые научно обоснованные нормы: $\Delta'' = 2$ мм, $n'' = 13$ шт. и $g'' = 1,6\%$.

Расчет экономии. Определим уменьшение уровня брака по порам и включениям ΔB . При существующих нормах вероятность p появления дефектов размером более Δ' в количестве более n' составляет $p' \approx 0,65$. При новых нормах $p \approx 0,23$ (см. гл. VIII). Тогда новый уровень брака $B'' = 8 \cdot 0,23/0,65 \approx 3\%$. Принимаем изменение доли брака $\Delta B = B' - B'' = 5\%$.

Следовательно, не будет исправляться $\Delta B = 1250 \text{ уч/год} = 500 \text{ м/год}$. Примем, что вырубает весь участок шва длиной $\Delta L = 400 \text{ мм}$, шириной 12 мм и глубиной $h = 10 \text{ мм}$. Масса вырубленного металла на 1 м составляет $100 \text{ см} \cdot 1,2 \text{ см} \cdot 7,8 \text{ г/см}^3 \approx 1 \text{ кг}$, а всего примерно $0,5 \text{ т/год}$. Вырубку производят газовой строжкой, а повторную заварку — вручную электродами УОНИ 13/45 диаметром 4 мм .

Экономия на прямых затратах составит 300 руб/год и складывается так: а) стоимость электроэнергии $0,05 \times 500 = 25 \text{ руб/год}$; б) зарплата вырубщиков $0,15 \times 500 = 75 \text{ руб/год}$; в) зарплата сварщиков $0,4 \times 500 = 200 \text{ руб/год}$.

При накладных расходах 100% стоимость исправления составит 600 руб/год . Экономия на стоимости электродов при значениях коэффициентов массы покрытия $\approx 0,35$, переходе металла в шов $\approx 0,9$, стоимости 1 т электродов $\approx 200 \text{ руб}$, составит: $0,5 \cdot 200/(1 - 0,35) \approx 200 \text{ руб/год}$. Экономия на повторном контроле при стоимости испытания одного участка $1,35 \text{ руб}$, составит: $1,35 \cdot 1250 = 1700 \text{ руб/год}$. Общая экономия: $\Sigma_z = 600 + 200 + 1700 = 2500 \text{ руб/год}$.

10.2. ОРГАНИЗАЦИЯ СЛУЖБЫ КОНТРОЛЯ

Общие положения. В гл. VIII указано, что проблема обеспечения высокого качества сварочной продукции может быть решена только при использовании системы управления качеством. Контроль качества понимается как часть этой системы.

Под оптимальным уровнем качества продукции следует понимать уровень, отвечающий требованиям потребителя при достижении максимальной народно-хозяйственной эффективности. Нормативный уровень должен по возможности приближаться к оптимальному уровню качества, обеспечивающему минимум затрат при рациональном запасе надежности конструкций.

Организацией контроля качества продукции называют систему технических и административных мероприятий, направленных на обеспечение нормативного уровня качества. Она должна: 1) обеспечивать повышение уровня качества и надежности сварочной продукции; в первую очередь путем активного воздействия контроля на технологию сварки и сборки; 2) содействовать развитию добросовестного отношения к работе и сопровождаться постоянно действующей и четкой системой поощрений за высокое качество работы; 3) обеспечить независимость органов технического контроля от производственного персонала; 4) обеспечивать безоговорочное соблюдение нормативной документации.

Контроль в заводских условиях. Структура службы контроля качества должна учитывать выполнение обеих функций контроля — предупредительной и приемочной. Поэтому, наряду с работниками службы ОТК (отдела технического контроля) и дефектоскопистами в работе по контролю качества должны принимать участие технологи-сварщики. В их задачу входит в первую очередь анализ и устранение причин появления дефектов.

Дефектоскописты могут быть подчинены структурно ЦЗЛ (центральной заводской лаборатории), ОТК или специальному отделу неразрушающего контроля (ОНК).

Информация о выявленном дефектоскопистами уровне качества сварочной продукции должна оперативно сообщаться технологам или отделу главного сварщика (ОГС). Однако сведения о качестве одновременно должны официально поступать администратору, ответственному за уровень качества продукции на заводе. Эти сведения должны обязательно включать статистику исправлений (дефектов), а не только окончательный уровень качества продукции. Наличие данных только по окончательному браку делает систему активного управления качеством неэффективной из-за малочисленности и непредставительности статистических сведений о дефектах и их причинах.

Контроль в монтажных условиях. Анализ показывает, что в монтажных условиях уровень брака в несколько раз выше, чем в заводских. Имеют место случаи, когда все, что сварено, вырубает и заваривают вновь. Особенно это характерно при освоении новых вариантов технологии.

Существующая система подчинения многочисленных передвижных испытательных лабораторий (ПИЛ) технологам-монтажникам недостаточно эффективна. Из-за вмешательства технологов контроль часто не является достоверным и объективным. Поэтому проведение анализа причин дефектов и совершенствование технологии затруднено. Для эффективного контроля необходимы обеспечение централизованного административного и методического руководства испытательными лабораториями, независимость от технологов при сохранении оперативности в работе и наличие специальной службы предупредительного контроля (СПК).

Документация по качеству сварки. Соблюдение стандартов и нормативных документов — важнейшее условие повышения качества продукции. Документация по контролю качества сварки должна обеспечивать соблюдение ГОСТов, четкую систему оценки качества,

Т а б л и ц а 10.3

Документация для управления качеством сварки

№ п/п	Наименование	Индекс	Назначение документа
1	Форма контроль-учет	КУ-1	Типовая заводская форма для условий производства с протяженными сварными швами (судостроение, резервуары и т. п.) при радиационном и ультразвуковом контроле
2. 3	Формы качества сварочных работ	КСР-1	Анализ качества по способам сварки
		КСР-2	Анализ качества по методам контроля
4	Формы учета брака	УБ-1	Учет брака сварных швов за месяц
5	Форма учета дефектов	УД-1	Учет дефектов сварных швов за месяц

отбраковки негодной продукции, а также возможность оперативного и активного вмешательства в технологию.

В табл. 10.3 дан перечень, а в приложениях 2—4 образцы основной унифицированной документации, которая может быть полезна при разработке системы управления качеством сварки. В зависимости от условий производства формы следует корректировать.

10.3. СИСТЕМА НАЗНАЧЕНИЯ УРОВНЕЙ КОНТРОЛЯ

Основные критерии. Установленные в нормативных документах категории качества соединений должны обуславливать уровень контроля, т. е. допустимую дефектность, требуемые объемы, методы и чувствительность контроля. Указания о назначении уровня контроля для каждого конкретного вида сварных соединений или изделий должны быть даны в правилах контроля или в ТУ на изделие.

Основные критерии, которые должны быть приняты во внимание при назначении или выборе уровней контроля, следующие:

1. Категория ответственности соединений или изделий (назначаемая, например, от 1 до 4), связанная с условиями их эксплуатации и учитывающая последствия возможных отказов.

2. Недопустимые виды (и размеры) критических трещиноподобных дефектов [трещин (T), протяженных непроваров (H) и т. п.], рассчитываемые на основе анализа прочности и надежности соединений.

3. Допустимый уровень малозначительных дефектов, назначаемый исходя из эксплуатационных, технологических, экономических и других условий.

4. Требуемая точность выборочных оценок — достоверность системы контроля, назначаемая с учетом рисков потребителя и поставщика отдельно для критических и отдельно — для малозначительных дефектов.

5. Требуемая достоверность метода контроля — уровень статистической выявляемости дефектов: а) критических; б) малозначительных.

Кроме указанных критериев при назначении уровней контроля должны быть учтены: стабильность технологического процесса; дефектоскопичность соединений и другие условия производства.

Пример шкалы уровней контроля. С учетом перечисленных выше критериев дан пример применения условной шкалы уровней контроля (табл. 10.4), соответствующей трем категориям качества. Каждой категории в примере соответствуют два уровня контроля — усиленный (без индекса) и обычный (а). На основе данных, подобных примеру табл. 10.4, в ПК или ТУ устанавливают:

— планы приемочного и предупредительного контроля, исходя из требуемой достоверности и на базе расчетных таблиц контроля (q_0 , q_m , N , C , n);

— необходимую чувствительность и метод контроля, исходя из требуемой выявляемости дефектов.

Таблица 10.4

Пример применения шкалы уровней контроля

Шкала уровней контроля	Критерии уровня контроля							
	Категория качества	Критические дефекты		Проходная ступень дефектности по десятибалльной шкале	Достоверность выборочных оценок дефектов		Статистическая выявляемость дефектов, %	
		Т	Н		критических	малозначительных	критических	малозначительных
					β -риск потребителя	суммарный риск $\alpha + \beta$	Вероятность недобракровки χ_n	Выявляемость V
1	1	Не допускаются		1	Менее 0,05	0,10	0,27	90
1а	1			2	0,05	0,20	1	80
2	2			3	0,10	0,30	2	70
2а	2	—	Норма	4	0,10	0,40	5	60
3	3	—	Норма	5	0,20	Не нормируется	10	50
3а	3	—	Норма	6	$\geq 0,20$		> 10	Не нормируется

Примечание. Обозначения и методика оценки отдельных критериев даны в гл. VIII.

Если технология не стабильная, то контроль следует ужесточить, переводя изделия на время отладки процесса сварки на один уровень вверх по шкале. Если изделие или соединение не дефектоскопично, то требуемую достоверность оценки качества обеспечивают на основе контроля точности технологического процесса и статистического регулирования режима сварки, а также на образцах-свидетелях по выборочному разрушающему контролю.

ТАБЛИЦА ЗНАЧЕНИЙ ФУНКЦИИ $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{z^2}{2}} dz$; $\Phi^*(x) = \Phi(x) + 0.5$

x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$
0,00	0,0000	0,40	0,1554	0,80	0,2881	1,20	0,3849	1,60	0,4452
0,01	0,0040	0,41	0,1591	0,81	0,2910	1,21	0,3869	1,61	0,4463
0,02	0,0080	0,42	0,1628	0,82	0,2939	1,22	0,3883	1,62	0,4474
0,03	0,0120	0,43	0,1644	0,83	0,2967	1,23	0,3907	1,63	0,4484
0,04	0,0160	0,44	0,1700	0,84	0,2995	1,24	0,3925	1,64	0,4495
0,05	0,0199	0,45	0,1736	0,85	0,3023	1,25	0,3944	1,65	0,4505
0,06	0,0239	0,46	0,1772	0,86	0,3051	1,26	0,3962	1,66	0,4515
0,07	0,0279	0,47	0,1808	0,87	0,3078	1,27	0,3980	1,67	0,4525
0,08	0,0319	0,48	0,1844	0,88	0,3106	1,28	0,3997	1,68	0,4535
0,09	0,0359	0,49	0,1879	0,89	0,3133	1,29	0,4015	1,69	0,4545
0,10	0,0398	0,50	0,1915	0,90	0,3159	1,30	0,4032	1,70	0,4554
0,11	0,0438	0,51	0,1950	0,91	0,3186	1,31	0,4049	1,71	0,4564
0,12	0,0478	0,52	0,1985	0,92	0,3212	1,32	0,4066	1,72	0,4573
0,13	0,0517	0,53	0,2019	0,93	0,3238	1,33	0,4082	1,73	0,4582
0,14	0,0557	0,54	0,2054	0,94	0,3264	1,34	0,4099	1,74	0,4591
0,15	0,0596	0,55	0,2088	0,95	0,3289	1,35	0,4115	1,75	0,4599
0,16	0,0636	0,56	0,2123	0,96	0,3315	1,36	0,4131	1,76	0,4608
0,17	0,0675	0,57	0,2157	0,97	0,3340	1,37	0,4147	1,77	0,4616
0,18	0,0714	0,58	0,2190	0,98	0,3365	1,38	0,4162	1,78	0,4625
0,19	0,0753	0,59	0,2224	0,99	0,3389	1,39	0,4177	1,79	0,4633
0,20	0,0793	0,60	0,2257	1,00	0,3413	1,40	0,4192	1,80	0,4641
0,21	0,0832	0,61	0,2291	1,01	0,3438	1,41	0,4207	1,81	0,4649
0,22	0,0871	0,62	0,2324	1,02	0,3461	1,42	0,4222	1,82	0,4656
0,23	0,0910	0,63	0,2357	1,03	0,3485	1,43	0,4236	1,83	0,4664
0,24	0,0948	0,64	0,2389	1,04	0,3508	1,44	0,4251	1,84	0,4671
0,25	0,0987	0,65	0,2422	1,05	0,3531	1,45	0,4265	1,85	0,4678
0,26	0,1026	0,66	0,2454	1,06	0,3554	1,46	0,4279	1,86	0,4686
0,27	0,1064	0,67	0,2486	1,07	0,3577	1,47	0,4292	1,87	0,4693
0,28	0,1103	0,68	0,2517	1,08	0,3599	1,48	0,4306	1,88	0,4699
0,29	0,1141	0,69	0,2549	1,09	0,3621	1,49	0,4319	1,89	0,4706
0,30	0,1179	0,70	0,2580	1,10	0,3643	1,50	0,4332	1,90	0,4713
0,31	0,1217	0,71	0,2611	1,11	0,3665	1,51	0,4345	1,91	0,4719
0,32	0,1255	0,72	0,2642	1,12	0,3686	1,52	0,4357	1,92	0,4726
0,33	0,1293	0,73	0,2673	1,13	0,3708	1,53	0,4370	1,93	0,4732
0,34	0,1331	0,74	0,2703	1,14	0,3729	1,54	0,4382	1,94	0,4738
0,35	0,1368	0,75	0,2734	1,15	0,3749	1,55	0,4394	1,95	0,4744
0,36	0,1406	0,76	0,2764	1,16	0,3770	1,56	0,4406	1,96	0,4750
0,37	0,1443	0,77	0,2794	1,17	0,3790	1,57	0,4418	1,97	0,4756
0,38	0,1480	0,78	0,2823	1,18	0,3810	1,58	0,4429	1,98	0,4761
0,39	0,1517	0,79	0,2852	1,19	0,3830	1,59	0,4441	1,99	0,4767

x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$
2,00	0,4772	2,24	0,4875	2,48	0,4934	2,72	0,4967	2,96	0,4985
2,02	0,4783	2,26	0,4881	2,50	0,4938	2,74	0,4969	2,98	0,4986
2,04	0,4793	2,28	0,4887	2,52	0,4941	2,76	0,4971	3,00	0,49865
2,06	0,4803	2,30	0,4893	2,54	0,4945	2,78	0,4973	3,20	0,49931
2,08	0,4812	2,32	0,4898	2,56	0,4948	2,80	0,4974	3,40	0,49966
2,10	0,4821	2,34	0,4904	2,58	0,4951	2,82	0,4976	3,60	0,499841
2,12	0,4830	2,36	0,4909	2,60	0,4953	2,84	0,4977	3,80	0,499928
2,14	0,4838	2,38	0,4913	2,62	0,4956	2,86	0,4979	4,00	0,499968
2,16	0,4846	2,40	0,4918	2,64	0,4959	2,88	0,4980	4,50	0,499997
2,18	0,4854	2,42	0,4922	2,66	0,4961	2,90	0,4981	5,00	0,499997
2,20	0,4861	2,44	0,4927	2,68	0,4963	2,92	0,4982		
2,22	0,4868	2,46	0,4931	2,70	0,4965	2,94	0,4984		

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ПРИМЕР ЗАПОЛНЕНИЯ ФОРМЫ УЧЕТА КАЧЕСТВА СВАРКИ
(ПРЕДПРИЯТИЕ — МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЙ ЗАВОД)

Заказ № 148 Дата сварки 20.1.74— 24.1.74 Дата контроля 28.1.74	1. Соединение — стыковое 2. Способ сварки — автоматическая под флюсом 3. Материал — сталь 09Г2 4. Толщина — 20 мм 5. Электроды — 6. Проволока — Св-08Г2 7. Флюс — ОСЦ-45	8. Условия сварки — цеховые 9. Категория соединений — I 10. Узел (секция) — бортовая № 3-I 11. Способ контроля — гамма-графирование 12. Объем контроля — 20% 13. Число участков контроля — 40 14. Сварщик — Иванов Б. С.	Форма КУ-1 Примечания: 1. Аппарат — РИД-21					
Результаты контроля участков сварных швов								
№ контрольного участка	Чувствительность, %	Дефекты сварки					Балл качества (по трехбалльной системе)	Примечания
		Вид	Группа	Число	Размер, мм	Протяженность, мм		
1	1,0	П	А	4	1,0	—	3	—
1	1,0	П	А	2	1,5	—	2	—
2	1,2	Ш	А	2	3,0	—	2	—
3	1,0	Н	—	1	—	80	1	Брак
3	1,0	П	А	2	1,0	—	3	—
4	1,2	П	Б	2	1,0	20	2	—
5	1,2	П	А	5	2,0	—	2	—

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

ПРИМЕРЫ ЗАПОЛНЕНИЯ ФОРМ УЧЕТА КАЧЕСТВА СВАРОЧНЫХ РАБОТ

Предприятие — машиностроительный завод Вид конструкции — листовая Соединение стыковое								
Качество сварочных работ. Анализ качества по способам сварки или видам соединений							Форма КСР-1	
№ п/п.	Показатели		Всего	Соединения				Примечания
				1	2	3	4	
1	Сварено элементов N , тыс. шт.		38,19	5,44	5,20	4,25	23,6	—
2	Проконтролировано элементов n , тыс. шт.		8,51	5,44	1,04	0,85	1,18	—
3	Доля контроля n/N , %		22,10	100	20	20	5	—
4	Дефектных элементов m_d , шт.	Всего	724	190	103	195	236	—
		О недопустимыми дефектами	324	117	55	46	106	—
		С допустимыми дефектами	400	73	48	149	130	—
5	Исправлено элементов m_n , шт.		324	117	55	46	106	—
6	Доля дефектных элементов $D = m_d/n$, %		8,5	3,5	9,9	23,0	20	—
7	Доля исправленных элементов $B = m_n/n$, %		4,05	2,16	5,3	5,4	9	—
Сварка — автоматическая под флюсом.								

Участок — сборочно-сварочный цех № 7
 Элемент — участок длиной $\Delta L = 300$ мм
 Материал — низколегированные стали

Качество сварочных работ. Анализ качества
 по методам контроля

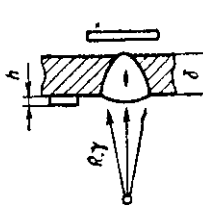
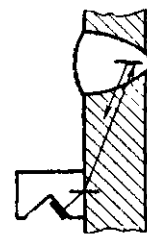
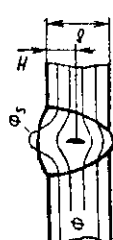
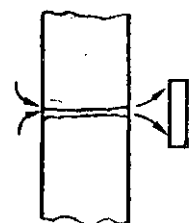
Форма КСР-2

№ п/п	Число элементов		Всего	Метод контроля			Примечание
				Радиография	Ультразвуковой	С разрушением	
1	Проконтролировано n , тыс. шт.		0,85	0,34	0,51	—	—
2	Дефектных m_d , шт.	Всего	195	72	123	—	—
		С недопустимыми дефектами	46	17	29	—	—
		С допустимыми дефектами	149	55	94	—	—
3	Доля контроля $\eta = n/N$, %		20	8	12	—	—
4	Исправлено элементов m_n , шт.		46	17	29	—	—
5	Доля дефектных элементов $D = m_d/n$, %		23,0	21,2	24,2	—	—
6	Доля исправленных элементов $B = m_n/n$, %		5,4	5,1	5,7	—	—

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕКОТОРЫХ ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Класс прибора	Тип прибора	Излучение	Диапазон измерений	Детекторы	Погрешность измерения, %	Диапазон рабочих температур, °С	Основные характеристики
Дозиметры для измерения дозы	ИФКУ	рентгеновское, α -, β -, γ -излучения, нейтроны	0,05—2 бэр 0,0005—0,02 Дж/кг	Фотоленка	± 20	± 35	Индивидуальный, вес 30 гс
	КИЛ-2	рентгеновское, β - и γ -излучения	0,02—2 Р 5,2 · 10 ⁻⁶ — 5,2 · 10 ⁻⁴ Кл/кг	Ионизационная камера	± 15	5—35	Индивидуальный, вес датчика 50 гс, всего комплекта 8 кгс
Дозиметры для измерения мощности дозы	Кура-1	рентгеновское и γ -излучение	0—7,17 · 10 ⁻³ А/кг 0—1000 мР/ч	Сцинтилляционный счетчик	± 20	—10 ÷ 40	Носимый, вес 2,5 кгс, питание — сетевое, батарейное
	УСИТ-2	рентгеновское и γ -излучение	0,01—10 ³ мкР/с 2,58 · 10 ⁻¹² — 2,58 · 10 ⁻⁷ А/кг	Газовые счетчики	± 20	—20 ÷ 40	Стационарный, вес 6 кгс, питание — сетевое, двухканальный с сигнализацией о превышении порогового значения
Радиометры для измерения радиоактивных загрязнений и интенсивности излучения	РУП-4	α -излучения β -излучения γ -излучения нейтроны	0,01—300 см ⁻² ·с ⁻¹ 0,1—1000 см ⁻² ·с ⁻¹ 10 ² —10 ⁶ см ⁻² ·с ⁻¹ 0,2—10 ⁴ см ⁻² ·с ⁻¹	Газовые и сцинтилляционный счетчики	± 20	—20 ÷ 40	Носимый, вес 4 кгс, питание — сетевое, батарейное
	ПП-15	α -, β -, γ -излучения	До 10 ⁶ с ⁻¹	Сцинтилляционный счетчик	± 15	0—40	Носимый, вес 12 кгс, питание — сетевое. Измеряет только интенсивность

ПРИЛОЖЕНИЕ 6 ХАРАКТЕРИСТИКА И ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОСНОВНЫХ ВИДОВ ДЕФЕКТОСКОПИИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Контроль передачей энергии		Контроль движением вещества	
Радиационная дефектоскопия, Рд	Ультразвуковая дефектоскопия, Узд	Магнитная дефектоскопия, Мд	Капиллярная дефектоскопия, Кд
			
Основные методы дефектоскопии			
Эхо-метод поперечными волнами Реже применяют теневой метод, а также методы контроля продольными (Рзед) и нормальными (Нмбд) волнами		Люминесцентная Лд Цветная Цд Люминесцентно-цветная ЛЦд	
Магнитографическая МГд Магнитопорошковая МПд		Контроль газами Пневматический Пд Вакуумный Вд Химический Хмд Галогенный Ггд Масс-спектрометрический Мсд Контроль жидкостями Гидравлический Ггд Керосином Крд Пенетрантами Пгд Люмо-гидравлический Лгд	
Характеристика методов и контролируемые толщины			
Выявляют несплошности до глубины, мм МГд МПд 16—25 3—5		Любые толщины	
Частоты $f = 1-5 \text{ МГц}$ Длины $\lambda/3$ -волн для $f = 2 \text{ МГц}$ при скоростях волн в стали: поперечных $C_t \approx 3 \text{ мм/мкс}$ продольных $C_l \approx 6 \text{ мм/мкс}$ составляют $\lambda_t = \frac{C_t}{f} \approx 1,5 \text{ мм}; \lambda_l = \frac{C_l}{f} \approx 3 \text{ мм}$ Толщины 4—2000 мм			
Длины волн $\lambda = 1-10^{-1} \text{ Å}$ Энергия $E, \text{ МэВ}$ 0,01—0,4 трубки — ускорители — изотопы с м-шенейю γ-лучами нейтронами Толщины 1—1000 мм			

Рд	Узд	Мд	Кд	Тчд
Объемные внутренние и поверхностные несплошности в любых материалах, в стыковых швах	Основные особенности Внутренние и поверхностные несплошности в любых материалах кроме крупных зернистых в стыковых и нахлесточных швах	Поверхностные и подповерхностные несплошности в ферромагнитных материалах и стыковых швах	Поверхностные несплошности в любых материалах и соединениях	Сквозные несплошности в любых материалах и соединениях
Несплошности малого раскрытия (трещины), расположенные под углом более 7° к лучу, выявляются плохо. Для угловых швов метод мало эффективен	Чугун и аустенитные стали не контролируют. Однородные сплавы выявляются плохо Объемные несплошности-включения хуже, чем плоские трещиноподобные несплошности	Усиление шва существенно снижает чувствительность контроля	Других ограничений нет	
Абсолютные значения W abs измеряют как наименьшие выявляемые размеры канавки x_k или проволоки x_p эталонно-дефектомеров (по ГОСТ 7512—69) Относительные значения W отн определяют по формулам $\frac{x_k}{0.1h} \% \quad \frac{x_p}{b} \%$	W измеряют как площадь плоскостного отражателя $W = S = (0.2 \div 0.4) \lambda$ Условную чувствительность измеряют как глубину расположения бокового сверления (по эталону № 1 ГОСТ 14782—69)	$W = W_{MГД}$ измеряют как наименьшие выявленные размеры канавок эталонно-дефектомеров $W = x/H \%$ МГД измеряют раскрытие трещин Δr и диаметр включения d .	W измеряют как наименьшее выявленное раскрытие Δr поверхностных несплошностей и их глубину Δh	W измеряют как скорость затекания через сквозные несплошности
Определение чувствительности (W) методов				
Примерные значения чувствительности				
Методы	W отн %	МГД W отн = 5—10% МГД $\Delta r \geq 0.005$ мм $d \geq 2$ мм	Методы	Метод
Рг Рс Рм	0.5—5 3—8 5—10	Лд Цд ЛГд	Δr мм Δh мм	Пд, Гид Крд, Хмд ЛГд Мсд
Х-лучами γ-лучами Нейтронами	0.5—3 2—5 2—5			10 ⁻¹ 10 ⁻¹ 10 ⁻¹ 10 ⁻¹ 10 ⁻¹

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

ПЕРЕХОДНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ k ДЛЯ УСИЛИВАЮЩИХ ЭКРАНОВ
И РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ РАДИОГРАФИЧЕСКИХ ПЛЕНОК ПРИ $D = 1,5$,
 $E_{эф} = 50$ кэВ ($V = 80$ кВ)

Экран	Коэффициенты k для пленок				
	РТ-1	РТ-3	РТ-4М	РТ-5	РТ-2
Без экрана	1,0	1,8	5,0	15,0	2,0
Металлический из Pb	0,5	0,9	2,5	7,5	1,0
Флуоресцентный с BaSO ₄ тип СБ	0,45	0,35	0,85	4,0	0,08
Флуоресцентный с CaWO ₄ , тип УФД	0,25	0,15	0,5	2,2	0,04
Примечание. Коэффициент k равен отношению времени просвечивания для других комбинаций пленок и экранов ко времени просвечивания t , принятому за единицу для пленки РТ-1 без экранов					

ПРИЛОЖЕНИЕ 8

РАСЧЕТ РЕЖИМОВ ПРОСВЕЧИВАНИЯ ПРИ РАДИОГРАФИЧЕСКОМ КОНТРОЛЕ

Исходные данные. Сварной шов длиной $l = 2,8$ м, толщиной $\delta = 35$ мм. Материал стали.

Минимально допустимая плотность почернения снимка $D \geq 1,5$.

Требуемая относительная чувствительность $W_{отн} = 2\%$.

Эталонные чувствительности — канавочные.

1. По табл. 3.14 и 3.9 выбираем источник излучения Cs 137 с МЭД γ -излучения $P = 5 \cdot 10^{-4}$ Р/с на расстоянии 1 м и диаметром активной части $d = 5$ мм.

Энергия излучения $E \approx 0,661$ МэВ, линейный коэффициент ослабления $\mu = 0,573$ см⁻¹ (табл. 3.2).

По рис. 3.35 для стали толщиной $\delta = 35$ мм и энергии $E = 0,661$ МэВ выбираем радиографическую пленку типа РТ-5.

2. Полагая $u_r = u_b$ определяем допустимое расстояние F в центре снимка (рис. 3.31). Согласно примеру 3.7 $F = 600$ мм.

3. Определяем общую нерезкость изображения в центре снимка по уравнению (стр. 84, 88): $u = 1,25$ $u_b = 0,375$ мм.

4. Для $\mu\delta = 0,573 \cdot 35 \approx 2$ по рис. 3.38 выбираем угол φ , определяющий размер просвечиваемого участка: $\varphi = 32^\circ$.

Толщина просвечивания, размер активной части и допустимое расстояние по краю снимка равны: $\delta_\varphi = \delta / \cos \varphi \approx 41$ мм; $d_\varphi = d / \cos \varphi \approx 6$ мм; $F_\varphi = F / \cos \varphi \approx 710$ мм.

5. Определяем общую нерезкость изображения по краю снимка, используя формулу для u_r на стр. 83:

$$u = \sqrt{u_{r\phi}^2 + u_a^2} = 0,385 \text{ мм.}$$

6. Определяем разность плотностей почернения между центром и краем снимка ΔD согласно формуле на стр. 86.

Для пленки РТ-5, $\gamma = 4$ (табл. 3.11).

Из табл. 3.3 методом интерполирования определим

$$B = 2,93 \text{ для } \mu\delta = 2 \text{ и } B\phi = 3,43 \text{ для } \mu\delta\phi = 2,35;$$

$$\Delta D = 0,87 \cdot 4 \left[2 \frac{710 - 600}{710 + 600} + 0,5 \cdot 2 \left(\frac{41}{36} - 1 \right) - \frac{3,43 - 2,93}{3,43 + 2,93} \right] \approx 0,9.$$

7. Определяем плотность почернения снимка по его центру

$$D = D_\phi + \Delta D = 1,5 + 0,9 = 2,4.$$

8. Определяем контрастность снимка для его центра и края по уравнению для γ_D на стр. 86.

Принимая по табл. 3.11 для пленки РТ-5 $f = 5,2$; $D_{\max} = 10,2$, получим:
по центру снимка

$$\gamma_D = 0,87 \cdot 5,2 \cdot 2,4 \frac{10,2 - 2,4}{2 \cdot 10,2 - 2,4} = 4,7;$$

по краю снимка

$$\gamma_{D\phi} = 0,87 \cdot 5,2 \cdot 1,5 \frac{10,2 - 1,5}{2 \cdot 10,2 - 1,5} = 3,1.$$

9. Определяем чувствительность для центра и края снимка по уравнению на стр. 81.

Для канавочных эталонов чувствительность при предельном значении $W_{\text{отн}} \leq \leq 2\%$ принимаем $\Delta b \approx \delta W_{\text{отн}}/100 = 35 \cdot 2/100 = 0,7$ мм. Принимая $\Delta D_{\min} = 0,01$, получаем $W_{\text{отн}} = 1,2\%$, $W_{\text{отн}\phi} = 1,8\%$:
для центра снимка

$$W_{\text{отн}} = \frac{2,3 \cdot 0,01 \cdot 2,93}{4,7 \cdot 2} \left(1 + \frac{0,385}{0,7} \right) 100\% \approx 1,2\%;$$

для края снимка

$$W_{\text{отн}\phi} = \frac{2,3 \cdot 0,1 \cdot 3,43}{3,1 \cdot 2,35} \left(1 + \frac{0,385}{0,7} \right) 100\% \approx 1,8\%.$$

10. Определяем число участков, на которое разбивается сварной шов при просвечивании согласно формуле на стр. 90:

$$N = \frac{2800}{2(600 - 35) \operatorname{tg} 32^\circ} = 4.$$

Рассмотрим пример заполнения матрицы достоверности (табл. П-9.1) по упрощенной форме записи для пробного метода ультразвуковой дефектоскопии УЗд и эталонного вскрытия.

Из табл. П-9.1 видны абсолютные значения числа совпадений n_r , n_n и несовпадений n_a , пр-ошибок контроля. Эти ошибки по смыслу соответствуют принятым

Таблица П-9.1

$n_{\Sigma} = 200$ стыков		Вскрытие	
		+	-
УЗд	+	$n_r = 150$	$n_{\beta} = 5$
	-	$n_a = 15$	$n_n = 30$

в математической статистике терминам: перебраковка — ошибка I рода или риск поставщика α ; недобраковка — ошибка II рода или риск потребителя β . Здесь следует выделить два варианта расчета показателей статистической выявляемости: V_{Σ} — по отношению к сумме всех выявленных дефектов (или дефектных элементов) и V_n по отношению к числу недопустимых дефектов (см. табл. П-9.2).

Кроме того, можно выделить показатели погрешностей выявляемости ΔV_{Σ} и ΔV_n , определяемые по формуле $\Delta V = 1 - V$.

Из табл. П-9.2 видно, что как по структуре, так и по результатам расчета показатели статистической выявляемости суммы дефектов V_{Σ} и недопустимых дефектов V_n существенно различны.

Оба показателя могут быть использованы для оценки эффективности применяемого метода контроля. Причем показатель V_{Σ} более ценен для осуществления предупредительной функции контроля, а V_n — для приемочной.

Показатели выявляемости V_{Σ} , V_n не связаны с результатами контроля конкретной партии изделий, а характеризуют только метод обнаружения дефектов. Для перехода к достоверности D контроля конкретной партии N изделий следует учитывать засоренность q этой партии дефектными изделиями — M .

Если доля дефектных изделий в партии $q = M/N$, а доля годных $p = 1 - q$, то можно определить относительную погрешность ΔD контроля партии по формуле $\Delta D = \Delta V q$. Имея в виду, что достоверность $D = 1 - \Delta D$, получаем $D = p + V q$.

Используя эти формулы, можно определить значения D и ΔD , исходя из выявляемостей дефектов V_{Σ} , V_n и соответствующих им засоренностям партии дефектами q_{Σ} и q_n .

Формулы и примеры расчета достоверности приведены в табл. П-9.2.

Таблица П-9.2

Формулы и пример расчета статистической выявляемости дефектов
и достоверности контроля партий изделий по альтернативному признаку

Общие формулы для достоверности контроля партии	Формулы для разных показателей выявляемости	
	по отношению к сумме всех дефектов	по отношению к числу недопустимых дефектов
$D = p + Vq$	$V_{\Sigma} = \frac{n_{\Gamma} + n_{\Pi}}{n_{\Sigma}} = 0,90$ $q_{\Sigma} = \frac{M_{\Sigma}}{N} = 0,20$ $p_{\Sigma} = 1 - q_{\Sigma} = 0,80$ $D = p_{\Sigma} + V_{\Sigma}q_{\Sigma} =$ $= 0,8 + 0,9 \cdot 0,2 = 0,98$	$V_{\Pi} = \frac{n_{\Pi}}{n_{\Pi} + n_{\alpha} + n_{\beta}} = 0,60$ $q_{\Pi} = \frac{M_{\Pi}}{N} = 0,05$ $p_{\Pi} = 1 - q_{\Pi} = 0,95$ $D = p_{\Pi} + V_{\Pi}q_{\Pi} =$ $= 0,95 + 0,6 \cdot 0,05 = 0,98$
$\Delta D = 1 - D =$ $= \Delta Vq$	$\Delta V_{\Sigma} = \frac{n_{\alpha} + n_{\beta}}{n_{\Sigma}} = 0,10$ $\Delta D = \Delta V_{\Sigma}q_{\Sigma} = 0,02$	$\Delta V_{\Pi} = \frac{n_{\alpha} + n_{\beta}}{n_{\Pi} + n_{\alpha} + n_{\beta}} = 0,40$ $\Delta D = \Delta V_{\Pi}q_{\Pi} = 0,02$
Примечание. При заданном q_{Σ} и рассчитанных из матрицы выявляемости ΔV_{Σ} и $\Delta V_{\Pi} - q_{\Pi}$ определяем из соотношения $\Delta V_{\Sigma}q_{\Sigma} = \Delta V_{\Pi}q_{\Pi}.$		

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волченко В. Н. Оценка и контроль качества сварных соединений с применением статистических методов. М., «Стандарты», 1974, 160 с.
2. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М., «Высшая школа», 1972. 368 с.
3. Гурвич А. К., Ермолов И. Н. Ультразвуковая дефектоскопия сварных швов. Киев, «Техника», 1972, 460 с.
4. Дорофеев А. Л. Электроиндуктивная дефектоскопия. М., «Машиностроение», 1967, 232 с.
5. Карякин А. В., Боровиков А. С. Люминесцентная и цветная дефектоскопия. М., «Машиностроение», 1972, 240 с.
6. Кузнецов А. А., Алифанов О. М., Ветров В. Н. и др. Вероятностные характеристики авиационных материалов. М., «Машиностроение», 1970, 570 с.
7. Неразрушающие испытания. Под ред. Р. Мак-Мастера. Пер. с англ. М., «Энергия», 1965, 504 с.
8. Ланис В. А. и Левина Л. Е. Техника вакуумных испытаний. Л., Госэнергоиздат, 1963. 311 с.
9. Николаев Г. А., Куркин С. А., Винокуров В. А. Расчет, проектирование и изготовление сварных конструкций. М., «Высшая школа», 1971, 760 с.
10. Румянцев С. В. Радиационная дефектоскопия. М., Атомиздат, 1974, 512 с.
11. Точность производства в машиностроении и приборостроении. Под ред. А. Н. Гаврилова. М., «Машиностроение», 1973, 567 с.
12. Фалькевич А. С., Хусанов М. Х. Магнитографический контроль сварных соединений. М., «Машиностроение», 1966, 176 с.
13. Шиндовский Э. и Шюрц О. Статистические методы контроля производства. М., «Стандарты», 1969, 546 с.
14. Шмелев В. К. Рентгеновские аппараты. М., «Энергия», 1973, с. 325.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Активность изотопа	52
Акустическое давление	128
— поле	125
— сопротивление	131
Акустическая волна	125
— ось	135
Альbedo излучения	49
Альтернативный признак	273
оценки качества	
Альфа-частицы	42
Амплитуда эхо-сигнала	139
Аппаратура рентгеновская	52
— ультразвуковая	151
— электромагнитная	283
АРД — диаграмма	146
Аттенюатор	145

Б

Бета-излучение	59
— частицы	42
Бетатрон	57, 58

В

Вариация (коэффициент)	262
Вейбулла распределение	264, 279
Вероятности обнаружения и появления дефектов	281
Вероятностные бумаги	264
Взаимодействие излучения с веществом	43, 49
Внешний осмотр	34
Волны ультразвуковые поперечные, продольные	127
Выявляемость дефектов (статистическая)	289

Г

Гамма-дефектоскопы	60
— излучение	42
— эквивалент	52
Генераторы нейтронов	75
ГОСТ 6032—58	301
ГОСТ 6996—66	298
ГОСТ 7512—69	11, 81, 92
ГОСТ 7932—56	51
ГОСТ 8848—63	51
ГОСТ 13216—67	5
ГОСТ 13377—67	5
ГОСТ 13585—68	297
ГОСТ 13819—68	301
ГОСТ 14782—69	165, 182
ГОСТ 15467—70	5, 256
ГОСТ 15843—70	79
ГОСТ 15895—70	256, 283
ГОСТ 16493—70	268
ГОСТ 16760—71	121
ГОСТ 17102—71	10, 282
ГОСТ 18353—73	24
ГОСТ 18442—73	241
Грамм-эквивалент радия	52
Границы регулирования	265

Д

Детекторы радиационной де-	72, 99,
фектоскопии	112
Дефектность	21
Дефекты, виды и типы	12
— влияние	19
— внутренние	16
— наружные	12
— подготовки и сборки	10
Дефектоскопы радиационные	61
— ультразвуковые	151
— электромагнитные	218, 227
Децибелы	128

Диаграмма направленности	135
Дисперсия	262
Диффузионный способ проявления	236
Длина волны	126
Длительность импульса	138
Дозы облучения	119
Документация по качеству	308
Доля брака и дефектных элементов	22
Донный импульс	126
Достоверность контроля	289

Е

Единицы измерения ионизирующих излучений	51
— продукции	260

З

Законы ослабления излучения	48
— радиоактивного распада	42
— распределения случайных величин	262
Затухание волн ультразвуковых	128
— — электромагнитных	201
Затраты на контроль	305
Зона ближняя (Френеля)	135
— дальняя (Фраунгофера)	136
Зондирующий импульс	126

И

Излучение тормозное (рентгеновское)	40
Иммерсионный способ контроля	134
Индикатриса рассеяния ультразвука	139
Индикаторные пенетранты	238
Интенсивность ультразвука	128
— излучения	52
Искатель ультразвуковой	133
Испытания механические	298
— неразрушающие и разрушающие	23, 25
Источники ионизирующих излучений	52
— нейтронов	63
— радиоизотопные	59
— тормозного излучения	52

К

Камера нонизационная	114
Компенсаторы	93
Контраст изображения	66, 84

Контроль выборочный	267
— исходных материалов	28
— качества	256
— квалификации операторов	34
— оборудования	29
— технологии	33
Координаты дефекта	96, 147
Коэффициент выявляемости	145
— затухания	128
— ослабления излучения	45, 46
Кристалл сцинтилляционный	102
Ксерорадиография	70

Л

Лаборатория радиационной дефектоскопии	145
Лэмба волны	127
Люминесцентный метод	236
Люминесценция	24

М

Магнитная головка	214, 215
— восприимчивость	197
— индукция	194
— лента	209, 224
— проницаемость	196
Магнитография	220
Магнитодвижущая сила	200
Максвелла уравнения	199
Макротвердость	301
Математическое ожидание	262
Материалы дефектоскопические	238
Металлография	301
Методы дефектоскопии	24
— магнитного порошка	215
— ультразвукового контроля	125
Методы контроля капиллярные	235
— — магнитные	215
— — радиационные	37
— — течением	242
— — ультразвуковые	125
— — электромагнитные	232
Мертвая зона	169
Микротвердость	302
Микротрон	58
Модель (расчетная) допустимости дефектов	281

Н

Намагничивающие устройства	218, 224
Напряженность поля	194
Нерезкости изображения	83

О

Обоснование норм дефектов	281
Обратные связи контроля	257
Объемы контроля	267
Организация службы контроля	307
Оценка дефектности	278
— качества соединений	274
Оперативная характеристика контроля	267

П

Пенетрант	235
Пластины ксерорадиографические	75
Пленки радиографические	72
Поле дефекта	203, 206
Полезадающие системы	192
Преломление магнитного поля	201
— ультразвуковых волн	132
Преобразователи электронно-оптические	104
Приборы дозиметрические	315
Приемочное число	268
Принадлежности радиографические	91
Проба валиковая	297
— технологическая	294
Просвечивание	92
Пуассона коэффициент	127
— распределение	279
Пьезоэлектрические пластины	133

Р

Радиография	37, 68
Радиометрическая дефектоскопия	37, 110
Радиоскопия	37, 97
Разрешающая способность ультразвука	170
— радиоскопии	100
Распределение биномиальное и гипергеометрическое	269
— нормальное	263, 269, 279
— экспоненциальное	279, 280
Расшифровка снимков	95
Регистрация электромагнитных полей	209
Регулирование статистическое	256
Риски поставщика и потребителя	267
Рекомендации СЭВ по стандартизации РС СЭВ 2192—72	11

— — — — РС СЭВ 3641—72	294
— — — — РС СЭВ 4102—73	297
Рэлее волны	127

С

Свариваемость металлов	292
Системы оценки дефектности	286
— телевизионные	106
— управления качеством	256, 307
Сканирование	180
Скорость ультразвука	126
Сорбционный способ	236
Спектры рентгеновского и тормозного излучений	42, 58
Среднеквадратическое отклонение	262
Статистические методы регулирования	256
Счетчики газоразрядные	114
— сцинтилляционные	112

Т

Тест — образцы	146
Технологические пробы	294
Теческатели газозлектрические, галондные, гелневые (масс-спектрометрические)	246
Трансформация волн (ультразвуковых)	132

У

Углы преломления и расхождения ультразвука	132, 136
Управление качеством	256
Уровни качества браковочный и приемочный	267
Усилители видимого света	105
Ускорители линейные	57
Условные размеры несплошностей	148

Ф

Факторы качества технологические и конструктивные	5, 6, 9, 28
Феррозонд	211, 212
Феррозондовый метод	230
Формы учета качества	308, 313

Х

Химическая индикация течей	253
Химический анализ	301

Ц

Цветной метод контроля 236

Ч

Чувствительность контроля 26
 предельная, реальная, ус-
 ловная
 — капиллярного 241
 — магнитного 216, 223,
 231
 — радиационного 75, 66,
 107, 115
 — ультразвукового кон- 161
 троль
 — теченскания 245

Э

Экраны-преобразователи 76
 Экраны усиливающие метал-
 лические 77
 — — флуоресцентные и флуо-
 рометаллические 79
 — — флуороскопические 101
 — — электролюминесцент-
 ные 103
 Электронно-оптический пре-
 образователь (ЭОП) 104
 Электрорадиография 70
 Эталон (чувствительности) 160

Я

Ядерные реакторы 64

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава I	
Качество сварки, сварочные дефекты и контроль качества	
1.1. Факторы качества сварки	5
1.2. Дефекты и уровень дефектности сварных соединений	10
1.3. Выбор методов контроля качества сварки	22
Глава II	
Контроль технологических факторов и внешний осмотр соединений	
2.1. Контроль технологических факторов	28
2.2. Внешний осмотр	34
Глава III	
Радиационные методы контроля сварных соединений	
3.1. Классификация и физические основы методов	37
3.2. Источники ионизирующих излучений для радиационной дефектоскопии	52
3.3. Основные параметры радиационного контроля	65
3.4. Промышленная радиография	68
3.5. Промышленная радиоскопия	97
3.6. Радиометрическая дефектоскопия	110
3.7. Техника безопасности и дозиметрия	117
Глава IV	
Ультразвуковые методы контроля сварных соединений	
4.1. Классификация и физические основы методов	125
4.2. Основные измеряемые характеристики дефектов	139
4.3. Аппаратура для ультразвукового контроля	151
4.4. Основные параметры ультразвукового контроля	161
4.5. Методика и технология контроля	170
Глава V	
Магнитные и электромагнитные методы контроля сварных соединений	
5.1. Классификация и физические основы методов	189
5.2. Магнитные методы	215
5.3. Электромагнитные методы	232
Глава VI	
Капиллярные методы контроля сварных соединений	
6.1. Классификация и физические основы методов	235
6.2. Средства, методика и чувствительность контроля	238

Глава VII

Методы контроля сварных соединений течением

7.1. Классификация, физические основы и чувствительность методов . . .	242
7.2. Газоэлектрические теческатели	246
7.3. Прочие методы контроля течением	251

Глава VIII

Статистические методы управления качеством сварки

8.1. Применение статистических методов управления качеством и выборочный контроль	256
8.2. Оценка качества соединений при разрушающих испытаниях	274
8.3. Оценка дефектности соединений	278

Глава IX

Оценка свариваемости и механические испытания сварных соединений

9.1. Оценка свариваемости металлов	292
9.2. Механические испытания	298

Глава X

Экономика и организация контроля качества сварки

10.1. Оценка экономической эффективности контроля	303
10.2. Организация службы контроля	307
10.3. Система назначения уровней контроля	309
Приложения	311
Список литературы	322
Предметный указатель	323

Контроль качества сварки

Владимир Никитич Волченко, Анатолий Константинович Гурвич,
Анатолий Николаевич Майоров, Леонид Анатольевич Кашуба,
Эдуард Леонидович Макаров, Мухамед Хамидулович Хусанов

Редактор издательства Т. Е. Черешнева Технический редактор Л. Т. Зубко
Переплет художника Ф. Ю. Эллибаум Корректор Л. В. Асташенов

Сдано в набор 21/X 1974 г. Т. 07433	Формат 60×90 ¹ / ₁₆ .	Подписано к печати 23/IV 1975 г.
Уч.-изд. л. 22,2	Тираж 40 000 экз.	Бумага типографская № 2 Усл. печ. л. 20,5 Заказ № 300 Цена 1 р. 01 к.

Издательство «Машиностроение», 107885, Москва, Б-78, 1-й Басманный пер., 3

Набрано в Ленинградской типографии № 6
Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательства, полиграфии и книжной торговли
193144, Ленинград, С-144, ул. Моисеенко, 10

Отпечатано с матриц в Московской типографии № 4
Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательства, полиграфии и книжной торговли.
Москва, И-41, Б. Переяславская, 40