

А. П. Щербаков, Д. В. Иванов

# ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ СУДЕБНО-ЭКСПЕРТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗДАНИЙ, СООРУЖЕНИЙ И ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН



ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ СУДЕБНО-ЭКСПЕРТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ  
ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗДАНИЙ, СООРУЖЕНИЙ И ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН

А. П. Щербаков, Д. В. Иванов

2022

Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации

Санкт-Петербургский государственный  
архитектурно-строительный университет

**А. П. Щербаков, Д. В. Иванов**

**ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ  
СУДЕБНО-ЭКСПЕРТНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ СВАРНЫХ  
СОЕДИНЕНИЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ  
ЗДАНИЙ, СООРУЖЕНИЙ  
И ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН**

Монография

Санкт-Петербург  
2022

УДК 621.86:343.148.6

*Рецензенты:*

д-р техн. наук, профессор *В. Б. Харченко* (Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет);

канд. техн. наук, доцент *А. А. Баженов* (Санкт-Петербургский горный университет)

### **Щербаков, А. П.**

Особенности проведения судебно-экспертных исследований сварных соединений промышленных зданий, сооружений и дорожно-строительных машин : монография / А. П. Щербаков (гл. 2–12), Д. В. Иванов (гл. 1) ; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – Санкт-Петербург : СПбГАСУ, 2022. – 332 с.– Текст : непосредственный.

ISBN 978-5-9227-1255-2

Изложены состояние вопроса контроля качества сварных соединений промышленных зданий, сооружений и дорожно-строительных машин в системе технической эксплуатации и ремонта, а также особенности проведения судебно-экспертных исследований указанных соединений. Приведена классификация дефектов, рассмотрены причины их возникновения и влияние на работоспособность сварных соединений. Указаны факторы, влияющие на выявляемость дефектов при техническом диагностировании.

Рассмотрены физические основы, технические возможности и область применения методов контроля качества.

Предназначается для научных работников и инженеров, специализирующихся в области проектирования, технической эксплуатации и ремонта сварных металлоконструкций, а также для студентов строительных, машиностроительных специальностей и экспертов в области судебных инженерно-технических экспертиз.

Табл. 16. Ил. 72. Библиогр.: 145 назв.

*Печатается по решению Научно-технического совета СПбГАСУ*

ISBN 978-5-9227-1255-2

© Щербаков А. П., Иванов Д. В., 2022

© Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2022

## Список сокращений

- АЭ – акустическая эмиссия  
АСД – автоматическая сигнализация обнаружения дефектов  
АЧХ – амплитудно-частотная характеристика  
ВИК – визуально-оптический и измерительный контроль  
ВРЧ – временная регулировка чувствительности  
ЗКН – зона концентрации напряжений  
ЗТВ – зона термического влияния  
КН – концентрация напряжений  
МК – металлические конструкции  
МПД – магнитопорошковая дефектоскопия  
МПИМ – магнитная память металла  
НДС – напряженно-деформированное состояние  
НК – неразрушающий контроль  
НТД – нормативно-техническая документация  
ПДО – плоскодонный дисковый отражатель  
ПС – прямой совмещенный  
ПЭП – пьезоэлектрический преобразователь  
РС – раздельно-совмещенный  
РШХ – реверберационно-шумовая характеристика  
СНК – средства неразрушающего контроля  
СО – стандартный образец  
СОП – стандартный образец предприятия  
ТО – термообработка  
ТУ – технические условия  
УЗ – ультразвук

*Список сокращений*

---

- УЗД – ультразвуковой дефектоскоп
- УЗК – ультразвуковой контроль
- УЗТ – ультразвуковой толщиномер
- ХТО – химико-термическая обработка
- ЦО – цилиндрическое отверстие
- ЭЛТ – электронно-лучевая трубка
- ЭРД – эквивалентный размер дефекта

## Введение

Проблема качества и надежности материалов, изделий и сварных металлических конструкций – одна из актуальных проблем современного научно-технического развития, особенно для изделий и конструкций, эксплуатирующихся в экстремальных условиях при высоких динамических и статических нагрузках, в соприкосновении с пожаровзрывоопасными средами.

Подавляющее большинство металлических несущих конструкций является сварным. В РФ за период с 1920 г. и по настоящее время изготовлено, смонтировано и находится в эксплуатации около 800 млн т сварных конструкций различного назначения. При этом на долю сварных конструкций с истекшим плановым сроком службы приходится 55...65 % всех сварных конструкций, находящихся в эксплуатации во всех отраслях народного хозяйства [92].

Одной из главных причин технических аварий является отсутствие или недостаток необходимого обеспечения средствами и методиками контроля и диагностики. При эксплуатации и ремонте изделий, оборудования и конструкций с помощью средств контроля качества предотвращаются поломки и аварии, сокращаются простои и эксплуатационные расходы, увеличиваются срок эксплуатации и межремонтные периоды, также сокращаются продолжительность и стоимость ремонтов. Кроме того, на основании результатов контроля изделие или объект может быть изъят из эксплуатации [81]. Поэтому созданию и наращиванию дефектоскопического оборудования, соответствующих

специализированных мощностей в настоящее время уделяется большое внимание. При этом совершенствование технического уровня средств контроля качества на основе широкого использования цифровой обработки информации и микропроцессорной техники, а также повышение требований к надежности контроля резко увеличивают трудоемкость и стоимость контрольных операций.

Следует отметить, что обеспечение высокого качества работ – одна из наиболее важных научно-технических и производственных проблем в области сварки, значение которой все более возрастает по мере усложнения конструкций сварных изделий.

Эта проблема является многогранной и решается в нескольких направлениях. Среди них ответственная роль принадлежит разработке и широкому применению современных методов и средств НК, эффективность которых определяется прежде всего их достоверностью и производительностью [117].

Таким образом, проблема поддержания надежной работы опасных производственных объектов является актуальной. В связи с этим чрезвычайно остро встает вопрос оценки ресурса несущих конструкций промышленных и гражданских зданий и сооружений, а также строительных машин при продлении их срока эксплуатации, реконструкции, выводе из эксплуатации, необходимости прогнозирования и оценки экономического риска аварии [82].

Решение проблемы по поддержанию высокой эксплуатационной надежности сварных металлоконструкций требует не только совершенствования, но и разработки новых методов, методик и средств неразрушающего контроля, более активного их использования и правильного выбора.

# Глава 1

## СПЕЦИАЛЬНЫЕ ЗНАНИЯ О СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ В СУДЕБНОЙ ЭКСПЕРТИЗЕ<sup>1</sup>

### 1.1. Основные формы использования специальных знаний в судопроизводстве и принципы судебно-экспертной деятельности

Своевременно не решенные проблемы качества и надежности материалов, изделий и сварных металлических конструкций способны вызывать вопросы, ответы на которые приходится искать в рамках гражданского, арбитражного, административного и уголовного судопроизводства. При этом разрешение определенных вопросов может потребовать не юридических, а специальных знаний в области науки, техники, искусства или ремесла.

С точки зрения теории судебной экспертизы использование специальных знаний о сварных соединениях может быть в двух формах:

- непроцессуальной;
- процессуальной.

*Непроцессуальная форма* реализуется посредством информационно-консультационной деятельности специалистов. Как

---

<sup>1</sup> Автор данной главы Д. В. Иванов. Автор остальных глав – А. П. Щербаков.



правило, проводимые исследования носят предварительный характер. Такая форма предусматривается, например, ст. 6 Федерального закона от 12.08.1995 № 144-ФЗ «Об оперативно-разыскной деятельности»<sup>2</sup>, согласно которой должностные лица органов, осуществляющих оперативно-разыскную деятельность, решают ее задачи посредством личного участия в организации и проведении оперативно-разыскных мероприятий, используя в том числе помощь должностных лиц и специалистов, обладающих научными, техническими и иными специальными знаниями, с их согласия на гласной и негласной основе. Подпункт 4 п. 3 ст. 6 Федерального закона от 31.05.2002 № 63-ФЗ «Об адвокатской деятельности и адвокатуре в Российской Федерации»<sup>3</sup> предусматривает право адвоката привлекать на договорной основе специалистов для разъяснения вопросов, связанных с оказанием юридической помощи.

Возможны и другие случаи использования специальных знаний о сварных соединениях в непроцессуальной форме. Например, сторона – участница спорного правоотношения на основании гражданско-правового договора может привлечь специалиста для дачи консультаций по техническим вопросам, необходимых для подготовки правовой позиции.

В случаях использования *процессуальной формы* носитель специальных знаний наделяется особым процессуальным статусом (набором определенных прав и обязанностей) участника судебного процесса. В зависимости от характера судебного разбирательства носитель специальных знаний может выступать в качестве участника:

---

<sup>2</sup> Федеральный закон от 12.08.1995 № 144-ФЗ «Об оперативно-разыскной деятельности».

<sup>3</sup> Федеральный закон от 31.05.2002 № 63-ФЗ «Об адвокатской деятельности и адвокатуре в Российской Федерации».

- гражданского процесса;
- арбитражного процесса;
- административного процесса;
- уголовного процесса.

В зависимости от задач, стоящих перед носителем специальных знаний – участником судебного процесса, ему предоставляется либо процессуальный статус специалиста, либо процессуальный статус эксперта (судебного эксперта). При этом следует отметить существенную разницу между правовым положением специалиста – носителя специальных знаний, используемых в непроцессуальной форме, и правовым положением специалиста – носителя специальных знаний, используемых в процессуальной форме. В последнем случае правовой статус специалиста определяется соответствующим процессуальным законодательством.

Так, в силу ч. 1 ст. 58 Уголовно-процессуального кодекса РФ от 18.12.2001 № 174-ФЗ<sup>4</sup> (УПК РФ), специалист – лицо, обладающее специальными знаниями, привлекаемое к участию в процессуальных действиях в порядке, установленном настоящим кодексом, для содействия в обнаружении, закреплении и изъятии предметов и документов, применении технических средств в исследовании материалов уголовного дела, для постановки вопросов эксперту, а также для разъяснения сторонам и суду вопросов, входящих в его профессиональную компетенцию.

Согласно ч. 1 ст. 188 Гражданского процессуального кодекса РФ от 14.11.2002 № 138-ФЗ<sup>5</sup>, в необходимых случаях при осмотре письменных или вещественных доказательств, воспроизведении

---

<sup>4</sup> Уголовно-процессуальный кодекс Российской Федерации от 18.12.2001 № 174-ФЗ.

<sup>5</sup> Гражданский процессуальный кодекс Российской Федерации от 14.11.2002 № 138-ФЗ.

аудио- или видеозаписи, назначении экспертизы, допросе свидетелей, принятии мер по обеспечению доказательств суд может привлекать специалистов для получения консультаций, пояснений и оказания непосредственной технической помощи (фотографирования, составления планов и схем, отбора образцов для экспертизы, оценки имущества).

В соответствии с ч. 1, 2 ст. 55.1 Арбитражного процессуального кодекса РФ от 24.07.2002 № 95-ФЗ<sup>6</sup>, специалистом в Арбитражном суде является лицо, обладающее необходимыми знаниями по соответствующей специальности, осуществляющее консультации по касающимся рассматриваемого дела вопросам. Лицо, вызванное Арбитражным судом в качестве специалиста, обязано явиться в суд, отвечать на поставленные вопросы, давать в устной форме консультации и пояснения.

Следует обратить внимание, что привлечение специалиста для осуществления консультаций по вопросам, относящимся к рассматриваемому делу, также возможно и по инициативе одной из сторон судебного разбирательства. Например, в одном из судебных споров ООО «Энергоучет» обратилось в Судебную коллегия по экономическим спорам Верховного Суда РФ с кассационной жалобой на судебные акты судов нижестоящих инстанций, указав, что при оценке экспертного заключения суд апелляционной инстанции необоснованно отказал в приобщении к материалам дела заключения специалистов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения «Воронежский государственный технический университет» от 04.01.2017, опровергающего выводы судебной экспертизы и содержащего подробный анализ экспертного заключения. В этой связи, по мнению подателя жалобы, суд необоснованно отказал

---

<sup>6</sup> Арбитражный процессуальный кодекс Российской Федерации от 24.07.2002 № 95-ФЗ.

и в проведении повторной экспертизы, необходимость которой обосновывалась указанным заключением специалистов.

Как указала Судебная коллегия по экономическим спорам Верховного Суда РФ в Определении от 25.01.2018 по делу № 305-ЭС17-11486, А40-73410/2015 ходатайство общества о приобщении в материалы дела заключения специалистов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения «Воронежский государственный технический университет» от 04.01.2017, в котором обоснованность выводов экспертов ставилась под сомнение, судом апелляционной инстанции отклонено, поскольку этот документ не соответствует критериям относимости и допустимости доказательств, предусмотренных ст. 67 и 68 Арбитражного процессуального кодекса Российской Федерации.

Между тем, как следует из объяснений ответчика, заключение от 04.01.2017 составлено с целью опровержения выводов экспертизы, проведенной по данному делу, а потому имеет отношение к настоящему делу. Требования к оформлению такого заключения, фактически представляющему собой мотивированные объяснения стороны относительно дефектов судебной экспертизы, законом не установлены, а следовательно, оно неправомерно признано судом недопустимым доказательством.

Не приобщив указанный документ и не дав оценку его содержательной части, суд лишил сторону возможности доказать свои возражения в части объема выполненных работ и обоснованности встречного иска. В этой связи нельзя признать правомерным и отказ суда в проведении повторной экспертизы<sup>7</sup>.

Доктринально судебная экспертиза рассматривается в качестве основной способа использования специальных знаний в процессуальной форме.

---

<sup>7</sup> Определение Судебной коллегии по экономическим спорам Верховного Суда РФ от 25.01.2018 по делу № 305-ЭС17-11486, А40-73410/2015.

В силу ст. 9 Федерального закона от 31.05.2001 № 73-ФЗ «О государственной судебно-экспертной деятельности в Российской Федерации»<sup>8</sup>, судебная экспертиза – это предусмотренное законодательством Российской Федерации о судопроизводстве процессуальное действие, включающее в себя проведение исследований и дачу заключения экспертом по вопросам, требующим специальных знаний в области науки, техники, искусства или ремесла.

Принимая во внимание положения ст. 2 и 41 Федерального закона «О государственной судебно-экспертной деятельности в Российской Федерации», основная задача судебно-экспертной деятельности должна быть сформулирована следующим образом: оказание содействия судам, судьям, органам дознания, лицам, производящим дознание, следователям в установлении обстоятельств, подлежащих доказыванию по конкретному делу, посредством разрешения вопросов, требующих специальных знаний в области науки, техники, искусства или ремесла.

В основе судебно-экспертной деятельности лежит ряд основополагающих правовых идей. Они образуют правовой фундамент, на котором выстраиваются правовые нормы, регулирующие судебно-экспертную деятельность, которые обеспечивают решение основной задачи указанной деятельности. Опираясь на положения ст. 4 и 41 Федерального закона «О государственной судебно-экспертной деятельности в Российской Федерации», следует признать, что судебно-экспертная деятельность основывается на правовых принципах:

- законности;
- соблюдения прав и свобод человека и гражданина, прав юридического лица;

---

<sup>8</sup> Федерального закона от 31.05.2001 № 73-ФЗ «О государственной судебно-экспертной деятельности в Российской Федерации».

- независимости эксперта;
- объективности, всесторонности и полноты судебно-экспертных исследований, проводимых с использованием современных достижений науки и техники.

Все принципы судебно-экспертной деятельности находятся в системной взаимосвязи и являются не чем иным, как принципами процессуального законодательства либо их логическим продолжением. Таким образом, принципы судебно-экспертной деятельности отражаются как в нормах законодательства, определяющего правовую основу, принципы организации и основные направления судебно-экспертной деятельности, так и в положениях процессуального законодательства.

Принцип законности при осуществлении судебно-экспертной деятельности относится к так называемым функциональным признакам. Он заключается в точном исполнении нормативных правовых актов, составляющих правовую основу этой деятельности. Данный принцип вытекает из требований ч. 2 ст. 15 Конституции РФ<sup>9</sup>, согласно которой органы государственной власти, органы местного самоуправления, должностные лица, граждане и их объединения обязаны соблюдать Конституцию РФ и законы.

Принцип законности закреплен, в частности, в ст. 5 Федерального закона «О государственной судебно-экспертной деятельности в Российской Федерации», а также находит свое отражение в положениях ст. 2 Гражданского процессуального кодекса РФ; ст. 2, 6, 13 Арбитражного процессуального кодекса РФ; ст. 7 п. 5.1 ч. 2, ч. 3 ст. 37, ч. 3 ст. 125, ч. 2 ст. 125.1, ч. 5 ст. 165 Уголовно-процессуального кодекса РФ; ч. 1 Кодекса административного судопроизводства РФ<sup>10</sup>.

---

<sup>9</sup> Конституция Российской Федерации (принята всенародным голосованием 12.12.1993, с изм., одобренными в ходе общероссийского голосования 01.07.2020).

<sup>10</sup> Кодекс административного судопроизводства РФ от 08.03.2015 № 21-ФЗ.

В случае нарушения закона виновные лица привлекаются к ответственности, установленной законодательством РФ. Прежде всего речь идет об уголовной ответственности, предусмотренной ст. 307 Уголовного кодекса РФ<sup>11</sup> за заведомо ложные заключение или показание эксперта, а также уголовной ответственности, предусмотренной ст. 310 Уголовного кодекса РФ, за разглашение данных предварительного расследования.

С принципом законности неразрывно связан и логически вытекает из него принцип соблюдения прав и свобод человека и гражданина, прав юридического лица при осуществлении судебно-экспертной деятельности. Он основывается на положениях ст. 2 Конституции РФ, согласно которой человек, его права и свободы являются высшей ценностью. Признание, соблюдение и защита прав и свобод человека и гражданина – обязанность государства.

Содержание данного принципа раскрывается в положениях ст. 6 и 41 Федерального закона «О государственной судебно-экспертной деятельности в Российской Федерации», согласно которым судебно-экспертная деятельность осуществляется при неуклонном соблюдении равноправия граждан, их конституционных прав на свободу и личную неприкосновенность, достоинство личности, неприкосновенность частной жизни, личную и семейную тайну, защиту чести и доброго имени, а также иных прав и свобод человека и гражданина согласно общепризнанным принципам и нормам международного права и в соответствии с Конституцией РФ.

Судебно-экспертные исследования (далее – исследования), требующие временного ограничения свободы лица или его личной неприкосновенности, проводятся только на основаниях и в порядке, которые установлены федеральным законом.

---

<sup>11</sup> Уголовный кодекс Российской Федерации от 13.06.1996 № 63-ФЗ.

Лицо, полагающее, что действия (бездействие) судебно-экспертного учреждения или эксперта привели к ограничению прав и свобод гражданина либо прав и законных интересов юридического лица, вправе обжаловать указанные действия (бездействие) в порядке, установленном законодательством РФ.

Принцип соблюдения прав и свобод человека и гражданина, прав юридического лица при осуществлении судебно-экспертной деятельности зафиксирован в том числе в положениях ч. 2 ст. 79, ч. 3 ст. 84 Гражданского процессуального кодекса РФ; ч. 2 и 3 ст. 82, ч. 2 ст. 83 Арбитражного процессуального кодекса РФ; ч. 3 ст. 195, ст. 198, ст. 206 Уголовно-процессуального кодекса РФ; ч. 3 и 4 ст. 77, ч. 3 ст. 79 Кодекса административного судопроизводства РФ.

Независимость эксперта, как принцип судебно-экспертной деятельности, раскрывается в ст. 7 Федерального закона «О государственной судебно-экспертной деятельности в Российской Федерации», в соответствии с которой при производстве судебной экспертизы эксперт независим, он не может находиться в какой-либо зависимости от органа или лица, назначивших судебную экспертизу, сторон и других лиц, заинтересованных в исходе дела. Эксперт дает заключение, основываясь на результатах проведенных исследований в соответствии со своими специальными знаниями.

Не допускается воздействие на эксперта со стороны судов, судей, органов дознания, лиц, производящих дознание, следователей и прокуроров, а также иных государственных органов, организаций, объединений и отдельных лиц в целях получения заключения в пользу кого-либо из участников процесса или в интересах других лиц.

Лица, виновные в оказании воздействия на эксперта, подлежат ответственности в соответствии с законодательством РФ.

Так, ч. 1 ст. 302 Уголовного кодекса РФ предусматривается уголовная ответственность в том числе за принуждение эксперта



к даче заключения или показаний путем применения угроз, шантажа или иных незаконных действий со стороны следователя или лица, производящего дознание, а равно другого лица с ведома или молчаливого согласия следователя или лица, производящего дознание.

Также Уголовным кодексом РФ предусматривается уголовная ответственность в том числе за подкуп эксперта в целях дачи им ложного заключения или ложных показаний (ч. 1 ст. 309), за принуждение эксперта к даче ложного заключения, а равно принуждение к уклонению от дачи показаний, соединенное с шантажом, угрозой убийством, причинением вреда здоровью, уничтожением или повреждением имущества этих лиц или их близких (ч. 2 ст. 309).

Принцип независимости эксперта при производстве судебной экспертизы находит свое отражение в том числе в положениях ч. 1 ст. 18 Гражданского процессуального кодекса РФ; ст. 21, ч. 1 ст. 23, ч. 1 ст. 24 Арбитражного процессуального кодекса РФ; ч. 1 ст. 62, п. 2 ч. 2 ст. 70 Уголовно-процессуального кодекса РФ; ч. 2 ст. 33 Кодекса административного судопроизводства РФ.

Требования принципа объективности, всесторонности и полноты судебно-экспертных исследований, проводимых с использованием современных достижений науки и техники, в силу ст. 8 Федерального закона «О государственной судебно-экспертной деятельности в Российской Федерации» заключаются в том, что эксперт должен проводить исследования объективно, на строго научной и практической основе, в пределах соответствующей специальности, всесторонне и в полном объеме. Кроме того, заключение эксперта должно основываться на положениях, дающих возможность проверить обоснованность и достоверность сделанных выводов на базе общепринятых научных и практических данных.

Кроме того, согласно ст. 16 Федерального закона «О государственной судебно-экспертной деятельности в Российской

Федерации», эксперт обязан составить мотивированное письменное сообщение о невозможности дать заключение и направить данное сообщение в орган или лицу, которые назначили судебную экспертизу, в частности, если современный уровень развития науки не позволяет ответить на поставленные вопросы.

В процессуальном законодательстве принцип объективности, всесторонности и полноты судебно-экспертных исследований, проводимых с использованием современных достижений науки и техники, зафиксирован в том числе в положениях ч. 1 ст. 85 Гражданского процессуального кодекса РФ; ч. 2 ст. 55, ч. 2 ст. 87 Арбитражного процессуального кодекса РФ; ч. 2 ст. 207 Уголовно-процессуального кодекса РФ; ч. 2 и 4 ст. 49 Кодекса административного судопроизводства РФ.

## **1.2. Нормативные основы проведения судебно-экспертных исследований**

Судебно-экспертные исследования сварных соединений промышленных зданий, сооружений и дорожно-строительных машин происходят в рамках отдельного процессуального действия, которое не может происходить вне правового поля. Производство судебных экспертиз регулируется процессуальным законодательством с учетом особенностей отдельных видов судопроизводства.

Также необходимо учитывать теснейшую связь данных исследований со строительной отраслью. «Область строительства строго детально регламентирована. Можно смело заявлять, что она является самой нормированной сферой деятельности человека. Объясняется это прежде всего тем, что любое строительство при нарушении установленных общепринятых требований нормативной документации представляет собой огромную опасность и угрозу жизни и здоровью населения, может нанести вред

имуществу физических и юридических лиц, государственному и муниципальному имуществу, а также привести к негативным последствиям для окружающей среды»<sup>12</sup>.

Нормативное регулирование, осуществляемое в рассматриваемой сфере, включает в себя:

- нормативно-правовое регулирование;
- техническое регулирование.

*Нормативно-правовое регулирование* заключается в установлении уполномоченными органами государственной власти общеобязательных правовых норм, призванных упорядочивать общественные отношения, которые возникают между различными субъектами (физическими лицами (гражданами), юридическими лицами, государством, органами местного самоуправления).

Нормативно-правовые акты, образующие правовую основу судебно-экспертной деятельности, могут быть дифференцированы по различным критериям, в том числе:

- по юридической силе (Конституция РФ, федеральные законы, подзаконные акты);
- степени систематизации (обычные и кодификационные);
- предмету правового регулирования (материально-правовые и процессуальные) и т. д.

Исходя из положений ст. 3 Федерального закона «О государственной судебно-экспертной деятельности в Российской Федерации», можно с уверенностью утверждать, что правовую основу судебно-экспертной деятельности составляют Конституция РФ, Гражданский процессуальный кодекс РФ, Кодекс административного судопроизводства РФ, Арбитражный процессуальный кодекс РФ, Уголовно-процессуальный кодекс РФ, Кодекс РФ об

---

<sup>12</sup> Ревунов А. А. Нормативные основы производства судебных строительно-технических экспертиз // Теория и практика судебной экспертизы. 2020. № 4. Т. 15. С. 33.

административных правонарушениях, законодательство РФ о таможенном деле, Налоговый кодекс РФ, законодательство в сфере охраны здоровья, Федеральный закон «О государственной судебно-экспертной деятельности в Российской Федерации», другие федеральные законы, нормативные правовые акты Президента РФ, нормативные правовые акты Правительства РФ, нормативные правовые акты федеральных органов исполнительной власти, на которые возложены функции по организации и (или) производству экспертизы в целях осуществления судопроизводства в РФ, а также нормативные правовые акты федерального государственного органа, осуществляющего в соответствии с законодательством РФ полномочия в сфере уголовного судопроизводства.

В дополнение к данному перечню следует указать Постановление Пленума Высшего Арбитражного суда РФ от 04.04.2014 № 23 «О некоторых вопросах практики применения арбитражными судами законодательства об экспертизе»<sup>13</sup>, которое сохраняет свою силу до принятия соответствующих решений Пленумом Верховного Суда РФ, а также Постановление Пленума Верховного Суда РФ от 21.12.2010 № 28 «О судебной экспертизе по уголовным делам»<sup>14</sup>.

В числе подзаконных нормативно-правовых актов также следует указать Приказ МВД России от 29.06.2005 № 511<sup>15</sup>, которым, в частности, утверждена «Инструкция по организации производства судебных экспертиз в экспертно-криминалистических

---

<sup>13</sup> Постановление Пленума ВАС РФ от 04.04.2014 № 23 «О некоторых вопросах практики применения арбитражными судами законодательства об экспертизе».

<sup>14</sup> Постановление Пленума Верховного Суда РФ от 21.12.2010 № 28 «О судебной экспертизе по уголовным делам».

<sup>15</sup> Приказ МВД России от 29.06.2005 № 511 «Вопросы организации производства судебных экспертиз в экспертно-криминалистических подразделениях органов внутренних дел Российской Федерации».

подразделениях органов внутренних дел Российской Федерации», а также утвержден «Перечень родов (видов) судебных экспертиз, производимых в экспертно-криминалистических подразделениях органов внутренних дел Российской Федерации».

Приказом Минюста России от 27.12.2012 № 237<sup>16</sup> утверждены перечень родов (видов) судебных экспертиз, выполняемых в федеральных бюджетных судебно-экспертных учреждениях Минюста России, и перечень экспертных специальностей, по которым представляется право самостоятельного производства судебных экспертиз в федеральных бюджетных судебно-экспертных учреждениях Минюста России.

Значительное внимание при проведении судебно-экспертных исследований сварных соединений промышленных зданий, сооружений и дорожно-строительных машин должно уделяться обеспечению безопасности. Федеральный закон от 21.07.1997 № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов»<sup>17</sup> определяет правовые, экономические и социальные основы обеспечения безопасной эксплуатации опасных производственных объектов и направлен на предупреждение аварий на опасных производственных объектах и обеспечение готовности эксплуатирующих опасные производственные объекты юридических лиц и индивидуальных предпринимателей.

В области обеспечения промышленной безопасности также принят ряд подзаконных нормативных актов, требования кото-

---

<sup>16</sup> Приказ Минюста России от 27.12.2012 № 237 «Об утверждении Перечня родов (видов) судебных экспертиз, выполняемых в федеральных бюджетных судебно-экспертных учреждениях Минюста России, и Перечня экспертных специальностей, по которым представляется право самостоятельного производства судебных экспертиз в федеральных бюджетных судебно-экспертных учреждениях Минюста России».

<sup>17</sup> Федеральный закон от 21.07.1997 № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов».

рых следует соблюдать при осуществлении судебно-экспертных исследований. Например, Приказом Ростехнадзора от 27.09.2018 № 468<sup>18</sup> утверждено Руководство по безопасности «Методические рекомендации о порядке проведения компьютерной радиографии сварных соединений технических устройств, строительных конструкций зданий и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах», которое содержит рекомендации по организации, технологии, техническим средствам и оформлению результатов компьютерной радиографии (компьютерного радиографического контроля) сварных соединений при изготовлении, строительстве, монтаже, ремонте, реконструкции, эксплуатации, техническом диагностировании (освидетельствовании) технических устройств, зданий и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах.

Постановлением Госгортехнадзора РФ от 25.07.1995 № 38 утверждено Положение о системе технического диагностирования сварных вертикальных цилиндрических резервуаров для нефти и нефтепродуктов РД 08-95–95<sup>19</sup>. Данное Положение распространяется на стальные сварные цилиндрические резервуары вместимостью от 100 до 50 000 куб. м, предназначенные для хранения нефти и нефтепродуктов. Положение предусматривает порядок оценки технического состояния резервуаров по совокупности диагностируемых параметров в целях выработки

---

<sup>18</sup> Приказ Ростехнадзора от 27.09.2018 № 468 «Об утверждении Руководства по безопасности „Методические рекомендации о порядке проведения компьютерной радиографии сварных соединений технических устройств, строительных конструкций зданий и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах“».

<sup>19</sup> РД 08-95–95. Положение о системе технического диагностирования сварных вертикальных цилиндрических резервуаров для нефти и нефтепродуктов. (утв. Постановлением Госгортехнадзора РФ от 25.07.1995 № 38) (вместе с «Типовой программой полного технического диагностирования резервуара»).

рекомендаций об условиях их дальнейшей безопасной эксплуатации с вероятным остаточным ресурсом, о сроках и уровнях последующих обследований либо о необходимости проведения ремонта или исключения их из эксплуатации.

Постановлением Госатомнадзора России от 17.02.1993 № 2 утверждены Правила контроля сварных соединений элементов локализирующих систем безопасности атомных станций. ПНАЭ Г-10-032–92<sup>20</sup>, которые являются руководящим документом при проектировании, конструировании, изготовлении, монтаже и ремонте в процессе изготовления и монтажа сварных узлов и конструкций локализирующей системы безопасности.

Техническое регулирование, согласно ст. 2 Федерального закона от 27.12.2002 № 184-ФЗ «О техническом регулировании»<sup>21</sup>, заключается в правовом регулировании отношений в области установления, применения и исполнения обязательных требований к продукции или к продукции и связанным с требованиями к продукции процессам проектирования (включая изыскания), производства, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, а также в области применения на добровольной основе требований к продукции, процессам проектирования (включая изыскания), производства, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, выполнению работ или оказанию услуг и правовое регулирование отношений в области оценки соответствия.

Федеральный закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности»<sup>22</sup> определя-

---

<sup>20</sup> ПНАЭ Г-10-032–92. Правила контроля сварных соединений элементов локализирующих систем безопасности атомных станций.

<sup>21</sup> Федеральный закон от 27.12.2002 № 184-ФЗ «О техническом регулировании».

<sup>22</sup> Федеральный закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности».

ет основные положения технического регулирования в области пожарной безопасности и устанавливает общие требования пожарной безопасности к объектам защиты (продукции), в том числе к зданиям и сооружениям, производственным объектам, пожарно-технической продукции и продукции общего назначения.

Примечательно, что техническое регулирование в рассматриваемой сфере осуществляется не только на федеральном уровне, но также и на региональном. Например, в соответствии с п. 26 ст. 12 Закона Московской области от 30.12.2014 № 191/2014-ОЗ «О регулировании дополнительных вопросов в сфере благоустройства в Московской области»<sup>23</sup>, элементы оборудования из металла должны быть защищены от коррозии или изготовлены из коррозионно-стойких материалов. Не допускается наличие глубокой коррозии металлических конструкций элементов оборудования. Металлические материалы, образующие окислы, шелушащиеся или отслаивающиеся, должны быть защищены нетоксичным покрытием. Выступающие концы болтовых соединений должны быть защищены способом, исключающим травмирование. Сварные швы должны быть гладкими.

Характерной чертой судебно-экспертных исследований сварных соединений промышленных зданий, сооружений и дорожно-строительных машин является наличие значительного числа стандартов. В их числе можно указать, например, Межгосударственный стандарт ГОСТ 5264–80 «Ручная дуговая сварка. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры»<sup>24</sup>, который устанавливает основные типы, конструктивные элементы и размеры сварных соединений из

---

<sup>23</sup> Закон Московской области от 30.12.2014 № 191/2014-ОЗ «О регулировании дополнительных вопросов в сфере благоустройства в Московской области».

<sup>24</sup> Межгосударственный стандарт ГОСТ 5264-80 «Ручная дуговая сварка. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры».



сталей, а также сплавов на железоникелевой и никелевой основах, выполняемых ручной дуговой сваркой (за исключением сварных соединений стальных трубопроводов по ГОСТ 16037–80).

ГОСТ 14782–86 «Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые» [33] устанавливает методы ультразвукового контроля стыковых, угловых, нахлесточных и тавровых соединений, выполненных дуговой, электрошлаковой, газовой, газопрессовой, электронно-лучевой и стыковой сваркой оплавлением в сварных конструкциях из металлов и сплавов для выявления трещин, непроваров, пор, неметаллических и металлических включений.

ГОСТ 16504–81 «Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения» [34] устанавливает применяемые в науке, технике и производстве термины и определения основных понятий в области испытаний и контроля качества продукции. Термины, установленные данным стандартом, являются обязательными для применения в документации всех видов, научно-технической, учебной и справочной литературе.

### **1.3. Научно-методическое обеспечение производства судебных экспертиз**

Судебная экспертиза характеризуется определенным дуализмом. Двойственность проявляется в том, что это процессуальное действие, совершаемое в порядке, установленном процессуальным законом, и в то же время – это научное исследование. В связи с этим использование специальных знаний о сварных соединениях в судопроизводстве теснейшим образом связано с решением задач научно-методического обеспечения производства судебных экспертиз. Это относится как к государственным

судебно-экспертным учреждениям, так и к судебно-экспертной деятельности лиц, не являющихся государственными судебными экспертами.

Дело в том, что полнота исследований, проводимых с использованием современных достижений науки и техники, является одним из принципов судебно-экспертной деятельности (ст. 4, 41 Федерального закона «О государственной судебно-экспертной деятельности в Российской Федерации»). Отражение данного принципа можно найти, в частности, в требованиях к экспертному заключению и его содержанию (ст. 25 Федерального закона «О государственной судебно-экспертной деятельности в Российской Федерации»).

Кроме того, ст. 8 Федерального закона «О государственной судебно-экспертной деятельности в Российской Федерации» вменяет эксперту в обязанность проводить исследования объективно, на строго научной и практической основе, в пределах соответствующей специальности, всесторонне и в полном объеме. А заключение эксперта должно основываться на положениях, дающих возможность проверить обоснованность и достоверность сделанных выводов на базе общепринятых научных и практических данных.

Однако, предъявляя указанные требования к судебно-экспертным исследованиям, законодатель тем самым определяет границы формальной регламентации. Дело в том, что научная деятельность является творческой (данное обстоятельство, помимо прочего, отражено в положениях Конституции РФ (ч. 1 ст. 44, ч. 3 ст. 97)).

«Творческая деятельность изначально включает в себя определенным образом организованный способ умственной деятельности или, другими словами, умственный труд по обобщению разрозненных фактов, поисков недостающей информации посредством специальных алгоритмов и методов творческого

процесса и последующего представления неизвестного исследуемого предмета, явления, события как мысленной модели. Творческую деятельность от нетворческой отличают не только по новизне как конечному продукту деятельности, но и по нетрадиционности, нестандартности подхода к проблеме. Выделяются условия, при которых должна осуществляться творческая деятельность... К объективным условиям могут относиться способность установления противоречий в решаемой проблеме, объективная возможность моделирования объекта изучения (например, достаточность информации), возможность к освоению либо к совершенствованию методов исследования и т. п. К субъективным условиям творческой деятельности относят стиль работы исследователя (в частности, стиль его мышления), индивидуальную склонность к определенным факторам деятельности. Важно отметить, что субъективные условия творческой деятельности логически вытекают из объективных характеристик и неразрывно связаны с ними. И субъективные, и объективные условия способствуют успешности и эффективности творческой деятельности»<sup>25</sup>.

Таким образом, творчество, как интеллектуальный субъективный процесс, находится за гранью нормативно-правового регулирования. В подтверждение данного вывода сошлемся на положения ст. 4 и 7 Федерального закона от 23.08.1996 № 127-ФЗ «О науке и государственной научно-технической политике»<sup>26</sup>, устанавливающих принцип свободы научного творчества и вытекающее из него право субъектов научной и (или) научно-технической деятельности на выбор направлений и методов проведения научных исследований и экспериментальных разработок.

---

<sup>25</sup> Батеженко В. В. Феномен творчества: опыт философско-методологического анализа // Вестник ОГУ. 2011. № 11 (130). С. 133.

<sup>26</sup> Федеральный закон от 23.08.1996 № 127-ФЗ «О науке и государственной научно-технической политике».

Учитывая данные обстоятельства, неудивительно то внимание, которое уделяет научно-методическому обеспечению судебно-экспертной деятельности законодатель, а также органы исполнительной власти, на которые возложены функции по организации и (или) производству экспертизы в целях осуществления судопроизводства в РФ, и федеральный государственный орган, осуществляющий в соответствии с законодательством РФ полномочия в сфере уголовного судопроизводства.

Значительную роль в данном отношении играют методические рекомендации и методические руководства, принимаемые МВД России и Минюстом России. В первую очередь упомянутые в предыдущем параграфе Перечень родов (видов) судебных экспертиз, производимых в экспертно-криминалистических подразделениях органов внутренних дел Российской Федерации, утвержденный Приказом МВД России от 29.06.2005 № 511, а также Перечень родов (видов) судебных экспертиз, выполняемых в федеральных бюджетных судебно-экспертных учреждениях Минюста России, утвержденный Приказом Минюста России от 27.12.2012 № 237.

Оба перечня играют важную роль в научно-методическом обеспечении производства судебных экспертиз, поскольку в их основе лежит научная дифференциация родов (видов) судебных экспертиз по объекту экспертного исследования (по крайней мере после того, как Приказом Минюста России от 29.10.2013 № 199<sup>27</sup> были внесены изменения в Приложение № 1 к Приказу Минюста России от 27.12.2012 № 237).

---

<sup>27</sup> Приказ Минюста России от 29.10.2013 № 199 «О внесении изменений в приложения № 1 и № 2 к приказу Минюста России от 27.12.2012 № 237 „Об утверждении Перечня родов (видов) судебных экспертиз, выполняемых в федеральных бюджетных судебно-экспертных учреждениях Минюста России“ и „Перечня экспертных специальностей, по которым представляется право самостоятельного производства судебных экспертиз в федеральных бюджетных судебно-экспертных учреждениях Минюста России“».

При первом приближении судебно-экспертные исследования сварных соединений промышленных зданий, сооружений и дорожно-строительных машин непосредственно связаны с исследованием технологических процессов и технического состояния объектов. Принимая во внимание Перечень родов (видов) судебных экспертиз, производимых в экспертно-криминалистических подразделениях органов внутренних дел Российской Федерации, утвержденный Приказом МВД России от 29.06.2005 № 511, следует признать, что рассматриваемые судебно-экспертные исследования должны проводиться в рамках автотехнических экспертиз (2.2. Исследование технического состояния деталей и узлов транспортных средств) либо пожарно-технических экспертиз (15.1. Исследование причин, закономерностей возникновения и развития пожара, слеодообразования на объектах, составляющих вещную обстановку места происшествия, в том числе на электротехнических, электромеханических, радиоэлектронных изделиях, деталях и узлах транспортных средств), либо строительно-технических экспертиз (21.1. Исследование строительных объектов и территории, функционально связанной с ними).

Исходя из Перечня родов (видов) судебных экспертиз, выполняемых в федеральных бюджетных судебно-экспертных учреждениях Минюста России, утвержденного Приказом Минюста России от 27.12.2012 № 237, судебно-экспертные исследования сварных соединений промышленных зданий, сооружений и дорожно-строительных машин должны проводиться в рамках автотехнических экспертиз (исследование технического состояния транспортных средств) либо пожарно-технических экспертиз (исследование технологических, технических, организационных и иных причин, условий возникновения, характера протекания пожара и его последствий), либо взрывотехнологических экспертиз (исследование технических и организационных причин, условий возникновения, характера протекания взрыва и его по-

следствий), либо строительно-технических экспертиз (исследование строительных объектов и территории, функционально связанной с ними, в том числе с целью определения их стоимости).

Как можно заметить, научно-методические подходы МВД России и Минюста России применительно к проведению судебно-экспертных исследований сварных соединений промышленных зданий, сооружений и дорожно-строительных машин имеют отличие. Вместе с тем следует обратить внимание на то, судебно-экспертные исследования сварных соединений промышленных зданий, сооружений и дорожно-строительных машин могут выполняться также при производстве экспертиз иной родовой (видовой) принадлежности. В подтверждение данного тезиса приведем примеры из судебной практики.

Так, в рамках одного из уголовных дел о нарушении правил техники безопасности, находившегося на рассмотрении Судебной коллегии по уголовным делам Верховного Суда РФ, проводились криминалистическая и пожарно-техническая экспертизы. Исследовались вопросы о причинах разрушения конструкции газового баллона на автомашине, двигатель которой на момент разрушения баллона был выключен. При этом эксперты установили, что разрушение произошло из-за совокупности причин, одной из них явилось то, что разрыв баллона произошел по шву сварного соединения, где между основаниями внешнего и внутреннего швов имелась зона непровара высотой до 1,8 мм, проходящая по стыку двух краев свариваемого листа, образующего обечайку баллона<sup>28</sup>.

Как следует из материалов другого, находившегося на рассмотрении Судебной коллегии по уголовным делам Верховного

---

<sup>28</sup> См.: Определение Верховного Суда РФ от 28.07.2008 № 29-Д08-5. [Электронный ресурс]. Доступ из справочно-правовой системы «Консультант-Плюс» (дата обращения: 10.12.2021).

Суда РФ уголовного дела, при помощи сварки была произведена подделка номера кузова автомобиля. Данное обстоятельство было выявлено в результате производства трасологической экспертизы, которой было установлено, что маркировочная площадка номера двигателя автомашины подвергалась изменению путем забивания порядкового номера двигателя, а также подвергалась изменению первичная идентификационная маркировка автомашины с установлением знаков вторичной идентификационной маркировки<sup>29</sup>.

Судебной товароведческой экспертизой, проведенной при рассмотрении Арбитражным судом Калужской области дела № А23-6020/09Г-15-305, были установлены, в частности, следующие дефекты: сварные швы конструкции металлического каркаса, которые выглядят грубовато, выполнены с наплывом и резким переходом к основному металлу (устранимый недостаток производственного характера)<sup>30</sup>.

Таким образом, исследования сварных соединений промышленных зданий, сооружений и дорожно-строительных машин могут проводиться в рамках широкого спектра судебных экспертиз. В этой связи следует отметить, что «характерным признаком каждого рода и вида судебных экспертиз является соответствующая методика экспертного исследования. Так, специфика предмета

---

<sup>29</sup> См.: Определение Верховного Суда РФ от 27.04.2005 № 83-О05-3. [Электронный ресурс]. Доступ из справочно-правовой системы «Консультант-Плюс» (дата обращения: 10.12.2021).

<sup>30</sup> См.: Постановление Двадцатого арбитражного апелляционного суда от 27.03.2012 по делу № А23-3034/2011. [Электронный ресурс]. Доступ из справочно-правовой системы «Консультант-Плюс» (дата обращения 10.12.2021); см.: Определение Арбитражного суда Калужской области от 04.10.2010 по делу № А23-6020/09Г-15-305. URL: [https://kad.arbitr.ru/Document/Pdf/8dc02078-3713-41b7-b546-4cedd7b7647a/7f5c5afc-6225-47e8-a18a-45c93d87c56d/A23-6020-2009\\_20100304\\_Opredelenie.pdf?isAddStamp=True](https://kad.arbitr.ru/Document/Pdf/8dc02078-3713-41b7-b546-4cedd7b7647a/7f5c5afc-6225-47e8-a18a-45c93d87c56d/A23-6020-2009_20100304_Opredelenie.pdf?isAddStamp=True) (дата обращения: 10.12.2021).

и объектов судебной экспертизы определяет и специфику ее методики. На сегодняшний день в понимании сущности методики судебно-экспертного исследования есть некоторые различия. При этом понимание термина „методика“ в русском языке в принципе однозначно. Убедиться в этом можно, изучив наиболее популярные в настоящее время толковые словари русского языка: В. И. Даля, С. И. Ожегова и изданный под редакцией Д. Н. Ушакова, а также наиболее авторитетные энциклопедические издания: Большую советскую энциклопедию и Энциклопедический словарь Ф. Павленкова. В них „методика“ определяется следующим образом:

- способ, порядок, основания; принятый путь для хода, движения чего-либо, в виде общих правил;
- совокупность методов обучения чему-нибудь, практического выполнения чего-нибудь;
- система практических способов, приемов изучения предмета, выполнения работы.

В приведенных выше определениях нет смысловых различий, соответственно, любая методика предусматривает комплекс методов, которые реализуются последовательно и логически»<sup>31</sup>. Данное обстоятельство следует принимать во внимание при выборе родовой (видовой) методики, которая охватывает средства и способы производства судебных экспертиз определенного рода (вида).

Наряду с указанной методикой в теории судебной экспертизы также различаются частная и типовая методики экспертного исследования.

Частная методика экспертного исследования включает совокупность методов (средств и способов), которые были применены

---

<sup>31</sup> *Попова А. А.* Методика судебно-экспертного исследования как один из видов методики // *Юридические науки.* 2018. № 4. С. 85–86.



при подготовке заключения эксперта по конкретному делу. Именно эти методы должны быть указаны в заключении эксперта (комиссии экспертов) в соответствии с требованиями ст. 25 Федерального закона «О государственной судебно-экспертной деятельности в Российской Федерации».

Под типовой методикой экспертного исследования следует понимать обобщенный опыт судебно-экспертной деятельности, методические рекомендации по решению типовых экспертных задач применительно к типичным объектам экспертизы.

«Типовая экспертная методика – методика, в которой выражен наиболее обобщенный опыт решения типовой, т. е. наиболее часто встречающийся в практике, экспертной задачи при производстве определенного вида экспертного исследования.

Исходя из изложенного, обратим внимание на то, что типовые методики экспертного исследования:

- позволяют сократить сроки производства экспертиз благодаря применению уже имеющихся научно обоснованных и апробированных методик экспертного исследования;
- обеспечивают создание единообразного подхода к решению типовых задач, благодаря чему сокращаются экспертные ошибки в заключениях;
- могут быть опорным материалом при решении сложных задач;
- служат материалом для обучения неопытных экспертов;
- помогают органам уголовного преследования, суда и сторон по делу при оценке заключения эксперта.

Так, чтобы экспертная методика получила статус типовой, она должна пройти этапы апробации и внедрения, а также утверждения соответствующим научно-методическим или научно-техническим ученым советом. Типовые экспертные методики обычно содержатся в методических рекомендациях, разрабатываемых и издаваемых ведущими судебно-экспертными учреждениями».

В этой связи особый интерес представляют методические рекомендации и методические руководства, разрабатываемые и утверждаемые уполномоченными федеральными государственными органами, а также ведущими судебно-экспертными учреждениями.

Так, МВД России в 2012 г. утвердило Методические рекомендации по организации деятельности подразделений Государственной инспекции безопасности дорожного движения Министерства внутренних дел Российской Федерации по техническому надзору<sup>32</sup>. В соответствии с данными Методическими рекомендациями, при проведении мероприятий по контролю сотрудниками осуществляется идентификация транспортного средства на предмет его соответствия данным паспорта транспортного средства и (или) регистрационного документа, а также при необходимости регистрационным и информационным учетам и устанавливается, в частности, соответствие конструкции транспортного средства, целостность конструкции или составляющей части конструкции транспортного средства, имеющей маркировочное идентификационное обозначение, в том числе наличие признаков кустарного демонтажа (сварные швы, следы прессовки или крепления иным способом) элементов (части) шасси, либо несущего каркаса кузова транспортного средства, а также принадлежности отдельных элементов (фрагментов) транспортных средств конкретной марке (модели, модификации) транспортного средства. При выезде на место совершения ДТП сотрудниками, в частности, устанавливаются соответствие конструкции транспортного средства, признаки целостности конструкции или

---

<sup>32</sup> Методические рекомендации по организации деятельности подразделений Государственной инспекции безопасности дорожного движения Министерства внутренних дел Российской Федерации по техническому надзору (утв. МВД России 19.12.2012 № 13/5-8042). [Электронный ресурс]. Доступ из справочно-правовой системы «Консультант-Плюс» (дата обращения: 10.12.2021).

составляющей части конструкции транспортного средства, имеющей маркировочное идентификационное обозначение, в том числе наличие признаков кустарного демонтажа (сварные швы, следы прессовки или крепления иным способом) элементов (части) шасси, либо несущего каркаса кузова транспортного средства, а также принадлежности отдельных элементов (фрагментов) транспортных средств конкретной марке (модели, модификации) транспортного средства.

Приказом Минюста РФ от 20.12.2002 № 346 утверждены Методические рекомендации по производству судебных экспертиз в государственных судебно-экспертных учреждениях системы Министерства юстиции Российской Федерации<sup>33</sup>, которые используются при определении возможных сроков производства судебных экспертиз и составлении заключения эксперта или комиссии экспертов в государственных судебно-экспертных учреждениях Минюста РФ.

Методическое руководство для экспертов и судей по исследованию недостатков легковых автомобилей отечественных моделей, находящихся в эксплуатации (одобрено научно-методическим Советом Российского Федерального центра судебной экспертизы при Минюсте России. Соответствует требованиям системы сертификации, основанным на положениях нормативных актов Минюста России по судебной экспертизе. Сертификат соответствия № 4/3)<sup>34</sup> устанавливает технические признаки существенных

---

<sup>33</sup> Приказ Минюста России от 20.12.2002 № 346 «Об утверждении Методических рекомендаций по производству судебных экспертиз в государственных судебно-экспертных учреждениях системы Министерства юстиции Российской Федерации». [Электронный ресурс]. Доступ из справочно-правовой системы «Консультант-Плюс» (дата обращения: 10.12.2021).

<sup>34</sup> Исследование недостатков легковых автомобилей отечественных моделей, находящихся в эксплуатации. Методическое руководство для экспертов и судей (одобрено Минюстом РФ). [Электронный ресурс]. Доступ из справочно-правовой системы «Консультант-Плюс» (дата обращения: 10.12.2021).

недостатков автомобилей (автотранспортных средств) – колесных транспортных средств категорий М1 отечественного производства, находящихся в эксплуатации, а также рекомендации по установлению данных недостатков. В приложении № 4 к данному методическому руководству содержатся «Методические рекомендации по исследованию недостатков антикоррозионной защиты сварных швов, стыков и фланцевых соединений».

Тем не менее представленных методических документов явно недостаточно для полноценного научно-методического обеспечения производства судебных экспертиз в рассматриваемой сфере. Учитывая небольшое число разработанных и утвержденных уполномоченными федеральными государственными органами, а также ведущими судебно-экспертными учреждениями методических документов, относящихся к сфере судебно-экспертных исследований сварных соединений промышленных зданий, сооружений и дорожно-строительных машин, значительное внимание должно уделяться изучению существующих и разработке новых научных методов судебно-экспертных исследований. Также внимание должно быть уделено изучению имеющихся научных методик исследования сварных соединений на предмет их возможного использования при производстве судебных экспертиз.

## Глава 2

# ВИДЫ ДЕФЕКТОВ

Под термином «дефект» понимают недопустимое отклонение от требований, установленных нормативно-технической документацией (НТД).

В зависимости от происхождения дефекты можно подразделить:

- на производственно-технологические (металлургические, литейные, вследствие прокатки и т. п.);
- технологические, возникающие при изготовлении и ремонте изделий (сварке, механической, термической и других видах обработки);
- эксплуатационные, возникающие после определенной обработки изделия в результате усталости металла, коррозии, износа и т. д., а также неправильного технического обслуживания и эксплуатации [2, 8, 20, 82].

Наиболее опасными являются дефекты типа нарушения сплошности, которые возникают на разных стадиях технологического процесса:

- в процессе плавки и литья (раковины, поры, горячие трещины, включения и т. д.);
- обработки металлов давлением (внутренние и поверхностные трещины, расслоения, закаты, флокены и т. д.);
- термической и химико-термической обработок (ХТО) (термические трещины и т. п.);
- механической обработки (шлифовочные трещины, прижоги);

- сварки (непровар, трещины, поры и т. д.);
- эксплуатации и хранения (усталостные трещины, коррозионные поражения и т. д.).

Основным технологическим процессом, применяющимся при изготовлении строительных конструкций, является сварка, поэтому эксплуатационная надежность и экономичность МК в первую очередь определяется качеством сварных соединений [22, 40, 115, 121].

Наличие в них дефектов может привести к нарушению надежности, герметичности, прочности и других эксплуатационных характеристик, к разрушению отдельных швов или всей конструкции в процессе ее изготовления, монтажа или эксплуатации [111].

Количество дефектов в сварных соединениях зависит от правильности выбранной технологии сварки, пригодности используемых материалов, точности сборки и подготовки стыков под сварку, квалификации сварщика, технического состояния оборудования и оснастки, условий эксплуатации, а также других факторов.

## 2.1. Классификация сварочных дефектов

В сварочном производстве принято различать дефекты подготовки и сборки под сварку и сварочные дефекты [30, 31, 123].

Характерными дефектами подготовки и сборки под сварку являются:

- непостоянство зазора между кромками по длине стыкуемых элементов;
- неправильный угол скоса кромок в швах с *V*-, *X*- и *U*-образной разделкой кромок;
- несовпадение стыкуемых плоскостей;

- большое или малое притупление по длине стыкуемых кромок;

- расслоение и загрязнения на кромках и т. п.

Причины подобных дефектов – ошибки в чертежах, неисправности станков и приспособлений для сборки, недоброкачество исходных материалов, а также низкий уровень квалификации работников и культуры производства.

В зависимости от причин возникновения сварочные дефекты можно разделить на две группы.

К первой группе относятся дефекты, связанные с металлургическими, термическими и гидродинамическими явлениями, происходящими в процессе образования, формирования и кристаллизации сварочной ванны и остывания сварного соединения. Это горячие и холодные трещины в металле шва и околошовной зоне, поры, шлаковые включения, зоны несплавления, неблагоприятные изменения свойств металла шва и зоны термического влияния (ЗТВ).






Ко второй группе дефектов относятся дефекты формирования шва: несоответствие швов расчетным размерам, непровары, подрезы, прожоги, наплывы, незаваренные кратеры и др. Происхождение этих дефектов связано в основном с нарушениями технологии сварки, сборки, неисправностями оборудования, низкой квалификацией сварщиков и т. п.

По месту расположения дефекты бывают наружными и внутренними. Наружные дефекты, в отличие от внутренних, могут быть обнаружены внешним осмотром. К наружным дефектам относятся нарушение установленной формы и размеров шва, подрезы, прожоги, наплывы, внешняя пористость, незаваренные кратеры, шлаковые включения и трещины на поверхности шва. К внутренним дефектам относятся поры, неметаллические включения, непровары, пережог и перегрев металла шва, а также внутренние трещины.

Основные виды дефектов сварных соединений в соответствии с [37, 77, 90, 93] и способы их устранения приведены в табл. 1.


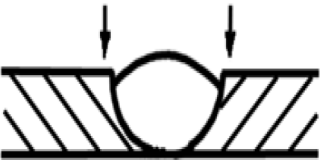

Таблица 1

**Основные виды дефектов сварных соединений**

Эскиз дефекта	Вид дефекта	Способ устранения
	Продольная и поперечная трещины	Выборка дефектного участка с последующей подваркой
	Трещина в шве на остающейся подкладке	То же
	Непровар в корне шва	То же
	Непровар между слоями	То же
	Поры	То же



Окончание табл. 1

Эскиз дефекта	Вид дефекта	Способ устранения
	Шлаковые включения	Выборка дефектного участка с последующей подваркой
	Подрезы	Подварка после предварительной зачистки
	Наплыв	Зачистка абразивным инструментом; при необходимости – подварка

## 2.2. Дефекты формирования сварного шва

*Нарушение формы и размеров сварного шва.* Форма и размеры сварных швов обычно зависят от толщины свариваемого металла и задаются техническими условиями, указываются на чертежах и регламентируются стандартами [56, 96, 129, 134]. В частности, при сварке плавлением регламентируют:

- для стыковых швов ширину шва, высоту выпуклости и глубину проплавления;
- для угловых – катет шва и высоту рабочего сечения.

*Вогнутость или чрезмерная выпуклость шва.* Вогнутость корня шва – небольшая канавка со стороны корня одностороннего сварного шва, образовавшаяся вследствие усадки.

Превышение выпуклости стыкового шва – избыток наплавленного металла на лицевой стороне стыкового шва сверх установленного значения.

Для обеспечения нормальной работы конструкции стыковые швы должны иметь небольшую выпуклость (1...3 мм) с плавными очертаниями (рис. 1, а). Избыточная выпуклость приводит к концентрации напряжений и снижению работоспособности сварного соединения, особенно в конструкциях из легированных сталей и при отрицательной температуре. Поэтому для ответственных изделий в технических условиях (ТУ) на изготовление указываются допуски на размеры швов.

*Неровная поверхность (грубая чешуйчатость) и неравномерная ширина шва* (рис. 1, б, в) обычно наблюдаются при сварке в монтажных условиях вследствие стекания жидкого металла под действием сил тяжести, нестабильности горения дуги. К числу дефектов геометрической формы можно отнести также неравномерность и несимметричность сварных швов.

Неровная поверхность – грубая неравномерность формы поверхности усиления шва по длине.

Неравномерность усиления по длине шва получается при ручной сварке из-за недостаточной квалификации сварщика, неудовлетворительного качества электродов и неправильных приемов приварки прихваток. При автоматической сварке эти дефекты встречаются редко и являются следствием неполадок в механизме, регулирующем скорость сварки.

Неравномерная ширина шва – отклонение ширины от установленного значения вдоль сварного шва. Швы неравномерной ширины получаются в результате отклонений от заданного зазора кромок при сборке или неправильных движениях электрода

при ручной сварке. При автоматической сварке под слоем флюса этот дефект образуется при нарушении скорости подачи проволоки, скорости сварки, стабильности горения дуги и т. д.

Распространенным дефектом сварки является непровар, который уменьшает сечение шва и является концентратором напряжений. Отрицательное влияние на прочность оказывают узкие глубокие непровары.

*Непровар* – это несплавление основного металла по всей длине шва или на участке, возникающее вследствие неспособности расплавленного металла проникнуть в корень соединения.

Образованию непровара способствуют:

- плохая зачистка кромок свариваемых деталей от ржавчины, окалины, краски, масла шлака и других загрязнений;
- чрезмерная скорость сварки, в результате чего свариваемые кромки не успевают расплавиться;
- смещение электрода в сторону одной из свариваемых кромок, вследствие чего расплавленный металл натекает на другую нерасплавленную кромку, прикрывая непровар;
- плохое качество основного металла, электродов, флюсов и т. д.;
- неустойчивый режим сварки;
- применение электродов из легкоплавкого металла, вследствие чего жидкий металл затекает на наплавленные свариваемые кромки.

Причинами образования непровара в корне шва, кроме перечисленных, могут быть:

- недостаточный зазор между кромками свариваемых деталей;
- недостаточный угол скоса кромок и большая величина их притупления;
- большой диаметр применяемого электрода или присадочной проволоки, что сильно затрудняет расплавление основного металла.

Образование непровара между отдельными слоями многослойного шва возникает по следующим причинам:

- недостаточная тепловая мощность (излишне длинная или короткая дуга, малый сварочный ток);
- неполное удаление шлака с образовавшегося при наложении предыдущего валика.

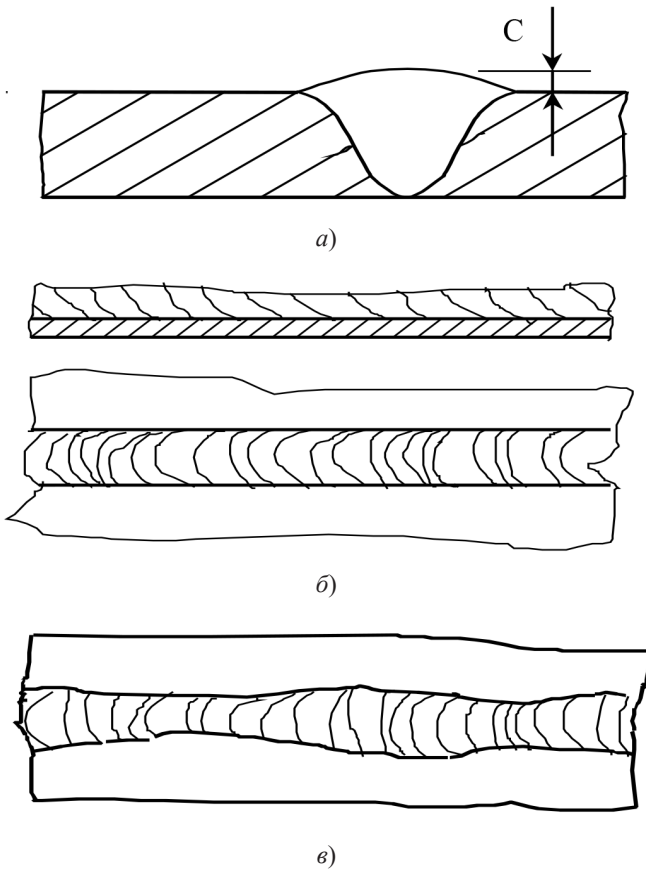


Рис. 1. Дефекты сварных соединений: а – усиление шва; б – грубая чешуйчатость; в – неравномерная ширина шва

*Подрез* непрерывный – углубление продольное на наружной поверхности валика сварного шва, образовавшееся при сварке.

Подрез представляет собой дефект в виде острого конусообразного углубления на границе поверхности сварного шва с основным металлом. Подрезы возникают при повышенном напряжении на дуге, увеличенном токе, неправильном положении электрода или изделия в процессе сварки. Подрезы уменьшают сечение основного металла вблизи линии сплавления, поэтому прочность сварного соединения в этом месте значительно снижается.

В околошовной зоне они действуют как концентраторы напряжения, однако на прочность и пластические свойства они оказывают значительно меньшее влияние, чем трещины и непровары. Наиболее опасны подрезы в конструкциях из высокопрочных сталей, чувствительных к концентраторам напряжений. Подрезы, превышающие допустимые нормы, сглаживают механическим путем (фрезерование, шлифование) или заваривают дуговой сваркой при пониженных значениях тока. При вибрационных нагрузках подрез существенно снижает прочность сварного соединения. Следует отметить, что отрицательное действие подреза менее значительно, чем наличие в сварных швах трещин и непроваров.

*Наплав* (наплыв) – избыток наплавленного металла сварного шва, натекающий на поверхность основного металла, но не сплавленный с ним.

Напльвы опасны в изделиях, работающих при знакопеременных или пульсирующих нагрузках, в условиях высокочастотной вибрации. Участки несплавления в этом случае становятся местами зарождения усталостных трещин.

Причинами образования напльвов являются:

- неправильно выбранный режим (например, сварка плавящимся электродом на большом токе с большой скоростью, при

которой образование наплыва происходит в результате соприкосновения металла электрода с холодным основным металлом);

- плохая очистка основного металла;
- неправильно выбранное положение изделия в пространстве;
- смещение электродной проволоки при сварке кольцевых швов под флюсом.

*Прожоги* – вытекание металла сварочной ванны, в результате которого образуется сквозное отверстие в сварном шве.

Прожоги образуются при сварке металла небольшой толщины. Наиболее вероятно образование прожогов при однопроходной сварке стыковых соединений «на весу», стыковых соединений на подкладках и при сварке нахлесточных и тавровых соединений.

Причинами возникновения прожогов могут быть:

- избыточная сила тока, что приводит к возрастанию объема расплавленного металла в сварочной ванне и его вытеканию;
- большие зазоры между соединяемыми элементами, неплотное прилегание подкладки с обратной стороны сварного шва.

Прожоги являются недопустимыми дефектами, и места их расположения должны быть тщательно зачищены и заварены вновь.

*Кратер* – усадочная раковина в конце валика сварного шва, не заваренная до или во время выполнения последующих проходов.

Кратер представляет собой дефект в виде полости или впадины, образовавшийся при усадке расплавленного металла при затвердевании (располагается, как правило, в местах обрыва дуги или окончания сварки). В кратере в результате объемной усадки металла, при его кристаллизации часто возникают «паучки» трещин, которые при эксплуатации могут явиться началом разрушения изделий. Поэтому в конце процесса сварки рекомендуется выводить кратер на технологические планки или заканчивать шов на заваренном ранее участке (например, при сварке кольцевых швов).

Для заплавления кратера следует в конце сварки плавно увеличивать длину дуги или постепенно снижать ток. При изготовлении особо ответственных изделий кратеры удаляют механическим путем с полировкой металла и контролем на отсутствие трещин.

### **2.3. Дефекты металлургического, гидродинамического, термодинамического происхождения**

К этой группе дефектов относят горячие (кристаллизационные) и холодные трещины, поры, шлаковые включения. Наиболее опасным, недопустимым дефектом в сварных соединениях являются трещины [123].

*Трещина сварного соединения* – это несплошность, вызванная местным разрывом шва, которая может возникнуть в результате охлаждения или действия нагрузок [37]. Трещины могут располагаться:

- в металле сварного шва;
- на границе сплавления;
- в зоне термического влияния;
- в основном металле.

Трещины могут:

- быть ориентированы параллельно оси сварного шва (продольная трещина);
- быть ориентированы поперек оси сварного шва (поперечная трещина);

- радиально расходиться из одной точки (радиальная трещина).

Трещины могут быть отдельными и разветвленными.

Образованию трещин способствуют следующие факторы:

- сварка легированных сталей в жестко закрепленных конструкциях;

- высокая скорость охлаждения при сварке углеродистых сталей;
- использование повышенных плотностей сварочного тока при наложении первого слоя многослойного шва на толстостенные сосуды и изделия;
- недостаточный зазор между кромками деталей при электрошлаковой сварке;
- очень глубокие и узкие швы при автоматической сварке под флюсом;
- выполнение сварки при низких температурах.

*Горячие кристаллизационные трещины* зарождаются при высокой температуре в процессе кристаллизации шва и развиваются при остывании металла. Эти трещины распространяются по границам кристаллов (зерен) металла шва и носят межкристаллитный характер. Они бывают продольными и поперечными по отношению к оси шва.

Основными факторами, способствующими образованию кристаллизационных трещин, является влияние:

- химического состава металла шва;
- формы сварочной ванны;
- растягивающих напряжений;
- размера первичных кристаллитов в шве.

Стойкость металла сварного шва против образования кристаллизационных трещин напрямую зависит от его химического состава и содержания в нем вредных примесей.

*Сера* – одна из наиболее вредных примесей, так как резко снижает стойкость металла шва против образования кристаллизационных трещин. В шов сера попадает из основного и присадочного материалов, а также из электродных покрытий и флюсов. Практический интерес представляет применение флюсов и электродных покрытий, при которых сера из сварочной ванны переходит в шлак.



*Фосфор*, как и сера, относится к вредным примесям. Он уменьшает стойкость металла шва против кристаллизационных трещин из-за образования легкоплавких эвтектик. Кроме того, его наличие в металле шва приводит к снижению ударной вязкости, особенно при пониженных температурах. Растворимость фосфора в аустените меньше, чем в феррите, поэтому фосфор очень опасен при сварке аустенитных (нержавеющих и жаропрочных) сталей.

*Углерод* определяет структуру, а следовательно, и свойства сварного шва. Он оказывает отрицательное влияние на стойкость шва против образования трещин, так как усиливает вредное действие серы, способствуя образованию по границам зерен легкоплавких карбидных пленок. С уменьшением содержания углерода в шве стойкость против образования трещин повышается (рис. 2), поэтому при сварке сталей применяют электроды и присадочную проволоку с пониженным содержанием углерода, хотя это снижает прочность шва и в целом сварного соединения.

*Марганец* оказывает двойное влияние на образование кристаллизационных трещин: при небольшом содержании он повышает стойкость против образования трещин, при значительном (свыше 4 %) – способствует возникновению трещин.

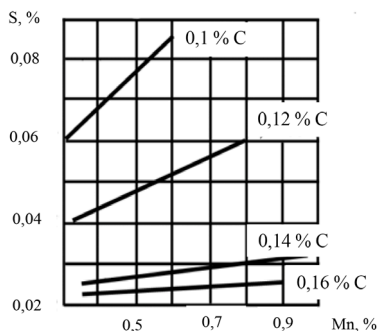


Рис. 2. Совместное влияние серы, углерода и марганца на стойкость швов против кристаллизационных трещин (выше линии – трещины в шве есть, ниже линии – трещин нет)

При сварке углеродистых, низколегированных и хромоникелевых аустенитных сталей марганец способствует предотвращению кристаллизационных трещин, уменьшая вредное влияние серы.

Кремний увеличивает склонность металла к образованию кристаллизационных трещин, но в углеродистых и низколегированных сталях его содержание в пределах 0,15...0,6 % мало влияет на стойкость против кристаллизационных трещин.

Таким образом, средством для повышения стойкости металла сварного шва против образования кристаллизационных трещин является уменьшение в нем вредных и увеличение полезных элементов.

Изменение режимов сварки ведет к изменению формы сварочной ванны, а следовательно, и формы шва, что приводит к изменению направления роста столбчатых кристаллов и характера их срастания. Конфигурация шва характеризуется коэффициентом формы шва  $\psi$ , представляющим собой отношение ширины шва  $b$  к глубине проплавления  $h$  (рис. 3):

$$\psi = b / h. \quad (1)$$

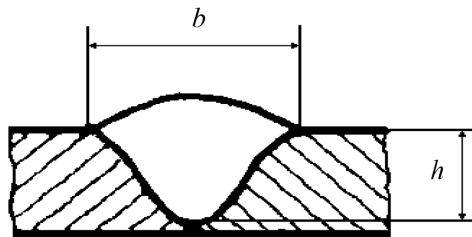


Рис. 3. Конфигурация шва

При узком шве и глубоком проваре ( $\psi = 0,8 \dots 1,2$ ) кристаллиты растут навстречу друг другу и срастаются под углом, близким к  $180^\circ$ . При этом в зоне срастания образуется легкоплавкая

эвтектика, способствующая возникновению кристаллизационных трещин. При чашеобразной форме провара ( $\psi = 1,3 \dots 5,0$ ) кристаллиты растут под острым углом друг к другу и легкоплавкие составляющие более равномерно распределяются по сечению шва. При широком шве и небольшой глубине провара ( $\psi > 5$ ) кристаллиты растут параллельно друг другу и, не встречаясь, выходят на поверхность шва.

Зависимость между содержанием углерода в стали и коэффициентом формы шва (рис. 4) показывает, что наиболее благоприятной для стойкости против образования кристаллизационных трещин является чашеобразная форма шва, т. е. когда кристаллиты сростаются под острым углом друг к другу.

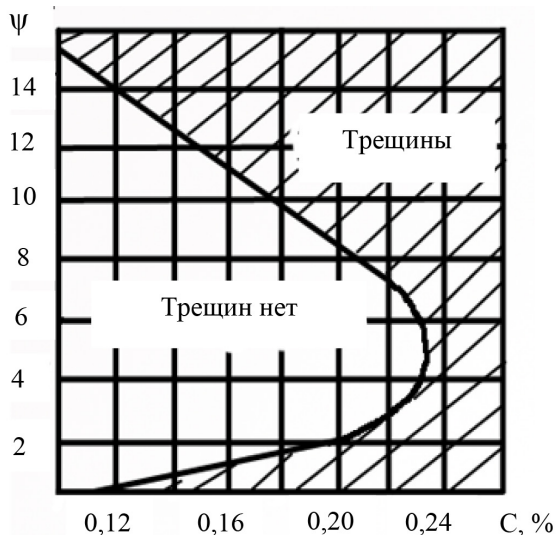


Рис. 4. Зависимость между содержанием углерода и коэффициентом формы шва

*Влияние растягивающих напряжений.* Снижение растягивающих напряжений и, как следствие этого, уменьшение веро-

ятности образования кристаллизационных трещин может быть достигнуто за счет конструктивных мер:

- уменьшения количества и рассредоточения сварных швов;
- устранения излишней жесткости узлов;
- выбора оптимальной разделки кромок.

К технологическим мерам относятся:

- предварительный подогрев свариваемых изделий;
- рациональная последовательность наложения сварных швов;
- выбор рациональных способов и режимов сварки, способствующих уменьшению напряжений.

Температура предварительного подогрева, при которой исключается образование кристаллизационных трещин, зависит от химического состава металла шва, конструкций и сечения свариваемых заготовок и других факторов. Обычно она составляет 150...500 °С. При увеличении содержания углерода в шве необходимая температура подогрева повышается (рис. 5).

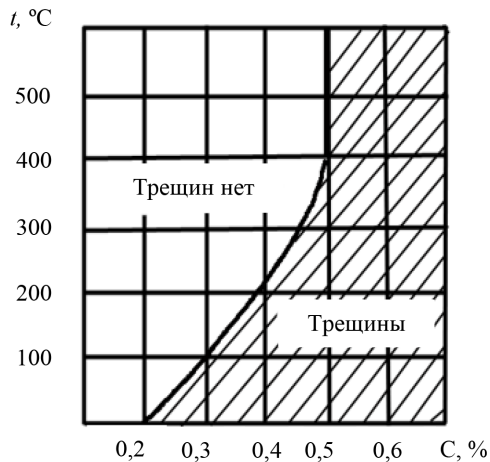


Рис. 5. Зависимость температуры предварительного подогрева от концентрации углерода в металле сварного шва

*Влияние размера зерен в сварном шве.* Мелкозернистая структура металла шва повышает стойкость против образования кристаллизационных трещин.

Для получения мелкозернистой структуры требуется:

- повышение скорости сварки;
- снижение силы сварочного тока;
- увеличение числа слоев в сварном шве;
- колебание электрода и металла сварочной ванны;
- применение ультразвука (УЗ) в процессе кристаллизации металла сварочной ванны;
- изменение формы провара шва (при ручной и электрошлаковой сварке коэффициент формы провара должен находиться в пределах 2,5...5, при сварке под флюсом – 1...2).

*Холодные трещины* образуются в сварных соединениях при остывании до невысоких температур, как правило, ниже 240 °С. Наиболее часто эти трещины образуются в сварных соединениях из средне- и высоколегированных сталей перлитного и мартенситного классов, т. е. в сталях, восприимчивых к закалке. Намного реже – в соединениях из низколегированных ферритно-перлитных сталей и высоколегированных сталей аустенитного класса.

Основными причинами возникновения холодных трещин в сварном шве или околошовной зоне являются образование закалочных структур и наличие водорода в металле шва. Образование закалочных структур происходит при высоких скоростях охлаждения сварного шва, что приводит к возникновению внутренних сварочных напряжений вследствие образования мартенсита.

Разрушение металла и образование трещин при сварке также происходит вследствие диффузии водорода в околошовную зону, его превращения в молекулярный водород и создания в результате этого избыточного давления.

При дуговой сварке наиболее распространенным дефектом являются *поры*. *Газовая пора* – газовая полость обычно сферической формы.

Поры могут располагаться:

- равномерно в металле сварного шва (равномерно распределенная пористость);
- группой газовых полостей (три или более), расположенных кучно с расстоянием между ними менее трех максимальных размеров большей из полостей (скопление пор);
- рядом газовых пор, расположенных в линию, обычно параллельно оси сварного шва, с расстоянием между ними менее трех максимальных размеров большей из пор (цепочка пор).

Причинами образования пор являются:

- использование отсыревших материалов (электродов, флюса, защитных газов);
- загрязненность кромок свариваемых изделий;
- недостаточная защита сварного шва при сварке в среде углекислого газа;
- высокая скорость сварки.

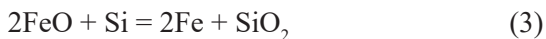
Основной причиной пористости при сварке сталей является выделение растворенных в жидком металле водорода, азота и окиси углерода. Для борьбы с пористостью необходимо предотвращать попадание газов в металл шва, что достигается обеспечением надежной защиты зоны сварки от проникновения воздуха (предотвращение попадания кислорода и азота), очисткой основного и присадочного металла от ржавчины (предотвращение попадания влаги и окислов), просушкой сварочных материалов (электродов, флюсов, защитных газов). Использование химических мер предусматривает применение защитных газов с добавками кислорода. В этом случае процесс сварки менее чувствителен к наличию влаги в зоне сварки, так как кислород, соединяясь с водородом в нерастворимый гидроксил  $\text{ОН}$ , предотвращает растворение водорода в металле.

Однако большое количество кислорода в сварном шве, в случае применения аргона с добавками кислорода или углекислого

газа, может увеличить пористость. Это связано с интенсификацией протекания в жидком металле реакции окисления углерода растворенным кислородом:



При этом образуется нерастворимая в металле окись углерода, выделяющаяся из жидкой ванны в виде пузырьков. Для подавления этой реакции в сварочную проволоку добавляют в качестве раскислителей марганец и кремний в качестве более активных, чем железо, элементов. При этом они связывают кислород в нерастворимые окислы марганца и кремния и всплывают в виде шлака на поверхность сварочной ванны:



Поры могут располагаться по оси сварного шва, по всему сечению сварного шва, а также вблизи линии сплавления. При электродуговой сварке поры могут быть как внутри сварного шва, так и выходить на поверхность. Поры, выходящие на поверхность шва, называют свищами.

*Свищ* – трубчатая полость в металле сварного шва, вызванная выделением газа. Форма и положение свища определяются режимом затвердевания и источником газа. Обычно свищи группируются в скопления и распределяются «елочкой».

Равномерная пористость (рис. 6, а) обычно появляется при следующих постоянно действующих факторах:

- загрязненность кромок основного металла (ржавчина, масло и т. д.);
- переменная толщина покрытия электрода и др.

На образование скоплений пор (рис. 6, б) существенное влияние оказывают местная загрязненность свариваемых кромок,

отклонения от заданного режима сварки, обрыв дуги или значительные изменения длины дуги.

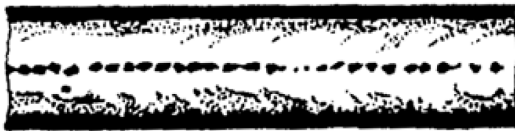
Цепочки пор (рис. 6, в) образуются при загрязненности кромок изделий (ржавчина), при подсосе воздуха в зазор между кромками и при подварке корня сварного шва некачественными электродами. Одиночные поры возникают при воздействии случайных факторов. В швах стыковых соединений из низкоуглеродистых и аустенитных сталей количество отдельных пор невелико. Их число, вид и характер распределения зависят от вида сварки и уровня производства.



а)



б)



в)

Рис. 6. Характер пористости в наплавленном металле:  
а – равномерная пористость; б – скопление пор; в – цепочки пор

*Шлаковое включение* – шлак, попавший в металл сварного шва. В зависимости от условий образования такие включения могут быть линейными, разобщенными и прочими.



Шлаковые включения возникают в результате сварки изделий с загрязненными кромками (ржавчина, окалина, грязь) и недостаточного удаления шлака при многослойной сварке. Образованию шлаковых включений также способствуют высокая скорость сварки и повышенная длина дуги.

Шлаковые включения могут иметь разнообразную форму: круглую, плоскую, в виде плоской пленки или продолговатую. В отличие от пор они имеют больший размер и более вытянутую форму, вследствие чего более направленно отражают ультразвуковые волны и поэтому лучше обнаруживаются.

Наиболее типичные дефекты сварных соединений, полученные при сварке плавлением, и методы их выявления приведены в табл. 2. Дефекты сварных соединений при контактной сварке и методы их выявления приведены в табл. 3.

Таблица 2

**Дефекты сварных соединений при сварке плавлением**

Дефект	Характеристика дефектов	Методы выявления
Сечение сварного шва	Занижены размеры – уменьшаются прочность соединения; ослабленные швы снижают прочность соединения; чрезмерное усиление шва – повышенный расход присадочного материала, повышение внутренних напряжений	Визуальный, замеры с применением мерительного инструмента
Незаваренные кратеры	Очаги образования трещин – концентраторы напряжений	Визуальный
Подрезы	Концентраторы напряжений уменьшают рабочее сечение сварного шва, снижают прочность, могут быть причиной разрушений сварных соединений	Визуальный и металлографические исследования

Дефект	Характеристика дефектов	Методы выявления
Прожоги	Возникают при сварке тонких элементов соединения и при первом проходе многослойных швов	Визуальный
Поры	Единичные или в виде скопления (цепочки пор); снижают прочность, способствуют разрушению соединения	Визуальный (поверхности и излома шва), радиационные, магнитные
Шлаковые включения	Макроскопические включения: вызывают концентрацию напряжений, снижают прочность сварных швов	Визуальный (излома шва), металлографические исследования, рентгеновский и др.
Непровары	Создают концентрацию напряжений, снижают прочность соединения	Визуальный, рентгеновский и др.
Трещины	Могут быть в металле шва и в околошовной зоне, резко снижают пластические свойства сварных соединений	Визуальный, радиационный, ультразвуковой и др.
Вогнутость корня	Уменьшается сечение шва, снижается прочность соединения	Визуальный, рентгеновский
Свищи	Несквозные углубления в сварочном шве ослабляют сечение сварного шва	Визуальный
Брызги металла	Загрязнение поверхности детали в месте сварки	То же
Наплывы	Являются местами концентраций напряжений, снижают прочность соединения	То же
Несплошность	Являются концентратором напряжений в месте перехода	То же

Таблица 3

**Дефекты сварных соединений при контактной сварке**

Дефект	Внешние характеристики дефекта	Методы выявления
<i>Стыковая сварка</i>		
Пережог, перегрев	Чрезмерный разогрев детали (определяется по зоне цветов побежалости), раковины, трещины, крупнозернистая структура	Визуальный
Непровар	Расслоение в виде полоски на выдавленном металле, малая зона нагрева, пленка оксидов по поверхности излома стыка	Визуальный, УЗ-метод, металлографические исследования
Трещины и рыхлоты	Кольцевые и продольные трещины, выходящие на поверхность и скрытые	То же плюс магнитные исследования
<i>Точечная сварка</i>		
Непровар	Отсутствует или слишком мала зона цветов побежалости, отсутствует вмятина	Визуальный, ультразвуковой методы, металлографические исследования
Пережог	Большая глубокая вмятина, значительная зона цветов побежалости, грубая поверхность, сильное окисление, краевой наружный выплеск, раковины, трещины, выплески	Визуальный, ультразвуковой и рентгеновские
Трещины при сварке закаливающихся сталей	Во вмятине видны трещины, расходящиеся в виде паутины или в виде серпа по окружности точки	Визуальный, магнитный или ультразвуковой

## 2.4. Эксплуатационные дефекты

### 2.4.1. Влияние условий эксплуатации

К условиям эксплуатации строительных металлических конструкций обычно относят нагрузки, температуру, среду, с которой соприкасается сварное соединение, и время, в течение которого происходит действие перечисленных факторов [14].

Условия эксплуатации влияют главным образом на выбор материала, тип сварного соединения, способ сварки и послесварочную обработку сварных конструкций. Применяемые нагрузки оказывают значительное влияние на условия эксплуатации.

Нагрузки различают по скорости их приложения и по продолжительности действия. Для статической нагрузки характерно относительно медленное ее приложение. Многократные статические нагрузки, следующие с частотой не более одного нагружения в секунду, условно относят к повторно-статическим.

Более частые нагрузки, естественно, осуществляются с более высокой скоростью и меньшей продолжительностью действия в одном цикле. Нагрузки могут быть созданы как внешними воздействиями, например силами, так и собственными деформациями, например при неравномерных нагревах и структурных превращениях. Внешние воздействия, как правило, характеризуют значениями сил и значительно реже уровнем перемещений.

В сочетании с формой сварных соединений и элементов конструкций нагрузки образуют сложные распределения напряжений, от которых в большинстве случаев зависят прочность и работоспособность сварных соединений.

На одно из первых мест по силе влияния следует поставить циклический характер нагрузок, особенно при большом числе циклов.

Ударные нагрузки относят также к числу наиболее тяжелых режимов работы сварных конструкций. Многие стали чувствительны к увеличению скорости приложения нагрузок в области умеренно низких или даже положительных температур, в особенности при наличии концентраторов напряжений. Это предопределяет необходимость выбора металла с учетом термической обработки до и после сварки, достаточно плавных форм сварных соединений, повышенных норм контроля сварных соединений и самого металла.

Большие сжимающие нагрузки требуют создания устойчивых форм сварных конструкций. Тип сварных соединений в этом случае особой роли не играет. На первый план выступают толщина применяемого металла и формы конструктивных элементов, которые должны обеспечить по возможности более высокие рабочие напряжения, близкие к пределу текучести металла.

На необходимость учета температурного фактора существенно влияют механические характеристики применяемых металлов и сплавов. Зависимость прочности от температуры схематично показана на рис. 7 двумя линиями: линией 1, соответствующей прочности гладкого образца, и линией 2, относящейся к образцу с острым надрезом. Левая часть кривой 2 относится к так называемой низкотемпературной хрупкости, когда металл очень чувствителен к концентрации напряжений. В области, где эта хрупкость отсутствует, прочности гладкого и надрезанного образцов примерно одинаковы. При продолжительном действии температуры и нагрузки проявляется ползучесть металла и прочность определяется пределом длительной прочности  $\sigma_{дл}$  (кривая 3).

При этом прочность конструктивных элементов, имеющих концентрацию напряжений, выразится кривой 4. В соответствии с рис. 7 различают три характерные температурные области работы конструкций: область I – низкотемпературную (которая в общем случае может простирается и в область положительных

температур), область II, где выраженная хрупкость и ползучесть отсутствуют, и область III, в которой рассматривается жаропрочность металла.

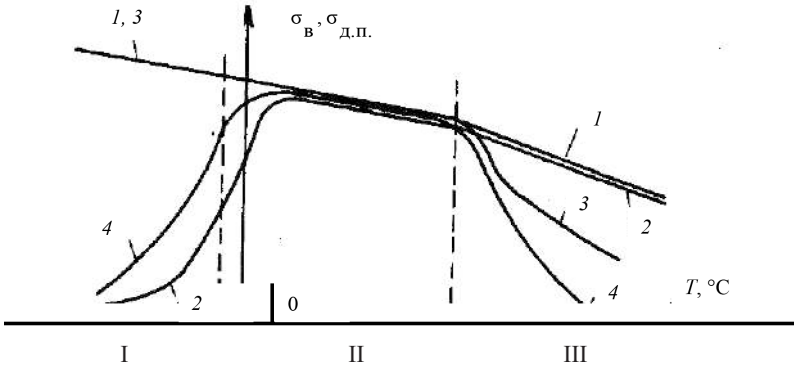


Рис. 7. Зависимость прочности от температуры:

- 1 — гладкий образец, кратковременное действие нагрузки;
- 2 — образец с острым концентратором при кратковременном приложении нагрузки;
- 3 — гладкий образец, длительное действие нагрузки;
- 4 — образец с надрезом, медленное и длительное приложение нагрузки

Область низких температур диктует свои требования в отношении выбора металла из-за возможности отрицательного проявления низкотемпературной хрупкости. В области низких климатических температур (до  $-60 \dots -80 \text{ }^\circ\text{C}$ ) удается обеспечить достаточно хорошую работоспособность сварных конструкций на основе применения сталей с невысокой степенью легирования, но, как правило, термически обработанных. Для диапазона умеренно низких температур (до  $-20 \dots -30 \text{ }^\circ\text{C}$ ) при соответствующих видах соединений и конструктивных формах возможно применение дешевых конструкционных материалов. При криогенных температурах, как правило, необходимо использовать специальные стали и цветные сплавы, а также соответствующие им способы сварки.

Воздействие фактора среды также крайне многообразно. Оно может иметь отрицательные последствия даже при отсутствии нагрузок, вызывая, например, коррозию металлов, что в сочетании с нагрузками может привести к коррозионному растрескиванию и усталости. Значительное влияние на выбор металла оказывает характер агрессивной среды [75]. Нередко требуется применение термической обработки после сварки.

#### ***2.4.2. Внутренние сварочные напряжения***

В процессе сварки в изделии возникают внутренние сварочные напряжения. Когда их значения достигают предела текучести, происходит пластическая деформация, приводящая к изменению размеров и формы изделия, т. е. к короблению.

Пластические деформации в металлических конструкциях возникают при нагрузках в тех случаях, когда локальные или общие напряжения значительно превышают предел упругости материала. Происхождение дефектов может быть самым разнообразным:

- потеря устойчивости сжатых стержней металлоконструкции;
- удары, вмятины, погнутости при авариях и нарушениях правил эксплуатации, транспортировки или монтажа конструкций;
- локальные области конструкций с большими коэффициентами концентрации напряжений;
- дефекты проката металла и др.

Обнаружение пластических деформаций в металлоконструкциях легко осуществляется визуально. Измерения деформаций, таких как прогиб, выпучивание и волнистость плоских поверхностей, скручивание балок и стержней, спиральная изогнутость, могут осуществляться с помощью простых приспособлений и приборов (линейки, угольники, щупы, струны, уровни, скобы, рейсмусы). Для повышенной точности, особенно при измерении

ях элементов большой протяженности, применяются оптические инструменты (лазерные визиры, лазерные дальномеры и т. д.).

Деформации элементов ферменных конструкций возникают в результате эксцентричного приложения сжимающих усилий, при этом несущая способность элемента значительно снижается.

Совместное действие растягивающих напряжений, дефектов с острыми краями и структуры, склонной к образованию трещин, является вполне достаточным для разрушения изделия. Для предотвращения хрупкого разрушения достаточно исключить хотя бы один из этих факторов, например правильно выбрать марку металла, который тормозил бы развитие дефекта. Так, появившаяся трещина в области мартенситной структуры тормозится при переходе в зону пластичного феррита, обладающего равноосными зернами. При этом превышение критических размеров трещиной, развивающейся из области сварного шва, создает напряжения, приводящие к разрушению. Поэтому при формулировании требований к контролирующей аппаратуре, установлении порогов выявляемости дефектов следует знать, как работает изделие, какие остаточные и нагрузочные напряжения возникают в сварных соединениях [117].

Остаточные напряжения вызываются не только упругопластическими деформациями при образовании сварных швов, но также возникают и в процессе нагружения изделия при эксплуатации, и при наложении ремонтных швов.

Ранее было показано, что образующиеся дефекты являются концентраторами напряжений, последние же могут принимать различные значения (при одних и тех же дефектах) в зависимости от знака остаточных напряжений (растягивающих или сжимающих) при циклических нагрузках.

В работе [120] исследовалось изменение остаточных напряжений у концентраторов в процессе циклического нагружения образцов. На рис. 8 видно, что с увеличением числа циклов



переменного нагружения наблюдается снижение остаточных растягивающих и сжимающих напряжений.

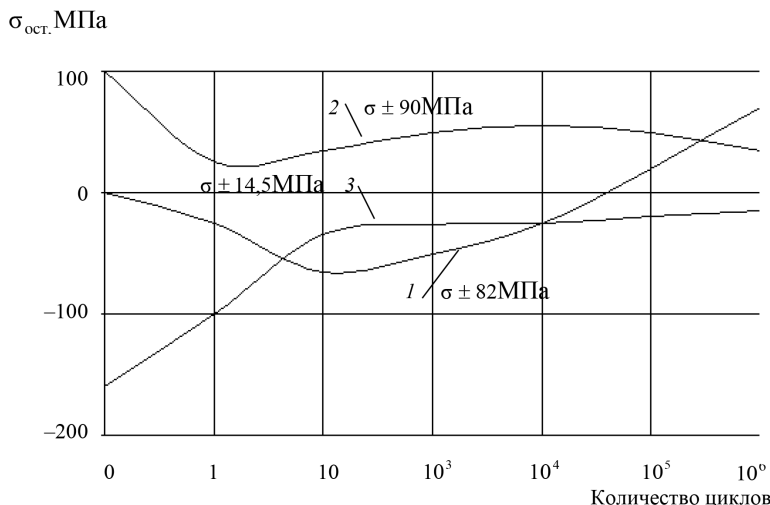


Рис. 8. Изменение остаточных напряжений у концентраторов в процессе циклического нагружения образцов: 1 – без остаточных напряжений; 2 – с начальным остаточным напряжением растяжения; 3 – с начальным остаточным напряжением сжатия

Вид соединений и величина нагружения влияют на уровень остаточных напряжений после их перераспределения. Особенно чувствительны к знакопеременным изменениям этих напряжений стыковые и нахлесточные сварные соединения.

Проведенные исследования показали [4], что остаточные напряжения могут существенно изменять сопротивление усталости сварных соединений как на стадии образования, так и на стадии развития усталостной трещины. Для исследований использовалась низколегированная сталь с  $\sigma_{в} = 500$  МПа и  $\sigma_{т} = 350$  МПа. Перед экспериментом для двух типов образцов посредством глубокого отжига снимались напряжения и затем на образцы наплавкой

наносились валики, создавшие растягивающие 2 и сжимающие 3 остаточные напряжения.

Испытания проводились при однозначной пульсирующей нагрузке, вызывающей максимальные начальные напряжения  $\sigma_{\text{н}} = 150$  МПа, что значительно меньше предела текучести.

На рис. 9 показаны кривые развития трещины в районе сверления в трех типах образцов.

Показано, что остаточные напряжения сжатия приводят к резкому замедлению развития усталостной трещины, тогда как напряжения растяжения ускоряют разрушение образца. Следовательно, влияние одного и того же типа дефекта на несущую способность изделия зависит от места его расположения и характера действующих остаточных напряжений.

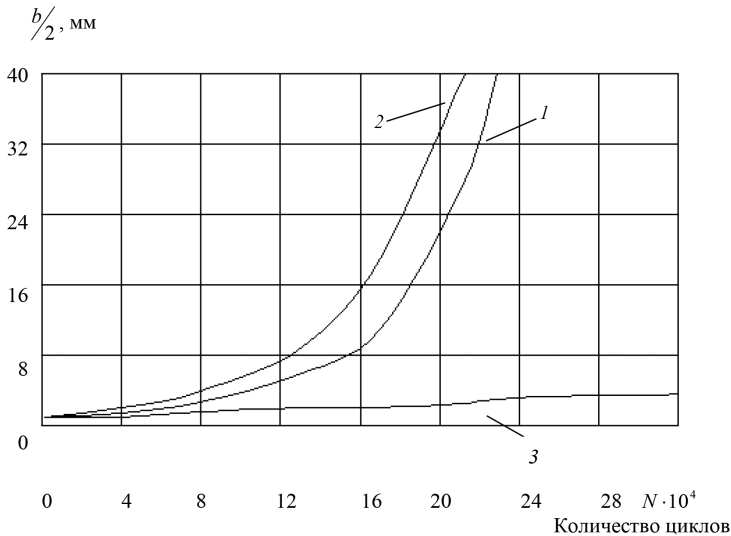


Рис. 9. Зависимость полудины  $b/2$  усталостной трещины от количества циклов  $N$  в образцах: 1 – без остаточных напряжений; 2 – с начальным остаточным напряжением растяжения; 3 – с начальным остаточным напряжением сжатия

Наличие деформаций и остаточных сварочных напряжений способно вызвать изменение формы и размеров конструкции (искривление продольной оси элементов конструкций, работающих на сжатие, грибовидность полков колонн и балок) и привести к потере устойчивости и разрушению всей конструкции.

### ***2.4.3. Усталостные трещины***

Наиболее распространенным эксплуатационным дефектом являются усталостные трещины, которые возникают под действием высоких переменных напряжений [65, 66].

Они образуются в следующих зонах концентрации напряжений:

- в местах с резкими переходами сечений и наличием под-резов;
- местах дефектов металлургического и технологического происхождения;
- на поверхности конструкции после грубой механической обработки.

*Факторы, влияющие на процесс распространения трещины.* Скорость распространения усталостных трещин в строительных конструкциях определяется напряженно-деформированным состоянием (НДС) в вершине трещины и зависит от многих параметров, таких как:

- температура среды;
- коррозионная активность среды;
- толщина и геометрическая форма изделия;
- частота, параметры цикла и скорость нагружения конструкции;
- напряженно-деформированное состояние элементов конструкции;

- механические характеристики, структура, термообработка (ТО) материала изделия;
- история нагружения и степень накопления усталостных повреждений в материале изделия.

На изменение механических свойств металлических конструкций при охлаждении влияют структура металла, напряженное состояние, режим нагружения и текущая температура [16]. При понижении температуры в сталях наблюдаются два процесса, которые по-разному приводят к изменению служебных свойств металлов: низкотемпературное упрочнение материала и его охрупчивание. Поэтому при расчетах металлических конструкций на прочность и долговечность приходится учитывать следующие основные факторы:

- повышение значений механических характеристик за счет низкотемпературного упрочнения, что при определенных условиях является основанием для снижения металлоемкости конструкции;
- возможность разрушения конструкции за пределами порога хладноломкости, что происходит без видимых пластических деформаций по механизму хрупкого разрушения.

При анализе хрупких разрушений элементов конструкций видно, что при низких климатических температурах очагами хрупкого разрушения часто являются зоны концентрации напряжений (ЗКН) в сварных швах, а также зоны развития усталостных трещин. Последние при ударном и циклическом нагружении переходят в хрупкие при напряжениях значительно ниже предела текучести.

Развитие трещины определяется:

- напряженным состоянием в ее вершине;
- размером и формой пластической зоны, которые в значительной степени зависят от толщины стенки изделия.

Скорость роста трещины повышается с увеличением толщины изделия. Так, при увеличении толщины стенки от 0,6 до

4,0 мм количество циклов нагружения, необходимое для увеличения длины трещины от 4 до 20 мм, снижается почти в три раза.

По внешнему виду трещины могут быть поперечными или кольцевыми, расположенными под углом к оси детали, продольными и поперечными по отношению к сварному шву. У деталей, работающих на кручение, продольные или поперечные трещины, распространяясь вглубь изделия, изменяют направление своего развития на спиральное. В области шпоночных канавок и шлицевых соединений трещины образуются в области прямоугольных переходов и развиваются в направлении вырезов. На деталях, работающих под воздействием переменных контактных нагрузок (валы, оси, подшипники, зубья шестерен), усталостные трещины возникают в контактных областях.

Теоретически и экспериментально установлено, что процесс усталостного разрушения начинается всегда с поверхности. Это вызвано тем, что металл поверхностного слоя находится в наиболее неблагоприятном положении и напряжения на его поверхности достигают наивысших значений. Поэтому от качества обработки поверхности зависит интенсивность процесса разрушения.

Концентрация напряжений (КН) от дефектов (даже от небольшого непровара) является источником зарождения первичных трещин, развивающихся при повторных нагружениях или с течением времени. Иногда трещины значительной длины возникают внезапно и служат причиной аварий, например, в конструкциях подъемно-транспортных машин, в строительных металлических конструкциях, в конструкциях оболочкового типа (сосуды давления, газопроводы) и т. д.

Усталостное разрушение может происходить только при наличии повторно-переменных нагрузок, характером которых определяется интенсивность разрушения.

Виды циклов нагружений могут быть следующие: знакопеременные, симметричные, асимметричные, знакопостоянные.

При переменных нагрузениях прочность соединения определяется характером и размером дефекта, числом нагружений и характеристикой цикла. Прочность соединения определяется по формуле

$$r = \frac{S_{\min}}{S_{\max}}, \quad (5)$$

где  $S_{\min}$  и  $S_{\max}$  – минимальное и максимальное напряжения.

Наиболее опасным для прочности конструкции является симметричный вид нагружения ( $r = -1$ ).

*На сопротивление разрушению влияет число нагружений.*

При этом не следует полагать, что материалы с относительно высоким сопротивлением дефектам при статических нагружениях сохраняют эти же свойства в условиях накопления усталостных повреждений. Например, у аустенитных сталей, обладающих высокими пластическими свойствами, для сварных соединений с дефектами понижение сопротивления циклическим нагрузкам имеет место в значительно большей степени, чем у ряда других материалов, например у малоуглеродистых сталей.

По проблеме усталостного разрушения выполнено значительное количество теоретических и экспериментальных работ, но единого общепризнанного объяснения процесса усталости не существует. Однако известно, что процесс развития усталостной трещины проходит три стадии: зарождение, развитие, разрушение.

Анализ разрушений строительных конструкций показывает, что наиболее часто встречающимися дефектами являются дефекты эксплуатационного происхождения [80] вследствие накопления усталостных повреждений, коррозионного изнашивания, пластической деформации элементов из-за случайных перегрузок.

Типичными дефектами при усталости металла являются трещины: краевые, центральные, краевые симметричные, а также косые трещины, работающие по смешанному механизму

разрушения. Краевые трещины в металлоконструкциях являются наиболее распространенным типом усталостных трещин. Но характер нагружения элементов конструкций, при которых развиваются краевые трещины, может быть различным:

- трещины для силовых схем растяжения;
- трещины для силовых схем изгиба;
- трещины при смешанных механизмах нагружения.

На рис. 10 показано типовое расположение трещин в ферменных металлоконструкциях.

#### ***2.4.4. Коррозионные повреждения***

Одной из главных причин снижения надежности и долговечности металлических конструкций и сооружений является коррозия [55]. Борьба с коррозией металлов имеет первостепенное значение и может рассматриваться в качестве одного из главных источников экономии металла. Приносимый материальный ущерб не ограничивается потерей металла, значительные потери связаны с затратами на ремонт, восстановление и защитные мероприятия [3].

Сложность аналитических методов расчета скорости коррозии связана с большим числом внешних и внутренних факторов, оказывающих влияние на кинетику коррозионного разрушения:

- состояние поверхности;
- наличие покрытия;
- внутренние напряжения;
- структура и свойства металла;
- температура;
- агрессивная среда и т. д.

Для металлических конструкций скорость распространения коррозии в обычных атмосферных условиях составляет 0,03...0,05 мм в год.

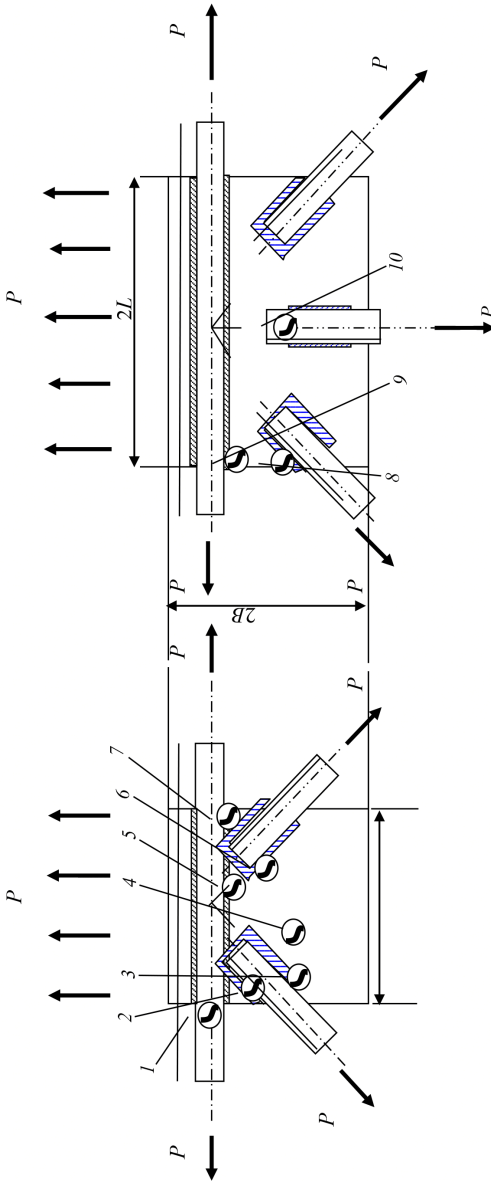


Рис. 10. Типовое расположение трещин в ферменных металлоконструкциях:

*1, 3, 8* – краевые трещины в стержнях;

*2, 4, 7, 9* – краевые трещины в косынках; *5, 6, 10* – центральные трещины в косынках



В зависимости от механизма разрушения коррозия бывает химическая, электрохимическая, контактная, щелевая, питтинговая, коррозия под напряжением (коррозионное растрескивание), электрическая, газовая, межкристаллитная [51, 69] и др.

*Виды коррозионного износа.* Результаты обследования сварных металлоконструкций показывают, что очагами развития коррозионного поражения являются:

- сплошностенные конструкции в местах расположения полостей, карманов, щелей, возникающих при сварке прерывистыми швами;
- заклепочные и болтовые соединения в местах неплотного прилегания элементов из-за большого шага между крепежными элементами;
- места скопления и задержки влаги;
- внутренние поверхности коробчатых и трубчатых элементов, особенно в результате проникновения влаги во внутреннее пространство в теплых климатических условиях.

Коррозионный износ подразделяют на следующие виды (рис. 11).

*Общий износ отдельного листа*, при этом происходит примерно одинаковое уменьшение толщины листа по всей его поверхности.

*Общий износ однородных листов* – происходит уменьшение ряда листов, имеющих одинаковое функциональное назначение и расположенных в одном поперечном сечении корпуса.

*Местный износ* – происходит локальное уменьшение толщины на отдельных участках элементов корпуса. Различают:

- износ пятнами участка листа – утонение листа на отдельных участках поверхности;
- канавочный износ (одно- или двухсторонний) – избирательное утонение листа в виде канавки вдоль границы сварного шва или околовольной зоны;
- линейный износ – утонение листа на узкой полосе вдоль линии приварки стенок продольного или поперечного набора.

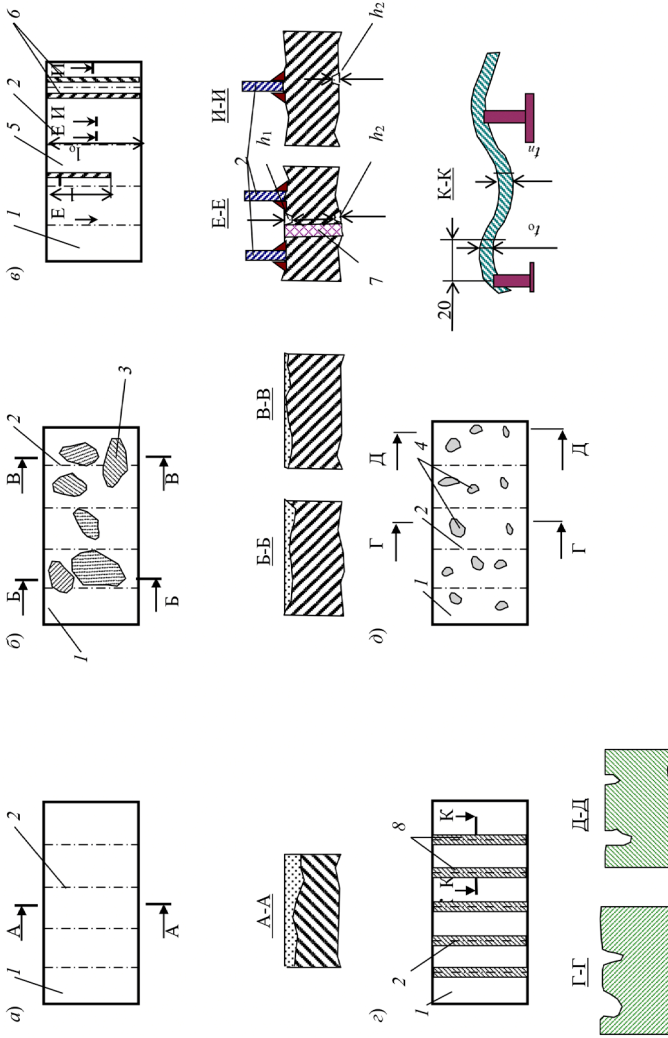


Рис. 11. Виды коррозионного износа: а – общий износ отдельного листа; б – износ пятнами участка листа; в – канавочный; г – линейный; д – язвенный; е – язвенный; ж – общий износ участка листа; з – набор листов; 1 – лист обшивки; 2 – набор листов; 3, 4 – контуры пятен; 5, 6 – канавки; 7 – сварной шов; 8 – зоны износа

*Язвенный износ* – это сосредоточенное в ограниченной области утонение листа в виде отдельных питтингов, раковин, точек.

Типичными дефектами при коррозионном разрушении являются области уменьшения сечения элементов конструкций и появление концентраторов напряжения, особенно при локальном коррозионном разрушении.

При оценке степени коррозионного износа конструкций производят следующие операции:

- очистку конструкций от пыли, мусора, легко отслаивающихся продуктов коррозии с помощью промышленных пылесосов, волосяных щеток и деревянных шпателей;
- общую визуальную оценку состояния противокоррозионной защиты (наличие дефектов и повреждений покрытий, относительная площадь пораженных участков металла);
- установление вида коррозионных повреждений металла;
- выявление участков с повышенным коррозионным износом и подготовка поверхности конструкций к инструментальным замерам путем зачистки металлическими щетками, напильниками или инструментами с абразивом от пластовой ржавчины и противокоррозионного покрытия;
- замер степени поражения конструкций коррозией.

Поверхность элементов конструкций, подлежащих специальному обследованию, необходимо очистить от пыли, грязи, жировых загрязнений, легко отслаивающихся старых покрытий и продуктов коррозии. При этом следует использовать инструменты и приспособления, не образующие острых концентраторов напряжений – риски и царапин – на очищенных поверхностях (шаберы, грубую шкурку и т. п.). Поверхности элементов в плоскостях, в которых проводят инструментальные измерения, необходимо очищать до металлического блеска механическими щетками, а затем мелкой шлифовальной шкуркой. Извлекать продукты коррозии из питтингов, язв, узких щелей и зазоров (для

последующего проведения измерений глубины коррозионных повреждений) следует остро заточенным инструментом без применения ударного воздействия. Не допускается устанавливать глубину местных коррозионных повреждений путем послыонного сошлифовывания металла на элементах конструкций. Удалять неразрушенное полимерное покрытие с отдельных участков поверхности конструкций допускается при условии своевременного восстановления покрытия на этом участке или в случае, когда принимается решение о необходимости замены либо восстановления покрытия на всей поверхности конструкций.

*Обеспечение коррозионной стойкости сварных соединений.*

Получение высокой коррозионной стойкости сварных соединений достигается при соблюдении следующих условий:

- выбор для сварной конструкции стали, наименее чувствительной к воздействию тепла сварочной дуги;
- получение сварного шва, химический состав которого по уровню легирующих элементов (хрома, никеля и других) идентичен основному или даже несколько его превосходит;
- выбор режимов и технологии сварки, обеспечивающих наименьшие структурные изменения в околошовных зонах и металле шва, т. е. таких режимов, при которых степень нагрева будет наименьшей;
- введение дополнительной термической обработки там, где условия работы и состав шва требуют дополнительных мер против межкристаллитной коррозии [80].

### Глава 3

## ВЛИЯНИЕ ДЕФЕКТОВ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Предельными состояниями металлических конструкций и деталей являются состояния, когда их эксплуатация считается невозможной, опасной или нежелательной. Наступление текучести, потеря устойчивости, появление течи, образование трещины в детали – все это примеры предельных состояний. Чаще всего наступление предельного состояния связывают с появлением в металле какого-то явления или процесса, например прогиба балки заданной величины, определенного удлинения металла при ползучести и т. д. [14].

В некоторых случаях приходится рассматривать возможность наступления в одной и той же детали нескольких предельных состояний. Например, в сварном раскосе фермы, работающем при переменных растягивающих и сжимающих нагрузках, возможными предельными состояниями будут: наступление текучести, потеря устойчивости при сжатии, появление трещины усталости или разрушение в момент приложения максимальной растягивающей нагрузки.

Самыми опасными предельными состояниями следует считать разрушения конструкций и сооружений [34]. В то же время наступление текучести хотя и используется часто в расчетах для определения требуемого сечения элементов, не относится

к аварийно опасным, так как вызывает лишь нарушение размеров вследствие пластических деформаций.

Часто конструкции проектируют так, чтобы предельное состояние в них в период эксплуатации не наступало. В некоторых случаях, если достижение предельного состояния не вызывает аварийного состояния, предусматривают возможность ремонта конструкции или замены узла тогда, когда предельное состояние уже наступит.

Степень близости эксплуатационного состояния к предельному может быть различной, что оценивают вероятностью отсутствия наступления предельного состояния. Чем выше эта вероятность, тем выше уровень работоспособности сварной конструкции.

Под работоспособностью сварных конструкций понимают их способность сопротивляться наступлению тех предельных состояний, которые ограничивают их нормальную эксплуатацию. Понятие работоспособности относится не только к сварным конструкциям, но и к отдельным сварным соединениям. Источники разрушений, связанные с применением в конструкции сварных соединений, многообразны – это, например, технологические несплошности, возникающие в процессе производства сварных конструкций.

Возникновение несплошностей, а также конструктивных концентраторов напряжений, связанных с резкими переходами от основного металла к металлу шва или от одного элемента к другому, может способствовать снижению надежности сварного соединения. Наиболее сильное влияние несплошностей наблюдается при работе конструкции с накопленными усталостными повреждениями. В этом случае даже небольшой дефект или концентратор может стать источником зарождения трещины.

Таким образом, ни один из существующих способов сварки не обеспечивает бездефектного сварного соединения

без последующего исправления, так как на качество сварных соединений оказывают влияние многие факторы металлургического, технологического и производственного характера [21].

Качественным сварным соединением можно считать соединение, имеющее прочностные характеристики металла во всех зонах шва не ниже, чем у основного металла соединяемых элементов, но и не превышающие их более чем на 15...25 %. Кроме того, металл соединения должен иметь характеристики пластичности не хуже, чем у основного металла, а шов не должен содержать дефекты более установленной нормативными документами величины. Качество металла шва обеспечивают выбором соответствующих материалов [12].

Правильный и объективный подход к оценке качества сварных конструкций должен основываться на прочностных и экономических расчетах с определением реальной несущей способности конструкций. Определение механических свойств сварного шва, околошовной зоны и основного металла проводят при отработке технологического процесса сварки [112].

Анализ разрушений показывает, что многие из них происходят по околошовной зоне, а не по сварному шву. Наличие тех или иных дефектов в сварных соединениях само по себе еще не определяет потерю работоспособности этих соединений. Однако дефекты могут существенно снижать работоспособность конструкций и даже привести при определенных условиях к ее разрушению. Наибольшую опасность представляют внутренние дефекты, так как их нужно обнаружить, не разрушая сварной конструкции. В табл. 4 приведены причины разрушения сварных конструкций по данным Международного института сварки (МИС).

Таблица 4

**Причины разрушения сварных конструкций**

Причины разрушения	Кол-во случаев разрушения, %
Нерациональность спроектированных конструкций, в том числе:	28,8
неправильное конструирование	22,5
введение сварных узлов в участки повышенных напряжений	6,3
Наличие дефектов в сварных соединениях, в том числе:	21,3
дефекты в швах или высокие остаточные напряжения	12,5
дефекты формирования швов	8,8
Повышенные напряжения при эксплуатации, чрезмерные нагрузки	20,0
Нарушение технологии сварки трудносвариваемых сталей	18,7
Влияние коррозии	5,0
Неправильная подготовка перед сваркой	3,7
Неправильное применение смежных процессов	2,5

Основными причинами разрушения являются:

- нерациональность спроектированных конструкций;
- наличие дефектов в сварных соединениях;
- нарушение технологии сварки.

Степень влияния дефектов зависит от большого числа конструктивных и эксплуатационных факторов:

- свойств свариваемого материала;
- конструкции соединения;
- схемы нагружения;



- концентраторов напряжений;
- вида нагрузки;
- агрессивности среды;
- температурных воздействий;
- вероятности и опасности отказа оборудования.

Для определения надежности сварных конструкций и установления требований, предъявляемых к качеству сварных соединений, очень важно располагать сведениями о влиянии наиболее вероятных дефектов на прочность сварных соединений в условиях, близких к реальным [9]. Влияние различных дефектов на механические свойства сварного соединения определяется величиной (длина и глубина) и формой дефектов, частотой их появления, материалом конструкции, условиями эксплуатации (положительная или отрицательная температура), характером нагрузки (статическая или динамическая).

### **3.1. Влияние плоскостных и объемных дефектов**

Наиболее опасны дефекты, имеющие вытянутую форму и острые очертания; менее опасны дефекты округлой формы. С увеличением глубины дефектов влияние их на прочность резко возрастает, поэтому в сварных швах ответственных конструкций могут быть допущены лишь неглубокие дефекты, не превышающие 5...10 % толщины соединяемых деталей.

Для изделий, работающих в условиях статических нагрузок, наиболее опасным является расположение дефектов перпендикулярно максимальному растягивающему усилию. Концентрация напряжений в месте расположения дефектов еще более усиливает их влияние на прочность. Значительно меньшую опасность представляют дефекты, расположенные параллельно или под очень малым углом к направлению к действующему усилию [80].

При статической нагрузке основное влияние на прочность конструкции оказывает относительная величина дефекта, если материал сварного соединения обладает большим запасом пластичности. Однако это свойственно конструкциям, работающим при температуре до  $-60$  °С. При более низких температурах прочность определяется интенсивностью напряжений в зоне дефекта.

Как правило, при статических, а тем более динамических нагрузках наличие трещин любой величины в сварных конструкциях не допускается, так как дефекты такого рода способствуют концентрации внутренних напряжений и легко распространяются вглубь металла [86, 122]. Исправление возможно при наличии единичных трещин, а сварное соединение с множественными трещинами исправлению не подлежит.

В результате многочисленных исследований показано, что для пластичных металлов и сплавов при статической нагрузке влияние величины непровара на уменьшение их прочности прямо пропорционально его относительной глубине или площади. В то же время для малопластичных и высокопрочных материалов такая пропорциональность при статической, динамической и вибрационной нагрузке нарушается [49]. На рис. 12 показано влияние дефектов на прочностные характеристики сварных соединений.

Часто даже при относительно больших непроварах разрушение сварного соединения происходит по околошовной зоне, что компенсируется усилением шва. Так, в стыковых соединениях труб из низколегированной стали непровары до 20 % толщины стенки полностью уравниваются валиком усиления, однако при низких температурах резко падают прочность и пластичность [117]. По данным МГТУ им. Н. Э. Баумана, непровар глубиной 25 % при понижении температуры до  $-45$  °С снижает разрушающее напряжение сварного соединения в два раза. Согласно результатам Института электросварки им. Е. О. Патона,

непровар в корне стыкового шва, находящийся под действием растягивающей нагрузки при температуре  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , приводит к такой хрупкости соединения, что оно может разрушиться даже под действием небольших усилий.

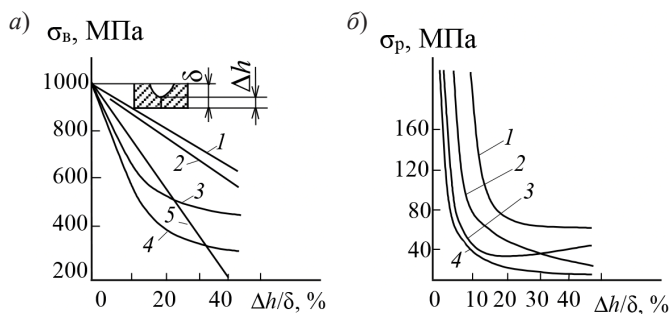


Рис. 12. Влияние дефектов на прочностные характеристики сварных соединений: а – влияние относительной глубины  $\Delta h/\delta$  непровара корня шва на статическую прочность стыковых соединений без усиления: 1 – Ст3; 2 – 12Х18Н9Т; 3 – 25ХГФА; 4 – 30ХГСНА; 5 – сплав Д16Т; б – влияние относительной величины  $\Delta h/\delta$  дефектов на усталостную прочность стыковых сварных соединений без усиления из Ст3:

1 – подрезы; 2 – поры; 3 – непровар корня шва;

4 – шлаки. Число циклов –  $3,2 \cdot 10^5$

Непровары оказывают существенное влияние и на пластичность сварных швов. Г. А. Николаев показал [80], что непровар глубиной 25...30 % понижает пластичность в 2...4 раза, а при работе сварного шва при отрицательных температурах пластичность снижается еще больше. Поэтому глубина непровара в стыковых швах не должна превышать 10...15 % от толщины металла.

Непровар недопустим при работе изделий в режиме динамических нагрузок, а также в деталях особо ответственного назначения. Это связано с тем, что при понижении температуры увеличивается склонность стали к хрупкому разрушению и повышается чувствительность металла к влиянию концентраторов

напряжений на понижение разрушающей нагрузки и разрушающего напряжения.

В сварных соединениях металлических конструкций промышленных и гражданских зданий и сооружений допускаются непровары:

- по сечению швов в соединениях, доступных сварке с двух сторон, – глубиной до 5 % толщины металла, но не более 2 мм при длине непровара не более 50 мм и общей длине участков непровара не более 200 мм на 1 м шва;
- доступных сварке с одной стороны (без подкладок) – глубиной до 15 % толщины металла, если она не превышает 20 мм, и не свыше 3 мм при толщине металла более 20 мм.

Допускается суммарная величина непровара, шлаковых включений и пор, расположенных отдельно или цепочкой, не превышающая в рассматриваемом сечении при двухсторонней сварке 10 % толщины свариваемого металла, но не более 2 мм, и при односторонней сварке без подкладок – 15 %, но не свыше 3 мм.

У трубопроводов для горючих, токсичных и сжиженных газов сварные швы бракуются при обнаружении:

- трещин любых размеров и направлений;
- свищей, сетки или цепочки пор;
- шлаковых или других инородных включений;
- непровара в корне шва;
- межваликовых несплавлений: непроваре при одностороннем шве без подкладочного кольца глубиной более 10 % толщины стенки трубы, если она не превышает 20 мм, и более 2 мм при толщине стенки свыше 20 мм;
- одиночных пор, включений вольфрама размером свыше 10 % толщины стенки, если она не превышает 20 мм, и более 2 мм, если толщина стенки свыше 20 мм, в количестве более 3 штук на каждые 100 мм шва.

Примерно такими же являются браковочные признаки для трубопроводов высокого давления.

В швах, выполненных стыковой контактной сваркой и другими прессовыми методами, наиболее опасными для работы конструкций являются непровар, связанный с нарушениями технологического режима, а также скопления окислов, рыхлости и пережоги в зоне стыка. При этом наличие дефектов сравнительно мало сказывается на статической прочности в условиях положительных температур, но зато резко снижает пластичность и ударную вязкость. Так, например, при попадании в шов окислов предел прочности снижается на 10...15 %, а углы загиба образцов уменьшаются до 10...20 %.

Авторы [115] отмечают значительное влияние подрезов на работоспособность конструкций в трех областях сварного соединения:

- переход между швом и основным металлом. В этой области недопустимы подрезы, крутой угол между основным металлом и усилением шва, скопление дефектов в вершине шва (поверхностной зоне);
- корень шва. Влияние подреза может быть значительным в случае односторонних стыковых сварных соединений и незначительным, если они выполнены на подкладке;
- поверхность усиления шва. В поверхностной зоне усиления швов опасными при напряжениях, действующих вдоль шва, являются соединительные точки в местах прерывания шва, вызванных сменой электродов или сварочной проволоки.

Степень влияния подрезов на усталостную прочность зависит от глубины подреза, величины остаточных напряжений и вида сварного соединения [125]. Так, у трубопроводов для горючих, токсичных и сжиженных газов допускаются подрезы в местах перехода сварного шва к основному металлу глубиной не более 10 % толщины стенки трубы, но не более 1 мм. На одном стыке допускается подрез общей протяженностью не более 30 % длины шва.

Поры являются менее опасными дефектами, чем трещины, однако они недопустимы в сварных швах изделий, работающих под давлением, вакуумом или предназначенных для хранения и транспортировки жидких и газообразных продуктов.

Концентрация напряжений при переменных нагрузках имеет решающее значение. Считается, что если коэффициент концентрации напряжения от валика усиления выше, чем от пор, то умеренная пористость (до 4 %) не ухудшает несущей способности. При удалении валика усиления даже небольшие поры резко снижают выносливость [117]. В большинстве случаев у сварных конструкций валики усиления швов сохраняются. Во многих случаях, несмотря на высокую пористость, разрушение сварного соединения происходит по околошовной зоне на границе перехода валика усиления к основному металлу, что в значительной степени обусловлено влиянием формы шва на концентрацию напряжений.

Поры становятся очагами усталостных разрушений в первую очередь в угловых, стыковых и поперечных швах с высокими растягивающими остаточными напряжениями. Например, в сварных швах трубопроводов высокого давления не допускаются одиночные поры, сплошная цепочка или сетка пор (независимо от длины и площади) размером более 5 % толщины стенки при ее толщине до 20 мм и свыше 1 мм при большей толщине стенки в количестве, превышающем две на каждые 100 мм шва.

В нахлесточных соединениях поры практически не влияют на их выносливость. Для сварной конструкции места расположения пор играют большую роль, чем их размеры.

Отрицательное влияние на прочность сварных соединений оказывают шлаковые включения. Шлаковые включения по сравнению с порами в значительно меньшей мере снижают усталостную прочность. Однако они так же, как и поры, ослабляют сечение шва, уменьшают его прочность и являются концентраторами

напряжений. Они располагаются между отдельными слоями или внутри наплавленного металла и представляют собой заполненную шлаком несплошность. В сварных швах изделий ответственного назначения допускаются лишь отдельные поры и шлаковые включения, а также небольшие скопления пор (не более 5...6 на 1 см<sup>2</sup> сечения шва) глубиной не более 10...15 % толщины металла.

Показано [49], что поры и шлаковые включения при их относительной суммарной площади в сечении шва до 5...10 % практически мало влияют на статическую прочность соединения. Исследованиями МГТУ им. Н. Э. Баумана и НИИЖБ установлено, что допустимый размер внутренних дефектов в сварных стыках арматуры и закладных деталей составляет 15...20 % расчетного сечения шва. Эти данные были положены в основу регламентации норм допустимых размеров дефектов в сварных соединениях строительных конструкций, которые приведены в СНиП III-18-75. Например, суммарная величина непровара, пор и шлаковых включений при двухсторонней сварке допускается в размере 10 % толщины сварного шва, а при односторонней – 15 %.

Дефекты, как плоскостные, так и объемные, существенно снижают прочность сварных швов, поэтому виды, число и размеры допускаемых внутренних дефектов при техническом диагностировании ограничивают в зависимости от назначения конструкции.

Таким образом, трещины, непровары, подрезы, поры, шлаковые включения и другие дефекты создают концентрацию напряжений и снижают долговечность конструкций. При этом самым опасным дефектом в сварных соединениях являются трещины, особенно расположенные по оси шва. На их острых краях при соответствующих условиях может происходить резкое увеличение напряжений, которое способствует дальнейшему развитию трещин и возможному разрушению конструкции.

В настоящее время многими исследователями в разных отраслях промышленности собран значительный статистический материал по дефектам сварных соединений. Наиболее полный и систематизированный материал приводится в работе [109]. На рис. 13 приведена статистика видов встречающихся дефектов, а в табл. 5 – распределение дефектов сварных швов по видам.

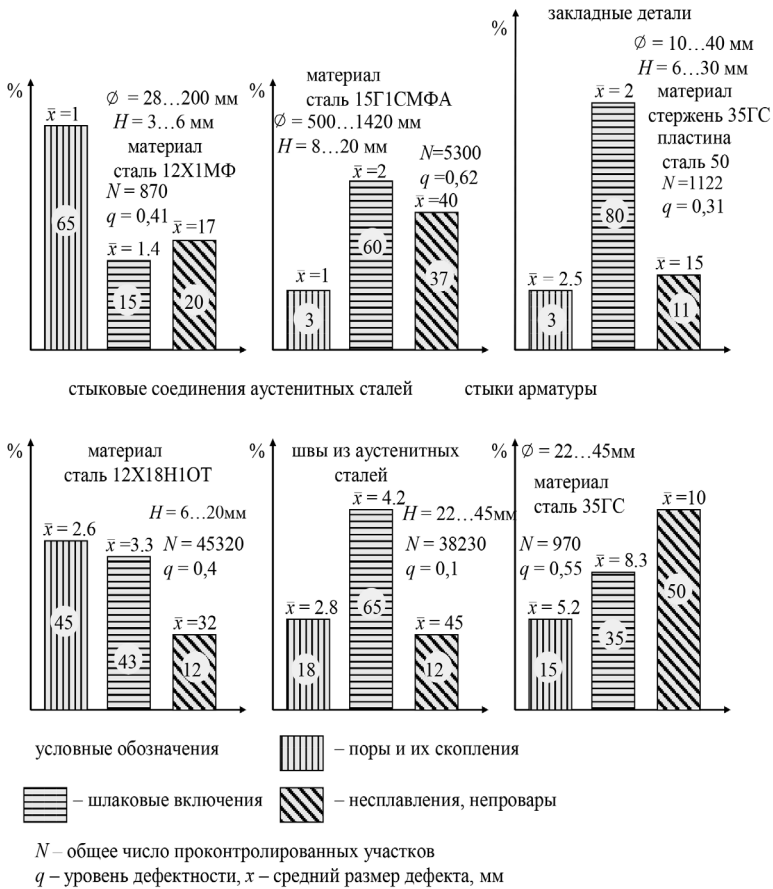


Рис. 13. Статистика видов встречающихся дефектов



Таблица 5

**Распределение дефектов сварных швов**

Виды дефектов	Распределение дефектов, %				
	Резервуары $H = 6...20$ мм		Судовые конструкции, нефтегазовое оборудование, трубопроводы $H = 3,5...40$ мм	Энергетическое оборудование $H = 50...250$ мм	
	Завод № 1	Завод № 2		Завод № 1	Завод № 2
Объемные (компактные):	68,7	66,0	70...75	91,7	65...75
одиночные (шлаки)	62,6	58,0	60...70	55,0	62...76
скопления (поры, риски)	2,2	4,1	15...30	23,6	–
цепочки (поры)	3,9	3,9	–	15,1	5...15
Плоскостные:	31,3	34,0	25...30	8,3	25...30
непровары	9,3	5,7	5...10	6,2	6...28
непровары с трещиной	7,2	4,7	5...10	–	–
трещины	11,5	21,6	0,5...5	2,1	0,4...8
подрезы	3,2	2,0	–	–	–

Из приведенных данных видно, что наиболее распространенными дефектами являются объемные – это шлаковые включения, скопления и цепочки пор. В то же время количество наиболее опасных дефектов (трещин, подрезов, непроваров) намного меньше.

Следует отметить, что выявление дефектов является весьма трудоемкой задачей и требует как применения дорогого и слож-

ного оборудования, так и разработки новых методов и методик контроля [50, 68, 100]. Однако это оправдано, так как повышает достоверность проводимого контроля, а следовательно, и качество и надежность конструкций [111, 114].

Исходным критерием при оценке сопротивляемости сварных соединений действию переменных нагрузок является предел выносливости основного металла и соединения.

Резкий перепад температур в области сварного соединения при сварке приводит к изменению микроструктуры в области шва и околошовной зоне. На границе раздела жидкой и твердой фаз в результате перегрева протекают диффузионные процессы, происходит перекристаллизация, появляются трещины, термические напряжения и т. д. Поэтому зоны термического влияния в сварных швах даже при отсутствии дефектов являются концентраторами напряжения и разрушение конструкций почти всегда начинается в области сварных швов.

Снижение механических свойств сварного шва в зоне дефекта, по сравнению с бездефектным швом, зависит от следующих факторов: вида, расположения и размера дефекта, свойств металла, вида нагрузки, условий эксплуатации др.

### **3.2. Критерии оценки дефектов сварных соединений**

*Показатели качества сварных соединений.* При оценке качества большое значение имеет форма единичных дефектов в соединениях, их количество, доля брака, а также доля исправленных дефектов. Исправление дефектов не всегда повышает работоспособность изделия. Кроме того, исправление дефектов связано с дополнительными экономическими затратами. Уровень размеров дефектов, допустимых без исправления, регламентируют отраслевые НТД.

Используют показатели качества сварки двух видов: альтернативные (да, нет) и количественные (измеримые). Альтернативные показатели – это обычно доля брака  $B = n_B / n$  или доля дефектных элементов  $q = n_D / n$ .

Их вычисляют исходя из числа бракованных  $n_B$  или дефектных  $n_D$  элементов в выборке из единиц продукции стыков или участков шва;  $n$  – общее число элементов.

Для количественной оценки насыщенности швов дефектами используют показатели, отражающие размеры, число, виды дефектов (трещины, поры и др.) и их тип (компактные, удлиненные и др.) в контролируемом элементе.

Результаты контроля позволяют корректировать и улучшать технологию. Для этого рассчитанные для разных условий производства показатели качества (альтернативные и количественные) сравнивают между собой и делают выводы о причинах появления дефектов, уровнях технологии и путях улучшения качества. При этом важным условием является четкое ведение контрольно-технической документации. Основными характеристиками дефектов является их вид (трещины, непровар, поры, неметаллические включения и т. п.), а также характерные линейные размеры.

Из анализа работ [10, 63] следует, что в сварном шве может существовать трещина критической величины, которая не влияет на эксплуатационные свойства исследуемой металлической конструкции. Применяя характеристики трещиностойкости материала, можно определить критическую длину трещины  $2l$ . Так, в случае растяжения пластины с центральной трещиной напряжениями интенсивности  $P$  (задача Гриффитса) имеем:

$$l = \frac{K_{1C}^2}{(1 - \nu^2)\pi P_*^2}, \quad (6)$$

где  $l$  – полудлина трещины;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $P_*$  – критическая (разрушающая) величина напряжений;  $K_{1C}$  – значение вязкости разрушения.

Значение  $K_{1C}$  используют для определения максимального размера допустимой трещины, связав этот размер с пределом текучести или пределом прочности материала.

В результате получены простые аналитические выражения:

- для поверхностного дефекта (типа пористости, кратерных трещин и т. д.), в котором глубина не превышает половины длины дефекта:

$$l = 0,6f(K_{1C} / \sigma_T)^2; \quad (7)$$

- для поверхностного дефекта (типа трещин, несплавления и непровара), длина  $l$  которого более чем в 10 раз превышает глубину:

$$a = 0,25f(K_{1C} / \sigma_T)^2; \quad (8)$$

- для внутреннего объемного дефекта:

$$D = 2,8f(K_{1C} / \sigma_T)^2, \quad (9)$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести;  $D$  – диаметр дефекта;  $f$  – коэффициент, характеризующий надежность применяемого метода контроля, величина которого меньше единицы [10].

Дефекты, критические размеры которых определены по формулам (7–9), можно использовать при эталонировании дефектов и изготовлении стандартных образцов.

Основным критерием при оценке допустимости дефектов является напряжение в сварном соединении. Если при статическом нагружении хрупкое разрушение не происходит, то дефекты, ослабляющие поперечное сечение до 10 %, не влияют на несущую способность сварной конструкции. Это установлено, в частности, для швов с порами и шлаковыми включениями. Такое же явление наблюдается и при других дефектах, включая трещины для вязких материалов, но ослабление поперечного сечения более чем на 3 % уже является признаком низкого качества [115].

Теоретические и экспериментальные исследования показывают, что в конструкциях при статических и динамических нагрузках одни и те же дефекты по-разному влияют на сварное соединение.

При динамических нагрузках прочность сварных соединений определяется их сопротивлением усталостным напряжениям. Непровары, подрезы, поры и шлаковые включения, создавая концентрацию напряжений, снижают долговечность конструкций.

Эксплуатация сварных конструкций показывает, что в основном сварочные напряжения и деформации не снижают несущей способности конструкций. Однако в этих случаях необходимы постоянное наблюдение за дефектными местами (мониторинг) методами НК и иногда – дополнительный прочностной расчет.

## Глава 4

# КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Дефектами в сварных швах принято называть недопустимые отклонения от требований, установленных в нормативно-технической документации (НТД), ухудшающие качество сварных соединений, их механические свойства, сплошность, герметичность и т. д. [29].

Дефекты при изготовлении строительных металлических конструкций образуются вследствие нарушения требований к сварочным материалам, подготовки, сборки и сварки соединяемых элементов, термической и механической обработок сварных соединений и конструкции в целом.

В зависимости от происхождения дефекты можно подразделить на:

- производственно-технологические (металлургические, литейные, вследствие прокатки и т. п.);
- технологические, возникающие при изготовлении и ремонте изделий (сварке, механической, термической и других видах обработки);
- эксплуатационные, возникающие после определенной нагрузки изделия в результате усталости металла, коррозии, износа и т. д., а также неправильного технического обслуживания и эксплуатации [5].

Наиболее опасными являются дефекты типа нарушения сплошности, которые возникают на разных стадиях технологического процесса [21]:

- в процессе плавки и литья (раковины, поры, горячие трещины, включения и т. д.);
- обработки металлов давлением (внутренние и поверхностные трещины, расслоения, закаты, флокены и т. д.);
- термической и химико-термической обработок (термические трещины и т. п.);
- механической обработки (шлифовочные трещины, прижоги);
- сварки (непровар, трещины, поры и т. д.);
- эксплуатации и хранения (усталостные трещины, коррозионные поражения и т. д.).

Современная техническая диагностика немислима без применения методов разрушающего и неразрушающего контроля, призванных контролировать следующие основные параметры:

- прочностные характеристики (несущая способность конструкций, прочность бетона, жесткость конструкций, твердость и т. д.);
- параметры надежности, долговечности (трещиностойкость, морозостойкость, сопротивление усталости);
- физико-механические и химические характеристики (химический состав металлов и сплавов, предел текучести и прочности, ударная вязкость, плотность, влажность, пористость материалов);
- толщина антикоррозийных покрытий;
- дефекты сварных соединений (трещины, непровары, свищи, прожоги, незаваренные кратеры и пр.), их допустимые размеры, количество и расположение;
- положение арматурных и закладных деталей в железобетонных конструкциях, размеры и толщина защитного слоя бетона.

Основным технологическим процессом, применяющимся при изготовлении строительных конструкций, является сварка, поэтому эксплуатационная надежность и экономичность металлических конструкций в первую очередь определяется качеством сварных соединений [22, 40, 115, 121].

В сварочном производстве объектов строительства применяют следующие виды контроля:

- входной, или предупредительный;
- текущий, или пооперационный;
- приемочный, или выходной (контроль готового сварного изделия или сварочного узла).

*Входной, или предупредительный, контроль* призван уменьшать вероятность возникновения брака при выполнении сварочных работ и предполагает проверку:

- проектной и исполнительной технологической документации;
- качества сварочных и основных материалов, наличия сертификатов, соответствия их требованиям нормативной и проектной документации, условий их хранения и подготовки к сварке, а также проведения необходимых проб и испытаний (до 35 % среднегодового брака образуется за счет низкого качества сварочных материалов);
- технического состояния и выполнения правил эксплуатации сварочного оборудования, сборочно-сварочной оснастки, приспособлений, аппаратуры и контрольно-измерительных приборов;
- квалификации сварщиков, соответствия ее выполняемым работам, соответствия сроков аттестации и переаттестации, наличия удостоверений, сварки опытных образцов и т. д.

*Текущий, или пооперационный, контроль* осуществляется в процессе сборочно-сварочных работ и включает контроль:

- подготовки деталей для сборки (чистоту свариваемых кромок, правильность разделки кромок и т. д.);



- сборки (проверка зазоров, смещение кромок, соосность, правильность постановки прихваток, подкладных колец и т. д.);
- ведения исполнительской документации (отметки режимов подогрева и последующего охлаждения, последовательность наложения швов, очистка слоев от шлака при многослойной сварке и т. д.);
- работы сварочного оборудования, в том числе соблюдение графика планово-предупредительных осмотров и ремонтов;
- ведения исполнительской документации (отметки в паспорте на изделие, клеймение швов и т. д.).

*Приемочный, или выходной, контроль* качества сварного узла (изделия) осуществляется для выявления наружных и внутренних дефектов сварки. Методы и объемы контроля оговариваются в стандартах и технических условиях на изготовление узлов и изделий.

Различают разрушающие и неразрушающие методы контроля качества сварных соединений.

К разрушающим методам контроля относятся механические, металлографические и коррозионные и химические испытания сварных соединений, выборочные испытания конструкций на прочность, усталость и т. д.

К неразрушающим методам контроля (ими проверяется более 80 % сварных изделий) относятся:

- визуально-оптический и измерительный контроль (ВИК);
- контроль на непроницаемость;
- капиллярные методы контроля;
- радиационные методы контроля;
- магнитные методы контроля;
- электромагнитный (вихретоковый) метод контроля;
- ультразвуковой (УЗ) метод контроля;
- акустико-эмиссионный (АЭ) метод контроля;
- контроль методом магнитной памяти металла (МПМ).

Необходимость в контроле, объем и периодичность выполнения контрольных операций зависят от ответственности сварного изделия и устанавливаются нормативно-технической документацией.

### **4.1. Предупредительный контроль**

Одним из важнейших условий повышения качества сварных соединений является постоянное улучшение системы контроля качества. При существующей системе контроля качества сварки основное внимание уделяется выявлению дефектов в сварных швах, этим объясняется все еще значительный процент брака в сварных конструкциях. Кроме того, контроль качества физическими методами часто производится спустя некоторое время после выполнения сварочных работ, что не дает возможности своевременно принять меры для устранения причин брака. Бывают случаи, когда дефекты в сварных швах обнаруживаются при сдаче готового сооружения (при опрессовке трубопроводов, испытании резервуаров, нагружении конструкций), а иногда и в процессе эксплуатации.

Контроль не даст ожидаемых результатов, если он будет направлен только на выявление дефектов в уже выполненных швах или будет проводиться спустя продолжительное время после сварки. В таких случаях невозможно принять меры для устранения причин появления брака.

Поэтому значительное внимание должно быть уделено предупредительному контролю, позволяющему на различных стадиях сварочного производства проверять основные и сварочные материалы, квалификацию сварщиков, сварочное оборудование, подготовку изделий под сварку, технологию сварки, после контроля готовых изделий выявление дефектов и устранение причин их появления, принятие мер по устранению причин появления брака.

## **4.2. Контроль основных и сварочных материалов**

Основным материалом для сварных соединений является металл. Перед сваркой проверяют наличие сертификатов и заводскую маркировку на материале, а у специальных сталей, кроме того, наличие и качество легирующих элементов. В сертификате указываются марка и химический состав, номер плавки, масса и номер партии, результаты всех испытаний, выполненных в соответствии с действующим стандартом, номер стандарта на отправляемый металл, профиль и размеры материала. Показатели механических свойств – пределы прочности, текучести, относительное удлинение и поперечное сужение, угол изгиба, ударная вязкость, химический состав – должны соответствовать ГОСТам и техническим условиям. После этого поступивший материал (листовой и профильный прокат, заготовки) подвергают внешнему осмотру с целью выявления расслоений, трещин, недопустимых вмятин, закатов.

При отсутствии сертификата металл до определения механических свойств, химического состава, испытания на свариваемость нельзя запустить в производство.

Большое влияние на качество сварки оказывает качество сварочных материалов. Основным видом сварочных материалов являются электроды для ручной сварки. Каждая партия электродов должна иметь сертификат, в котором указываются завод-изготовитель, дата изготовления, номер и масса партии, ГОСТ на электроды, диаметр, тип и марка электродов, механические свойства наплавленного металла, рекомендуемые режимы сварки, режим просушки электродов.

Затем проверяется соответствие поступивших электродов сертификату, выборочно контролируется внешний вид электродов. Покрытие должно быть прочным (проверяют при изгибе

электрода и падении его на стальную плиту) и плотным, не иметь пор, трещин, вздутий и комков, неразмешанных компонентов. Допускаются следующие дефекты поверхности покрытия: поры – не более трех на длине 100 мм, диаметром до 2 мм, глубиной до 0,5 толщины покрытия; шероховатость поверхности, продольные риски и отдельные задиры – глубиной не более 1/4 толщины покрытия; не более двух волосных трещин длиной до 12 мм каждая; не более трех местных вмятин глубиной до 0,5 толщины покрытия и длиной до 12 мм каждая.

Для определения степени влажности покрытия электродами проверяемой партии заваривается несколько образцов.

При наличии недопустимых в электродах дефектов применять их запрещается.

При отсутствии сертификата применять электроды запрещается до определения их свойств. В этом случае необходимо проверить сварочные свойства электродов, механические свойства и химический состав наплавленного металла, механические свойства сварного соединения, а также прочность покрытия. Для электродов аустенитной структуры, кроме того, следует проверить наличие в нем ферритной фазы.

Качество электродов во многом зависит от условий их хранения. Поэтому после проверки поступивших электродов сотрудник лаборатории, на которого возложен контроль за хранением электродов, устанавливает режим их хранения на складе и прокатки, если этого требует паспорт на электроды.

Проверяются также проволоки, предназначенные для механизированной автоматической сварки и в качестве присадки при газовой сварке. Проволока поставляется в бухтах, снабженных металлическими бирками, на которых указано обозначение проволоки по стандарту, номер плавки и завод-изготовитель. Каждая партия проволоки должна иметь сертификат, в котором указываются ее марка и диаметр, химический состав, номер плавки и название завода-изготовителя.

После контроля наличия сертификата и бирок проверяют поверхность проволоки. В небольших партиях следует проверить каждую бухту, в больших – выборочно.

На поверхности проволоки не должно быть окислов, грязи, краски, масла. На проволоке из высоколегированной стали не должно быть следов графитовой смазки.

Для удаления указанных поверхностных дефектов можно применять механические и химические способы.

На качество сварных соединений существенное влияние оказывает качество флюса. Так же, как и другие материалы, поступивший флюс должен иметь сертификат. Флюс хорошо поглощает влагу, поэтому прежде всего его следует проверить на содержание влаги.

Наиболее простым способом контроля, при котором проверяются и другие показатели (например, гранулометрический состав, загрязненность), является сварка образцов. Качество флюса считается удовлетворительным, если дуга в процессе сварки горит устойчиво, шов не имеет трещин, пор, свищей, шлак легко отделяется. При получении плохих результатов необходимо тщательно проверить гранулометрический состав, влажность, плотность, загрязненность флюса.

Более точным и сложным способом определения влажности флюса является сушка его пробы массой в 100 г при температуре 300 °С. Взвешивая пробу через определенные промежутки, просушивание прекращают в момент, когда результаты предпоследнего и последнего взвешиваний становятся одинаковыми, Флюс считается качественным, если влажность его не превышает 0,1 %.

Гранулометрический состав проверяют, просеивая флюс через сито с ячейками размерами, равными верхним и нижним размерам зерен флюса.

После указанной проверки флюса сваривают тавровый образец и исследуют наплавленный металл на содержание углерода и серы (проба берется из верхнего шва). В случае неудовлетворительного результата проверяемая партия флюса забраковывается или подвергается повторной прокалке с последующей перепроверкой всех показателей.

Храниться флюс должен на складах при условиях, исключающих его насыщение влагой и оборудованных печами для сушки. Проверка условий хранения флюса, как и для электродов, является важнейшей задачей предупредительного контроля.

При сварке в качестве защитных газов в основном применяются углекислый газ и аргон. Газы поставляются в баллонах и должны иметь сертификат завода-поставщика с указанием ГОСТа, названия газа, процентного содержания примесей, влажности и даты выпуска. Качество газов при наличии сертификата проверяется только при проявлении недопустимых дефектов, обнаруженных при сварке образцов перед применением газа на производстве.

В связи со значительным содержанием влаги в углекислом газе рекомендуется применять меры для удаления ее из баллонов. Производится это в два приема.

После получения баллонов их следует поставить основанием вверх, а затем ненадолго отвернуть вентиль, через который и будет стекать влага. Затем углекислый газ очищают в процессе сварки с помощью специального осушителя, через который пропускается газ перед поступлением в горелку.

Осушитель заполняется силикагелем. После насыщения силикагеля влагой последняя удаляется путем нагрева до 180...200 °С. Нагрев полностью восстанавливает свойства силикагеля.

### **4.3. Контроль подготовки изделий под сварку, сварочного оборудования и технологии сварки**

Подготовка изделий под сварку оказывает существенное влияние на качество сварного соединения. Основными этапами проверки являются контроль чистоты поверхности, геометрических размеров разделки шва и качества прихваток.

Недопустимо в разделке шва и на прилегающей к ней поверхности наличие масла, грязи, ржавчины, окалины, а также грязи и мусора на других участках изделия, которое после сборки подвергается кантовке. При кантовке загрязнения могут попасть в разделку шва.

При проверке разделки шва под сварку основными контролируемыми размерами являются зазор между кромками, притупление и угол раскрытия разделки (для стыковых швов); ширина нахлестки и зазор между листами (для нахлесточных соединений); зазор между свариваемыми деталями и угол между ними (для угловых соединений). От качества подготовки и геометрических размеров разделки шва в значительной степени зависит качество сварного соединения и производительность сварочных работ.

В результате завышения угла скоса кромок происходит перерасход электродного материала, возрастают деформации и коробления свариваемых элементов вследствие большой зоны интенсивного разогрева и более заметного влияния усадки наплавленного металла из-за увеличения его объема.

Уменьшенный угол скоса затрудняет надежное проплавление вершины угла разделки и приводит к непровару в корне шва.

Увеличение размера притупления кромок приводит к непровару, а его уменьшение – к прожогам.

Отклонение величины зазора от нормальной происходит вследствие неточной сборки, смещения и коробления деталей под

действием термических и усадочных напряжений наплавленного металла ранее заваренных швов и неточной разделки кромок.

Уменьшение зазора обычно приводит к непровару, а чрезмерное увеличение – к прожогам.

Учитывая роль геометрических размеров разделки шва в качестве сварного соединения, их проверяют с помощью специального инструмента – шаблона.

Качество сборки соединения под сварку во многом зависит от метода обработки кромок. Наилучшие результаты дает механическая обработка (строгание, фрезерование, токарная обработка).

Подготовку кромок, сборку изделий под сварку, наложение прихваток, зачистку подготовленного сварного соединения в соответствии с существующими ТУ легче выполнить в условиях цеха, чем на монтажной площадке, поэтому перенесение заготовительных операций с монтажной площадки в цеха, мастерские или базы также позволяет значительно улучшить качество подготовки изделий под сварку.

Качество сварочного оборудования является одним из элементов, влияющих на качество сварного соединения. Этот вид контроля целесообразно разбить на два этапа. На первом этапе контролируется выбор необходимого оборудования, а на втором – состояние уже выбранного сварочного и вспомогательного оборудования.

При выборе оборудования следует руководствоваться прежде всего требованиями получения качественного сварного соединения. Для источников питания дуги следует рассмотреть технические данные оборудования (род тока, пределы его регулирования, напряжение и т. п.) с точки зрения получения качественных сварных соединений, а для автоматов – возможность применения и, в частности, обеспечение надежной защиты сварочной дуги в условиях строительно-монтажной площадки. Для термической обработки предпочтение следует отдавать аппаратуре, обеспечивающей автоматический контроль режима обработки.



На втором этапе предупредительного контроля следует поддерживать в заданных пределах состояние, технический уровень и надежность сварочного оборудования. Необходимо соблюдать график ТО оборудования и выполнять соответствующие инструкции по его эксплуатации.

Проверка технологии сварки является важным звеном в системе предупредительного контроля.

При проверке технологии сварки контролируется в зависимости от выбранного метода сварки целый ряд показателей, таких как марка и диаметр электрода, приемы (при ручной сварке), скорость сварки, марки и диаметр присадочной проволоки (при механизированной сварке), марка флюса и вид защитных газов, род сварочного тока, его величина, напряжение и полярность (при сварке на постоянном токе), величина вылета электрода, число валиков в сварном шве и порядок их наложения, режимы термической обработки.

Проверка технологии сварки начинается со сварки контрольных образцов (катушек для трубопроводов и пластин для металлоконструкций и оборудования). При этом проверяется правильность рекомендованных режимов, механические свойства сварного соединения.

В случае необходимости проверяются показатели наплавленного металла, а также проводятся коррозионные и металлографические исследования сварного соединения. Непосредственно в процессе сварки проверяются элементы технологии.

Контроль сварочных материалов заключается в проверке правильного их хранения на рабочих местах. Для хранения электродов рекомендуются специальные термоизоляционные пеналы, защищающие электроды от насыщения их покрытия влагой.

Большое внимание следует уделить проверке состояния инструмента сварщика и сварочного оборудования. Прежде всего источники питания сварочной дуги должны быть оборудова-

ны приборами для контроля сварочного тока и напряжения на дуге, обеспечивать параметры режима сварки, предусмотренные технологией.

Сварочный провод не должен превышать максимально допустимую длину, должен не иметь скруток (отрезки проводов должны соединяться специальными муфтами или соединителями), присоединение обратного провода цепи к свариваемому изделию выполняется с помощью специальной клеммы заземления.

Проверяют наличие на рабочем месте щетки, зубила, шаблона для проверки размеров разделки шва, клейма.

В случае применения механизированных способов сварки следует проверять состояние сварочного и вспомогательного оборудования. Наиболее часто появляются дефекты из-за износа роликов, подающих проволоку в сварочную дугу (создается неравномерная подача проволоки), засорения подающих рукавов в шланговых полуавтоматах, износа и забрызгивания токопроводящих мундштуков, образования люфтов в кинематической цепи механизмов перемещения автоматов, а также механизмов – манипуляторов, вращателей (создается неравномерная скорость сварки).

#### **4.4. Контроль квалификации сварщиков**

Проверка квалификации сварщиков производится перед допуском их к сварке конструкций ответственного назначения; кроме того, в процессе изготовления или монтажа металлических конструкций (МК) сварщики периодически проходят повторные испытания. Проверка квалификации сварщиков независимо от их стажа проводится не реже одного раза в год.

Испытания сварщиков разделяются на теоретические и практические.

Теоретические испытания заключаются в проверке знаний сварщиков в объеме технического минимума. При этом сварщик должен знать: сущность метода сварки, по которому происходит испытание; назначение, устройство, принцип действия и правила обслуживания сварочного оборудования, а также причины основных неисправностей и методы их устранения; технологию сварки, основные виды сварных соединений, типы швов, подготовку изделий под сварку, сборку и требования к ней, а также последовательность операций при сварке; типы и марки сварочных материалов, применяемых для этих конструкций; виды дефектов сварных швов, причины их возникновения и меры устранения; правила техники безопасности.

При проверке практической квалификации сварщика уславливается его умение качественно выполнять сварку ответственных швов, правильно устанавливать режим сварки, а также производить пуск, остановку и регулировку сварочного оборудования, подбирать сварочные материалы, инструмент и приспособления, исправлять дефекты сварных швов, выявлять дефекты сварных швов при внешнем осмотре и оценивать качество сварки по излому.

Все эти навыки сварщика определяются практической проверкой умения обращаться со сварочной аппаратурой, внешним осмотром сварных швов, проверкой их качества по данным механических испытаний.

Кроме рассмотренных правил испытания сварщиков для их допуска к ответственным сварочным работам на объектах, подведомственных контролю Госгортехнадзора, имеется ряд ведомственных ТУ и правил испытаний сварщиков. Так, например, при монтаже технологических трубопроводов, сооружений резервуаров и строительстве магистральных газонефтепроводов к сварщикам предъявляется ряд дополнительных требований, подробно изложенных в технических условиях.

## 4.5. Разрушающие методы контроля качества

В процессе эксплуатации металлические конструкции работают при различных видах нагрузок, температурах и средах. Поэтому для обеспечения нормальной эксплуатации необходимо знать их техническое состояние, что может обеспечить техническое диагностирование. Однако неразрушающие методы контроля не позволяют выявить такие недостатки металла, как:

- низкие значения механических свойств (прочность, хрупкость и т. д.);
- низкая химическая стойкость – склонность к общей или межкристаллитной коррозии (для сварных соединений специальных сталей, работающих в условиях агрессивных сред);
- недостатки микроструктуры – наличие структур закалки, большой размер зерен, наличие микродефектов, пор, загрязнений и т. д.;
- несоответствие химического состава шва предъявленным требованиям.

Аналогичная картина наблюдается при разработке технологии и изготовлении изделия.

Поэтому перечисленные недостатки, способные негативно отразиться на работоспособности конструкции, выявляются разрушающими методами, т. е. путем разрезания исследуемого места, изготовления из него специальных образцов и их испытания.

При таком разрушающем способе контроля на проверяемой конструкции в необходимом месте, например трубопроводе, вырезают контрольные стыки труб или сваривают специальные пробные или контрольные соединения, на которых производится проверка необходимых свойств.

Такие контрольные соединения свариваются теми же сварщиками, с применением тех же сварочных материалов и основного

металла, методов и условий сварки, что и при сварке основного контролируемого объекта. Заготовки для образцов вырезают ножницами или применяют кислородную или электродуговую резку. Из заготовок образцы изготавливают только механическим путем, строго следуя указаниям по допускам и чистоте обработки. Объем сварки (или вырезки) контрольных сварных соединений регламентируется техническими условиями на данный объект [80].

#### ***4.5.1. Испытание механических свойств металла шва и сварных соединений***

Нарушения технологии сварки и использование некачественных сварочных материалов могут неблагоприятно сказываться как на кристаллическом строении сварного шва, его газонасыщенности и загрязненности, так и на состоянии околошовной зоны, и не могут быть обнаружены неразрушающими методами контроля. Для углеродистых и низколегированных сталей эти явления прежде всего отражаются на механических свойствах, у легированных сталей они могут отразиться и на других свойствах.

Критерием механической прочности является способность сварного соединения или конструкции в целом сопротивляться механическому разрушению или выдерживать деформации без разрушения. Часто, кроме механических свойств металла сварного шва, требуется определить и механические свойства сварного соединения в целом. В этом случае сравнивают свойства металла шва и зоны термического влияния со свойствами основного металла. При сварке ответственных металлических конструкций изготавливают контрольные образцы, результаты испытаний которых служат критерием качества сварки.

Вид механических испытаний образцов зависит от того, какую нагрузку несет сварное соединение в процессе эксплуатации.

Испытания бывают статическими (с постоянной или медленно возрастающей нагрузкой), динамическими (с ударной нагрузкой) и вибрационными. При вибрационном испытании, или испытании на выносливость, нагрузка изменяется по величине и амплитуде в течение определенного времени, при этом также изменяются частота и число циклов нагружения.

Определение механических свойств всего сварного соединения, отдельных его участков, наплавленного металла при всех видах сварки проводят в соответствии с ГОСТ.

В табл. 6 приведены некоторые виды механических испытаний и области их применения.

Таблица 6

**Виды механических испытаний**

Вид испытания	Назначение
Статическое растяжение (металл различных участков сварного соединения и наплавленный металл). Ударный изгиб (металл шва и зоны термического влияния). Стойкость против механического старения (металл различных участков сварного соединения)	Проверка сварочных материалов (электродов, проволоки, флюсов, защитных газов).  Определение свариваемости различных марок стали и сплавов
Статическое растяжение, статический изгиб (загиб) и ударный изгиб	Определение механических свойств сварных соединений на образцах, взятых из контрольных стыков (пластин). Проверка квалификации сварщиков, допускаемых к ответственным сварочным работам
Измерение твердости металла различных участков сварного соединения и наплавленного металла	Контроль качества сварочных материалов и сварных соединений, преимущественно на закаливающихся сталях

*Статические испытания.* При статических испытаниях определяют прочность и пластичность металла. Свойства определяются при испытании образцов на растяжение (сварного соединения и наплавленного металла), изгиб (сварного соединения), стойкость хрупкого разрушения и твердость.

При растяжении стандартных образцов определяют пределы прочности и текучести, относительное удлинение и сужение. Для определения пластических свойств стыкового соединения проводят испытание на изгиб до появления первой трещины. Его выполняют на плоских образцах, вырезанных из сварных соединений. Испытание проводят путем изгиба образца, помещенного на двух опорах, с помощью оправки. При испытании образцов с односторонним швом в растянутой зоне образца (внизу) должны располагаться поверхностные внешние слои шва; при испытании двусторонних швов на растянутой стороне должен размещаться шов, сваренный последним. Мерой пластичности служит величина просвета между сжимаемыми стенками, т. е. угол загиба.

При этом испытании наличие поверхностных и подповерхностных дефектов (пор, шлаковых включений, мельчайших трещин, несплавления по кромке) способствует образованию надрывов при малом угле загиба образца и служит показателем низкого качества сварного соединения.

Следует отметить, что во время испытания на изгиб дефекты в сварном соединении, находящиеся на внутренней поверхности и во внутреннем сечении образца, не видны и не оказывают существенного влияния на результаты, что является недостатком этого вида контроля [80].

Сварные конструкции, изготовленные из высокопрочных материалов (или предназначенных для работы при отрицательных температурах), дополнительно испытываются на стойкость против хрупкого разрушения. При хрупком разрушении пластические деформации перед разрушением относительно малы по

сравнению с упругими, поэтому разрушение конструкции возможно при сравнительно невысоких средних напряжениях и сопровождается лавинообразным распространением трещины через все сечение конструкции [123].

Стойкость против хрупкого разрушения определяется при статическом изгибе специального образца с надрезом, в вершине которого имеется искусственно созданная усталостная трещина.

*Динамические испытания.* Динамические испытания проводят на растяжение, изгиб и кручение. Чаще всего проверяется ударная вязкость при нормальной, пониженной и повышенной температурах. Температура задается в зависимости от условий работы конструкции. Для испытаний готовятся специальные образцы с надрезом, который может располагаться по оси шва, линии сплавления или в зоне термического влияния со стороны раскрытия шва. Место расположения надреза определяется целью испытания. При испытании металла шва или основного металла надрез можно делать с любой стороны образца. Для испытаний применяются маятниковые копры с различной предельной энергией.

Ударная вязкость определяется как отношение работы, затраченной на излом образца, к площади его поперечного сечения в месте надреза до испытания. Следует отметить, что результаты испытаний даже одного и того же металла на образцах различного сечения оказываются разными, поэтому сравнимыми могут быть результаты только на образцах одного какого-либо типа [80].

К динамическим нагрузкам относятся испытания на усталость (выносливость), когда определяется способность конструкции сопротивляться действию переменных нагрузок при растяжении, изгибе и кручении.

Испытания проводят на цилиндрических или плоских образцах специальной формы и размеров, вырезанных поперек сварного соединения. Наибольшее напряжение, при котором образец



выдерживает без разрушения заданное число циклов, принимается за базу испытания и называется пределом усталости (выносливости). Усталостные испытания проводятся для специальных конструкций, изготовленных из высокопрочных сталей или работающих в условиях отрицательных температур и вибрационных нагрузок.

*Испытания на твердость.* Контроль твердости проводят не только для проверки качества сварных соединений, но и при термической обработке. При контроле сварного соединения образцы из изделия вырезают таким образом, чтобы в них имелись все три участка сварного соединения: металл сварного шва, зона термического влияния и основной металл. Твердость проверяют на изготовленных шлифах и с помощью портативных твердомеров на предварительно зашлифованной поверхности изделия. Измерения проводятся на поперечном сечении образца в двух взаимно перпендикулярных направлениях: по оси шва и вдоль линий, параллельных верхней и нижней поверхности листа. Если стыковое соединение имеет толщину менее 3 мм, то твердость замеряется на наружной поверхности при снятом усилении. Твердость определяется по методу Бриннеля, Роквелла и Виккерса.

Для определения твердости непосредственно на конструкции или на строительно-монтажных площадках можно использовать малогабаритные ультразвуковые твердомеры.

Измерение твердости производится в основном для проверки свойств сварных соединений легированных перлитных сталей, склонных к полной или частичной закалке при охлаждении с высоких температур. При отсутствии термической обработки сварных швов проверка твердости шва и околошовных зон проводится для того, чтобы убедиться в отсутствии частичной закалки металла.

Если сварное соединение металлических конструкций подвергается термической обработке, то замер твердости является средством быстрой проверки ее эффективности.

### 4.5.2. Металлографический контроль

Металлографические исследования проводят при проверке технологии сварки, режимов последующей термической обработки, качества сварочных материалов и при технической диагностике в процессе эксплуатации объекта. Металлографический контроль состоит из трех видов испытаний: контроля вида излома, контроля макроструктуры, проверки микроструктуры.

При металлографических исследованиях изучается структура металла сварного соединения. Цель исследования – проверка правильности технологии сварки и термической обработки, качества сварочных материалов, выявление дефектов и установление причин их появления. Изучение структуры может проводиться на специальных образцах – шлифах, в изломе сварного образца и на поверхности лунки, образованной засверливанием.

*Контроль вида излома.* Проверка вида излома может производиться либо на специально приготовленных образцах, либо на образцах, оставшихся после испытания ударной вязкости. В соответствии с этим в сварном соединении можно оценивать изломы швов, околошовных зон теплового влияния и основного металла.

Характер излома может быть вязким (волокнуистым) или хрупким (кристаллическим).

Волокнистое строение металла свидетельствует о пластичном разрушении и повышенной ударной вязкости.

Крупнозернистый излом с блестящей кристаллической поверхностью характерен для хрупкого металла, обладающего пониженной ударной вязкостью. Степень пластичности металла сварного соединения можно определить по соотношению площадей с вязким и кристаллическим видами разрушения.

У углеродистых сталей, наиболее часто применяемых в строительстве, матовый волокнуистый излом без блесков и хорошо

различных крупных кристаллов свидетельствует о вязкости стали и хороших свойствах (рис. 14, *а*). Чем больше в изломе появляется блестящих кристаллических участков, тем ниже вязкость стали, и, наконец, когда весь излом является блестящим, кристаллическим, металл оказывается наиболее хрупким (рис. 14, *б*).

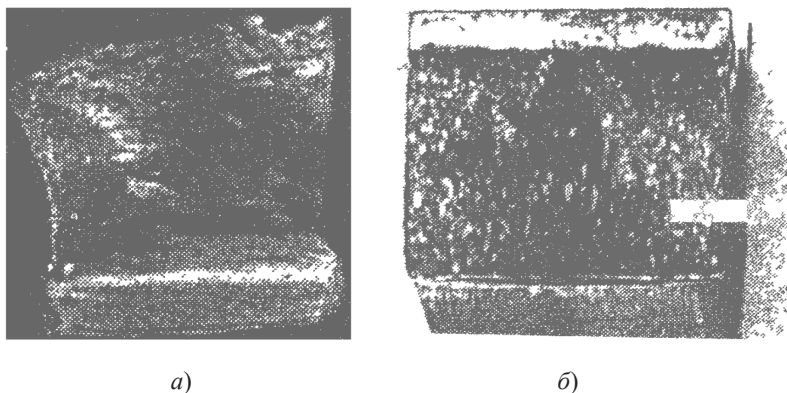


Рис. 14. Изломы ударных образцов из углеродистых сталей:  
*а* – вязкий (волокнистый); *б* – хрупкий (кристаллический)

При контроле околошовной зоны характер волокнистого (вязкого) и кристаллического (хрупкого) вида излома является принципиально таким же, как для швов, с той разницей, что общее строение является более мелким (рис. 15). Появление же в изломе блестящих кристалликов, как правило, свидетельствует о перегреве (чем больше размер этих блестящих образований, тем нагрев выше). При контроле излома околошовных зон по ударным образцам часто можно наблюдать расслоение основного металла, обусловленное полосчатым строением, которое следует отнести к его недостаткам.

Легирование стали, как правило, измельчает ее зерно, и чем больше легированных добавок, тем это измельчение заметнее.

В то же время характер волокнистого и кристаллического строения принципиально остается таким же. При этом волокнистость и кристалличность излома оказываются менее четко выраженными, что требует большего опыта для их оценки.

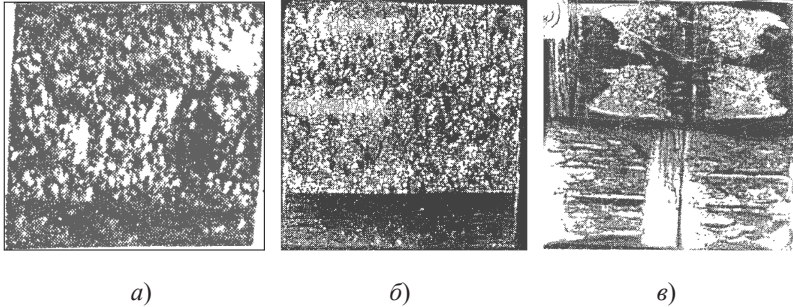


Рис. 15. Изломы образцов из околосовной зоны углеродистой стали:  
*a* – вязкий (волокнистый); *б* – хрупкий (кристаллический);  
*в* – расслоение

Кроме вида кристаллического строения, следует проверять качество сварки, наличие трещин, пор, шлаковых включений (рис. 16).

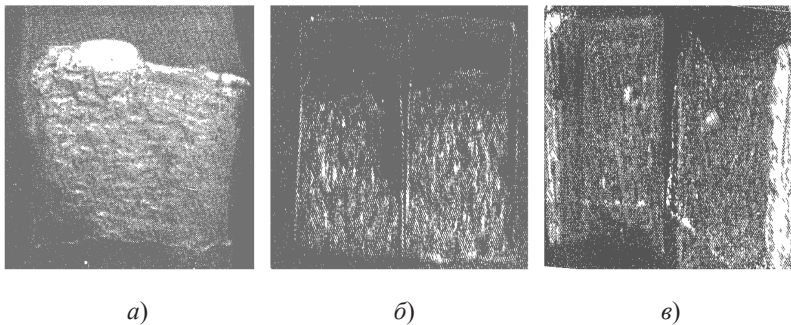


Рис. 16. Дефекты сварки в изломе:  
*a* – горячие трещины; *б* – поры; *в* – шлаковые включения

Горячая трещина в изломе чаще всего обнаруживается по его темной окислившейся поверхности. Поры имеют характерный вид округлых или втянутых пустот с гладкой поверхностью.

Шлак преимущественно выглядит как инородное включение в металле. Иногда при испытании шлаковое включение выпадает, тогда на его месте остается пустота с неровной поверхностью.

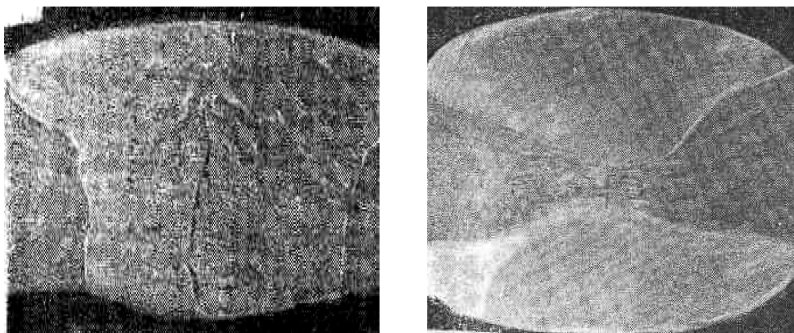
Наличие такого рода дефектов не должно превышать пределов, допустимых техническими условиями.

Макро- и микроструктура изучается на шлифах или на поверхности лунки.

*Проверка макроструктуры.* Для ее изучения из изделия вырезаются специальные контрольные пластины (катушки труб) или образцов, включающие в себя полное сечение шва, зону термического влияния и основной металл. После полировки и травления на образце должны быть четко выявлены границы между основным и наплавленным металлом, между зоной термического влияния и металлом, не подвергшимся изменению; между отдельными слоями при многослойной сварке.

Подготовленный таким образом образец-макрошлиф изучается невооруженным глазом или с помощью лупы. При изучении макрошлифа можно сделать выводы о строении сварного соединения в целом, его кристаллической и химической неоднородности. На макрошлифе можно обнаружить также скопления серы, фосфора, окислов железа, трещины, непровары. Макроскопические исследования можно проводить и на свариваемом изделии. Для этого сверлом с углом заточки  $90^\circ$  высверливают лунку в вершине шва с захватом основного металла на 1,5 мм на сторону. Затем засверленное место шлифуют наждачной бумагой, протравливают и рассматривают через лупу. При отсутствии дефектов лунка заваривается.

При проверке дефектов по макрошлифам особое внимание необходимо обращать на трещины и внутренние непровары между слоями по кромке (рис. 17).



*a)*

*б)*

Рис. 17. Макрошлиф с дефектами:

*a* – трещины; *б* – внутренний непровар между слоями

Проверка макроструктуры позволяет установить не только наличие дефектов, но и расположение и количество отдельных валиков шва (рис. 18), что часто (особенно для толстостенных изделий из легированных и высоколегированных сталей) оговаривается в технических условиях и инструкциях.

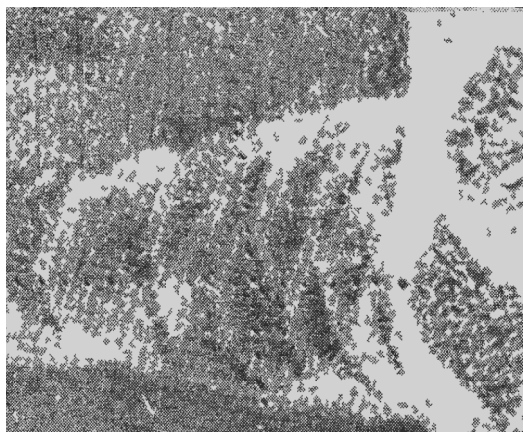


Рис. 18. Макрошлиф многослойного шва

Как правило, меньший размер валиков обеспечивает получение лучших свойств сварных соединений, а мелкокристаллическое строение шва должно считаться более предпочтительным, чем крупнокристаллическое (рис. 19).

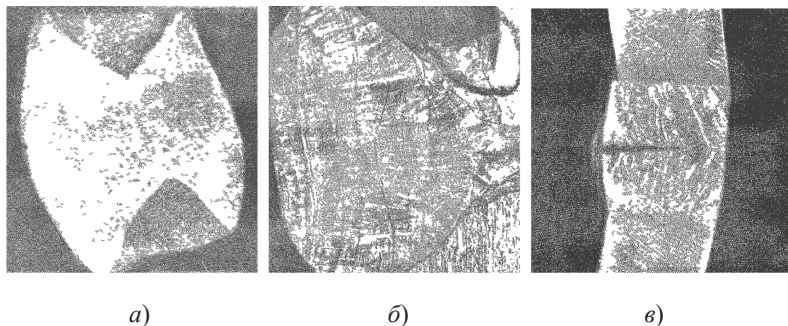


Рис. 19. Кристаллическое строение шва: *a* – мелкокристаллическое; *б* – крупнокристаллическое; *в* – со стыком кристаллов

Особенно вредно при крупнокристаллическом строении наличие ярко выраженного стыка кристаллов, растущих с разных сторон, с рыхлостью между ними.

По макрошлифу можно определить размеры и очертания зоны теплового влияния и оценить наличие сильного перегрева на этом участке по его крупнокристаллическому строению (рис. 20).

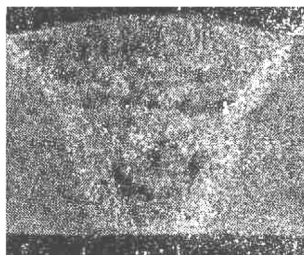


Рис. 20. Макрошлиф шва с околошовной зоной теплового влияния при наличии перегрева в околошовной зоне

На сварных соединениях металлоконструкций, выполненных прессовыми методами сварки, макротравление хорошо выявляет место стыка и наличие в нем дефектов (рис. 21).

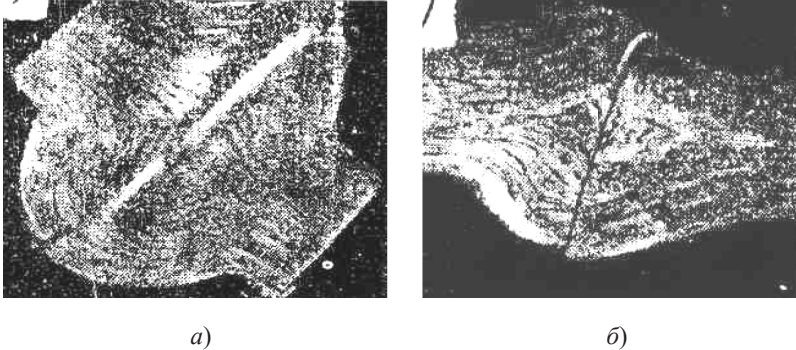


Рис. 21. Макрошлиф стыка прессовой сварки:  
а – при отсутствии дефектов; б – при наличии дефектов в стыке

*Проверка микроструктуры.* Микроструктура сварных соединений проверяется на специально подготовленных микрошлифах. Микрошлиф целесообразно вырезать так, чтобы в него попали все зоны сварного соединения. Его поверхность шлифуется, полируется и затем протравливается. Исследование заключается в изучении отдельных участков сварного соединения при увеличении микроскопа от 100 до 600 раз (иногда больше). Изучение проводится в два этапа. На первом этапе микрошлиф без травления изучается с целью выявления газовых пор, микротрещин, пережогов, металлических включений, а также проверки качества подготовки изучаемой поверхности [80]. На рис. 22 приведен пример обнаружения таких дефектов.

На втором этапе после травления шлифа исследуется микроструктура наплавленного металла, металла зоны термического влияния и основного металла; устанавливается наличие структур закалки и перегрева, размеры зерен, микроскопические дефекты



сварки. Это дает возможность приблизительно оценить механические свойства сварного соединения и изучить структуру характерных участков сварного соединения.

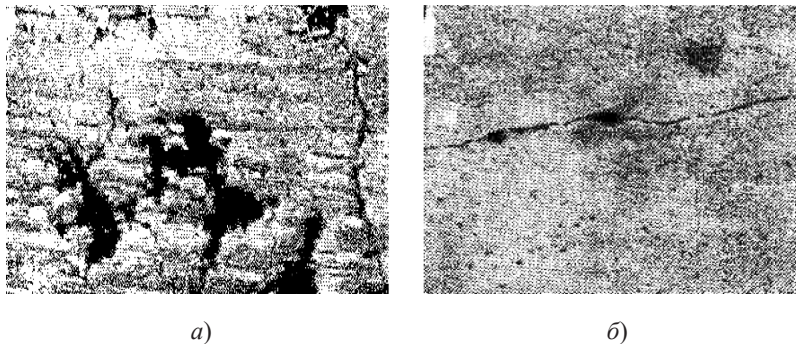


Рис. 22. Дефекты, обнаруживаемые на нетравленном микрошлифе:  
а – пережог; б – микротрещина

При сварке углеродистых и низколегированных сталей следует оценивать:

- степень перегрева в околошовной зоне по размерам выросших зерен – чем крупнее зерно, тем сильнее перегрев, отрицательно влияющий на некоторые свойства стали (вязкость, вибропрочность) (рис. 23);



Рис. 23. Перегрев в околошовной зоне углеродистой стали

- однородность и неоднородность структуры шва – наличие крупных дефектов является менее благоприятным, чем однородная бездендритная структура шва (рис. 24);

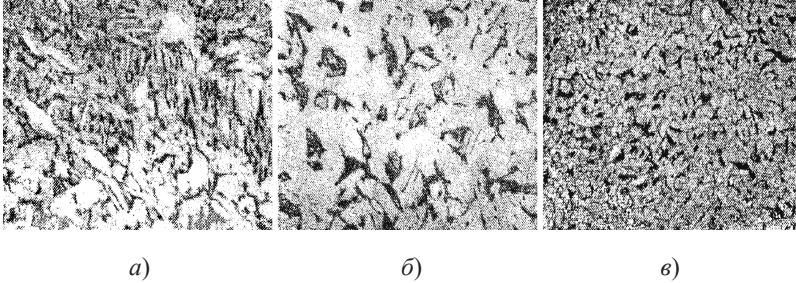


Рис. 24. Микроструктура шва углеродистой стали: *а* – неоднородное дендритное строение; *б* – однородное крупнозернистое феррито-перлитное строение; *в* – однородное мелкозернистое феррито-перлитное строение

- крупно- или мелкозернистое строение, при этом мелкозернистое строение шва более благоприятно (см. рис. 24);
- строчечность микростроения – малая степень строчечности свидетельствует о том, что сталь более чистая и однородная по свойствам, при большей степени строчечности сталь можно считать более загрязненной и менее надежной в эксплуатации (рис. 25).

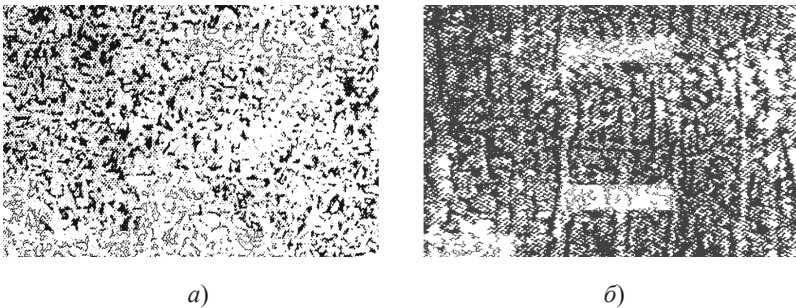


Рис. 25. Различная степень строчечности в свариваемой стали:  
*а* – строчечность более 1; *б* – строчечность более 4...5

Для сталей среднелегированных, способных к закалке (частичной или полной) при охлаждении на воздухе после сварки, следует проверить отсутствие игольчатых структур (рис. 26), особенно при содержании углерода в металле более 0,15 %.

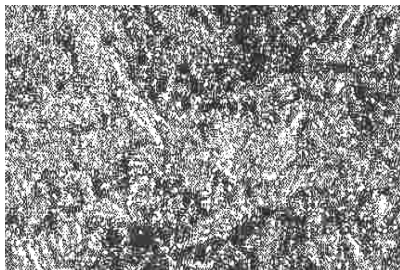


Рис. 26. Игольчатая структура закалки типа мартенсита в сварном соединении среднелегированной стали

### ***4.5.3. Контроль коррозионной стойкости***

В некоторых случаях сварные соединения углеродистых и главным образом легированных и высоколегированных сталей работают в условиях химически активной среды, способной вызвать коррозию. В этом случае применяют специальные (нержавеющие и кислотостойкие) стали и сплавы. В средах с умеренной химической активностью применяют или менее легированные стали, содержащие в основном хром, или даже углеродистые.

Поэтому сварные конструкции, работающие в агрессивных средах, иногда подвергают специальному контролю на коррозионную стойкость, так как металл шва по составу и по структурному состоянию может отличаться от основного металла. Цель проверки – восстановление долговечности работы изделия в данной среде.

Возможны в основном два вида коррозии – общая и межкристаллитная. При общей коррозии сварное соединение разрушается от непосредственного взаимодействия металла и агрессивной среды. Эта коррозия характерна для углеродистых и низколегированных сталей. При межкристаллитной коррозии разрушение металла происходит по границам зерен.

Межкристаллитной коррозии особенно подвергаются нержавеющие стали аустенитного и аустенитно-ферритного классов (рис. 27). При этом внешне изделие остается таким же, каким оно было до коррозионного поражения (неизменная толщина, даже металлический блеск), а внутри металл структурно оказывается настолько пораженным, что часто рассыпается при незначительном механическом усилии извне.



Рис. 27. Межкристаллитная коррозия нержавеющей стали

При нагреве до 500...700 °С при сварке или при эксплуатации нержавеющих сталей с большим содержанием хрома происходит образование и выделение по границам зерен карбидов хрома. В этом случае границы зерен обедняются хромом и теряют устойчивость против коррозии, вследствие чего химически активная среда поражает сталь по границам зерен, приводя в конечном счете к потере связи между зернами.

Для предотвращения этого явления в сталь вводят элементы, имеющие сродство с углеродом больше, чем хром (титан,

ниобий). Эти элементы связывают имеющийся в стали углерод, и он не может образовать карбиды хрома.

*Оценка стойкости против общей коррозии.* При ускоренном лабораторном испытании образцы кипятят в азотной кислоте разной концентрации несколькими циклами по 24...28 ч. Концентрация кислоты выбирается в зависимости от условий работы сварного соединения. Показателем общей коррозии является потеря в весе ( $\text{г/м}^2\cdot\text{ч}$ ) или скорость коррозии ( $\text{мм/год}$ ).

Шкала коррозионной стойкости железа и его сплавов приведена в табл. 7.

Таблица 7

**Шкала коррозионной стойкости железа**

Группа стойкости	Коррозионная стойкость, баллов	Скорость коррозии (глубина), мм/год	Потеря веса, $\text{г/м}^2\cdot\text{ч}$
Совершенно стойкие	1	Не более 0,001	Не более 0,0009
Весьма стойкие	2	0,001...0,005	0,0009...0,0045
	3	0,00...0,01	0,004...0,009
Стойкие	4	0,01...0,05	0,009...0,045
	5	0,05...0,01	0,045...0,09
Пониженной стойкости	6	0,1...0,5	0,09...0,45
	7	0,5...1	0,45...0,9
Малостойкие	8	1...5	0,9...4,5
	9	5...10	4,5...9,1
Нестойкие	10	Более 10	Более 9,1

*Оценка стойкости против межкристаллитной коррозии.* Межкристаллитная коррозия возможна главным образом на аустенитных нержавеющей сталях и в меньшей мере – на ферритных (хромистых).

Для оценки коррозионной стойкости образцы помещают в раствор, состоящий из 1 л воды с добавлением медной стружки, 160 г сернокислой меди и 100 мл серной кислоты, нагревают до кипения и кипятят в течение 24 ч.

Для выявления склонности к межкристаллитной коррозии в более жестких условиях продолжительность кипячения можно увеличить до 48 и даже 100 ч. После этого образцы извлекают из раствора, промывают, просушивают и загибают на угол 90°.

Поперечные трещины, появляющиеся на испытываемых образцах, свидетельствуют, что металл в местах растрескивания склонен к межкристаллитной коррозии и не пригоден для эксплуатации (рис. 28).

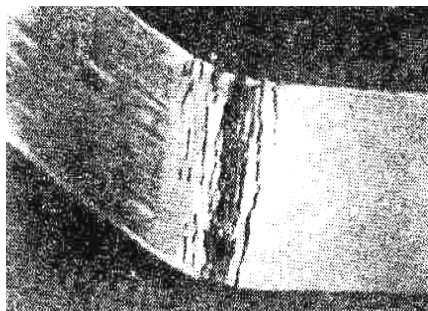


Рис. 28. Сварной образец нержавеющей стали, склонной к межкристаллитной коррозии

Склонность к межкристаллитной коррозии может быть определена металлографически. Для этого образцы после кипячения шлифуются и полируются с торцевой стороны. Исследование микрошлифа производится при увеличении в 300...400 раз. Для облегчения анализа шлиф можно слегка протравить в обычном для данной стали реактиве.

Браковочным признаком является разрушение границ зерен на глубину более 30 мкм при равномерном поражении всей

поверхности шлифа и на глубину более 50 мкм при повышенном разьедаении границ отдельных зерен.

*Контроль коррозионного и механического износа.* Для контроля толщин изделий в системе технической эксплуатации и ремонта строительных металлоконструкций наиболее эффективными являются ультразвуковые толщиномеры (УЗТ). Они применяются также для контроля коррозионного и механического износа металлоконструкций стержневого, коробчатого, трубчатого сечения, трубопроводов, пневмо- и гидropерегрузжателей, измерения остаточных толщин контейнеров, различных корпусных конструкций, деталей машин, немагнитных токонепроводящих покрытий и т. д. Ультразвуковые толщиномеры обеспечивают измерение толщин с точностью до 0,01 мм при одностороннем доступе к конструкции, позволяют заменить трудоемкие и непроизводительные методы определения остаточной толщины конструкции засверливанием.

Ультразвуковые толщиномеры основаны на измерении времени прохождения ультразвуковых импульсов при известной скорости прохождения ультразвуковых колебаний в материале изделия. Минимальная контролируемая толщина определяется частотой ультразвуковых колебаний, длительностью импульса, интервалом времени между двумя соседними импульсами и для плоских изделий может составлять 0,2...0,3 мм. Максимальная измеряемая толщина зависит от мощности импульсов и может достигать нескольких метров.

#### ***4.5.4. Химический анализ***

В ряде случаев – при отсутствии технической документации на объект, при разработке новой технологии сварки ответственных конструкций, для определения причин появления дефектов,

для отбраковки материалов по составу, при отсутствии сертификатов на основной и сварочный материал – необходимо знать химический состав металла шва, основного и присадочного металлов. При этом химический анализ позволяет определить в металле содержание основных химических элементов. Он позволяет выяснить, находится ли содержание углерода, кремния, марганца и других легирующих элементов в пределах, которые рекомендуются для тех или иных сварных соединений. Кроме того, важно установить, что содержание таких вредных примесей, как сера, фосфор и др., не превышает в стали допустимых пределов.

Анализу подвергаются стружки, взятые из специальных образцов или непосредственно из шва. Следует следить за тем, чтобы в пробу попало меньше основного металла. Если получаются сомнительные результаты по химическому анализу данной пробы, отбирают еще не менее двух проб.

*Преимущества и недостатки разрушающих методов контроля.* К преимуществам разрушающих испытаний следует отнести то, что при их проведении можно измерить разрушающие нагрузки или другие характеристики, которые определяют эксплуатационную надежность изделия.

Существенным недостатком разрушающих методов контроля является то, что они проводятся выборочно, только на определенной части изделий партии. При этом достоверность результатов испытаний зависит как от однородности исследуемых свойств в образцах, так и от сходства условий испытаний с условиями эксплуатации.

По сравнению с НК разрушающие методы контроля, как правило, более трудоемки, обладают меньшей производительностью и труднее поддаются автоматизации.

Одной из современных тенденций в использовании испытательной техники является стремление сочетать разрушающие и неразрушающие методы контроля.



Так, например, с помощью НК изделия сортируют по различным группам качества. Разрушающий контроль образцов, взятых из каждой группы, позволяет установить соответствие эксплуатационных характеристик изделия измеренным. Если эти связи установлены, то НК позволяет резко сократить объем и периодичность разрушающих испытаний. В этом случае разрушающие испытания проводят в основном для периодической проверки результатов НК.

#### **4.6. Неразрушающие методы контроля качества**

Зарождение неразрушающего контроля относят ко времени открытия в ноябре 1895 г. рентгеновских лучей, проникающих через тела и материалы, что позволило использовать их для наблюдения внутренних органов человека и выявления дефектов в промышленных объектах. В 1928 г. профессор С. Я. Соколов предложил использовать ультразвуковые волны для выявления несплошностей в объектах и оформил свой приоритет патентом [53].

Огромная роль в развитии методов НК принадлежит Р. И. Янусу, Л. Г. Меркулову, С. Т. Назарову, А. С. Фалькевичу, Н. С. Акулову, М. Н. Михееву, С. В. Румянцеву, И. Н. Ермолову, В. Г. Герасимову, Ф. Ферстеру, Р. Мак-Мастеру, Н. Крауткремеру, Х. Бергеру, Р. Шарпу и многим другим.

Новый, современный этап развития НК в России следует отсчитывать от 2000 г., что связано с включением НК в систему экспертизы промышленной безопасности Госгортехнадзора РФ.

Поскольку НК является элементом системы обеспечения безопасной эксплуатации опасных производственных объектов, результаты НК должны быть использованы более широко, чем сейчас. В частности, НК должен поставлять такую информацию, которая могла бы быть применена для оценки прочности

объекта (статической, динамической, циклической) и определения ресурса работы (или времени до достижения предельного состояния) [17].

В этом отношении наиболее приемлем системный подход. Госгортехнадзором России создана «Система контроля, позволяющая осуществить экспертизу промышленной безопасности и проводить техническое диагностирование без нарушения пригодности к дальнейшему применению и эксплуатации проверяемых технических устройств, оборудования и сооружений (неразрушающий контроль), для принятия решения о продлении срока их безопасной эксплуатации на опасных производственных объектах (определение остаточного ресурса) на территории Российской Федерации» [24, 92].

Для реализации положения системы НК разработана концепция управления [104], которой предусмотрено создание основополагающих нормативных документов:

- правила аттестации и основные требования к лабораториям НК;
- правила аттестации персонала в области НК;
- правила аттестации средств НК;
- правила аттестации методических документов по НК.

В этих документах должны быть изложены основные организационно-технические принципы проведения аттестации в соответствующей области действия каждого документа.

В настоящее время применение НК на объектах, представляющих потенциальную опасность, становится повседневной практикой на всех стадиях жизни объекта. При этом можно выделить следующие этапы: проектирование, изготовление, монтаж, начало эксплуатации (работа до назначенного ресурса), сверхресурсная эксплуатация, ускоренное старение, прекращение эксплуатации (отказ) [53].

### ***4.6.1. Визуально-оптический и измерительный контроль***

Визуальный контроль по своему исполнению сравнительно прост и эффективен. Признано, что он является обязательным, первоочередным и одним из самых информативных методов контроля, так как на этой стадии контроля могут выявляться недопустимые дефекты или места, требующие дополнительной проверки другими методами. Этот контроль широко применяется как при изготовлении различных узлов и конструкций, так и в процессе их эксплуатации. При этом выборочно проверяются геометрические размеры швов и их соответствие проектным величинам, выявляются подрезы, непровары, наплывы, прожоги, трещины, неравномерность размеров шва, отсутствие усиления и смещение при прессовых методах сварки, наличие кратеров, коробление и изменение размеров изделий сверх допустимого, пористость, отсутствие плавных переходов от одного сечения к другому и т. д.

Визуальный контроль основных материалов, сварных соединений и изделий проводится невооруженным глазом и (или) с применением оптических приборов (луп, зеркал, микроскопов, визуально-оптических приборов для контроля удаленных и скрытых объектов – эндоскопов, цистоскопов, бароскопов, флексоскопов, биноклей, перископических дефектоскопов, зрительных труб и др.) [56].

### ***4.6.2. Контроль на непроницаемость***

В зависимости от условий эксплуатации рабочей среды потеря сварной конструкцией работоспособности может наступить не из-за разрушений, а вследствие течи в сварных соединениях.

Поэтому изделия, предназначенные для работы под действием жидкостей и газов, подвергаются контролю сварных соединений на непроницаемость.

На непроницаемость испытываются трубопроводы и емкости, предназначенные для транспортировки и хранения жидкостей и газов, как правило, работающие при избыточном давлении. Изделие является герметичным, т. е. непроницаемым, если утечка рабочего вещества через его стенку не превышает допустимой величины и не нарушает нормальной работоспособности изделия в течение заданного времени. Нарушения непроницаемости вызывают сквозные дефекты. Для их обнаружения применяются следующие методы контроля.

*Керосино-меловая проба.* Этот метод служит для определения плотности сварных швов на металле толщиной до 10 мм. Доступную для осмотра сторону шва покрывают водной суспензией мела или каолина (350...450 г мела или каолина на 1 л воды) и просушивают. Противоположную сторону смачивают 2...3 раза керосином, который имеет высокую проникающую способность. При наличии течи керосин по неплотностям, за счет капиллярных сил, проникает сквозь толщу металла, и на осматриваемой стороне возникают жирные точки и полосы, которые с течением времени расплываются в пятна (рис. 29). Если дефекты сразу не зафиксировать, то точное определение места их нахождения становится затруднительным. Этим методом выявляют дефекты диаметром от 0,1 мм и более.

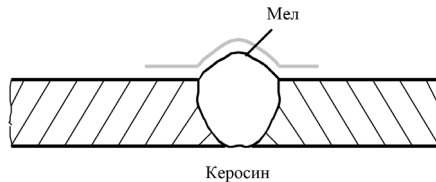


Рис. 29. Схема проведения керосино-меловой пробы

Для повышения вероятности обнаружения течи в керосин добавляют краски «Судан-111» (2,5 г/л).

Время проникновения керосина через дефектное место зависит от ряда факторов: температуры окружающей среды, размера и вида дефекта, количества смачиваний. При температуре ниже 0 °С время испытания должно быть не менее 8 ч, при температуре до 25 °С – не менее 4 ч, а при 50...60 °С – 1,5...2 ч.

Испытание керосином можно производить также при доступе к сварному шву с одной стороны. При этом поверхность шва обезжиривают бензином или ацетоном, а затем смачивают 3...4 раза подряд окрашенным в красный цвет керосином, который через 15...20 мин удаляют с помощью 5%-ного раствора кальцинированной соды с последующим просушиванием поверхности. После этого поверхность шва покрывают тонким слоем меловой суспензии и опять просушивают.

*Пневматические испытания.* Пневматические испытания (сжатым воздухом) проводят для определения общей герметичности сварных соединений трубопроводов, различных сосудов и емкостей, работающих под давлением.

Этот метод контроля основан на создании с одной стороны шва давления воздуха больше атмосферного (на 10...15 кПа) и промазывания шва с другой стороны мыльным раствором, образующим пузыри под действием сжатого воздуха, проникающего через неплотности. Мыльный раствор состоит из 100 г хозяйственного мыла на 1 л воды (зимой – 60%-ный раствор спирта или какой-либо незамерзающей жидкости).

Утечку воздуха можно также определить по понижению давления на манометре. Небольшие сосуды под давлением можно опускать в воду и по наличию пузырьков определять места течей.

Рассмотренный метод пневматического контроля применяется для испытания трубопроводов на прочность.

Другой метод испытания на герметичность заключается в обдувании струей сжатого воздуха давлением около 0,4...0,5 МПа

сварного соединения, обратная сторона которого покрыта пенным индикатором.

Расстояние между наконечником шланга и поверхностью шва не должно превышать 50 мм. Обдувной струей сжатого воздуха контролируют стыковые, тавровые и угловые сварные соединения крупногабаритных изделий при толщине свариваемого материала не более 10 мм.

*Вакуум-метод.* На строительно-монтажных площадках для контроля на непроницаемость сварных соединений в изделиях незамкнутой формы с односторонним доступом к ним, вслед за сваркой стыковых и нахлесточных соединений стальных резервуаров, металлических облицовок железобетонных и заглубленных резервуаров, разного рода экранов и панелей успешно применяется вакуумный метод, являющийся разновидностью пневматического. Этот метод позволяет выявлять сквозные несплошности размером 0,1 мм и выше в металле толщиной до 15 мм.

Сущность метода заключается в создании вакуума и регистрации проникновения воздуха через дефекты на одной, доступной для испытаний стороне шва, покрытой мыльным раствором (рис. 30).

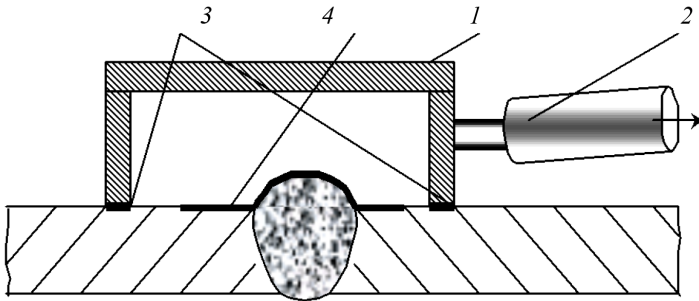


Рис. 30. Испытание на герметичность вакуум-методом:  
1 – стекло; 2 – накладная вакуум-камера;  
3 – уплотнительная резина; 4 – мыльный раствор

При положительной температуре в качестве пенных индикаторов обычно используют мыльные растворы (250 г хозяйственного мыла на 10 л воды). При отрицательной температуре применяется раствор хлористого кальция или натрия с экстрактом лакричного корня (15 г экстракта на литр хлористой соли) (табл. 8).

Таблица 8

**Зависимость температуры контроля  
от концентрации хлористого вещества**

Температура контроля, °С (отрицательная)	На 1 л водного раствора, г	
	Хлористого кальция	Хлористого натрия
До 5	100	83
5...10	170	160
10...15	220	222
15...20	263	290
20...25	303	–
25...30	329	–
30...35	366	–

*Гидравлические испытания.* В зависимости от вида конструкций различают три вида гидравлических испытаний.

Для контроля трубопроводов, гидравлических систем и других аналогичных изделий применяют метод гидравлического давления. Для проверки на герметичность вертикальных резервуаров, газгольдеров, баков, цистерн с толщиной стойки до 10 мм используют налив воды.

Сварные соединения большой протяженности открытых изделий контролируют поливом их с одной стороны струей воды из брандспойта.

При испытании гидравлическим давлением изделие герметизируется и заполняется водой или рабочей жидкостью под давлением, величина которого определяется техническими условиями Госгортехнадзора (обычно в 1,5...2 раза больше рабочего). При этом швы обстукивают молотком массой 0,5...1,5 кг после выдержки под давлением 5...10 мин. Дефектные места определяются по наличию капель, струек воды и запотевания. Этот метод одновременно оценивает и прочность конструкции.

При контроле наливом изделие заполняется водой до заданного уровня, определяемого техническими условиями на изделие, так же как и время выдержки и порядок осмотра. В среднем время выдержки должно составлять 0,5...24 ч при температуре воздуха и воды соответственно не ниже 0 и 5 °С.

Верхний шов, в котором обнаружены дефекты, освобождается от воды, дефекты устраняются, изделие дополняется водой для испытания исправленных швов.

Такие операции проводятся до полного устранения дефектов на всех швах сверху донизу. Такая технология по сравнению с полным удалением воды после обнаружения дефектов позволяет значительно сократить время испытаний.

При испытании поливом сварные соединения поливаются из шланга с брандспойтом (диаметр входного отверстия 15...30 мм, давление 0,1...1 МПа). Вертикальные соединения поливают снизу вверх. Операцию производят с расстояния не более 3 м.

*Контроль плотности методом химических реакций.* На наружный шов металла толщиной до 16 мм наносят слой 4%-ного раствора фенолфталеина или накладывают марлю, пропитанную раствором азотнокислого серебра. В изделие нагнетают воздух в смеси с аммиаком (аммиак поставляется в сжиженном виде в баллонах). Места локальных течей фенолфталеина окрашиваются в ярко-красный цвет, а азотнокислого серебра – в серебристо-черный. Перед испытанием требуется тщательная очистка швов от загрязнений.



### 4.6.3. Капиллярные методы контроля

Капиллярные методы основаны на капиллярном проникновении, адсорбции и диффузии, световом и цветовом контрастах и применяются для обнаружения поверхностных дефектов.

Выявление дефектов происходит за счет образования индикаторных оптически контрастных рисунков, воспроизводящих расположение и форму дефектов. Ширина индикаторных линий при этом значительно больше фактической величины раскрытия дефекта.

Проникновение жидкости в полости дефектов основано на капиллярных явлениях [9]. Так, если капилляр имеет форму цилиндрического отверстия, то смачивающая жидкость поднимается по капилляру на высоту  $h$ :

$$h = \frac{2\alpha \cdot \cos \theta}{R \cdot \rho \cdot g}, \quad (10)$$

где  $\alpha$  – коэффициент поверхностного натяжения;  $\theta$  – угол смачивания;  $\rho$  – плотность жидкости;  $R$  – радиус цилиндрического капилляра;  $g$  – ускорение свободного падения.

Если дефект имеет щелевидную форму с величиной раскрытия  $a = 2R$ , то

$$h = \frac{4\alpha \cdot \cos \theta}{a \cdot \rho \cdot g}. \quad (11)$$

Существенное влияние на производительность контроля оказывает скорость проникновения смачиваемой жидкости по капилляру. Так, время проникновения жидкости по капиллярам, имеющим форму сквозных цилиндрических отверстий на высоту  $h$ , определяется по формуле

$$t = \frac{h^2 \cdot 2 \cdot \eta}{R \cdot \alpha \cdot \cos \theta}, \quad (12)$$

где  $\eta$  – коэффициент вязкости.

Для дефектов, имеющих сквозную щелевидную форму с величиной раскрытия  $a = 2R$ , время составляет:

$$t = \frac{h^2 \cdot 4 \cdot \eta}{a \cdot \alpha \cdot \cos \theta}, \quad (13)$$

При наличии несквозных дефектов, например поверхностных трещин, проникновению пенетрантов вглубь препятствуют воздушные пробки, создающие противодействие капиллярным силам, в связи с чем время проникновения пенетрантов в глубокую трещину увеличивается и может достигать десятков минут.

В результате проникновения жидкости вглубь полости в верхней и нижней части образуются два мениска, создающие противоположные капиллярные давления  $P_1$  и  $P_2$  (рис. 31). Их равнодействующая  $P$  направлена вглубь полости и равна

$$P = P_1 - P_2 = \alpha \cdot \cos \theta \cdot \left( \frac{1}{R'_1} - \frac{1}{R'_2} \right), \quad (14)$$

где  $R'_2 > R'_1$  – радиусы кривизны второго и первого менисков соответственно.

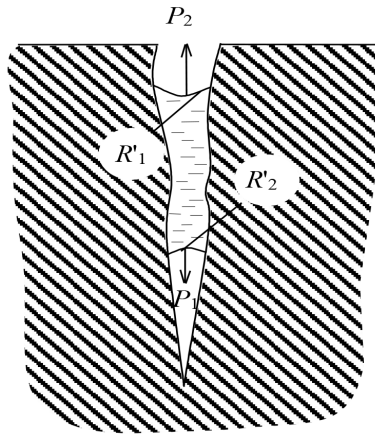


Рис. 31. Схема проникновения жидкости вглубь полости трещины

При наложении на контролируруемую поверхность пористого проявителя вместо верхнего мениска образуется большое количество малых менисков, создающих капиллярное давление много меньше нижнего, за счет чего цветной пенетрант поднимается на поверхность и образует над дефектом индикаторный рисунок.

На рис. 32 приведена схема выявления дефектов капиллярным методом. Трещина выявляется за счет проявления и увеличения индикаторного следа от дефекта и создания оптического контраста между контролируемой поверхностью и индикаторным рисунком.

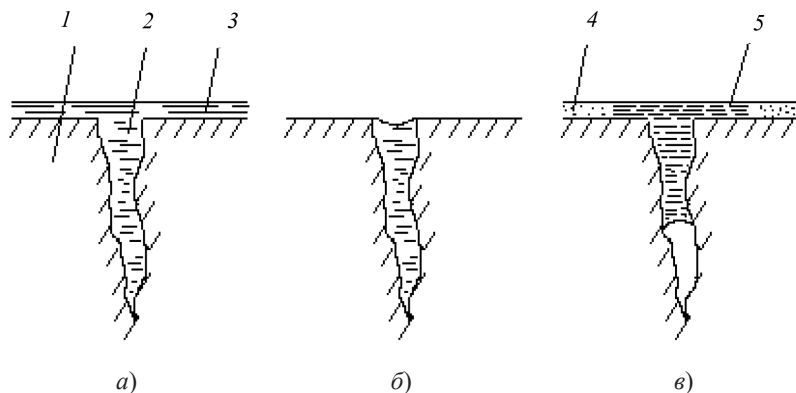


Рис. 32. Схема контроля деталей капиллярным методом с применением проявителя: *а* – полость трещины заполнена проникающей жидкостью; *б* – жидкость удалена с поверхности детали; *в* – нанесен проявитель, трещина выявлена; *1* – деталь; *2* – полость трещины; *3* – проникающая жидкость; *4* – проявитель; *5* – индикаторный рисунок трещины

К основным капиллярным методам контроля относятся цветная, люминесцентная и люминесцентно-цветная дефектоскопия (рис. 33).

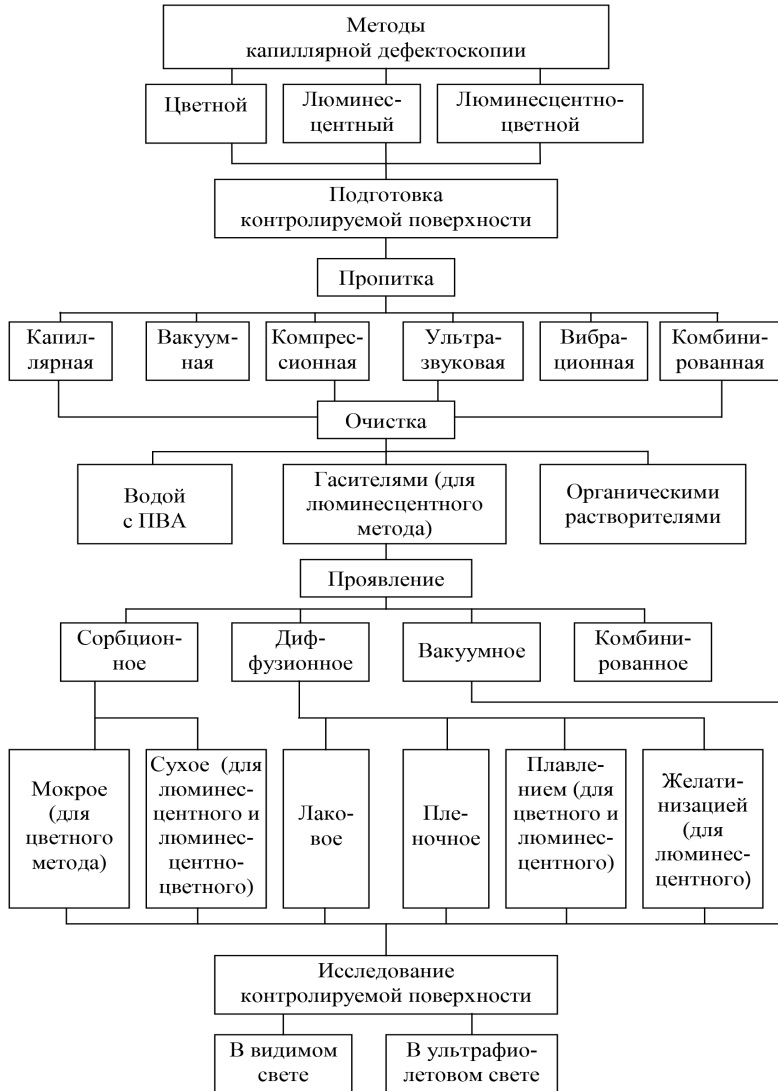


Рис. 33. Классификация методов капиллярной дефектоскопии и этапы ее проведения

Однако благодаря своей простоте и высокой чувствительности в строительно-монтажных организациях в основном применяется цветная дефектоскопия.

При люминесцентной и цветной дефектоскопии контролируемую поверхность покрывают раствором флюоресцирующего вещества или ярко-красной жидкостью. Затем красящую жидкость или раствор удаляют, а контролируемую поверхность облучают ультрафиолетовым светом (люминесцентный метод) или покрывают белой проявляющейся краской (цветная дефектоскопия).

При цветной дефектоскопии дефекты проявляются на фоне белой краски.

Цветная дефектоскопия сочетает в себе ценные для контроля качества наглядные результаты с очень простой технологией проверки изделий разных форм из разнообразных материалов (магнитные и немагнитные, цветные металлы и их сплавы, пластмассы).

Технология проведения цветной дефектоскопии включает пять основных операций:

- очистка контролируемой поверхности от остатков смазки, шлаков, окалины, ржавчины, краски, масла;
- нанесение цветного (красного) пенетранта на очищенную и высушенную контролируемую поверхность;
- удаление избытков цветного пенетранта салфеткой из ткани или бумаги, смоченной очистителем или водой;
- нанесение на поверхность равномерного слоя белого проявителя;
- оценка результатов контроля.

Появление на поверхности красной линии говорит о наличии трещины или отсутствии сплавления. О наличии тонкой трещины свидетельствуют красные точки, образующие прямую или кривую линию. Рассеянные красные точки на контролируемой поверхности означают пористость.

В случае ультразвукового контроля (УЗК) и цветной дефектоскопии одних и тех же сварных соединений цветной метод следует применять первым, так как контактная жидкость, используемая при ультразвуковом контроле, заполняет полости дефектов, затрудняя тем самым их выявление.

*Проведение контроля в холодных погодных условиях.* Некоторые международные и российские стандарты устанавливают уровень минимальных температур для контроля поверхности капиллярным методом (обычно  $+7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Холодная погода усложняет выполнение технологического процесса контроля из-за конденсации воды на холодной поверхности, задерживает проникновение пенетранта, замедляет скорость высыхания проявителя и снижает давление в баллоне распылителя. Для проведения качественного контроля необходимо:

- протереть поверхность контроля насухо и, если это возможно, подогреть ее каким-либо нагревателем;
- продлить время выдержки для пенетранта до 30 и более минут;
- разбрызгивать проявитель с большего, чем обычно, расстояния, чтобы он попадал на поверхность более сухим, чем обычно;
- держать аэрозольные баллоны в тепле, особенно проявитель.

*Контроль высокотемпературных поверхностей.* Для контроля поверхностей при температуре выше  $+90\text{ }^{\circ}\text{C}$  рекомендуется применять специальные наборы. Так, например, компания *SHEPWIN* разработала наборы HI-TEMP. Использование пенетранта HI-TEMP K017, очистителя HI-TEMP K019 и проявителя HI-TEMP D350 делает возможным контроль сварных швов при температуре до  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  без охлаждения прямо во время проведения сварки [98].

*Контроль методом течеискания.* При наличии в объектах сквозных дефектов они могут быть обнаружены методом

течеискания. При этом одна сторона, например внутренняя поверхность резервуара, обрабатывается цветным пенетрантом, а другая покрывается проявителем. Красящий пенетрант проходит через дефект, и по достижении им противоположной стороны дефект проявляется в виде красного следа на белом фоне. Метод течеискания имеет ограничения в применении по толщине стенок, которая не должна превышать 62,5 мм [98].

Скорость просачивания сквозь стенку зависит от формы капиллярного прохода, при этом узкий капилляр обеспечивает наилучшее прохождение. Пористость детали замедляет движение пенетранта. Если толщина стенки близка к максимальной и влияние капиллярности оценивается как незначительное, время выдержки должно быть увеличено. Повторное нанесение пенетранта в течение времени испытания дает положительные результаты.

Эта технология применима для тонкостенных резервуаров, трубопроводов и баков.

*Преимущества и недостатки капиллярных методов контроля.* Метод капиллярной дефектоскопии обеспечивает обнаружение поверхностных трещин с величиной раскрытия 0,001 мм, глубиной 0,01 мм и длиной более 0,1 мм. Благодаря высокой чувствительности, простоте контроля и наглядности результатов этот метод применяется также для подтверждения результатов, полученных с помощью электромагнитного, ультразвукового и других методов.

Большим преимуществом этого метода являются такие факторы, как отсутствие потребности в аппаратуре, электроэнергии, возможность точно установить место, направление, протяженность, а иногда и характер дефекта, возможность быстрой подготовки контролеров.

Особенно ценны эти преимущества для контроля сварных соединений в условиях строительного-монтажной площадки, где в основном применяется цветная дефектоскопия с использованием материалов в аэрозольной упаковке.

Цветная дефектоскопия применяется для выявления поверхностных невидимых или слабо видимых дефектов сварки типа подрезов, мелких пор, трещин, выходящих на поверхность шва или околошовной зоны.

Этими методами проверяются:

- корневые швы, выполненные аргонодуговой сваркой на трубопроводах высокого давления;
- стыковые, нахлесточные и тавровые соединения вместо гамма- или рентгеноконтроля;
- сварные соединения днищ цилиндрических резервуаров вместо вакуумного контроля или керосиновой пробы.

Наряду с большими преимуществами имеются и существенные недостатки. К ним относятся:

- возможность обнаружения только поверхностных дефектов;
- сложность механизации и автоматизации процесса контроля;
- снижение достоверности контроля при отрицательных температурах;
- низкая вероятность обнаружения дефектов, сжатых значительными остаточными или рабочими напряжениями в детали;
- необходимость удаления лакокрасочных покрытий и тщательной очистки поверхности;
- высокая трудоемкость, длительность процесса (0,5...1,5 ч на одно измерение).

#### ***4.6.4. Радиационные методы контроля***

Основным методом неразрушающего контроля сварных соединений на монтаже является радиационная дефектоскопия, которая выполняется двумя способами – рентгенографией и гаммаграфией. Выявление внутренних дефектов при радиационных



методах контроля основано на различном поглощении рентгеновского или гамма-излучения участками металла с дефектами и без них. Этот метод позволяет обнаружить большинство внутренних дефектов (непровары, поры, включения, крупные трещины).

При промышленном радиационном контроле наиболее часто используют два вида электромагнитного ионизирующего излучения: рентгеновское излучение, возникающее в рентгеновских трубках при торможении ускоренных электронов, и гамма-излучение, возникающее при распаде ядер радиоактивных изотопов.

Рентгеновское и гамма-излучение представляют собой коротковолновые электромагнитные колебания, одинаковые по своей природе с видимым светом, радиоволнами и т. д. и отличающиеся от них только длиной волны (табл. 9).

Таблица 9

**Основные части спектра волн**

Часть спектра	Длина волны
Радиоволны	30 км...0,3 мм
Инфракрасный свет	0,3 мм...750 Å
Видимый свет	7500...4000 Å
Рентгеновские лучи (используемый диапазон)	3,1...0,006 Å
Гамма-лучи	0,25...0,005 Å

Самопроизвольный распад радиоактивных веществ сопровождается выделением гамма-излучения. Гамма-излучение связано с длиной волны соотношением

$$E = \frac{C \cdot h}{L} = \frac{12 \cdot 38}{L}, \quad (15)$$

где  $E$  – энергия излучения в миллионах электроновольт (млн эВ);  $C$  и  $h$  – постоянные коэффициенты;  $L$  – длина волны излучения в  $X$ -единицах ( $X$ -единица =  $10^{-11}$  см).

Обладая большой энергией излучения и малой длиной волны, гамма-лучи способны проникать через большие толщины металла, чем обычные рентгеновские лучи, и поэтому дают хорошие результаты при просвечивании больших толщин металла (до 300 мм стали).

Скорость распада атомов данного вещества характеризует-ся постоянной распада, показывающей, сколько ядер данного вещества распалось за единицу времени. При этом количество распадающихся атомов прямо пропорционально всему количеству радиоактивных атомов. Следовательно, чем больше количество радиоактивного вещества, тем большее его количество распадается за единицу времени  $t$  и тем больше интенсивность излучения.

Однако в связи с распадом радиоактивных веществ интенсивность их излучения падает со временем, поэтому важной задачей является определение уровня падения интенсивности излучения в данный момент времени. Время распада каждого радиоактивного вещества характеризуется периодом его полураспада. Период полураспада  $\left(\frac{T}{2}\right)$  связан с его постоянной распада следующим соотношением:

$$\frac{T}{2} = \frac{0,693}{\lambda}, \quad (16)$$

где  $\lambda$  – постоянная распада радиоактивного вещества.

В соответствии с законом радиоактивного распада, число распадающихся атомов уменьшается со временем по закону показательной функции

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}, \quad (17)$$

где  $N$  – число нераспавшихся атомов по истечении времени  $t$ ;  $N_0$  – первоначальное число атомов;  $e$  – основание натурального логарифма;  $t$  – время.

Учитывая, что количество распавшихся атомов прямо пропорционально интенсивности излучения вещества в данный отрезок времени, то, преобразовывая формулу (17), получим:

$$I = I_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}, \quad (18)$$

где  $I$  – интенсивность излучения вещества по истечении времени  $t$ ;  $I_0$  – начальная интенсивность излучения вещества.

Зная период полураспада данного вещества или его постоянную распада и начальную интенсивность излучения, можно определить интенсивность его излучения по истечении любого времени. Это положение имеет очень большое значение в процессе работы по просвечиванию изделия, так как время экспозиции обратно пропорционально активности источника излучения, которая у ряда изотопов значительно изменяется со временем.

Для получения рентгеновских лучей применяются двух-электродные рентгеновские трубки, представляющие собой стеклянный баллон с вакуумом  $10^{-6} \dots 10^{-8}$  мм рт. ст., где с противоположных концов установлены два электрода: катод ( $1$ ) в виде спирали из вольфрамовой проволоки, помещенный в фокусирующую чашечку, и анод ( $3$ ) в виде металлического диска, расположенный под углом  $45^\circ$  к оси трубки (рис. 34).

При прохождении тока спираль, раскаляясь, испускает электроны, которые под воздействием высокого напряжения устремляются к положительно заряженному аноду. Скорость движения электронов при этом пропорциональна величине напряжения, подведенного к электродам трубки.

При столкновении быстро движущихся электронов с материалом анода трубки происходит резкое торможение электронов, и часть их кинетической энергии превращается в рентгеновское излучение. Это излучение и находит применение в практике рентгенодефектоскопии сварных швов.

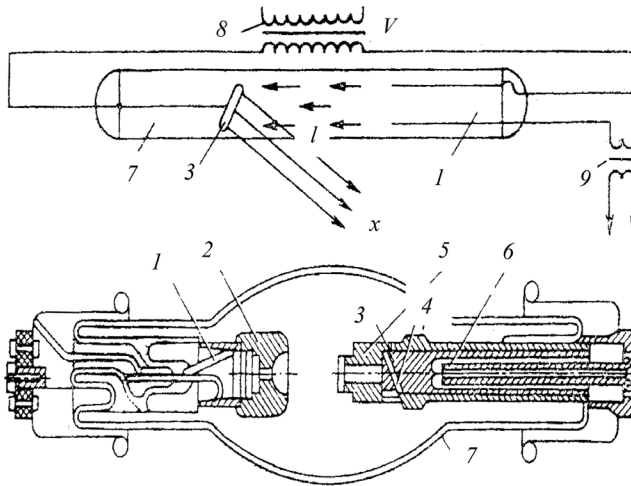


Рис. 34. Схема устройства рентгеновской трубки:  
 1 – катод; 2 – фокусирующее устройство; 3 – анод;  
 4 – вольфрамовая мишень; 5 – чехол анода; 6 – трубопровод  
 охлаждающей жидкости; 7 – колба; 8 – высоковольтный трансформатор;  
 9 – трансформатор накала

Область поверхности анода, где происходит торможение электронов, называют действительным фокусным пятном рентгеновской трубки, а проекцию этого пятна на плоскость, перпендикулярную оси рабочего пучка, – эффективным фокусным пятном. Размеры и форма фокусного пятна определяют качество работы аппарата, диаграмму направленности излучения, качество радиографического снимка.

По физическим принципам действия и конструктивному исполнению радиационные дефектоскопы делятся на рентгеновские непрерывного типа, импульсные и радиоизотопные, а по назначению – на стационарные, передвижные и портативные.

Просвечивание сварных швов рентгеновскими или гамма-лучами радиоактивных элементов находит широкое применение

для контроля качества сварных соединений в строительной индустрии.

Метод просвечивания дает возможность эффективно установить качество сварного соединения, местоположение дефектов в шве, их величину и конфигурацию, оценить геометрические размеры полостей, определить расстояния между деталями внутри агрегатов, выявить разностенность полых изделий. Полученные при этом снимки являются документальным доказательством проведенного контроля [80, 128].

*Рентгенографический метод контроля.* Рентгеновским просвечиванием контролируют сварные соединения с толщиной металла до 85 мм. Размеры выявляемых дефектов – 1...3 % от толщины листа (рис. 35).

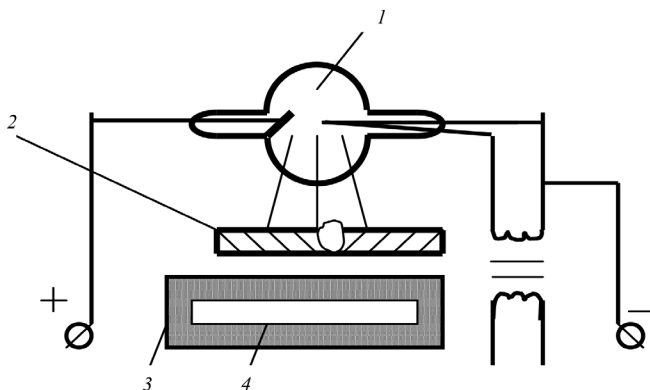


Рис. 35. Рентгенографический контроль сварных соединений:

1 – рентгеновская трубка; 2 – сварное соединение;

3 – кассета; 4 – фотопленка

На рентгеновской пленке можно зафиксировать положение скрытых деталей приборов, агрегатов и закрытых элементов конструкций до их разборки или разрезки. Этот контроль позволяет установить, нет ли деформаций и разрушений скрытых деталей

и других элементов, в правильном ли положении они находятся, нет ли внутри объектов продуктов коррозии.

При рентгеновском контроле можно зарегистрировать трещины с раскрытием более 0,1 мм, обнаружить раковины и непровары в сварных швах, выявить посторонние предметы, оценить качество заделки тросов в наконечники.

Рентгеновский метод имеет недостатки, ограничивающие его применение. Это низкая производительность контроля, высокая стоимость, ограниченная технологическая маневренность, низкая чувствительность и достоверность при обнаружении трещин и других малораскрытых дефектов, необходимость устройства защиты человека от воздействия рентгеновского излучения на организм [128].

В последние годы с целью экономии фотопленки применяют просвечивание швов на специальный экран, который покрыт слоем флюоресцирующего вещества (платиносинеродистый барий, сернистый цинк и др.) и дает свечение при действии рентгеновского излучения. Изображение экрана с помощью приемопередающей трубки (видикона) проецируется на телеэкран или записывается на видеоманитофон.

*Гаммаграфический контроль.* В качестве источника радиации применяются радиоактивные вещества (радиоактивные изотопы) (табл. 10).

Таблица 10

**Некоторые радиоактивные изотопы**

Источник излучения (изотоп)	Активность, г экв. радия	Толщина просвечиваемого металла, мм	Чувствительность снимка, %
Иридий-192	5	8...50	2...2,5
Селен-75	2	6...20	2,5...3,5

Источник излучения (изотоп)	Активность, г экв. радия	Толщина просвечиваемого металла, мм	Чувствительность снимка, %
Цезий-127	2	30...70	3,5...4,5
Тулий-170	0,5	3...15	3...4
Ирис-3	0,5	2...12	3,5...4,5

Схема просвечивания гамма-лучами приведена на рис. 36.

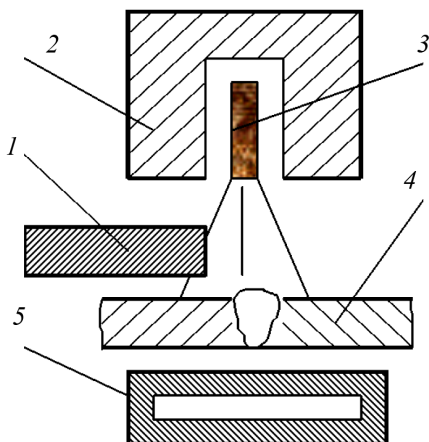


Рис. 36. Схема просвечивания гамма-лучами: 1 – затвор; 2 – свинцовая капсула; 3 – капсула с радиоактивным веществом; 4 – сварное соединение; 5 – кассета с пленкой

По сравнению с рентгеновским контролем просвечивание гамма-излучением имеет следующие преимущества:

- радиоактивный препарат можно установить в такие места конструкции, где не поместится громоздкая рентгеновская установка;

- гамма-излучением возможно одновременно контролировать несколько деталей, а также кольцевые швы изделий;
- контейнер с ампулой удобен в полевых условиях благодаря легкости его транспортирования;
- гамма-контроль дешевле рентгеновского и не требует источника электроэнергии.

К недостаткам гаммаграфии относятся:

- меньшая чувствительность к дефектам, чем при рентгенографии;
- при толщине листа менее 50 мм обнаруживаются дефекты, размер которых более 2...4 % толщины просвечиваемого листа;
- невозможность регулирования интенсивности излучения;
- большая опасность облучения при неосторожном обращении с аппаратурой.

Радиографический контроль неприемлем для контроля сварных соединений арматуры железобетонных конструкций и малоэффективен при контроле сварных швов металлоконструкций большой толщины.

Сложный профиль арматурных соединений практически не позволяет обнаруживать трещины и несплавления и затрудняет выявление объемных дефектов (вероятность выявления 50 %). Этим методом в стыковых соединениях металлических конструкций выявляются лишь объемные дефекты (поры и шлаковые включения), а трещиноподобные дефекты, по данным многочисленных исследований, обнаруживаются с вероятностью 35...40 % [139].

Кроме того, радиографический контроль не лишен субъективности в оценке результатов контроля. Авторы [68] отмечают, что из 5600 заключений, выданных радиографами, верная оценка дана только в 3696 случаях (66 %), а в [131] указывается, что при оценке качества сварных стыков газопроводов в пяти из девяти случаев ни один опытный оператор не обнаружил трещины, которые были подтверждены металлографическим анализом.



Общий недостаток радиационных методов – выявление дефектов, расположенных только по направлению луча (рис. 37).

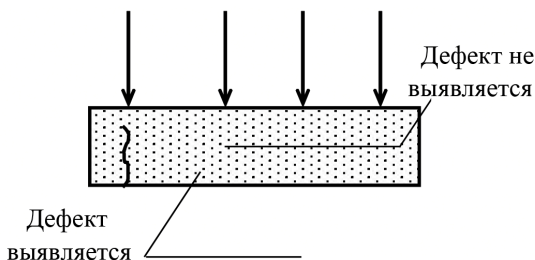


Рис. 37. Влияние расположения дефекта на чувствительность радиационных методов контроля

Для особо ответственных изделий рекомендуется просвечивать изделие под несколькими углами.

Основная опасность при радиационном контроле – вредное воздействие ионизирующего излучения на организм человека. При работе в закрытых помещениях опасны также вредные газы – озон и окислы азота, образующиеся при воздействии ионизирующего излучения с воздухом. Кроме того, существует опасность поражения током от установок, подключенных к электросети.

Защита от вредного воздействия ионизирующего излучения является наиболее сложной проблемой и требует проведения комплекса мероприятий, зависящих от типа источника излучения и условий его использования.

При использовании радиоактивных источников излучения необходимы дополнительные меры безопасности, обеспечивающие их безопасное хранение и транспортировку, а также предотвращающие возможность создания аварийных ситуаций (потерю излучателя, его разгерметизацию и др.).

### 4.6.5. Магнитные методы контроля

Сущность магнитных методов неразрушающего контроля сварных швов из ферромагнитных материалов заключается в обнаружении магнитных полей рассеяния, создаваемых различного рода дефектами (непровары, трещины, поры, шлаковые включения и др.) при намагничивании.

При отсутствии дефектов поток магнитных силовых линий распространяется по контролируемой детали без изменения направления. При наличии непроваров, трещин, пор, шлаковых включений и других дефектов магнитный поток искажается, что вызывает появление на поверхности изделия местных магнитных потоков (рис. 38) [100].

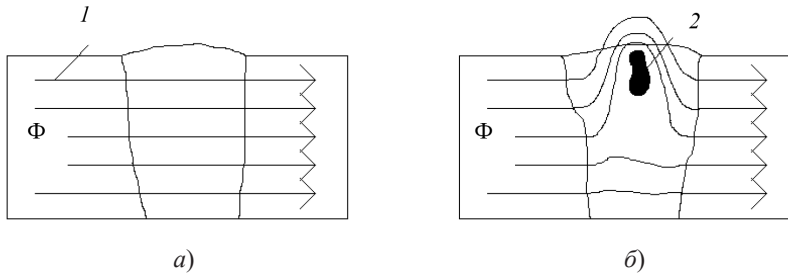


Рис. 38. Схема прохождения магнитного потока в сварном соединении:  
а – при отсутствии дефекта; б – при наличии дефекта;  
1 – поле магнитного рассеяния; 2 – дефект шва

Чем меньше размеры дефекта и больше глубина его залегания, тем меньше местный магнитный поток. При некоторых их величинах магнитный поток может не выйти на поверхность. А так как наличие дефектов обнаруживается по вышедшему на поверхность магнитному потоку, то их обнаружение в этом случае становится невозможным.

Различные магнитные методы отличаются по способам обнаружения полей рассеяния. При магнитных методах контроля

наиболее четко выделяются дефекты, расположенные перпендикулярно направлению потока магнитных силовых линий.

Поэтому для выявления дефектов, расположенных поперек шва, рекомендуется продольное, а расположенных вдоль шва – поперечное намагничивание. Продольное и поперечное намагничивание производят соленоидами или электромагнитами, представляющими собой катушку. Продольные дефекты можно также выявить с помощью циркулярного намагничивания, когда ток проходит через изделие или через проводник, расположенный внутри него.

Выбор способа намагничивания определяется ферромагнитными свойствами материала, формой и величиной изделия, возможными характером и расположением дефектов.

Для контроля сварных швов наибольшее распространение получили следующие способы контроля:

- магнитопорошковая дефектоскопия (МПД), при которой частички порошка или эмульсии, нанесенные на поверхность контролируемого изделия, скапливаются в зоне поля рассеяния над дефектом, достаточно четко повторяя его форму;
- магнитографический метод контроля, при котором поля рассеяния от дефектов фиксируются на магнитной ленте, уложенной на поверхности контролируемого шва.

*Магнитопорошковый метод контроля.* МПД применим только к ферромагнитным материалам и позволяет выявлять поверхностные и подповерхностные дефекты типа трещин, неметаллических включений, флокенов, заковов и др. При этом методе контроля в местах выхода потоков рассеяния на поверхность частицы порошка притягиваются к металлу и, располагаясь по всей длине дефекта, указывают на его протяженность.

Магнитопорошковый метод контроля сварных швов наиболее часто применяется для выявления поверхностных трещин, а также дефектов, залегающих на сравнительно небольшой глубине

от поверхности. Практически такой метод контроля рекомендуется применять для проверки изделий толщиной до 10 мм, при этом можно выявлять трещины с шириной раскрытия 0,001 мм и глубиной 0,01 мм и более.

На чувствительность метода оказывают влияние подготовка поверхности изделия, качество магнитного порошка и суспензии, величина намагничивающего поля.

Род тока также влияет на чувствительность метода. Следовательно, чувствительность при выявлении подповерхностных дефектов будет более низкой. Постоянный ток обеспечивает равномерное распределение магнитного потока по всему сечению изделия, что гарантирует выявление внутренних дефектов.

Предельная чувствительность магнитопорошковой дефектоскопии ограничена дефектами с раскрытием  $\geq 2$  мкм и глубиной  $\geq 20$  мкм. Подповерхностные дефекты обнаруживаются хуже, чем поверхностные. До глубины залегания 100 мкм чувствительность сохраняется примерно такой же, как и к поверхностным дефектам, а на большем расстоянии от поверхности могут быть обнаружены более крупные дефекты. Например, на глубине 2...3 мм могут быть обнаружены дефекты, глубина которых примерно равна их расстоянию от поверхности. При этом дефекты, наклоненные к поверхности под углом менее 40...50°, выявляются еще хуже.

МПД – достаточно универсальный метод, который можно применять для изделий любой конфигурации, на разных стадиях производства и в процессе эксплуатации, отличается простотой выполнения и надежностью, большой скоростью – как ручную, так и с помощью автоматизированных систем [100].

Основными достоинствами магнитопорошкового метода являются его простота и наглядность. Важнейший недостаток при контроле сварных швов – сосредоточение значительной части магнитного порошка в местах перехода валика усиления

к основному металлу и чешуйках сварного шва, поэтому наиболее эффективные результаты метод дает при контроле изделий со снятым усилением или ровной поверхностью сварного шва (кольцевые стыки магистральных трубопроводов, проверка продольных швов труб со снятым усилением).

Технология МПД включает в себя следующие основные этапы:

- подготовка поверхности изделия к контролю;
- намагничивание изделия;
- нанесение на контролируемую поверхность магнитного порошка или суспензии;
- осмотр изделия;
- размагничивание.

Контролируемая поверхность перед намагничиванием должна быть очищена от пыли, грязи, масел. Намагничивание изделия осуществляется способом приложенного магнитного поля или способом остаточной намагниченности. При первом способе намагничивание начинают раньше или одновременно с моментом прекращения нанесения суспензии или порошка и оканчивают после стекания суспензии с контролируемой поверхности. При втором способе нанесение суспензии осуществляется после полного намагничивания изделия. Выбор способа определяется магнитными свойствами материала, размерами и формой контролируемого изделия.

Вид намагничивания может быть циркулярным, продольным, комбинированным. В зависимости от возможностей ориентации предполагаемых дефектов намагничивание применяют в одном, двух или трех взаимно перпендикулярных направлениях или применяют комбинированное намагничивание.

Существуют два метода магнитопорошкового контроля: метод сухого магнитного порошка и метод магнитной суспензии (порошок находится в смеси масла и керосина) во взвешенном

состоянии. Сухим порошком посыпают поверхность шва; при мокром способе контролируемую деталь поливают или погружают в бачок с суспензией, а затем извлекают и осматривают.

Определение мест расположения дефектов проводится визуально, т. е. фиксируется наличие отложений магнитного порошка в местах дефектов. При необходимости расшифровка результатов контроля может проводиться с применением оптических средств. Освещенность контролируемой поверхности при естественном или искусственном освещении должна быть не менее 500 лк.

При необходимости документального оформления результатов контроля рекомендуется применение фотографирования и метода липкой ленты. Метод липкой ленты заключается в следующем. Дефектная поверхность покрывается липкой прозрачной лентой. Сверху накладывается лист светлой бумаги или прозрачная пленка и прижимается к дефектной поверхности мягким материалом или прокатывается резиновым валиком.

После удаления липкой ленты с поверхности получается дефектограмма дефектного участка за счет закрепления магнитного порошка на липкой ленте. Методом контактной печати с липкой лентой можно получить фотодефектограмму.

Далее исследованные участки металлоконструкции размагничивают, так как остаточная намагниченность способствует скоплению ферромагнитных продуктов износа, что может ускорить коррозионные процессы. Вращение неразмагниченных деталей приводит к возникновению вихревых токов в массивных металлических частях конструкций. При рамагничивании деталь перемагничивают магнитным полем, напряженность которого периодически изменяется по направлению к амплитуде.

*Магнитографический метод контроля.* Магнитографический контроль производится следующим образом. Размагниченную магнитную ленту укладывают на сварной шов, прижимая к нему резиновым поясом, а при проверке продольных швов – пластиком.

На швах трубопровода один конец ленты укладывается в точке зенита или у клейма сварщика, а лента наматывается по часовой стрелке по ходу продукта. Перемещая намагничивающее устройство вдоль шва, производят дополнительное местное подмагничивание соответствующих участков ленты и фиксируют на ней дефекты в виде местной остаточной намагниченности. Воспроизведение записей ленты осуществляют с помощью специальных дефектоскопов. Магнитная лента может использоваться в качестве документа, характеризующего сварное соединение ответственного назначения.

Принципиальное отличие магнитографического контроля от магнитопорошкового заключается в следующем:

- ферромагнитные частицы на ленте не могут перемещаться, как частицы суспензии при МПД, а только изменяют свою намагниченность. Эта особенность метода позволяет успешно применять его при контроле сварных соединений;
- на магнитной ленте фиксируются размеры и топография полей рассеяния от дефектов в широком диапазоне величин, что дает возможность с определенной степенью точности производить количественную и качественную оценку дефектов в сварных швах;
- магнитная лента может использоваться в качестве документа, характеризующего сварные соединения ответственного назначения.

Наиболее опасные дефекты, как правило, ориентируются вдоль шва. Поэтому при магнитографическом методе контроля применяется поперечное намагничивание. Намагничивание производится с помощью специальных устройств, в которых применяются П-образные магниты, питающиеся постоянным током. Для контроля протяженных сварных швов и швов трубопроводов диаметром более 160 мм применяют подвижные намагничивающие устройства, которые имеют четыре немагнитных опор-

ных ролика для свободного перемещения вдоль контролируемого сварного стыка в процессе его намагничивания и записи на магнитную ленту. Для трубопроводов меньших диаметров применяют неподвижные намагничивающие устройства.

Магнитографический контроль нашел широкое применение при сооружении магистральных и монтаже технологических, заводских и городских трубопроводов различного назначения, изготовлении и монтаже резервуаров и других листовых конструкций, на многих заводах строительной индустрии и машиностроительных предприятиях.

Магнитографический метод рекомендуется для контроля сварных соединений из ферромагнитных сталей толщиной от 1 до 16 мм. Чувствительность метода зависит от формы дефекта, его размеров, глубины залегания, состояния усиления шва, режима намагничивания. С помощью магнитографического метода лучше выявляются трещины, непровары и несплавления.

Трещины и непровары выявляются глубиной до 8 % толщины изделия, а газовые поры и раковины – диаметром не менее 1,5...2 мм при толщине стенки около 5 мм. С уменьшением глубины залегания дефектов чувствительность метода возрастает (до 2...2,5 раза для дефектов, выходящих на поверхность). Значительное влияние оказывает состояние поверхности шва. При более гладкой поверхности получаются лучшие результаты. Грубая чешуйчатость, наплывы, брызги металла приводят к повышению уровня помех, которые могут быть ошибочно приняты за дефекты. Поэтому стыки, имеющие значительное смещение кромок и высоту усиления, превышающую допуски, а также грубую чешуйчатость, магнитографическому контролю подвергать не следует.

Перед контролем сварные швы должны быть очищены от грязи, воды, снега и льда. Кроме того, с поверхности шва и прилегающей зоны на 50 мм с каждой его стороны должны быть тщательно удалены остатки шлака и металлические брызги.



При контроле стыков трубопроводов, лежащих на земле, под трубой должен быть вырыт приямок или положена лежка для свободного прохождения намагничивающего устройства.

Наилучшие результаты магнитографический метод контроля дает при контроле швов, имеющих сравнительно гладкую поверхность и выполненных автоматическим и механизированным методами сварки, в частности автоматической сваркой под слоем флюса. Швы, выполненные ручной дуговой и газовой сваркой, могут подвергаться магнитографическому контролю при условии удовлетворительной внешней поверхности.

Магнитографический метод контроля обладает следующими основными достоинствами:

- чувствительность к выявлению трещин и узких стянутых непроваров, сравнительно плохо выявляемых при просвечивании рентгеновскими и особенно гамма-лучами;
- высокая производительность контроля;
- экономичность, обусловленная малой трудоемкостью и дешевой магнитной лентой;
- безопасность для обслуживающего персонала.

Однако магнитографическому методу контроля свойствен и ряд недостатков:

- возможность проверки только стыковых швов стальных изделий при толщине металла до 16 мм;
- невозможность контроля стыковых швов, имеющих значительное смещение кромок, превышение усиления шва, а также грубую чешуйчатость;
- необходимо тщательное удаление с поверхности шва и прилегающей зоны на 50 мм с каждой его стороны остатков шлака и металлических брызг;
- этим методом наиболее четко выявляются узкие вытянутые по длине дефекты и значительно хуже – округлой формы (одиночные шлаковые включения и газовые поры);

- при контроле качества сварных соединений ответственного назначения рекомендуется результаты магнитографического контроля дублировать другими методами, например рентгеновскими лучами.

#### **4.6.6. Электромагнитный (вихретоковый) метод контроля**

Электромагнитный метод контроля основан на явлении взаимодействия электромагнитного поля вихревых токов, наводимых в поверхностных слоях контролируемого изделия, с переменным электромагнитным полем катушки преобразователя [85].

При наличии в контролируемой области трещины, неоднородности структуры или свойств материала изменяются интенсивность и характер распределения электромагнитного поля вихревых токов. По изменению результирующего электромагнитного поля и регистрируется наличие дефекта, что практически осуществляется при помощи электрической схемы прибора (изменение полного сопротивления или напряжения на зажимах катушки).

Информацию о контролируемом объекте несет в себе результирующее электромагнитное поле, на формирование которого влияет целый ряд факторов:

- величина, расположение и характер дефекта;
- электропроводность и магнитная проницаемость материала;
- структура материала;
- частота и величина тока в преобразователе;
- расстояние и взаимное расположение преобразователя и контролируемой детали и т. д.

Достоинствами метода являются:

- высокая разрешающая способность при обнаружении поверхностных дефектов (особенно усталостных трещин);

- высокая производительность и простота методики контроля;
- портативность и автономность аппаратуры;
- простота конструкции преобразователей;
- возможность проведения контроля без контакта преобразователя с объектом контроля (на расстояниях от долей миллиметра до нескольких миллиметров, в том числе – через слой краски);
- возможность контроля на больших скоростях;
- возможность автоматизации контроля;
- возможность измерения диаметра проволоки, прутков и труб; толщины металлических листов и стенок труб при одностороннем доступе к ним;
- отсутствие влияния влажности, давления, загрязненности объекта контроля непроводящими веществами на сигналы преобразователя;
- возможность определения толщины электропроводящих и диэлектрических покрытий на электропроводных основаниях, зазоров и т. д.

Благодаря влиянию структурного состояния материалов на их электрические и магнитные характеристики можно контролировать:

- изменение химического состава;
- структуру металлов и сплавов;
- механические напряжения;
- качество термообработки (ТО) и химико-термической обработки (ХТО) металлов;
- состояние поверхности после механической обработки.

К недостаткам метода можно отнести возможность контроля только поверхностных и подповерхностных слоев. Контроль наплавленной области сварного шва неосуществим из-за значительных неровностей поверхности.

#### 4.6.7. Ультразвуковой метод контроля

Ультразвуковая дефектоскопия основана на способности упругих колебаний с частотой свыше 20 кГц, не воспринимаемых человеческим ухом, проникать в материал и благодаря разнице сред «материал – воздух» отражаться от поверхности имеющихся в контролируемом изделии дефектов [73, 133].

Упругие колебания характеризуются скоростью распространения  $c$ , длиной волны  $\lambda$  и частотой  $f$ . Расстояние между ближайшими частицами, колеблющимися одинаковым образом (в одной фазе), называется длиной волны. Число волн, проходящих через данную точку в одну секунду, называется частотой ультразвука. Длина волны связана со скоростью ее распространения и частотой ее колебания соотношением  $\lambda = \frac{c}{f}$ .

В зависимости от направления колебаний частиц в волне (по отношению к ее направлению в материале) все волны делят на продольные, поперечные, поверхностные и нормальные.

Для продольной волны характерно совпадение направления колебаний частиц с направлением распространения волны; для поперечной – направление колебания частиц перпендикулярно направлению распространения волны. Продольные и поперечные волны наиболее широко используются при дефектоскопии материалов для обнаружения внутренних дефектов.

На поверхности твердого тела можно возбудить поверхностные волны (волны Рэлея), представляющие собой линейную комбинацию продольной и поперечной волн. Поверхностная волна способна распространяться на большие расстояния вдоль поверхности твердого тела и хорошо регистрироваться на расстоянии 2...3 м от точки ввода, однако она интенсивно затухает на глубине 1,5...2 длины волны.

Поверхностные волны применяют для обнаружения дефектов, непосредственно выходящих на поверхность или залегающих на глубине не более длины поверхностной волны.

В пластинах или в телах, толщина которых постоянна и соизмерима с длиной волны, могут возникать нормальные волны (волны Лэмба).

Скорость распространения продольных  $C_l$  и поперечных  $C_t$  колебаний (волн) зависит от постоянных упругости Лямэ  $\delta$  и  $\mu$ :

$$C_l = \sqrt{(\delta + 2\mu) \cdot \rho}; \quad (19)$$

$$C_t = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}, \quad (20)$$

где  $\rho$  – плотность среды.

На практике для расчетов чаще всего используют модуль Юнга  $E$  и коэффициент Пуассона  $\nu$ :

$$E = \frac{\mu \cdot (3\delta + 2\mu)}{\delta + \mu}; \quad (21)$$

$$\nu = \frac{\delta}{2 \cdot (\delta + \mu)}. \quad (22)$$

С учетом соотношений (13), (14) и  $\mu$ , когда

$$\mu = \frac{E}{[2 \cdot (1 + \nu)]}, \quad (23)$$

получим

$$C_l = \sqrt{\frac{E \cdot (1 - \nu)}{\rho \cdot (1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}}; \quad (24)$$

$$C_t = \sqrt{\frac{E}{2\rho \cdot (1 + \nu)}}. \quad (25)$$

Соотношение  $\rho \cdot c = z$  называется акустическим, или волновым, сопротивлением среды.

Скорость распространения волн зависит от их типа. Например, скорость поперечных волн примерно вдвое меньше скорости продольных, а скорость поверхностных волн всегда ниже, чем скорость поперечных. В табл. 11 приведены некоторые параметры, характеризующие свойства сред.

Таблица 11

**Основные параметры, характеризующие свойства различных сред**

Вещество	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Скорость распространения волн, км/с			Удельное акустическое сопротивление для продольных волн, 10 <sup>6</sup> Па·с/м
		продольных	поперечных	поверхностных	
<i>Металлы</i>					
Алюминий	2,7	6,3	3,1	2,8	16,9
Бронза	8,7	3,7	2,4	2,2	32,0
Железо	7,8	5,9	3,2	3,0	45,6
Медь	8,9	4,7	2,3	2,1	41,5
Никель	8,8	5,6	3,0	2,6	49,5
Сталь коррозионно-стойкая	8,1	5,7	3,1	3,1	45,5
Сталь углеродистая	7,8	5,9	3,2	3,0	45,6
Титан	4,5	6,0	3,5	3,2	27,0
Чугун	7,2	4,5	2,7	–	32,5

Вещество	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Скорость распространения волн, км/с			Удельное акустическое сопротивление для продольных волн, 10 <sup>6</sup> Па·с/м
		продольных	поперечных	поверхностных	
<i>Неметаллы</i>					
Капрон	1,1	2,6	–	–	2,9
Кварц плавленный	2,2	5,9	3,8	3,4	13,0
Стекло органическое	1,2	2,7	1,1	1,0	3,1
Полистирол	1,1	2,4	–	1,0	3,0
Резина	0,9...1,6	1,9	–	–	2,5
Текстолит	1,2	2,6	–	–	3,5
Фторопласт	2,2	1,4	–	–	3,0
<i>Жидкости</i>					
Вода	1,0	1,5	–	–	1,5
Глицерин	1,3	1,5	–	–	2,4
Керосин	0,8	1,3	–	–	1,1

*Явления на границе раздела двух сред.* При падении плоской УЗ волны на границу раздела двух сред, имеющих акустические сопротивления  $z_1$  и  $z_2$ , на границе раздела могут происходить три явления: отражение, преломление и трансформация волн [73].

Отражением называют изменение направления УЗ волны на границе раздела, при котором волна не переходит в другую среду.

Преломлением называют изменение направления УЗ волны на границе раздела, при котором волна переходит в другую среду.

Трансформацией называют преобразование волн одного типа в волны другого типа, происходящее на границе раздела двух сред.

При падении волны (продольной или поперечной) из твердой среды на границу раздела с другой твердой средой образуются следующие волны. При падении продольной волны (рис. 39):

- $C_{i1}$  – падающая и отраженная продольные волны;
- $C_{r1}$  – отраженная поперечная волна, образовавшаяся в результате трансформации волн;
- $C_{t2}$  – преломленная продольная волна;
- $C_{t1}$  – преломленная поперечная волна, образовавшаяся в результате трансформации волн.

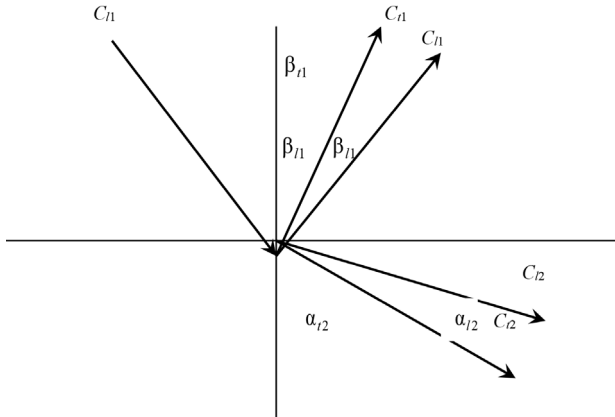


Рис. 39. Схема образования волн на границе раздела двух твердых сред при падении продольной волны

При падении поперечной волны (рис. 40):

- $C_{r1}$  – падающая и отраженная поперечные волны;
- $C_{r1}$  – отраженная продольная волна, образовавшаяся в результате трансформации волн;



- $C_{12}$  – преломленная поперечная волна;
- $C_{12}$  – преломленная продольная волна, образовавшаяся в результате трансформации волн.

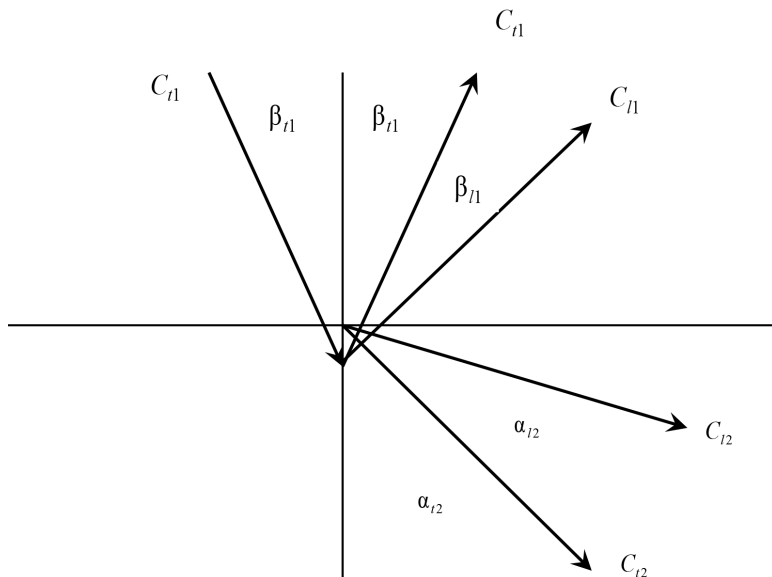


Рис. 40. Схема образования волн на границе раздела двух твердых сред при падении поперечной волны

На рис. 39, 40 углы  $\beta$  соответствующими индексами означают углы падения и отражения,  $\alpha$  с соответствующими индексами означают углы ввода.

Все углы в акустике отсчитывают от нормали (перпендикуляра) к поверхности раздела двух сред, проходящей через точку падения. Углы отражения и преломления зависят от скоростей звука в обеих средах и связаны между собой законом Снеллиуса:

$$\frac{\sin \beta_{11}}{C_{11}} = \frac{\sin \beta_{r1}}{C_{r1}} = \frac{\sin \alpha_{12}}{C_{12}} = \frac{\sin \alpha_{t2}}{C_{t2}}. \quad (26)$$

Из этого соотношения следует, что угол отражения двух волн одного типа равен углу падения.

Следует отметить, что направление смещения частиц в поперечной волне перпендикулярно направлению распространения волны, что обуславливает возможность возникновения поляризации.

*Поляризацией* называют нарушение симметрии распределения смещений и скоростей в упругих волнах относительно направления распространения.

В продольной волне, в которой частицы колеблются вдоль направления распространения волны, явление поляризации возникнуть не может. Скорость распространения поперечных волн и их затухание могут зависеть от вида поляризации. Поляризация может возникнуть:

- из-за отсутствия симметрии в возбуждающей волну излучателе;
- при распространении волны в анизотропной среде;
- при преломлении и отражении волн на границе двух сред.

Частные случаи

1. Нормальное падение. Если (см. рис. 40)  $\beta_{11}$ , то  $\beta_{11} = \alpha_{11} = \alpha_{22} = 0$ , т. е. в этом случае волна, прошедшая через границу раздела, не меняет своего направления, тип волны также не меняется.

2. Первый критический угол. Если  $C_{11} < C_{12}$ , то  $\alpha_{12} > \beta_{11}$ , следовательно, при некотором угле падения продольная волна идет по границе раздела, т. е. во второй среде продольная волна не возбуждается. Таким образом, наименьший угол падения продольной волны, при котором преломленная продольная волна не будет проникать во вторую среду, называется первым критическим углом.

3. Второй критический угол. При дальнейшем увеличении угла падения преломленная поперечная волна также начнет скользить по границе раздела. Таким образом, наименьший угол

падения продольной волны, при котором преломленная поперечная волна не будет проникать во вторую среду, называется вторым критическим углом. При углах падения, меньших, чем второй критический угол, и больших, чем первый, во второй среде возникает лишь поперечная волна.

4. Третий критический угол. При падении поперечной волны на границу «металл – воздух» из металла (рис. 41) при увеличении угла падения наступает такой момент, когда отраженная продольная волна начинает скользить по границе раздела. Значит, наименьший угол падения поперечной волны, при котором еще отсутствует отраженная продольная волна, называется третьим критическим углом.

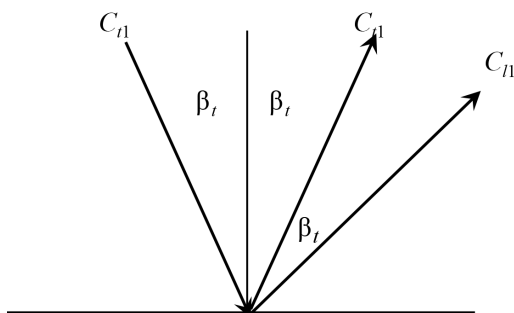


Рис. 41. Падение поперечной волны на границу «металл – воздух»

Значения критических углов определяют из равенств:

$$\sin \beta_{\text{кр}1} = \frac{C_{l1}}{C_{l2}}; \sin \beta_{\text{кр}2} = \frac{C_{l1}}{C_{t2}}; \sin \beta_{\text{кр}3} = \frac{C_t}{C_l}. \quad (27)$$

Для практики представляют интерес значения 1-го и 2-го критических углов при падении волны из органического стекла на границу со сталью. Взяв из табл. 11 соответствующие значения скоростей, получим:  $\beta_{\text{кр}1} = 27^\circ$ ;  $\beta_{\text{кр}2} = 55^\circ$ , а 3-й критический угол для границы «сталь – воздух» составляет  $\beta_{\text{кр}3} = 33^\circ$ .

Из многообразия методов акустического контроля металлических конструкций в основном применяют эхо-метод, теневой и зеркально-теневой метод.

*Эхо-метод.* Наибольшее применение для контроля сварных швов получил эхо-импульсный метод ультразвуковой дефектоскопии (эхо-метод). Этим методом контролируют около 90 % всех сварных соединений толщиной от 4 мм и более (рис. 42).

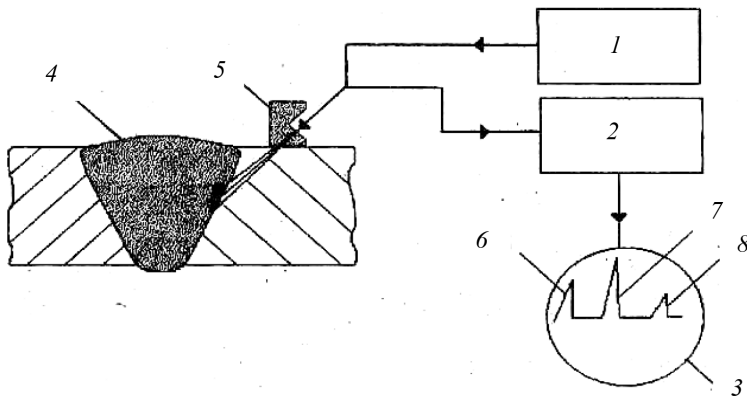


Рис. 42. Ультразвуковой контроль сварных соединений:  
1 – генератор; 2 – усилитель; 3 – экран прибора; 4 – сварной шов;  
5 – пьезоэлектрический преобразователь (ПЭП); 6 – начальный импульс;  
7 – импульс от дефекта; 8 – импульс от донной поверхности

Импульсный генератор 1 формирует короткие импульсы упругих колебаний (длительностью 0,5...1 мкс), разделенные более продолжительными паузами (1...5 мкс), которые через пьезоэлектрический преобразователь 5 подаются на изделие. Если на пути пучка колебаний встречаются дефекты сварки, нарушающие непрерывность акустической среды, то отраженные сигналы попадают в преобразователь 5, где в результате пьезоэлектрического эффекта превращаются в электрические сигналы и подаются на усилитель 2. На экране индикатора 3 (осциллографа) таким

образом регистрируются импульсы от поверхности детали (дна) в виде вертикальных пиков на горизонтальной развертке. Первый импульс 6 размещается в начале развертки, импульс донного сигнала 8 – в конце развертки, а импульс дефекта 7 – между ними.

Измеряя время от момента посылки импульса до приема сигнала, можно определить глубину залегания дефектов.

Эхо-методом можно контролировать сварные швы с одной стороны без снятия усиления или предварительной обработки поверхностей стыка, и в этом основное достоинство метода. Этот метод позволяет не только обнаружить дефект, но и определить координаты и примерные размеры дефектов в сварных швах толщиной от 4 мм и более. Точно определить характер дефектов по результатам ультразвукового контроля пока не удастся.

Кроме преимущества одностороннего доступа, этот метод также имеет наибольшую чувствительность к выявлению внутренних дефектов, высокую точность определения координат дефектов. К недостаткам метода следует отнести прежде всего низкую помехоустойчивость к наружным отражателям, резкую зависимость амплитуды сигнала от ориентации дефекта. Наличие периодического профиля (неровностей) на арматуре не позволяет проводить УЗ-контроль стыков арматуры эхо-импульсным методом вследствие того, что сигналы от неровностей совпадают по времени и соизмеримы по величине с сигналами от дефектов.

Недостатком эхо-метода является наличие «мертвой зоны», или зоны нечувствительности, представляющей собой неконтролируемый поверхностный слой, где отраженный от дефекта импульс совпадает на экране дефектоскопа с импульсом зондирующим.

При увеличении частоты излучения величина «мертвой зоны» уменьшается, так как уменьшаются длина волны и период колебаний. Наличие «мертвой зоны» не позволяет проводить контроль тонких пластин и выявлять дефекты в поверхностных слоях изделий.

Размеры зоны нечувствительности  $x$  можно найти из выражения

$$x = \frac{c_l(\tau_u + \tau_n)}{2}, \quad (28)$$

где  $c_l$  – скорость продольных волн;  $\tau_u$  – длительность зондирующего импульса;  $\tau_n$  – длительность переходного процесса.

Размер «мертвой зоны» для прямых совмещенных (ПС) ПЭП при изменении частоты от 0,7 до 5 МГц изменяется от 40 до 6 мм.

*Теневой метод.* Меньшее распространение получил теневой метод, при котором излучатель и приемник расположены с противоположных сторон сварного соединения (рис. 43).

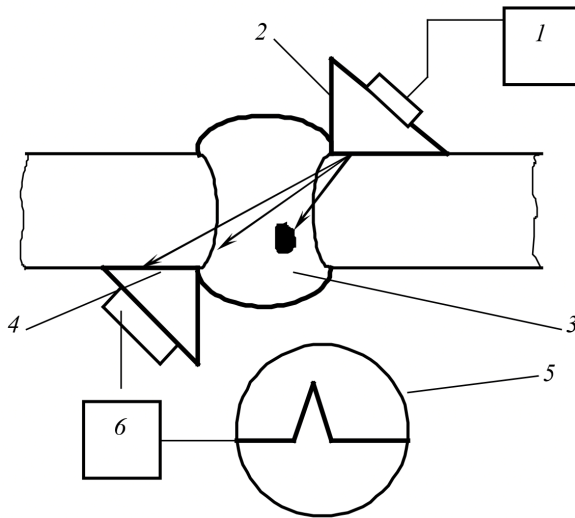


Рис. 43. Контроль теневым методом: 1 – генератор; 2, 4 – пьезоэлектрические преобразователи; 3 – сварной шов; 5 – электронно-лучевая трубка (ЭЛТ); 6 – усилитель

В этом случае ультразвуковые колебания вводят с одной стороны изделия, а принимают с другой. Наличие дефектов

останавливается по ослаблению энергии прошедших через изделие ультразвуковых колебаний. Величина измененной энергии зависит от площади отражающей поверхности дефекта, его расположения и площади сечения ультразвукового луча. Чем больше размер дефекта, тем меньше амплитуда прошедшего сигнала.

Теневой метод можно применять только при двухстороннем доступе к изделию. При ручном контроле этим методом можно контролировать сварные швы ограниченного сечения небольшой толщины.

Недостатками метода являются сложность ориентации ПЭП относительно центральных лучей диаграммы направленности, невозможность точной оценки координат дефектов и более низкая чувствительность (в 10...20 раз) по сравнению с эхо-методом.

К преимуществам следует отнести низкую зависимость амплитуды сигнала от ориентации дефекта, высокую помехоустойчивость и отсутствие «мертвой зоны». Благодаря первому преимуществу этим методом уверенно обнаруживаются наклонные дефекты, не дающие прямого отражения при эхо-методе.

*Зеркально-теневой метод.* Зеркально-теневой метод является разновидностью теневого. При этом методе признаком обнаружения дефекта служит ослабление амплитуды сигнала, отраженного от противоположной поверхности (ее обычно называют донной поверхностью) изделий (рис. 44). Дополнительным преимуществом этого метода по сравнению с теньевым являются односторонний доступ и более уверенное обнаружение дефектов, расположенных в корне шва. Оба эти метода нашли широкое применение при контроле сварных стыков.

Ультразвуковой неразрушающий контроль в настоящее время является одним из наиболее надежных, достоверных и информативных методов оценки качества материалов и изделий.

Объем применения ультразвукового контроля как в ряде отраслей промышленности нашей страны (энергомашиностроение,

судостроение, строительство, химическое машиностроение, железнодорожный транспорт), так и за рубежом за последние годы достиг 70...80 %. Это объясняется более высокой чувствительностью контроля (по раскрытию – на пять порядков) и достоверностью (2...2,5 раза) к обнаружению трещиноподобных дефектов; более высокой оперативностью (15...20 раз) и производительностью (2...4 раза); меньшей стоимостью (2...6 раз) и безопасностью в работе по сравнению с традиционными методами радиографического контроля [133].

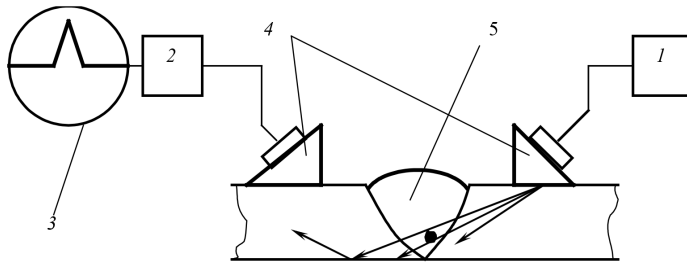


Рис. 44. Контроль зеркально-теневым методом:  
1 – генератор; 2 – усилитель; 3 – ЭЛТ; 4 – ПЭП; 5 – сварной шов

Ультразвуковой метод широко применяется для контроля сварных соединений из низкоуглеродистых и низколегированных сталей, алюминия, меди и их сплавов. При толщине стальных изделий свыше 80 мм ультразвуковой контроль в ряде случаев является наиболее надежным, в конструкциях из алюминиевых сплавов с его помощью выявляются все наиболее опасные дефекты. Кроме того, с помощью ультразвука можно определить структурные превращения в металле сварного соединения после термической обработки [123].

Ультразвуковая дефектоскопия применяется не только при контроле стыковых швов, выполненных ручной дуговой, автоматической сваркой под флюсом и электрошлаковой сваркой,



но и для проверки тавровых и нахлесточных соединений, а также для контроля швов, выполненных контактной сваркой.

Широкое распространение метода определяется его многочисленными достоинствами и преимуществами по сравнению с другими методами НК.

В первую очередь УЗ-контроль применяется для обнаружения несплошностей, находящихся внутри объекта контроля либо выходящих на поверхность. Методы УЗК дают возможность определять или оценивать размеры несплошностей, их координаты. Ряд методик позволяет определить тип дефекта (протяженный, непротяженный, плоскостной и др.) [99].

Применение УЗ-контроля позволяет повысить вероятность обнаружения плоскостных трещиноподобных дефектов, к примеру, при строительстве трубопроводов до 95...98 % [110] по сравнению с радиографическим контролем (35...37 %).

Эффективность УЗ-контроля зависит от многих факторов и в первую очередь – от частоты ультразвуковых волн. С увеличением частоты уменьшается их длина, а следовательно, и диапазон выявления более мелких дефектов. Следует отметить, что с увеличением частоты на распространение УЗ-колебаний больше влияние начинает оказывать структура изделия. Увеличивается повторное отражение волн от границ зерен и, как следствие этого, происходит постепенное затухание ультразвука. Размеры, форма, характер и место расположения дефектов влияют на выбор УЗ-волн.

С целью исключения влияния субъективных факторов на результаты проводимого контроля необходимо настраивать дефектоскоп по стандартным образцам (стандартным образцам предприятия) и проводить периодическую проверку настройки в процессе работы.

Оператор должен обладать достаточным опытом, чтобы отличать возникающие на экране дефектоскопа полезные сигналы от ложных, которые появляются независимо от наличия дефектов в изделии. Они возникают вследствие сложной формы изделия,

грубой обработки поверхности, крупнозернистой структуры металла, наличия отверстий и т. д. УЗК необходимо проводить на подготовленной поверхности с чистотой обработки, задаваемой рабочими документами.

Как показали исследования, проведенные С. Т. Назаровым, А. К. Гурвичем, Н. В. Химченко и др., применение УЗК позволяет не только обнаружить, но и определить местонахождение и примерные размеры дефектов в сварных швах толщиной от 3 мм и более. Однако при толщине швов менее 8...10 мм выявление дефектов требует высокой квалификации оператора, поэтому, как правило, УЗК используют для контроля сварных швов толщиной 12...15 мм и более. Особенно эффективен этот метод при контроле толстостенных изделий с толщиной 30...50 мм и более [80].

Однако ультразвуковой метод контроля позволяет выявлять и сверхтонкие дефекты на изделиях с толщиной менее 3 мм. Так авторы сообщают о возможности выявления сверхтонких дефектов на образцах из латуни и дюралюминия толщиной от 1 до 5 мм [94].

Разработанная методика ультразвукового контроля соединений, полученных контактной и диффузионной сваркой, с применением компьютерного дефектоскопа позволяет выявлять дефекты с точностью до 0,1 мм на изделиях толщиной 2...5 мм [95].

УЗ-контроль сварных соединений получил широкое применение при изготовлении, монтаже, ремонте и техническом диагностировании в процессе эксплуатации сварных металлических конструкций и технических устройств, это контроль:

- сварных швов металлических конструкций промышленных и гражданских зданий и сооружений;
- швов крупногабаритных изделий (кожухи доменных печей, котлы высокого давления, толстостенные трубопроводы высокого давления) с толщиной стенки изделия более 30...50 мм;
- сварных соединений из алюминиевых сплавов (строительных МК, резервуаров и трубопроводов для жидкостей и транспортировки коррозионно-активных жидкостей и газов);

- сварных швов трубопроводов, листовых конструкций (цилиндрические и шаровые резервуары и т. п.);
- сварных соединений грузоподъемных машин и механизмов;
- стыковых пролетных строений ферменных подкрановых и мостовых конструкций;
- 100%-ный контроль стыков рельсов;
- изделий значительных толщин, выполненных электрошлаковой сваркой.

Преимуществами УЗК являются:

- возможность контроля при одностороннем доступе к изделию;
- простота и высокая производительность метода;
- высокая чувствительность метода;
- большая проникающая способность, позволяющая обнаруживать внутренние дефекты в крупногабаритных изделиях;
- возможность автоматизации процесса контроля;
- безопасность для оператора и рабочих.

К недостаткам УЗК относятся:

- зависимость достоверности результатов контроля от квалификации оператора;
- наличие «мертвых зон»;
- необходимость в подготовке контролируемой поверхности сравнительно высокой чистоты;
- трудность контроля изделий из аустенитных сталей из-за крупнозернистой структуры;
- отсутствие документа с изображением дефекта.

*Технология ультразвукового контроля.* Выявляемость внутренних дефектов зависит от их величины, конфигурации отражающей поверхности, ориентации и местоположения в сварном шве. Поэтому при разработке средств и методик УЗК с целью ее оптимизации необходимо учитывать не только вероятность появления того или иного дефекта, но и его потенциальную опасность как концентратора внутренних напряжений. Особое вни-

мание должно быть уделено наиболее опасным плоскостным дефектам: трещинам, непроварам, подрезам.

В настоящее время многими исследователями в разных отраслях промышленности собран значительный статистический материал по дефектам сварных соединений. Наиболее полный и систематизированный материал приводится в работе [133]. На рис. 45 приведена статистика видов встречающихся дефектов, а в табл. 12 – распределение дефектов сварных швов по видам.

Таблица 12

**Распределение по видам дефектов сварных швов**

Виды дефектов	Процентное содержание, %				
	Резервуары $H = 6...20$ мм		Судовые конструкции, нефтегазовое оборудование, трубопроводы $H = 3,5...40$ мм	Энергетическое оборудование $H = 50...250$ мм	
	Завод № 1	Завод № 2		Завод № 1	Завод № 2
Объемные (компактные):	68,7	66,0	70...75	91,7	65...75
одиночные (шлаки)	62,6	58,0	60...70	55,0	62...76
скопления (поры, риски)	2,2	4,1	15...30	23,6	–
цепочки (поры)	3,9	3,9	–	15,1	5...15
Плоскостные:	31,3	34,0	25...30	8,3	25...30
непровары	9,3	5,7	5...10	6,2	6...28
непровары с трещиной	7,2	4,7	5...10	–	–
трещины	11,5	21,6	0,5...5	2,1	0,4...8
подрезы	3,2	2,0	–	–	–

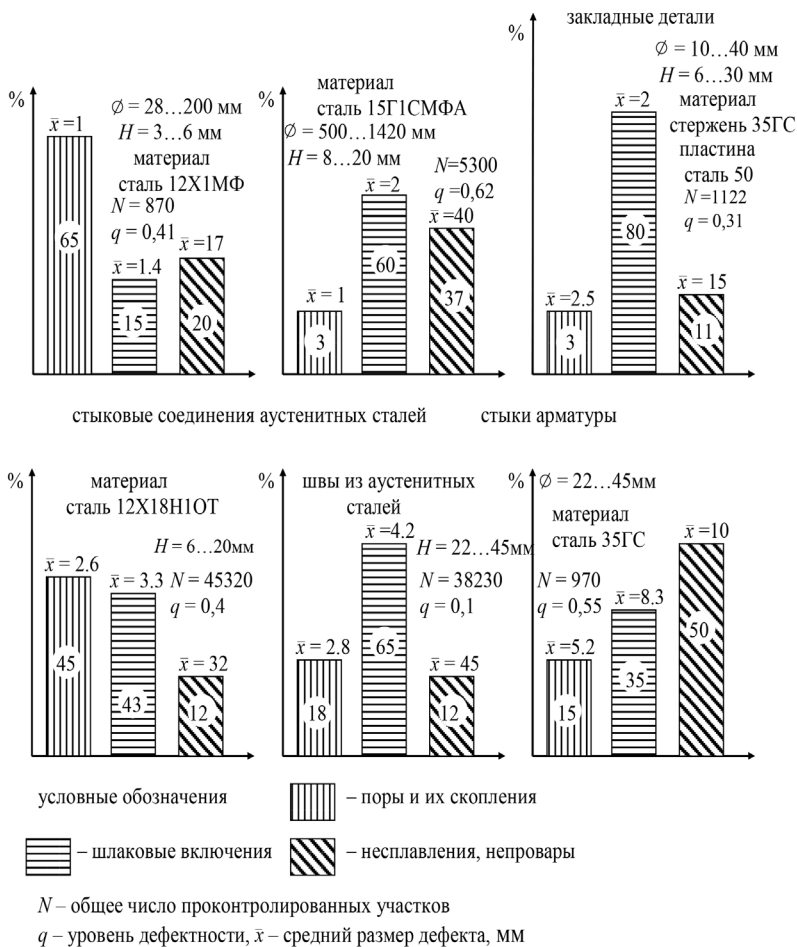


Рис. 45. Статистика видов встречающихся дефектов

Из приведенных данных видно, что наиболее распространены дефектами являются объемные – это шлаковые включения, скопления и цепочки пор. В то же время количество наиболее опасных – плоскостных – дефектов намного меньше. Следует

отметить, что их выявление является весьма трудоемкой задачей и требует как применения дорогого и сложного оборудования, так и разработки новых методов и методик. Однако это оправдано, так как повышает достоверность проводимого контроля, а следовательно, и качество продукции [7].

Технологию УЗК нормирует ГОСТ [35], который определяет:

- схемы прозвучивания сварных швов;
- основные параметры системы контроля;
- нормативные параметры дефектов.

Важнейшей характеристикой системы НК является ее воспроизводимость, т. е. независимость результатов контроля от применяемых дефектоскопа, преобразователя, стандартного образца (СО).

Поэтому воспроизводимость УЗК обеспечивается нормированием комплекса параметров системы «дефектоскоп – преобразователь». Согласно [114], таких параметров десять:

- длина волны или частота колебаний;
- чувствительность;
- положение точки выхода луча (стрела преобразователя);
- угол ввода УЗ-луча в металл;
- погрешность глубиномера;
- «мертвая зона»;
- разрешающая способность по дальности и по фронту;
- характеристики пьезоэлектрического преобразователя;
- минимальный условный размер дефекта, фиксируемый при заданной скорости сканирования;
- длительность импульса дефектоскопа.

Перечисленные параметры, их конкретные численные значения должны оговариваться в документации на ультразвуковом контроле сварных соединений.

Перед проведением УЗ-контроля производится зачистка поверхностей околошовной зоны размером 50...150 мм. Ширина

этой зоны зависит от толщины сварного шва. В соответствующих инструкциях оговаривается шероховатость поверхности, она должна быть не хуже  $R_z 40$ .

Для обеспечения хорошего акустического контакта между рабочей поверхностью призматического щупа на поверхность металла, прилегающую к шву, наносится тонкий слой жидкой смазки, которая способствует введению в металл значительной доли мощности излучаемых колебаний. В качестве жидкой смазки обычно используют трансформаторное, турбинное или машинное масло, а также глицерин, нанося их на поверхность контролируемого изделия в зоне шва.

УЗК в сварных соединениях подвергается наплавленный металл и зоны термического влияния (ЗТВ). Схемы прозвучивания должны обеспечивать выявление дефектов по всей контролируемой поверхности (рис. 46–50).

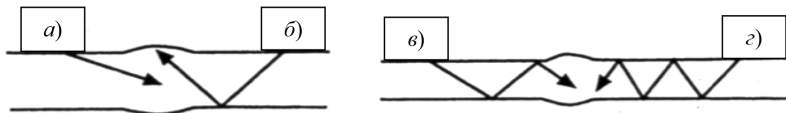


Рис. 46. Схемы прозвучивания стыковых сварных соединений эхо-методом: а — прямыми лучами; б — однажды отраженными лучами; в — дважды отраженными лучами; г — многократно отраженными лучами

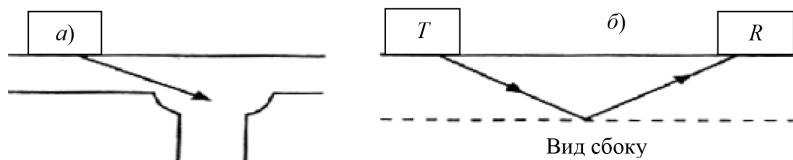


Рис. 47. Схемы прозвучивания тандем (а) и раздельно-совмещенная (б), реализующая зеркально-теневой метод; Т — излучающий преобразователь; Р — принимающий преобразователь

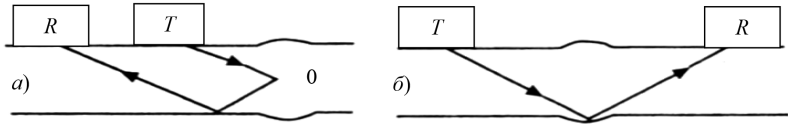


Рис. 48. Схемы прозвучивания угловых (тавровых) сварных соединений эхо-методом; а – прямыми лучами преобразователя; б – однажды отраженными лучами

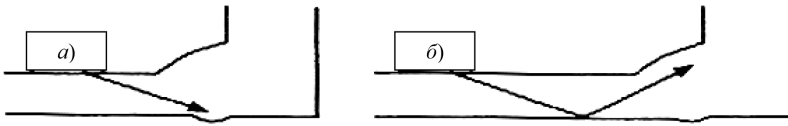


Рис. 49. Схемы прозвучивания тавровых сварных соединений со стороны основной детали: а – прямыми лучами преобразователя; б – раздельно-совмещенная схема

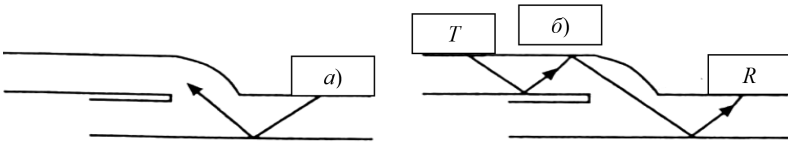


Рис. 50. Схемы прозвучивания нахлесточных сварных соединений: а – отраженными лучами преобразователя; б – раздельно-совмещенная схема

Сварные соединения, как правило, прозвучиваются с поверхности околошовной зоны наклонными УЗ-преобразователями, при этом наружный валик усиления шва не снимается.

Основными измеряемыми характеристиками дефектов, согласно [35], являются:

- эквивалентная площадь дефекта или амплитуда эхо-сигнала, определенная с учетом расстояния до дефекта;
- координаты дефекта в сварном соединении;
- условные размеры дефекта;



- условное расстояние между дефектами;
- количество дефектов на определенной длине сварного соединения.

В используемых методиках главным измеряемым параметром является амплитуда эхо-сигнала от дефекта. Поэтому для разбраковки эхо-сигнала по амплитуде устанавливается браковочный уровень чувствительности, настроенный по стандартному образцу предприятия (СОП). Последний содержит искусственные отражатели, имитирующие максимально допустимый дефект.

Размеры дефекта в УЗК оцениваются с помощью условных размеров, при этом в методиках используется условная протяженность дефекта (в мм). Она определяется на контрольном уровне чувствительности, который на 6 дБ ниже браковочного. Перемещением преобразователя вдоль сварного шва фиксируют два положения на концах протяженного дефекта, в которых амплитуда эхо-сигнала находится на контрольном уровне. Условную протяженность дефекта измеряют линейкой как расстояние между двумя положениями преобразователя и сравнивают с максимально допустимой. Если измеренная условная протяженность больше, чем допустимая, то изделие бракуется.

В методиках УЗК могут использоваться дополнительные критерии браковки:

- условная высота дефекта в корне сварного шва;
- цепочки и скопления пор в наплавленном металле;
- суммарная условная протяженность дефектов на любые 300 мм длины сварного шва, на периметр сварного шва;
- количество допустимых по амплитуде дефектов на любые 100 мм длины сварного шва, на любые 300 мм.

Наиболее часто встречающимися дефектами сварных швов являются трещины вдоль шва, непровары, поры, шлаковые включения, несплавления по кромкам, которые хорошо отражают УЗ-волны и достаточно четко выявляются.

Рассмотренные характеристики дефектов и критерии браковки достоверно позволяют оценить опасность дефектов, что подтверждает практика использования УЗК как при изготовлении, так и при ремонте сварных соединений.

Одним из основных критериев качества сварных соединений в опасных производственных объектах является механическая прочность. Поэтому эффективность НК необходимо оценивать по тому, насколько надежно выбранный метод бракует несплошности по их влиянию на общую прочность изделия. Однако в настоящее время нет ни одного метода НК, который бы давал идеальное соответствие критериев браковки изделия требованиям заданного уровня прочности.

Следует отметить, что определенные трудности возникают при выявлении и оценке эксплуатационных дефектов, таких как:

- усталостные трещины в продольном и поперечном направлении сварного шва;
- растрескивание в объеме ЗТВ, коррозионные повреждения, местная деградация микроструктуры стали и др.

Эти дефекты имеют, как правило, шероховатую изрезанную поверхность или состоят из множества мелких неоднородностей. Поэтому из-за значительного рассеивания УЗ-волн амплитуды эхо-сигналов от них существенно ниже, чем от гладких дефектов.

Такая же картина наблюдается и при изменении условий протяженности. В результате того, что в методиках УЗК условная протяженность определяется на фиксированном контрольном уровне чувствительности, а амплитуда эхо-сигнала низкая, измерение условной протяженности дает заниженный результат [7].

Увеличение чувствительности ультразвукового дефектоскопа (УЗД) дает возможность получать эхо-сигналы от шероховатых поверхностей, однако простое увеличение чувствительности позволяет получать сигналы не только от дефектов, но и от крупных зерен наплавленного металла, риск, волнистости или

шероховатости поверхности изделия. Так как наблюдаемые дефекты практически соизмеримы по амплитуде и находятся в той же зоне экрана дефектоскопа, оператору трудно их различить. Поэтому в этих условиях весьма сложно принимать правильные решения о качестве сварного шва.

Таким образом, основные проблемы правильной (адекватной) оценки опасности выявленных дефектов связаны с низкой информативностью измеряемых параметров: амплитуды эхо-сигнала и условных размеров дефектов.

В УЗ-дефектоскопии несплошности металла разделяют по форме на две группы:

- плоские (трещины, непровары, несплавления и т. д.);
- округлые (поры, шлаковые включения).

Дефекты второй группы, как правило, заполнены инородным веществом, имеют сложную геометрию и шероховатую поверхность, поэтому коэффициент отражения УЗ-колебаний от них снижается по сравнению с коэффициентом отражения от искусственных отражателей.

Учитывая сказанное, в УЗК вводится понятие реальной чувствительности, которой характеризуются минимальные размеры дефектов, уверенно выявляемых в изделиях или соединениях определенного вида. Она может быть оценена статистической обработкой результатов контроля и металлографических исследований большой серии объектов.

Реальную площадь компактных естественных несплошностей определяют делением эквивалентной площади выбранного искусственного отражателя на коэффициент выявляемости при равной амплитуде эхо-сигналов и глубин залегания отражателя и несплошности. Так, например, для поковок и проката этот коэффициент равен  $0,15 \dots 0,4$ , для сварных швов –  $0,01 \dots 0,1$ .

В случае получения дополнительной информации о типе несплошности измеряют также условную протяженность, вы-

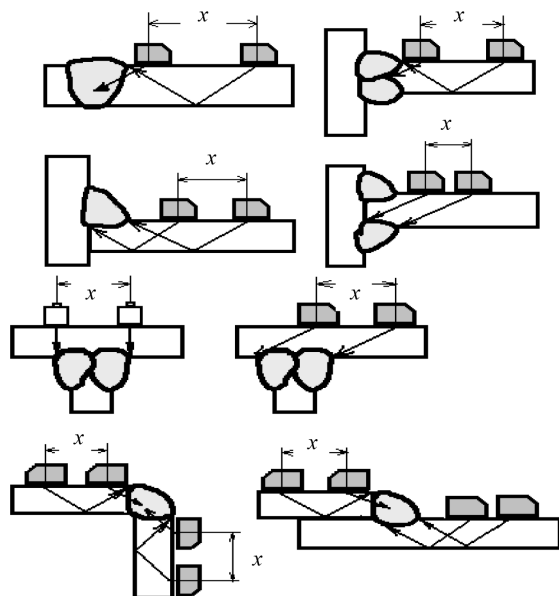
соту и ширину обнаруженной несплошности. Однако практика показывает, что результаты измерений с использованием традиционных технологий в основном не соответствуют истинным размерам обнаруженной несплошности. Возможно только распознавание компактных и протяженных несплошностей в металле. При УЗК важно различать плоскостные и объемные несплошности. Дефект промежуточного типа, как правило, идентифицировать не удается.

*УЗК тонкостенных объектов.* Параметры контроля и возможности идентификации УЗ-сигналов прежде всего определяются толщиной сварного соединения. Для изготовления строительных металлических конструкций широко применяются малоуглеродистые и низколегированные стали с толщиной стенок 4...16 мм. При этом используются не только стыковые сварные соединения, но и угловые, тавровые и нахлесточные, которые выполняются ручной дуговой сваркой, автоматической под слоем флюса и сваркой в защитных газах. Особые трудности представляет УЗ-контроль сплошных швов толщиной 4...16 мм и особенно 4...6 мм. Основными дефектами являются непровары, трещины, смещения кромок, провисания. Наиболее эффективными для контроля таких толщин являются раздельно-совмещенные преобразователи с большими углами в призме ( $\beta = 53...55^\circ$ ) и малой стрелой, при частоте 4...5 МГц [133].

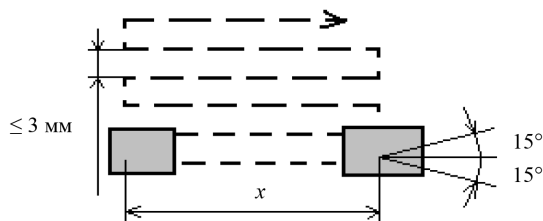
На рис. 51, *а* показаны схемы ультразвукового контроля различных типов сварных соединений (стыковых, угловых, тавровых, нахлесточных), а на рис. 51, *б* – схема поперечно-продольного перемещения ПЭП.

При проведении УЗ-контроля стыковых соединений наиболее вероятным выявляемым дефектом является непровар в корне швов. В односторонних соединениях он выявляется прямым лучом, и максимум эхо-сигнала от него располагается на переднем фронте строб-импульса (рис. 52, *а*). При увеличении толщины

элементов до 6 мм эхо-сигнал от непровара может смещаться влево из-за деформации (рис. 52, б). В двусторонних соединениях непровар может выявляться как прямым, так и однократно отраженными лучами (рис. 52, в).



а)



б)

Рис. 51. Схемы ультразвукового контроля: а – схемы сканирования; б – поперечно-продольное перемещение ПЭП

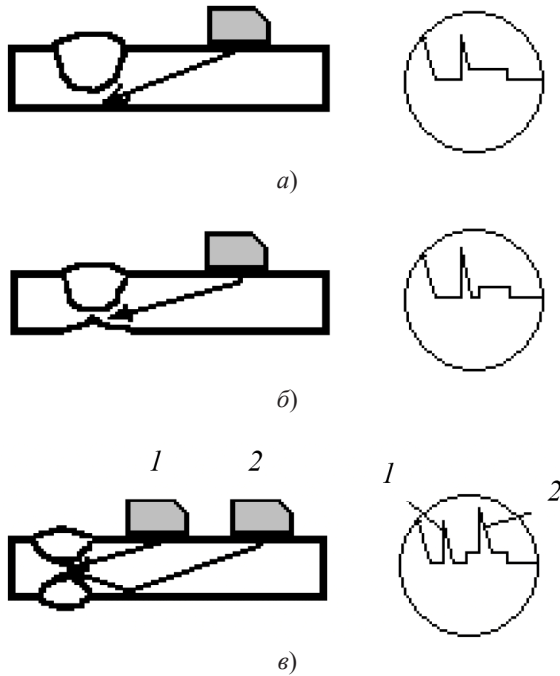


Рис. 52. Выявление непроваров в корне швов односторонних (а, б) и двусторонних (в) стыковых соединений:  
1 – контроль прямыми лучами;  
2 – контроль однократно отраженными лучами

Внутренние трещины обычно располагаются в средней зоне наплавленного валика, что дает возможность идентифицировать характер обнаруженного дефекта путем измерения его координат. При этом для определения типа обнаруженного дефекта необходимо оценивать изменение амплитуды эхо-сигнала от выявленного дефекта вращательным сканированием.

Признаком обнаружения поверхностной трещины является сильное реагирование эхо-сигнала на экране дефектоскопа на «прощупывание» в месте отражения УЗ-луча.

Следует отметить, что скопления пор или шлаковые включения, характеризующиеся появлением широкого эхо-сигнала, не обнаружены.

УЗ-контроль угловых и тавровых соединений с разделкой кромок со стороны привариваемого элемента практически ничем не отличается от контроля стыковых соединений.

В односторонних соединениях непровар в корне сварного шва обнаруживается прямым лучом наклонного преобразователя и максимум эхо-сигнала от него находится строго на переднем фронте строб-импульса (рис. 53, а). В двусторонних соединениях непровар можно выявить как прямым, так и однократно отраженным лучами (рис. 53, б). Однако более уверенно непровар выявляется прямым раздельно-совмещенным (РС) ПЭП со стороны основного элемента (см. рис. 53, б). В угловых соединениях непровар выявляется со стороны наименьшего катета (рис. 53, в).

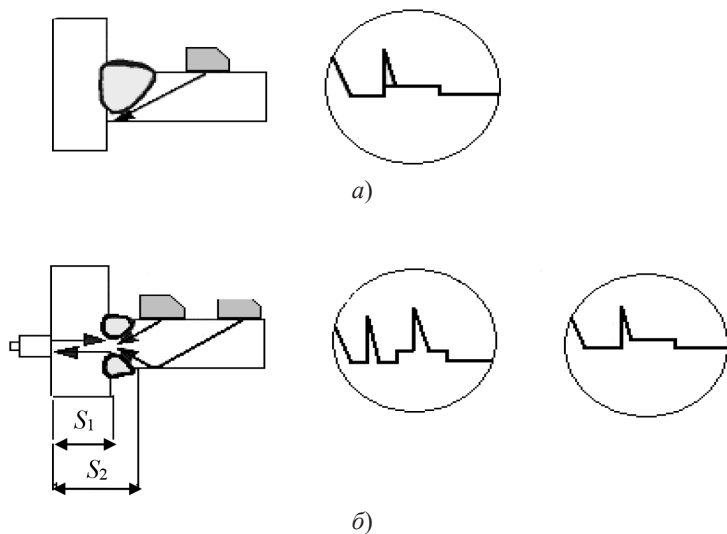
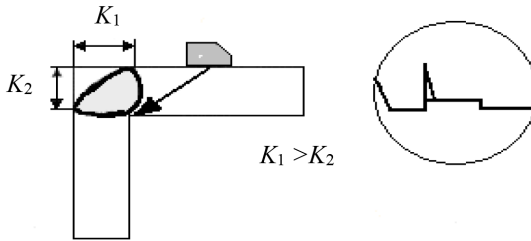


Рис. 53, начало. Выявление непроваров в корне швов угловых тавровых соединений, выполненных с разделкой кромок



в)

Рис. 53, окончание

Тавровые соединения, исполненные без разделки кромок с конструктивными непроварами, лучше всего контролировать со стороны привариваемого элемента: односторонние соединения – однократно отраженным лучом, а двусторонние – прямым лучом. В этом случае максимум эхо-сигнала от непровара в односторонних соединениях располагается на заднем фронте строб-импульса, а при контроле двусторонних соединений – на переднем (рис. 54, а).

Внутренние трещины обычно начинаются от зазора между основным и привариваемым элементами. Максимумы эхо-сигналов от обнаруженных трещин могут быть несколько смещены влево или вправо относительно заднего (при контроле односторонних соединений) или переднего (при контроле двусторонних соединений) фронтов строб-импульса (рис. 54, б). Шлаковые включения, как правило, находятся в корневой части шва, и расположение максимумов эхо-сигналов от них такое же, как и от максимумов эхо-сигналов от трещин в корне сварочного шва.

Особенностью контроля нахлесточных сварных швов является наличие эхо-сигналов от поверхности шва при прозвучивании со стороны верхнего элемента. При перемещении преобразователя в сторону основного металла от положения, при котором контролировался корень шва, на строб-импульсе появляется



эхо-сигнал, соответствующий отражению от поверхности сварного шва (рис. 55).

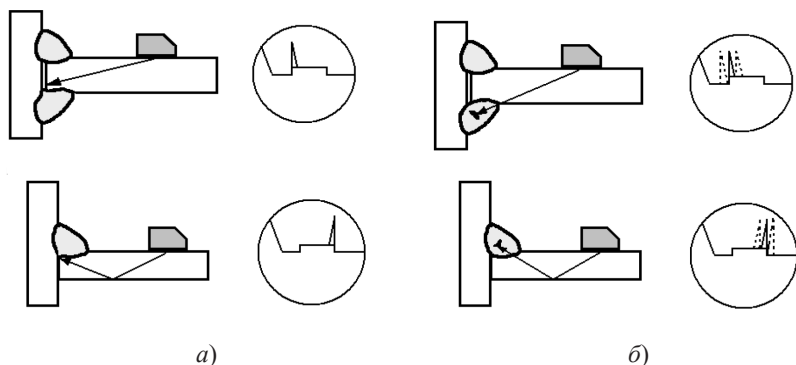


Рис. 54. Выявление непроваров в корне швов тавровых соединений, выполненных без разделки кромок

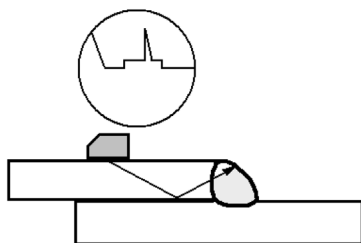


Рис. 55. Эхо-сигнал от поверхности шва нахлесточного соединения

Непровары в корне швов могут быть выявлены только прямым лучом со стороны верхнего элемента. Максимум эхо-сигнала от непровара в корне шва располагается на переднем фронте строб-импульса (рис. 56, *а*). Внутренние трещины обычно начинаются от зазора между сварными элементами и могут выявляться как прямым лучом со стороны верхнего элемента, так и однократно отраженным лучом со стороны нижнего элемента (рис. 56, *б*).

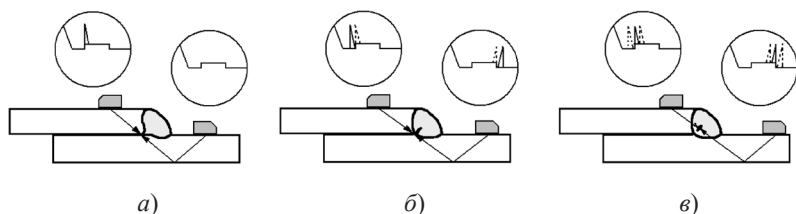


Рис. 56. Выявление дефектов в корне швов нахлесточных соединений

При выявлении трещины прямым лучом, максимум эхо-сигнала располагаются на переднем фронте строб-импульса или, что возникает чаще, несколько смещается по экрану влево. Максимум же эхо-сигнала от трещины, выявляемой однократно отраженным лучом, находится на заднем фронте строб-импульса или, что бывает чаще, несколько смещается по экрану вправо.

Шлаковые включения чаще всего располагаются в корневой части швов (рис. 56, в). При их выявлении прямым лучом максимумы эхо-сигналов располагаются на переднем фронте строб-импульса, при этом возможно их смещение влево или вправо относительно переднего фронта. При контроле сварного шва отраженным лучом максимумы эхо-сигналов появляются на заднем фронте строб-импульса или могут быть несколько смещены влево и вправо относительно заднего фронта.

Таким образом, рассмотренные особенности контроля качества сварных швов изделий, изготовленных из тонколистового проката, позволяют повысить достоверность результатов ультразвукового контроля.

#### 4.6.8. Пассивные методы контроля

К пассивным методам акустического контроля можно отнести те, которые не требуют намеренного возбуждения акустических

сигналов в объекте контроля. Такие сигналы возникают в самом объекте при его эксплуатации. К наиболее известным методам, использующим энергию излучения конструкций, можно отнести следующие:

- акустико-эмиссионный;
- метод магнитной памяти металлов.

*Акустико-эмиссионный метод контроля.* В последнее время все большее распространение в диагностике конструкций различного назначения приобретает АЭ-метод, который в сочетании с традиционными видами НК позволяет значительно повысить эффективность, надежность контроля и снизить трудоемкость. Этот метод наиболее целесообразен для выявления наиболее опасных дефектов – усталостных трещин – и позволяет в результате однократного контроля оценить степень их активности.

В основе этого метода лежит тот факт, что дефекты при нагружении изделий излучают упругие волны. Распространяясь по изделию, они достигают специальных датчиков, преобразующих упругие колебания в электрические сигналы. Регистрируя эти сигналы, можно определить момент возникновения и роста дефектов, их координаты и провести идентификацию. Обработка АЭ информации основывается как на анализе формы отдельных сигналов, так и на анализе временных и энергетических характеристик импульсов. Это позволяет классифицировать сигналы по принадлежности к различным типам источников АЭ и механизмов их генерации.

Как уже было сказано, метод АЭ, в отличие от других методов НК, пассивный, т. е. физическое поле излучения возбуждается самим дефектом.

В связи с этим для метода АЭ характерны определенные особенности, в ряде случаев обеспечивающие его преимущества перед другими методами НК.

Важным преимуществом АЭ-контроля является возможность одновременного контроля всей конструкции, включая основной

металл, сварные швы, вварные и приварные конструктивные элементы, а также контроля разнопрофильных объектов – как связанных технологически, так и несвязанных и разнесенных на большие расстояния.

Акустико-эмиссионный контроль традиционно используется для технического диагностирования емкостного и трубопроводного оборудования химических, нефтехимических и энергетических производств, где требование обязательного нагружения контролируемых объектов выполняется при традиционных испытаниях их внутренним давлением. Все большее распространение приобретает АЭ-контроль протяженных объектов и в первую очередь таких, как трубопроводы. Его достоинство заключается в том, что он обладает высокой производительностью и позволяет выявлять наиболее опасные, развивающиеся или склонные к развитию дефекты.

Высокая эффективность АЭ-метода достигается, во-первых, локальным доступом к поверхности трубопровода для установки датчиков и, во-вторых, большим расстоянием между ними, которое обычно составляет около 100 м [57]. Поэтому за один цикл контроля можно проверить значительный участок до 500 и более метров. Так, например, цифровая акустико-эмиссионная система A-line 32D (DDM) компании «Интерюнис» позволяет контролировать объект суммарной длиной до 5 км одновременно, при этом максимальная длина одной линии достигает 1200 м [97]. Ее назначение – провести НК методом АЭ без вывода из эксплуатации трубопроводов, сосудов давления, резервуаров, котлов, железнодорожных цистерн, буровых вышек, кранов мостов и других конструкций. Она может использоваться как для мобильного периодического контроля, так и для стационарного непрерывного контроля (мониторинга) с возможностью управления объектом.

*Преимущества и недостатки АЭ-метода контроля.* АЭ-метод незаменим при контроле конструкций с защитным покрытием,

которое обязательно к удалению при обследовании традиционными методами (УЗК, рентгеновским, магнитопорошковым, капиллярным и т. д.), что зачастую по техническим и экономическим соображениям представляется практически невозможным.

АЭ-метод позволяет резко снизить трудоемкость подготовительных операций при контроле оборудования химических предприятий, так как требует вскрытия только небольших участков для установки датчиков. Аналогичная картина складывается с контролем магистральных газо- и нефтепроводов, проложенных глубоко под землей. Кроме того, сварные конструкции морской глубоководной техники могут содержать труднодоступные или недоступные элементы для распространенных методов НК (швы с большими усилениями, перекрестья сварных швов и т. д.).

Этому методу нет альтернативы в случае диагностики двухкорпусных криогенных резервуаров, в которых исследованию подвергается внутренний сварной корпус, изолированный внешним кожухом и межкорпусным вакуумным пространством. Для технической диагностики при пневмонагружениях сосудов такого типа ЦНИИ им. А. Н. Крылова совместно с ООО «Пуск» и ЭТФ «Торэкст» была разработана специализированная методика и акустические преобразователи специального конструктивного исполнения [77].

Авторами [74] обобщен десятилетний опыт проведения акустико-эмиссионного экспресс-контроля контейнеров для жидкого хлора, главной задачей которого является определение необходимости проведения прецизионного дополнительного дефектоскопического контроля неразрушающими методами. Отмечается высокая эффективность контроля.

Положительные результаты получены при использовании АЭ-контроля ответственных объектов железнодорожного транспорта. При обследовании серповидной подвески редуктора тягового двигателя электропоезда найдены не только трещины,

не выявляемые магнитопорошковым методом, но и непровары, содержащие шлаковые включения, ухудшающие эксплуатационные свойства объекта. Это позволило изъять бракованные изделия из эксплуатации и значительно повысить надежность изделий [96].

Метод АЭ был эффективно использован при диагностике состояния ответственных сварных соединений МК разводного пролета моста Александра Невского (Санкт-Петербург) перед его капитальным ремонтом [90]. Операция разведения-сведения крыльев пролета моста позволила реализовать условие деформационной активации концентраторов в их конструктивных элементах (от минимальных изгибных напряжений при вертикальном положении крыла пролета до максимальных – при горизонтальном расположении крыла), шарнирных опорах и балках крепления противовесов.

В некоторых случаях АЭ-контроль является просто незамеченным. Так, например, только с помощью АЭ-контроля выявлено предельное состояние шпилек крепления заглушки у воздушных сварных сосудов насосно-аккумуляторных станций [5].

Проведение контроля сварных швов УЗД в объеме 100 % чаще всего невыполнимо, или количество идет в ущерб качеству. В то же время проведение АЭ-контроля, предшествующего УЗК, могло бы как сократить объем подготовительной работы по зачистке поверхности, демонтажу и восстановлению наружной изоляции, так и уменьшить объем УЗК за счет проверки только опасных зон, выявленных при АЭ-контроле [67].

АЭ-контроль является основным методом контроля, применяемым в системах диагностического мониторинга, что позволяет провести 100%-ный контроль состояния объекта с целью обнаружения дефектов, способных развиваться в процессе эксплуатации.

Применяемые в настоящее время методы НК для диагностики металлических конструкций грузоподъемных машин (ГПМ) в процессе эксплуатации в основном отличаются невысокой

эффективностью и поэтому требуют дальнейшего развития. Основным их недостатком является невозможность глобального обследования протяженных сложных конструкций.

В то же время ряд документов по диагностированию грузоподъемных машин (ГПМ) и объектов нефтегазовой промышленности предусматривают АЭ-контроль кранов, буровых вышек и других металлических конструкций [140]. Требования этих документов предполагают разработку методической базы и создание нормативных документов по проведению АЭ-контроля. Однако подобные работы находятся в основном в стадии научных исследований.

Несмотря на достижения акустико-эмиссионной дефектоскопии в настоящее время на первый план выходит проблема повышения достоверности и надежности, так как большое количество обнаруживаемых АЭ-контролем дефектов не подтверждается традиционными методами НК. Остается открытым и вопрос о том, с какой вероятностью (надежностью) при контроле выявляются опасные развивающиеся дефекты.

Надежность АЭ контроля развивающихся дефектов зависит от многих причин:

- условий проведения испытаний (приложенное давление, затухание звука, расстояние между датчиками и т. д.);
- чувствительности используемой аппаратуры;
- материала изделия;
- используемых критериев классификации источников и др.

При использовании метода АЭ получаемые результаты в значительной степени зависят от квалификации оператора. Так, например, фирма *NYKEM* (Германия) прекратила применение АЭ-контроля в атомной энергетике из-за сложности интерпретации результатов [8].

Нормы АСМЕ регламентируют только обнаружение источников акустической активности [2].

Метод акустической эмиссии, в отличие от активных методов НК, таких как УЗК и радиографический, не дает геометрических размеров дефектов, а указывает только местоположение источников АЭ и степень их опасности при эксплуатации. Поэтому после проведения АЭ-контроля применяют традиционные методы НК для определения характеристик дефектов и последующей их классификации.

Таким образом, этот метод контроля является в данном случае составной частью комплексной системы технической диагностики металлических конструкций. Его применение позволяет наиболее рационально выбирать места проведения контроля традиционными методами НК и повышает надежность и достоверность обследования объекта.

Опыт работы ОАО «ВНИКТИ НЕФТЕХИМОБОРУДОВАНИЕ» на предприятиях нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности, насчитывающий уже 15 лет, позволяет сделать выводы о необходимости строгого подхода к подготовке объекта контроля к испытаниям, о необходимости совершенствования методик АЭ-контроля, программного обеспечения, организации базы данных АЭ-информации для разработки критериев оценки результатов АЭ-контроля [33]. Решение этих задач позволит расширить область практического применения АЭ-контроля.

*Пассивный феррозондовый метод контроля.* Анализ неразрушающих методов контроля позволяет назвать их существенные основные недостатки:

- локальность контроля, непригодность некоторых методов для контроля протяженных конструкций;
- трудоемкая подготовка контролируемой поверхности и объектов контроля (зачистка, активное намагничивание и т. д.) для таких методов НК, как визуально-измерительный, ультразвуковой, капиллярный, магнитопорошковый;
- необходимость двустороннего доступа (радиографический);



- невозможность использования большинства методов в области пластической деформации;
- некоторые методы НК направлены только на выявление поверхностных дефектов;
- не всегда учитывается изменение структуры в процессе эксплуатации объекта;
- трудности в определении положения датчиков контроля относительно действия главных напряжений и деформаций.

Применение при техническом диагностировании традиционных методов НК часто является недостаточным для обеспечения требуемой надежности контролируемых объектов. Это связано в первую очередь с тем, что существующие методы НК направлены на поиск и обнаружение уже развитых дефектов, к примеру трещин. В результате контроля могут оставаться невыявленными опасные зоны, провоцирующие в процессе эксплуатации возникновение и развитие дефектов вплоть до критических размеров, что создает предпосылки к аварийным ситуациям.

Известно, что основные места разрушения металлических конструкций – зоны с высокой концентрацией напряжений (КН). Поэтому при обследовании желательно использовать метод, который бы позволял не только находить такие опасные зоны на ранней стадии (предразрушения), но и проводить 100%-ный контроль основного металла и сварных швов.

К такому методу можно отнести феррозондовый метод контроля. В соответствии с ГОСТ 21104–75 «Контроль неразрушающий. Феррозондовый метод» и ГОСТ 24450–80 «Контроль неразрушающий магнитный. Термины и определения», феррозондовый метод неразрушающего контроля основан на выявлении феррозондовым преобразователем магнитного поля рассеяния дефекта в намагниченных изделиях и преобразовании его в электрический сигнал. Феррозондовый дефектоскоп – это магнитный дефектоскоп, использующий в качестве чувствительных

элементов феррозондовые преобразователи. Феррозондовый преобразователь – ферромодуляционный преобразователь с пермаллоевыми сердечниками. Магнитное поле рассеяния дефекта – это локальное магнитное поле, возникающее в зоне дефекта вследствие магнитной поляризации его границ.

Чувствительность феррозондового метода контроля определяется магнитными характеристиками материала контролируемого изделия, его формой и размерами, способом контроля и видом намагничивания, чувствительностью применяемого преобразователя и электронной аппаратуры, а также магнитным полем рассеяния дефекта. Следует отметить, что метод позволяет контролировать изделия таких размеров и форм, у которых отношение их длины к наибольшему размеру в поперечном направлении и их магнитные свойства дают возможность намагничивания до степени, достаточной для создания магнитного поля рассеяния дефекта, обнаруживаемого с помощью преобразователя, что уменьшает возможности метода.

Феррозондовый метод контроля в зависимости от магнитных свойств материала, размеров и формы контролируемого изделия предусматривает два способа контроля: способ приложенного магнитного поля и способ остаточной намагниченности.

Способ приложенного магнитного поля заключается в намагничивании изделия и одновременной регистрации напряженности магнитных полей рассеяния дефектов преобразователем в присутствии намагничивающего поля. Способ остаточной намагниченности заключается в намагничивании изделия и регистрации напряженности магнитных полей рассеяния дефектов преобразователем после снятия намагничивающего поля.

При феррозондовом методе контроля применяют три вида намагничивания: циркулярное, продольное (полюсное) и поперечное (полюсное). При контроле крупногабаритных и сложной формы изделий применяют только локальное намагничивание.

К основным недостаткам феррозондового метода следует отнести необходимость подготовки изделия к контролю и проведение предварительного намагничивания и последующего размагничивания контролируемой поверхности, а для крупногабаритных изделий и изделий сложной формы – проведение только локального намагничивания зон контроля, что существенно снижает производительность контроля и не позволяет проводить сплошное магнитное сканирование. Учитывая, что сварные МК имеют значительные габаритные размеры и характеризуются разнообразностью и сложностью форм, а также требуют проведения сплошного магнитного сканирования элементов конструкций, использование феррозондового метода контроля с активным намагничиванием ввиду перечисленных недостатков во многих случаях является нецелесообразным.

Поэтому в настоящей работе рассматривались потенциальная возможность и целесообразность применения феррозондового метода контроля (в пассивном варианте) с целью контроля технического состояния МК в процессе их изготовления и эксплуатации, что требует разработки новых методик и способов контроля.

Принцип использования феррозондового метода в пассивном варианте в определенных рамках был реализован коллективом авторов под руководством А. А. Дубова в методе магнитной памяти металла (МПМ) [32, 42, 44, 45, 46, 47, 48], при котором намагничивание изделия осуществляется слабым магнитным полем Земли (область Рэлея). Недостатком разработанных методик НК и оценки НДС металла с использованием метода МПМ является отсутствие учета магнитной и механической предыстории металла, тогда как реальные МК в процессе изготовления, транспортировки, монтажа и эксплуатации могут подвергаться как магнитным, так и механическим воздействиям, что может существенно сказаться на результатах магнитных измере-

ний. Кроме того, недостатком применяемых методик контроля по остаточной намагниченности является то, что они предусматривают выявление зон КН по максимальной величине напряженности магнитного поля рассеяния  $H_p$  или по максимальной величине градиента магнитного поля рассеяния  $K_{ин}$ , которые, по мнению авторов, отвечают максимальным величинам внутренних напряжений. Однако такая оценка представляет собой частный случай и справедлива лишь при рассмотрении зон КН, находящихся в пластической области деформирования (где внутренние напряжения превышают предел текучести материала). Кроме того, что весьма важно для оценки степени опасности зоны КН, предлагаемые методики не позволяют оценить, какому НДС (упругому или пластическому) отвечает максимальная величина внутренних напряжений в рассматриваемой зоне КН на поверхности изделия. В действительности, в соответствии с работой [91], в процессе пассивного феррозондового контроля возможны три характерных случая:

- магнитный параметр  $H_p$  (или градиент магнитного поля рассеяния  $K_{ин}$ ) в упругой и пластической областях одинаковы;
- значение магнитного параметра  $H_p$  (или градиента  $K_{ин}$ ) в упругой области больше, чем в пластической;
- значение магнитного параметра  $H_p$  (или градиента магнитного поля рассеяния  $K_{ин}$ ) в упругой области меньше, чем в пластической.

Из этого следует, что максимальную величину внутренних напряжений и степень опасности зон концентрации с максимальными напряжениями нельзя достоверно определить по максимальным величинам  $H_p$  и  $K_{ин}$ , т. е. по максимальным значениям остаточной намагниченности объекта контроля.

Принадлежность выявленных локальных зон КН к упругой или пластической областям деформирования можно определить только в процессе нагружения (разгружения) конструкции

(элемента конструкции) по увеличению или уменьшению величины напряженности магнитного поля рассеяния  $H_p$ , а степень опасности зон КН (максимальную величину действующих внутренних напряжений) – по максимальной величине приращения  $H_p$  (по модулю) в этих зонах [88, 89].

К преимуществам пассивного феррозондового метода можно отнести следующие:

- отсутствие необходимости в намагничивании (подмагничивании) и размагничивании зоны контроля;
- отсутствие необходимости в специальной подготовке поверхности контроля (зачистка, снятие изоляционного покрытия);
- высокая скорость сканирования;
- возможность проведения сплошного неразрушающего контроля, в том числе и в труднодоступных местах;
- высокая чувствительность к структурным изменениям и механическим напряжениям;
- возможность практического применения для определения зон концентрации напряжений и оценки степени их опасности;
- возможность практического применения для косвенного определения действующих внутренних напряжений в элементах и сварных соединениях МК;
- возможность проведения постоянного или периодического магнитного мониторинга.

Проведенный анализ неразрушающих методов определения действующих внутренних напряжений показал, что они имеют ряд особенностей. Так, на результатах измерения напряжений магнитными методами сказывается магнитная и механическая предыстория образца, когда внешними магнитными полями и приложенными нагрузками создается магнитная текстура. Однако в целом в ряде анализируемых работ показано, что остаточная намагниченность (магнитное поле рассеяния) является весьма перспективным параметром для контроля внутренних напряжений.

## Глава 5

# ВЫБОР МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ

В последние годы в связи с длительной эксплуатацией оборудования и строительных конструкций, отработавших нормативные сроки эксплуатации, возникает проблема обеспечения их дальнейшей безопасной работы. Особенно остро это проявляется в связи со следующими особенностями настоящего периода [27, 54]:

- переходом на широкую эксплуатацию объектов по техническому состоянию;
- дальнейшим продлением их сроков службы на основе прогнозирования остаточного ресурса;
- увеличением интенсивности эксплуатации техники;
- значительным ростом тепловых и механических нагрузок на конструкции и т. д.

Для предотвращения аварий и их возможных тяжелых последствий в последнее время предъявляются повышенные требования к проведению технического диагностирования в рамках экспертизы промышленной безопасности опасных производственных объектов [78].

В общем случае техническое диагностирование должно включать в себя комплекс работ по оценке ресурса оборудования и конструкций:

- анализ технической документации;
- натурное исследование, включающее: визуально-оптический и измерительный контроль, выявление отклонений

геометрических размеров и взаимного расположения деталей и узлов от проектных, толщинометрию элементов конструкции, замеры твердости металлов переносным твердомером, НК сварных соединений и потенциально опасных участков;

- лабораторные исследования физико-механических свойств, химсостава, структуры металла контрольных вырезов;

- оценка фактической нагруженности элементов конструкции оборудования экспериментальными (тензометрия и т. п.) и расчетными методами;

- расчет НДС элементов конструкции;

- расчет усталостной прочности;

- выяснение причин возникновения дефектов и повреждений, оценка их влияния на работоспособность оборудования;

- разработка комплекса мероприятий, увеличивающих остаточный ресурс;

- разработка предложений по изменению системы технического обслуживания и планово-предупредительного ремонта в период дальнейшей эксплуатации;

- оценка остаточного ресурса оборудования, оформление результатов выполненных исследований и расчетов;

- составление заключения о возможностях и условиях безопасной эксплуатации оборудования.

В свою очередь, современная техническая диагностика немислима без применения методов разрушающего и неразрушающего контроля, призванных проверять следующие основные параметры [82]:

- прочностные характеристики (несущая способность конструкций, прочность бетона, жесткость конструкций, твердость и т. д.);

- параметры надежности, долговечности (трещиностойкость, морозостойкость, сопротивление усталости);

- физико-механические и химические характеристики (химический состав металлов и сплавов, предел текучести и проч-

ности, ударная вязкость, плотность, влажность, пористость материалов);

- толщина антикоррозийных покрытий;
- дефекты сварных соединений (трещины, непровары, свищи, прожоги, незаваренные кратеры и пр.), их допустимые размеры, количество и расположение;
- положение арматурных и закладных деталей в железобетонных конструкциях, размеры и толщину защитного слоя бетона.

Несмотря на ряд ограничений (несовершенство применяемой аппаратуры, методов и методик исследования), сфера использования методов и средств контроля расширяется, а требования к достоверности, чувствительности и в целом к эффективности разрушающего и неразрушающего контроля неуклонно возрастают.

В то же время традиционные методы изучения прочностных свойств, связанные с разрушением образцов материалов или отдельных элементов конструкций, зачастую не позволяют получить объективную оценку их состояния. Особенно это характерно для тех объектов, вывод из эксплуатации которых затруднен вследствие непрерывности технологического цикла. Кроме того, разрушающие методы не способны обеспечить сплошной контроль качества оборудования и конструкций, что предписывается нормативно-технической документацией для ряда объектов. Поэтому широкое применение неразрушающих методов контроля качества при испытаниях, монтаже, эксплуатации и ремонте, а также для диагностики технического состояния опасных производственных объектов является не только обоснованным, но и позволяет существенно повысить их надежность и безопасность.

Неразрушающие методы контроля обладают такими неоспоримыми преимуществами, как:

- получение экспресс-информации;
- снижение материальных и временных затрат при диагностировании;



- проведение исследований в труднодоступных, а также опасных местах, где применение разрушающего контроля приведет к ослаблению конструкции.

В то же время решение задач по поддержанию высокой эксплуатационной надежности технических устройств, конструкций и сооружений требует не только совершенствования и более активного использования неразрушающих методов контроля, но и правильного их выбора.

Существующие методы контроля можно разделить на группы [82].

1. Методы контроля, выявляющие дефекты подготовки и сборки деталей под сварку, поверхностные дефекты и различные отклонения от заданных геометрических размеров сварных швов. К этой группе относятся:

- внешний осмотр и обмер подготовленных к сборке деталей;
- внешний осмотр и обмер собранных под сварку узлов и конструкций;
- визуально-измерительный контроль сварных швов;
- капиллярный метод контроля поверхностных дефектов;
- электромагнитный метод;
- магнитный метод (только для деталей из ферромагнитных материалов).

2. Методы контроля с частичным или полным разрушением сварных швов. К этой группе относятся:

- проверка качества методом засверловки;
- технологические пробы на излом, загиб, скручивание;
- механические испытания на растяжение, изгиб, срез, удар, знакопеременную нагрузку, измерение твердости;
- металлографические исследования макро и микроструктуры сварных соединений, включая и оценку количества феррита в сварных швах аустенитных сталей;
- проверка химического состава шва, основного и присадочного металла;

- проверка коррозионной стойкости сварного соединения.

3. Основные физические неразрушающие методы контроля сплошности сварных швов. К числу этих методов относятся:

- ультразвуковой метод контроля;
- радиационные методы контроля (рентгенография и гаммаграфия);
- магнитный метод (магнитная порошковая дефектоскопия, магнитографический);
- электромагнитный метод;
- акустико-эмиссионный метод (АЭ);
- метод магнитной памяти металла (МПМ).

4. Методы контроля сварных соединений, выполненных электроконтактной сваркой или прессовыми способами путем проверки параметров режима сварки, определяющих степень нагрева или автоматического регулирования и величину деформации при осадке.

5. Методы контроля герметичности сварных швов. К ним относятся:

- пневматические и гидравлические испытания трубопроводов, резервуаров, аппаратов и других аналогичных конструкций;
- проверка сплошности сварных швов с помощью вакуум-камер;
- проверка герметичности сварных швов конструкций и сооружений с помощью жидкостей или газов, обладающих малой вязкостью и способных проникать через малейшие несплошности (промазка швов керосином, применение гелиевых или галоидных течеискателей, проверка воздухом с примесью аммиака и т. д.).

Выбор методов и приборов НК для решения задач дефектоскопии, толщинометрии, структуроскопии и технической диагностики зависит от параметров контролируемого объекта и условий его обследования. Ни один из методов и приборов не является универсальным и не может удовлетворить в полном объеме требованиям практики.

Поэтому при выборе методов контроля необходимо учитывать следующие факторы:

- вид дефекта и его расположение;
- условия работы конструкции;
- свойства материала;
- чистота обработки контролируемой поверхности;
- влияние покрытия контролируемой поверхности;
- зоны контроля;
- условия контроля и наличие подходов к объекту контроля;
- форма и размеры изделия;
- возможности методов НК.

## **5.1. Факторы, влияющие на выбор методов контроля**

*Вид дефекта и его расположение.* Характер подлежащих выявлению дефектов – очень важный фактор при выборе метода контроля. В зависимости от происхождения дефекты различаются формой, размерами и средой, заполняющей их полости. Для трещин характерна протяженная форма с различным раскрытием и глубиной. Трещины имеют резкие очертания, а неметаллические включения, поры, закаты, заковы часто имеют округлую форму. Дефекты могут находиться как на поверхности, так и внутри изделия.

Для обнаружения дефектов на поверхности изделия, например поверхностных трещин с малой шириной раскрытия (0,5...5 мкм) на деталях из ферромагнитных материалов, наиболее эффективным является магнитный, а из немагнитных материалов – электромагнитный или капиллярный методы. Визуально-оптический контроль выявляет только поверхностные дефекты.

Капиллярные методы контроля могут выявлять только дефекты, выходящие на поверхность, а магнитный и электромаг-

нитный – также и некоторые подповерхностные дефекты, причем магнитный метод применим только к ферромагнитным, а электромагнитный и УЗК – к любым металлам.

Для обнаружения внутренних дефектов применяют радиационный контроль, ультразвуковой и акустико-эмиссионный. Первый метод лучше выявляет объемные дефекты (раковины, поры, включения неметаллов), поэтому его применяют преимущественно для контроля литья и сварных соединений, а второй – дефекты с малым раскрытием (трещины, непровары, расслоения, флокены). Для деформированного металла УЗК является единственным методом обнаружения внутренних дефектов. Акустико-эмиссионный метод лучше выявляет дефекты с малым раскрытием [116], и поэтому он сопоставим с УЗК.

*Условия работы конструкции.* Условия работы конструкции включают в себя характер внешних нагрузок (статические, динамические, вибрационные), возможные перегрузки, внешнюю среду, в которой работает изделие, возможность эрозионно-коррозионного поражения, температурные условия.

Многие ответственные конструкции испытывают значительные знакопеременные нагрузки, работают в агрессивной среде, при высоких температурах и в запыленном воздухе (например, при работе двигателей на земле). Ряд деталей может подвергаться эрозионно-коррозионному воздействию. Многие конструктивные или производственные дефекты могут явиться очагами усталостного разрушения, особенно при работе изделий в условиях сложнапряженного состояния или воздействия агрессивных сред, ускоряющих разрушение.

Поэтому учет условий работы деталей позволяет определить критические места конструкций и обратить на них особое внимание при выборе метода и проведения контроля.

*Свойства материала.* Физические свойства материала изделия в значительной степени определяют выбор метода неразрушающего контроля:

- для применения УЗ-метода на выявление трещин выбирают однородные материалы с мелкозернистой структурой, минимально рассеивающей и поглощающей УЗ-волны при частоте колебаний от 1,25 до 10,0 МГц;

- для магнитного контроля наиболее приемлемы материалы с высокими и однородными ферромагнитными свойствами, без аустенитных сварных швов в зонах контроля, без карбидной полочатости, резких переходов от одной структуры к другой, различающихся магнитными свойствами;

- для электромагнитного метода наиболее пригодны ферромагнитные материалы с однородной электрической проводимостью (возможно ее плавное изменение до 10 % в пределах каждой зоны контроля);

- для цветной дефектоскопии выбирают непористые материалы, которые нерастворимы в дефектоскопических материалах и органических растворителях. Аналогичным образом поступают с каждым планируемым методом НК;

- при просвечивании ионизирующими излучениями ограничиваются лишь способностью материала поглощать данные излучения и толщиной материала.

*Чистота обработки контролируемой поверхности.* Возможность выполнения дефектоскопического контроля и его чувствительность зависят также от шероховатости поверхности деталей и узлов. Поэтому их шероховатость в зонах контроля регламентируют.

Для применения электромагнитного метода шероховатость поверхности должна быть  $R_z 80$  и менее, для большинства других методов – не более  $R_z 40$ .

При использовании УЗК конструкций обычно также оговаривают шероховатость внутренней (донной) поверхности: как правило, она должна быть не более  $R_z 80$ . Кроме того, на деталях и узлах целесообразно предусматривать в стороне зоны контроля

(не ближе 10 мм от зон, где возможно образование дефектов) хорошо обработанные контактные площадки для размещения УЗ пьезоэлектрических преобразователей.

Волнистость контактной поверхности (отношение стрелы прогиба к периоду волнистости) детали, проверяемой УЗ-методом, должна быть меньше 0,015...0,025 мкм [82].

Еще одним из главных условий проведения НК образования, находящегося в эксплуатации, является доступность к проверяемым узлам в конструкции объекта. Это обеспечивается путем использования съемных панелей, люков, смотровых окон и т. д., а также наличием необходимого рабочего пространства в зонах контроля. Так, для проведения УЗ, магнитного, электромагнитного, капиллярного контроля над поверхностью детали должно быть рабочее пространство высотой не менее 100 мм.

*Влияние покрытия контролируемой поверхности.* Не менее важным является обоснованный выбор метода НК в зависимости от толщины гальванических, химических и лакокрасочных покрытий. Их выбирают таким образом, чтобы было возможным выполнять контроль основного материала изделий без удаления покрытий. Так:

- для УЗК толщина лакокрасочного покрытия должна быть не более 0,03 мм, и покрытие не должно поглощать и рассеивать ультразвуковые волны;
- электромагнитного и акустического контроля толщина должна быть не более 0,5 мм;
- при магнитном контроле покрытие должно быть ферромагнитным и толщиной не более 0,03 мм при использовании остаточной намагниченности и не более 0,1 мм при контроле в приложенном поле;
- контроле капиллярными или другими методами, когда в соответствии с требованиями защитных свойств толщина покрытий выше указанных пределов, подбирают такие лакокрасочные

покрытия, которые легко смываются и легко восстанавливаются после контроля;

- капиллярном контроле не рекомендуется использовать гальванические покрытия из пластичных металлов (медь, серебро и т. д.), с относительным удлинением при нагружении, превышающим удлинение основного металла. При этом могут развиваться усталостные трещины со сближенными краями, не обнаруживаемые капиллярными методами [81]. Если по условиям работы такие покрытия заменить нельзя, то должны применяться другие методы контроля.

*Зоны контроля.* Контроль непосредственно на изделии подвергают отдельные зоны. Определение таких зон является важным фактором в выборе метода контроля, так как это облегчает разработку методики и обнаружение дефектов. Кроме того, для повышения надежности контроля необходимо не только определение, но и следующая подготовка контролируемых узлов и зон:

- в области магнитного и капиллярного контроля необходимо снятие усиления сварных швов. Этому контролю мешают центровочные отверстия, шлицы, конструкторско-технологические отверстия;

- УЗК поверхностными волнами не применим, если в проверяемой зоне имеются резкие переходы от одного сечения к другому (радиус галтели в месте перехода должен быть не менее  $2\lambda_{\text{пов}}$ , где  $\lambda_{\text{пов}}$  – длина поверхностной волны). Кроме того, в подлежащей УЗК зоне, как правило, не должно быть отверстий, заклепок, болтов и других отражателей УЗ-энергии. Контроль таких объектов в некоторых случаях возможен при условии применения специальной методики и искательных ультразвуковых головок;

- наличие узких ребер и пазов с острыми углами в сечении, галтелей малого радиуса и отверстий малого диаметра усложняют или даже делают невозможным электромагнитный, магнитный и УЗ-контроль;

- для электромагнитного контроля радиусы галтельных переходов должны быть не менее 2 мм, а для капиллярного и магнитопорошкового методов в зоне контроля не должно быть уступов с углом менее 90°, подрезов и наплывов металла. Ширина проточек, радиусы галтелей и отверстия в зоне капиллярного контроля должны быть не менее 3 мм.

Весьма важным фактором является обработка поверхности детали при изготовлении. Поверхностный слой не должен препятствовать проведению контроля и обнаружению усталостных, коррозионно-усталостных, термических и других трещин.

Перед магнитопорошковым контролем не рекомендуется подвергать поверхность обработке шариками или роликами, дробеструйной обработке и упрочнению электроискровым методом, так как возможно появление неравномерного наклепа поверхности. Это приводит к осаждению магнитного порошка в бездефектных зонах и снижает чувствительность метода.

Проведение на заключительных этапах изготовления детали перечисленных упрочняющих методов, а также химико-термической и поверхностной термической обработки может привести к образованию усталостных трещин со сжатой полостью или со сближенными «берегами», не обнаруживаемых капиллярными методами или подповерхностных усталостных трещин. Такие трещины появляются в прилегающих к поверхности слоях металла на границе сердцевины и упрочненного слоя, в местах резкого перехода от снижающих поверхностных напряжений к растягивающим, в зонах перехода от одной структуры к другой [70]. Они выходят на поверхность детали, когда достигают больших размеров, иногда непосредственно перед ее разрушением.

Следовательно, если детали должны обязательно подвергаться таким способам обработки, то для их контроля при эксплуатации и при ремонте должны назначаться некапиллярные методы – УЗ, электромагнитный и др., в лучшем случае – комплекс капиллярных и других методов.



*Условия контроля и наличие подходов к объекту контроля.* Контроль изделий может проводиться в лабораториях, цехах, строительного-монтажных площадках или непосредственно на эксплуатирующихся объектах.

При проведении контроля в труднодоступных местах требуются специальные устройства, различные датчики, полюсные наконечники, поворотные зеркала, осветители, манипуляторы и т. д., конструкция которых должна соответствовать условиям подхода. В некоторых случаях предусматривают технологические окна (лючки) или делают технологические разъемы.

Многие методы (ультразвуковой, магнитный, электромагнитный, капиллярный, керосиновая проба) применяются для контроля изделий при доступе с одной стороны. Радиационные методы требуют доступа с обеих сторон, при этом с одной стороны находится источник излучения, а с другой стороны – детектор.

*Форма и размеры изделия.* Форма и размеры изделий на выбор метода контроля влияют следующим образом. Например, ультразвуковой метод из-за трудности расшифровки результатов нельзя применять для контроля деталей сложной формы. Большинство методов можно применять для контроля изделий различной формы и размеров.

*Возможности методов НК.* Большое значение при выборе метода контроля имеет оценка его возможностей. Разрешающая способность методов контроля качества металлоконструкций приведена в табл. 13.

Визуальный контроль является одним из самых информативных методов контроля и поэтому широко применяется как при изготовлении различных узлов и конструкций, так и в процессе их эксплуатации [28].

Гамма- и рентгенографический контроль рекомендуется для обнаружения внутренних скрытых дефектов и дефектов закрытых деталей; обладает относительно низкой чувствительностью

к трещинам, имеет меньшую производительность и более высокую стоимость по сравнению с УЗ-методом.

Таблица 13

**Разрешающая способность методов контроля качества металлоконструкций**

Метод	Минимальные размеры обнаруживаемых дефектов, мм		
	Ширина раскрытия	Глубина	Протяженность
Визуально-оптический	0,005...0,01	–	0,1...0,3
Капиллярный (цветной)	0,001...0,002	0,01...0,03	0,1...0,3
Капиллярный (люминесцентный)	0,001...0,002	0,01...0,03	0,1...0,3
Магнитопорошковый	0,001...0,002	0,01...0,05	0,3...0,6
Токовихревой	0,0005...0,001	0,15...0,2	0,6...1,2
Ультразвуковой эхо-метод	0,001...0,03	0,1...0,3	–
Рентгенографический	–	1,5...3 % от толщины	–
Гаммаграфический	–	4...6 % от толщины	–

УЗК целесообразно применять для выявления внутренних (скрытых дефектов), а также поверхностных трещин, его можно использовать для контроля изделий из магнитных и немагнитных материалов, обладающих свойствами упругости. Кроме того, в таких случаях, как, например, при контроле сварных швов большой толщины, выполненных электрошлаковой сваркой, сварных соединений арматуры железобетонных конструкций, ультразвуковая дефектоскопия является единственно приемлемым методом контроля [25, 82].

Магнитографический метод контроля оправдывает себя при выявлении внутренних поверхностных и подповерхностных дефектов в виде трещин, волосовин, неметаллических включений.

Капиллярная дефектоскопия применяется для обнаружения поверхностных открытых трещин, пор и коррозионных поражений при контроле изделий из магнитных и немагнитных материалов.

Вакуумный контроль, керосино-меловую пробу, пневматические и гидравлические испытания используют для проверки сплошности сварных швов.

Характер выявления дефектов непосредственно предопределяет применение того или иного метода контроля.

В случае применения цветной дефектоскопии материал должен быть непористым и стойким к воздействию органических растворителей; при применении УЗК – мелкозернистым по структуре, однородным; магнитографического метода – ферромагнитным и однородным по магнитным свойствам.

Правильный выбор зон контроля облегчает разработку методики и обнаружение дефектов. В контролируемой зоне, например, при УЗ-методе не должно быть болтов, заклепок, отверстий и других отражателей ультразвуковых волн, резких переходов от одного сечения к другому (при проверке поверхностными волнами).

Учет условий работы изделий (статические, динамические и вибрационные нагрузки, отрицательные или высокие температуры, возможные перегрузки, агрессивная среда, запыленный воздух и т. д.) позволяет определить наиболее вероятные места образования дефектов или разрушения конструкций, а это, в свою очередь, облегчает правильный выбор метода контроля [23].

Основными критериями, которые характеризуют метод контроля, являются выявление наиболее опасных для данного изделия дефектов, производительность и стоимость контроля.

На современном этапе развития техники в целом ряде случаев не удается достигнуть одновременно оптимальных результатов

по всем указанным критериям. Тогда применяют комбинированный контроль, который состоит из сочетания нескольких методов. Наиболее действенным будет такое сочетание, которое обеспечивает достаточно высокое качество соединений при высокой производительности и минимальных затратах на выполнение контроля [26].

В зависимости от требований, обусловивших применение комбинированного контроля, выбирается сочетание методов. Например, при необходимости повысить производительность контроля, не ухудшая качества сварных соединений, можно применить УЗК в комбинации с гамма- или рентгеновскими методами.

УЗК подвергаются сварные швы на всей протяженности, а другой из двух методов применяется для контроля участков швов, где наиболее всего вероятно появление дефектов, или участков, сомнительных для качественного УЗК.

Для изделий из сталей, склонных к образованию трещин, целесообразно применять цветную или НК дефектоскопию в сочетании с радиографическим контролем, так как с помощью гамма- или рентгеновского метода трещины обнаружить трудно.

При НК и диагностике наиболее труднодоступных, опасных и ответственных участков трубопроводов (подземных, при переходе через водные и транспортные преграды) основной задачей является выявление активных, развивающихся дефектов в структуре материала. Обнаружение таких дефектов традиционными методами НК требует длительного времени и больших трудозатрат, а чаще всего практически невозможно. В связи с этим целесообразно применять «пассивный» метод, использующий энергию излучения конструкций, – метод АЭ. По результатам этого контроля рекомендуется проведение НК традиционными методами.

В случае необходимости полного обследования еще одним «пассивным» методом, позволяющим проводить 100%-ный контроль оборудования и металлических конструкций без предварительной подготовки поверхности, обнаруживать не только

развитые, но и развивающиеся дефекты, определять зоны концентрации напряжений на ранней стадии, является метод МПМ [43]. Затем с использованием, например, УЗ-дефектоскопии в опасных зонах определяется наличие конкретного дефекта и его допустимость.

## 5.2. Чувствительность методов неразрушающего контроля

При неразрушающем контроле каждый элемент, независимо от его вида или типа, может быть определен конкретным характеристическим размером. При радиографии и электромагнитных методах контроля – это отношение глубины дефекта к толщине изделия (безразмерная величина); при ультразвуковом контроле – эквивалентная площадь дефекта (мм<sup>2</sup>) или условный коэффициент выявляемости дефекта (безразмерная величина).

Для изделий одного типа характеристические размеры дефектов  $S_{ki}$  изменяются в определенном интервале и обусловлены большим числом случайных факторов. Если их значения подчиняются нормальному закону с плотностью вероятности

$$P_{ki}(S) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{ki}} e^{-\frac{(S_{ki}-\hat{S}_{ki})^2}{2\sigma_{ki}^2}} \quad (29)$$

(здесь  $\hat{S}_{ki}$  – центр рассеивания – среднее значение характеристического размера дефекта типа  $k$  и вида  $i$ ;  $\sigma_{ki}$  – среднее квадратическое отклонение характеристического размера дефекта типа  $k$  и вида  $i$ ), то вероятность  $P_{ki}(S_{ki} > S_0)$  того, что значения характеристического размера дефектов  $S_{ki}$  превышают заданное  $S_0$ , составит:

$$P_{ki}(S_{ki} > S_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{ki}} \int_{S_0}^{\infty} e^{-\frac{(S_{ki}-\hat{S}_{ki})^2}{2\sigma_{ki}^2}} dS_{ki} \quad (30)$$

Величина  $\sigma_{ki}$  характеризует различие в выявляемости однотипных и равновеликих дефектов. При неразрушающем контроле в зависимости от условий контроля и размеров дефект может быть выявлен или не выявлен. Минимальное значение характеристического размера дефекта изделия, фиксируемого при контроле с вероятностью более 0,99, определяет предельную чувствительность прибора НК.

При радиографическом методе чувствительность определяется по изображению на снимке проволочного, канавочного или пластинчатого эталона с помощью формул и выражают в миллиметрах или процентах.

Чувствительность того или иного метода определяется наименьшими размерами выявленных дефектов:

- поверхностных – шириной раскрытия у выхода на поверхность, протяженностью в глубь изделия и по ее поверхности;
- глубинных – размерами дефекта с указанием глубины залегания.

Она зависит от особенностей метода неразрушающего контроля, условий контроля, применяемой аппаратуры и дефектоскопических материалов, чистоты поверхности изделия, его материала, доступности к проверяемым узлам объекта и других факторов [19].

Так, чувствительность магнитных методов контроля зависит от направления магнитного потока и глубины залегания дефектов. Поэтому способ намагничивания контролируемого изделия является одним из важнейших факторов, определяющих чувствительность контроля. Основной задачей намагничивания является обеспечение выявления имеющихся в сварном соединении дефектов, независимо от их ориентации к продольной оси шва.

Исходя из этого, существует несколько способов намагничивания: для выявления дефектов, расположенных поперек шва,

применяют продольное, а расположенных вдоль шва – поперечное намагничивание.

### **5.3. Разрешающая способность аппаратуры**

Разрешающая способность аппаратуры определяется наименьшим расстоянием между двумя соседними минимальными выявляемыми дефектами, регистрация которых возможна. Она измеряется в единицах длины или числом линий на 1 мм. На оптические приборы и радиационные дефектоскопы предусматривается ТУ, для УЗ и токовихревых дефектоскопов может оговариваться при необходимости, для магнитных – не указывается.

### **5.4. Достоверность результатов контроля**

Достоверность результатов дефектоскопического контроля определяется вероятностью пропуска изделий с явными дефектами или необоснованной браковкой годных изделий. При проверке дефектоскопа на достоверность результатов контроля ответственной продукции обращают особое внимание на случаи обнаружения дефектов.

Под надежностью понимается свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующее способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования. Надежность приборов повышается в результате систематических проверок основных его параметров, а в случае автоматизированного контроля – при введении блоков автоконтроля [58].

Надежность работы оператора определяется вероятностью точного выполнения возложенных на него функций контроля изделия в заданных условиях. Этому способствует введение в алгоритм работы операций самоконтроля и введение в систему контроля изделий инспекционного контроля.

За показатель надежности комплекса «оператор – прибор» обычно принимается вероятность осуществления возложенных на комплексе функций контроля в заданных условиях контроля. Плохое состояние приборов отрицательно влияет на работоспособность оператора, а низкая надежность работы оператора ускоряет износ приборов. Вследствие этого показатель надежности комплекса не может являться простым произведением показателей надежности оператора и прибора. Возможность образования дефектов с учетом их потенциальной опасности определяет надежность технологического процесса получения изделия. Чем она ниже, тем выше должна быть надежность применяемых средств контроля.

При этом вероятность образования дефектов и их выявления отдельными методами, обуславливающими выбор эффективных средств контроля качества изделий, могут быть установлены только на основе обработки статистических данных контроля.

### **5.5. Общие требования к контролерам-дефектоскопистам**

Высокая эффективность НК обеспечивается не только правильно выбранными методами, современными средствами контроля, методиками и технологией контроля, но и высокой профессиональной подготовкой дефектоскопистов.



Так как НК изделий в настоящее время большей частью является ручным, то роль дефектоскопистов неизмеримо возрастает. В их функции входит настройка дефектоскопов, тщательное выполнение операций контроля, оценка показаний и принятие решения по обнаруженным дефектам. Для снижения влияния субъективных факторов к дефектоскопистам предъявляются следующие требования:

- обязательное обучение и аттестация с учетом специализации по методам и средствам в объеме типовой программы;
- знание опасных мест в объектах контроля; условий нагружения ответственных деталей; свойств материалов контролируемых объектов; видов обработки деталей; характера и размеров дефектов, подлежащих выявлению; требований нормативно-технической, отраслевой специализированной литературы;
- наличие практического опыта по настройке, проверке и применению дефектоскопов, умение распознавать и определять ложные сигналы;
- ответственность и уверенность в результатах контроля, способность самостоятельно повышать знания, а также умение накапливать опыт, анализировать, сравнивать, обобщать.

## **5.6. Техника безопасности при контроле качества**

Требования по технике безопасности при применении различных методов значительно отличаются. Ультразвуковой, магнитный и токовихревой контроль не требуют специальных мер защиты. При капиллярном контроле необходима защита от паров жидкостей и органических растворителей, а также ультрафиолетового облучения. При радиационном контроле требуется защита от ионизирующих излучений и от вредных для организма человека газов озона и окислов азота.

## Глава 6

# ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ

Актуальность проблемы технического диагностирования различных конструкций и оборудования с каждым годом становится все очевидней. Более того, для опасных производственных объектов наблюдается тенденция перехода от периодического контроля к постоянному.

Возможность применения того или иного вида диагностирования в значительной степени зависит от способа обеспечения необходимого уровня надежности, что во многом определяется видом эксплуатации объекта. Различают следующие виды эксплуатации [13]:

- до отказа;
- по назначенному ресурсу;
- техническому состоянию.

Наиболее экономически выгодным видом эксплуатации особо опасных производственных объектов следует считать эксплуатацию по техническому состоянию, в которой составной частью является система диагностического контроля непрерывного или периодического действия.

Следует отметить, что для особо опасных объектов в последнее время все чаще применяется непрерывный диагностический контроль (мониторинг). *Мониторинг* – система наблюдений за состоянием объекта для своевременного выявления изменений в объекте, их оценки, предупреждения и устранения последствий негативных процессов [39].

Его применение целесообразно при следующих обстоятельствах:

- когда затруднен или отсутствует доступ к объекту;
- в случае быстрого развития эксплуатационных дефектов и вследствие этого резкого сокращения срока службы объекта до выработки им расчетного (нормативного) ресурса;
- последствия разрушения объекта могут привести к значительным материальным и человеческим потерям, экологическим катастрофам.

Доступность к месту контроля сильно влияет на состав и вид системы технического диагностирования. Если доступ отсутствует, то периодическое диагностирование традиционными средствами НК практически невозможно, в то же время применение более прочных конструкций для предотвращения дефектов в процессе эксплуатации бывает экономически невыгодно. Следовательно, в условиях, когда скорость развития дефекта высока, диагностический мониторинг является наиболее эффективным способом обеспечения необходимой эксплуатационной надежности конструкции.

При отсутствии доступа к месту контроля и небольших скоростях развития дефектов мониторинг также имеет преимущество перед другими методами НК, так как возможен быстрый нерасчетный рост не выявленных ранее дефектов.

Система диагностического мониторинга должна включать в себя [39]:

- виды нагрузок и факторы, являющиеся причинами возникновения дефектов в конструкциях при их эксплуатации;
- виды эксплуатационных дефектов, их расположение, характер развития;
- методы неразрушающего контроля, их возможные сочетания с целью получения более надежной и доступной информации о дефекте;

- различные способы решения задач по обнаружению и слежению за ростом дефектов и их регистрации;
- критерии оценки опасности обнаруженных дефектов и рекомендации по дальнейшей эксплуатации.

На выбор методов неразрушающего контроля при мониторинге существенное влияние оказывают как виды действующих на конструкцию нагрузок, так и факторы, влияющие на поврежденность изделия.

Основную роль оказывают статические нагрузки, которые характеризуют напряженно-деформированное состояние объекта и в некоторых случаях могут привести к его разрушению. Это возможно при наличии в конструкции значительных производственных дефектов, а также при воздействии эксплуатационных нагрузок. Кроме того, при периодическом изменении статических нагрузок могут образовываться локальные участки с повышенным уровнем напряжений, которые обычно группируются в зоне геометрических концентраторов и других нерегулярностей.

Дополнительными факторами, способствующими возникновению и развитию дефектов, могут являться внешние случайные нагрузки, которые способны изменить проектное положение объекта, а также физико-химические свойства среды, приводящей к коррозии.

При диагностическом мониторинге контролируются такие основные виды эксплуатационных повреждений, как:

- трещины в сварных швах и в основном металле;
- коррозия металлов;
- износ стенок изделия;
- изменение пространственного положения конструкции в процессе эксплуатации.

Основными причинами появления трещин при эксплуатации изделия являются повышенные напряжения, возникающие в тех местах, где имеются:

- металлургические и производственные дефекты;
- зоны сосредоточенных нагрузок, геометрические концентраторы напряжений;
- повреждения механического характера, полученные в процессе монтажа или эксплуатации.

Следует отметить, что места образования трещин в зоне сосредоточения нагрузок и геометрических концентраторов напряжений зачастую известны, и, кроме того, их существование можно установить из опыта эксплуатации объекта.

Для конструкций, работающих при взаимодействии с агрессивными средами, особое значение принимает коррозия металла. Коррозию характеризует неопределенность местоположения и момент возникновения ее очага. Параметрами очага коррозии являются: длина, ширина, глубина, расстояние от сварных швов, площадь и расстояние между соседними очагами.

Износ стенок трубопроводов, сосудов обычно возникает вследствие эрозионных процессов, он возникает на вогнутой стороне отвода трубопроводов технологической обвязки компрессорной станции, при этом средняя скорость износа обычно известна из опыта эксплуатации. Параметрами износа являются толщина стенки изделия и площадь эрозионного пятна.

В процессе эксплуатации конструкции под действием дополнительных внешних нагрузок, например проседание грунта, возможно изменение проектного положения конструкции. Измеряемые параметры дефекта:

- отклонение конструкции, стенки резервуара, сосуда, опоры трубопровода от вертикали;
- отклонение оси трубопровода от проектной в вертикальном и горизонтальном направлениях.

Выбор методов НК, обеспечивающий своевременное обнаружение при диагностическом мониторинге, зависит от вида эксплуатационных дефектов, свойственных данному объекту, и от особенностей их расположения в исследуемой конструкции.

Одним из способов эксплуатационной оценки напряженно-деформированного состояния конструкции является тензометрия, которая в системе мониторинга выполняет две задачи:

- непрерывное измерение напряжений в конструкции;
- обеспечение автоматического процесса идентификации вида дефекта по данным АЭ-контроля и других методов, используемых в системе мониторинга.

Аппаратура на основе ультразвукового метода может входить в состав диагностической системы как элемент мониторинга локальных зон конструкции с известным видом дефекта и точным указанием его местоположения.

Ультразвуковая толщинометрия используется в системе диагностического контроля для обслуживания локальных участков конструкции с известным расположением участка с интенсивным износом стенок в процессе эксплуатации.

В настоящее время в связи с кардинальными усовершенствованиями акустико-эмиссионной аппаратуры благодаря использованию цифровой обработки сигналов появилась возможность ее применения для непрерывного контроля (мониторинга) различных конструкций. АЭ-контроль является основным методом контроля, который применяется в системах диагностического мониторинга. При его применении одновременно регистрируются параметры сигналов АЭ и параметры нагрузок, действующих на конструкцию в процессе эксплуатации.

Этот метод открывает новые возможности при приведении технического диагностирования разных конструкций, обеспечивая 100%-ный контроль объекта, и позволяет при этом обнаруживать дефекты, способные развиваться в процессе эксплуатации.

Так, например, АЭ-система LAM (Lokal Area Monitor) имеет восемь АЭ-каналов и позволяет контролировать до 800 м трубопровода. Она управляет и передает полученные данные в район нахождения оператора с помощью стандартной телеметрической

линии или по телефону. Эта система одновременно позволяет иметь большое количество датчиков для измерения температуры, ударных воздействий и получения другой информации, необходимой для комплексной оценки состояния объекта. Применение АЭ-системы для мониторинга ответственных конструкций, например подводных переходов газопроводов, может быть очень эффективным [57].

Более широкими возможностями обладает цифровая акустико-эмиссионная система A-Line 32D (DDM) компании «Интерюнис» (Москва), которая разработана с использованием передовых технологий в областях макроэлектроники и цифровой передачи данных. Эта многоканальная портативная система может контролировать объект суммарной длиной до 5 км одновременно [97].

Используемые при мониторинге датчики больших линейных перемещений индуктивного типа позволяют регистрировать изменения проектного положения конструкции, возникающие под действием дополнительных нагрузок. Появляющиеся перемещения приводят к перераспределению внутренних напряжений в конструкции и образованию потенциально опасных мест.

Таким образом, имея данные о виде нагрузок, действующих на изделие при эксплуатации, типах дефектов и их местоположения, о возможностях, преимуществах и недостатках различных методов НК, можно разработать систему мониторинга, отвечающую поставленным требованиям. При этом необходимо иметь в виду то, что основой универсальной системы диагностического мониторинга является акустико-эмиссионный метод контроля.

Следует отметить, что разработка и использование системы диагностического мониторинга требуют тщательного изучения характера нагружения конструкции в процессе эксплуатации, видов эксплуатационных дефектов, обусловленных этими нагрузками, предполагаемого местоположения дефектов и харак-

терных условий. С учетом перечисленных факторов возможны оптимальный выбор аппаратных средств, наиболее полно отвечающих конкретным техническим требованиям, и, наконец, создание системы критериев, позволяющих формировать решения о возможности дальнейшей эксплуатации объекта в реальном масштабе времени [39].



## Глава 7

# КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

### 7.1. Контроль качества сварных соединений арматурных конструкций

Контроль качества сварки арматурных конструкций проводится в три этапа:

- предварительный контроль до сварки;
- контроль в процессе сварки (текущий контроль);
- контроль качества сварного соединения.

В процессе предварительного контроля осуществляется проверка:

- соответствия основных и сварочных материалов требованиям ГОСТа и технических условий;
- качества подготовки торцов стержней арматуры под сварку и сборки стыков;
- исправности и правильности настройки аппаратуры на заданный режим сварки.

Ответственность за качество сборки стыков и сварных соединений возлагается на руководителя сварочных работ. Он осуществляет контроль на всех стадиях подготовки и сварки стыков.

Контроль в процессе сварки заключается в наблюдении за сохранением постоянных значений заданных параметров режима

сварки, а также за соблюдением техники и технологии сварки стыков стержней арматуры.

Этот контроль включает визуальный осмотр, испытание образцов на механическую прочность, просвечивание гамма-лучами или ультразвуковую дефектоскопию.

Внешний или визуальный осмотр выполненных сварных стыков является первичным и наиболее доступным способом контроля качества. Этим способом должны проверяться все сварные стыки.

Визуальный осмотр металла шва в сварных стыках арматуры с целью выявления наружных дефектов производится с помощью лупы десятикратного увеличения. При визуальном осмотре качество сварного соединения оценивается по форме шва и наличию внешних дефектов. Металл шва не должен иметь наплывов, сужений и перерывов, трещин, скоплений, а также цепочек пор и шлаковых включений. Подрезы основного металла не допускаются.

Допускаются отдельно расположенные поры и шлаковые включения на поверхности швов.

Переход от наплавленного металла к основному в сварных стыках арматуры должен быть плавным. Все кратеры должны быть заварены.

Механические испытания и неразрушающий контроль качества сварных соединений выпусков арматуры должны выполняться в следующем объеме:

- в монтажном стыке колонны с фундаментом производят выборочную вырезку образцов для механических испытаний в объеме от одного до трех стыков (из наиболее сомнительных по виду). Далее проводят ультразвуковую дефектоскопию или гамма-просвечивание одного стыка от партии, выполненной каждым сварщиком (стык для контроля выбирается дефектоскопистом в местах, труднодоступных для выполнения сварки);

- в монтажном стыке приторцованных колонн производится гамма-просвечивание или ультразвуковая дефектоскопия одного стыка от партии, выполненной каждым сварщиком;
- в узлах примыкания ригеля с колонной выполняют выборочное гамма-просвечивание двух стыков арматуры из наиболее сомнительных по внешнему виду;
- в узлах примыкания распорки с колонной подвергают выборочному гамма-просвечиванию один сварной стык;
- качество сварных стыков арматуры вспомогательных сооружений проверяют гамма-просвечиванием или УЗК в объеме 2 % от общего количества сварных стыков.

Контрольные образцы сварных соединений арматуры для механических испытаний должны вырезаться из рабочих конструкций или изготавливаться параллельно с основными соединениями механизированными способами сварки (при тех же режимах сварки и из тех же материалов).

Из готовой продукции вырезают контрольные образцы соединений, выполненных ручной электродуговой (обычной и ванной) и электрошлаковой сваркой.

Длина контрольных образцов должна быть такой, чтобы обеспечивать расстояние между захватами разрывной машины не менее 10 диаметров стержня. Сварной шов должен располагаться посередине образца.

Вырезанные контрольные образцы заменяют вставками. В этом случае производится сварка двух стыков.

Стыковые соединения стержней, выполненных ванной, ванно-шовной или электрошлаковой сваркой, а также тавровые соединения закладных деталей могут быть проверены как с помощью ультразвуковой дефектоскопии, так и радиографии.

Сварные стыки арматуры бракуются, если в них при контроле выявляются трещины любых размеров и направлений.

В сварных соединениях, доступных для сварки с двух сторон, допускаются непровары глубиной до 5 % толщины металла, но не более 2 мм.

В соединениях, доступных для сварки с одной стороны, без применения подкладок, допускаются:

- непровары глубиной до 15 % от толщины металла, но не более 3 мм;
- цепочка шлаковых включений при суммарной их длине не более 200 мм на 1 м шва;
- шлаковые включения или одиночные и групповые поры не более 5 штук на 1 см длины.

## **7.2. Контроль качества строительных железобетонных конструкций**

Основными строительными материалами, применяемыми при возведении промышленных и гражданских зданий, мостов, тоннелей, гидротехнических и других сооружений, остаются бетон и железобетон. В технически развитых странах на одного жителя приходится в год более 1 м<sup>3</sup> бетонных и железобетонных изделий. В России этот показатель втрое ниже, но все же объем применения железобетонных конструкций очень высок [52]. Это требует разработки надежных способов и средств диагностического контроля, которые бы позволили дать объективную оценку состояния железобетонных конструкций и оценить их остаточный ресурс.

Условия затвердевания бетонной композиционной смеси, а также ее меняющийся состав, состоящий из различных видов вяжущих материалов, наполнителей, специальных добавок и воды, вносят существенные трудности в проведение контроля. Физико-механические свойства строительных изделий могут

определяться как на образцах, вырезанных из изделий, так и на образцах, изготовленных по той же технологии, что и контролируемая партия. Высокая надежность в первом случае может обеспечиваться только при большой выборке объектов контроля и стабильном процессе их изготовления. Однако такой контроль в современных условиях маловероятен. Объективность контроля во втором случае также стоит под вопросом вследствие различных условий изготовления образцов-свидетелей и крупногабаритных конструкций. Для эксплуатируемых конструкций затруднительно смоделировать необходимые условия изготовления исследуемых образцов, а использовать разрушающие методы контроля зачастую не представляется возможным.

Поэтому повышение достоверности и надежности контроля может быть достигнуто за счет привлечения неразрушающих методов, обеспечивающих высокую производительность контроля непосредственно на объектах. Такая постановка вопроса особенно актуальна при обследовании зданий и сооружений, когда не известны характеристики бетона и арматуры. Кроме того, возрастающие объемы строительства многоэтажных зданий из монолитного железобетона также требуют использования неразрушающего контроля при проведении мониторинга [60].

Надежность результатов НК строительных конструкций из бетона и железобетона в значительной степени зависит от возможностей применяемой аппаратуры и методик исследования. При определении прочности бетона можно использовать различные методы: отрыв со скалыванием, ударно-импульсный и ультразвуковой, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки.

Наиболее точным является метод отрыва со скалыванием, который применяется в особо ответственных случаях при обследовании железобетонных конструкций и сооружений. Этот метод позволяет контролировать прочность бетона на глубине до

50 мм, т. е. на глубине заделки анкера. Недостатком являются высокая трудоемкость и невозможность использования в густоармированных участках исследуемого объекта, что можно компенсировать методом скалывания ребра, обеспечивающим более высокую производительность.

Основными производителями сертифицированных приборов для реализации метода отрыва со скалыванием являются: СКБ «Стройприбор» (Челябинск), ВЗ «Эталон» (Москва) и «Контрос-Стройприбор» (Москва) [15]. НПП «Карат» (Челябинск) выпускает прибор для испытаний бетона методом отрыва со скалыванием «Оникс-ОС». Это первый из приборов, прошедших сертификацию с утверждением типа и внесением в Госреестр.

Метод отрыва широко применяется за рубежом для оценки прочности бетона в процессе эксплуатации [118]. Согласно стандартам BS 1881:207, ASTM C900, EN 12399, UNI 9536, 10157, на исследуемой поверхности бетона с помощью специальной фрезы вырезается круговая канавка, на поверхность последней наклеивается отрывное устройство, с помощью которого вырывают подрезанную пробу, при этом сила вырыва нормируется. В соответствии со стандартами ISO 4624, NF P34501/301, EN 12618 и др., прочностные испытания реализуются посредством вырывания конуса. В этом случае после засверловки отверстия, определяющего высоту вырываемого конуса, вводится самораскрывающаяся фреза такой же высоты. Затем, с использованием специального устройства, производится вырыв конуса за разъемное кольцо.

Для ударно-импульсного метода характерна высокая производительность, позволяющая повысить достоверность измерений и автоматизацию процесса контроля. Основное достоинство метода – слабое влияние состава бетона на результаты измерений. Недостатками являются возможность контроля прочности только в поверхностном слое, который не всегда характеризует глубинные слои из-за разной степени старения бетона,

и происходящие изменения структуры и свойств поверхностного слоя под воздействием внешней среды. Однако при контроле только что изготовленной конструкции, тонкостенного изделия, а также диагностировании состояния поверхностного слоя бетона этот недостаток не сказывается.

Хорошо себя зарекомендовали микропроцессорные приборы ИПС-МГ4 и ИПС-МГ4+, разработанные СКБ «Стройприбор», которые предназначены для оперативного контроля прочности и однородности бетона, раствора и строительной керамики методом ударного импульса по ГОСТ 22690–2015 [38, 107].

Отличительной особенностью прибора «Оникс-2.4» НПП «Карат» является определение прочности бетона одновременно по ударному импульсу и упругому отскоку, что позволяет расширить информационный массив, повысить достоверность результатов и сократить количество ударов.

Ультразвуковой метод позволяет оценивать прочность бетона, находить внутренние дефекты (пустоты, трещины), осуществлять технический контроль, определять геометрические параметры различных строительных конструкций. Работы по созданию аппаратуры для УЗК железобетона стали проводиться в РФ с 1970-х годов, однако, в отличие от ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений и металлоконструкций, в случае железобетонных конструкций наблюдается отставание, объясняемое недостаточностью современных средств измерения и методического обеспечения. Перенесение средств и методов УЗК металлов и сплавов для исследования бетона невозможно [80]. При этом для контроля металлических конструкций используются высокочастотные ультразвуковые колебания, а для железобетона – низкочастотные (из-за быстрого затухания в нем высокочастотных колебаний).

Для контроля бетонных и железобетонных конструкций широко используются методы сквозного и поверхностного прозву-

чивания. При сквозном прозвучивании можно оценить характеристику бетона и состояние конструктивного элемента в целом с учетом имеющихся дефектов, что позволяет оценить несущую способность контролируемого объекта. Этот метод является наиболее информативным при техническом обследовании строительных сооружений. Заслуживает внимания разработанный и выпускаемый МНПО «Спектр» ультразвуковой дефектоскоп А 1220, который производится серийно и эксплуатируется в странах Восточной и Западной Европы [60].

При поверхностном прозвучивании железобетонных конструкций используются ультразвуковые приборы, которые отличает простота использования, высокая достоверность и точность измерений, а также высокая конструктивная надежность. Ультразвуковой тестер УК 1401 МНПО «Спектр», являющийся одним из наиболее широко применяемых приборов в России, позволяет контролировать прочность железобетонных конструкций как в процессе их изготовления, так и в процессе эксплуатации [64]. Ультразвуковой универсальный прибор «Пульсар-1.0» НПП «Карат» обеспечивает работу как со смазкой, так и с сухим контактом при поверхностном, сквозном и угловом прозвучивании на произвольной базе. Он позволяет измерять скорость прохождения ультразвуковых колебаний, определять прочность бетона (тяжелого, легкого), производить поиск дефектов, а также оценивать пористость, трещиноватость и анизотропию композитных материалов.

Метод сквозного и поверхностного прозвучивания реализован в приборе «Бетон-32» ЗАО «Интротрест», предназначенном для контроля прочности строительных материалов в строящихся и эксплуатируемых зданиях и сооружениях. В основу метода положено измерение времени распространения УЗ колебаний в контролируемом объекте и дальнейшая корреляция измерения с прочностными характеристиками данного материала.



Ряд европейских и американских компаний выпускает аналогичные ультразвуковые приборы для сквозного и поверхностного прозвучивания по стандартной схеме с вязким акустическим контактом. Это фирма *Krautkramer*, Германия (USD-10 NF, USM-23 LM), фирма *Starmans*, Чехия (DIU-562 LF) и др. Стоимость этих приборов значительно выше отечественных, в то же время техническая информация об их реальных возможностях и примерах эффективного применения отсутствует [130, 131].

Для определения параметров армирования (расположение и направление арматуры, ее диаметр, толщина защитного слоя бетона) широко используется магнитный метод. Без такой информации нельзя рассчитать несущую способность конструкции, определить опасные участки, восстановить документацию и т. д. Например, выпускаемые приборы «ИПА–МГ4» (СКБ «Стройприбор») и «Поиск–2.3/2.4» (НПП «Карат») предназначены для контроля толщины защитного слоя бетона и расположения стержневой арматуры диаметром от 3 до 40 мм («ИПА–МГ4») и от 3 до 50 мм («Поиск-2.3») по ГОСТ 22904.

Для повышения производительности труда, получения достоверных данных и более надежного расчета остаточного ресурса необходимо сочетать различные методы и методики в едином комплексе. Так, например, проведение исследований высокопроизводительными приборами (ударно-импульсным прибором «Оникс-2.4» и ультразвуковым «Пульсар-1.0») следует сочетать с трудоемкими, но точными измерениями прибором «Оникс-ОС» для корректировки в процессе измерений их калибровочных коэффициентов. Однако наиболее достоверные результаты испытания бетона на прочность, особенно в монолитных конструкциях ответственного назначения, можно получить сочетанием неразрушающих и разрушающих методов контроля.

В некоторых случаях при проведении технического диагностирования методы НК зачастую не дают необходимой точности

результатов. Кроме того, существует ряд ограничений на использование приборов НК при обследовании крупногабаритных конструкций. Поэтому у испытателей появляется некоторая неуверенность в полученных значениях прочности. Особенно остро это проявляется тогда, когда отличия максимальных напряжений (которые могут возникать от действующих и прогнозируемых нагрузок) составляют несколько процентов от расчетных сопротивлений бетона. При этом ставится под сомнение дальнейшая эксплуатация конструкции без усиления. В этих условиях незаменимыми являются разрушающие методы контроля. Пробы для разрушающего контроля в этом случае необходимо брать в зонах, наиболее приближенных к местам НК, и в количестве, позволяющем корректировать достоверность данных НК.

Сочетание НК с разрушающим контролем применялось фирмой «ЭРКОН» (Санкт-Петербург) на ряде промышленных объектов при обследовании основания каре и фундаментов склада нефтепродуктов ООО «Несте СПб», строительных конструкций «Станции разгрузки вагонов № 2» (УПКМ на причалах 106, 107, 4-й район морского порта Санкт-Петербурга), дымовых труб АО «Северсталь» и др.

Так, например, при испытаниях бетонного основания каре резервуарного парка и фундаментов емкостного оборудования на прибрежном складе нефтепродуктов ООО «Несте СПб» отбор проб из железобетонных конструкций проводился с помощью станка Hydrostress СН 6330. Он позволяет выполнять выбуривание кернов диаметром 75 мм и длиной 200...1500 мм и более в зависимости от применяемой насадки. Распиловка кернов позволяет получать образцы-цилиндры с необходимыми для испытаний соотношениями высота/диаметр. Применение комплекса методов и методик неразрушающего и разрушающего контроля позволило значительно уменьшить объем ремонтно-восстановительных работ и обоснованно выделить те элементы конструкций, которые нуждаются в усилении [11].

## Глава 8

# СРЕДСТВА ВИЗУАЛЬНО-ОПТИЧЕСКОГО И ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ

Проведение визуально-оптического и измерительного контроля (ВИК) необходимо:

- для проверки геометрических размеров швов на их соответствие проектным величинам (выпуклость, вогнутость, неравномерность ширины, неровная поверхность, асимметрия сварного шва и т. п.);
- выявления наружных дефектов (подрезов, непроваров, наплывов, натеков, прожогов, кратеров, пор, трещин) и проверки их по условиям допустимости;
- определения смещения, перелома осей сварных соединений, отсутствия плавных переходов от одного сечения к другому, коробления и изменения размеров изделий, общих и местных деформаций металлических конструкций и т. д. [94].

Визуальный контроль основных материалов, сварных соединений и конструкций проводится невооруженным глазом и (или) с применением оптических приборов (луп, зеркал, микроскопов, визуально-оптических приборов для контроля удаленных и скрытых объектов – эндоскопов, цистоскопов, бароскопов, флекоскопов, биноклей, перископических дефектоскопов, зрительных труб и др.) [56].

При прямом визуальном контроле исследуемая поверхность осматривается непосредственно глазами. Разрешающая способность глаза определяется минимальным углом между двумя точ-

ками, если они устойчиво воспринимаются глазом раздельно. Минимальное расстояние между точками  $R = l \cdot \sin \alpha$ , где  $\alpha$  – расстояние от глаза до плоскости точек;  $\alpha$  – минимальный разрешаемый угол поля зрения.

В оптимальных условиях острота зрения глаза составляет  $1'$  при  $l = 250$  мм, что соответствует расстоянию наилучшего зрения  $R = 0,075$  мм. Следовательно, чувствительность визуального метода обеспечивает обнаружение трещин с величиной раскрытия более  $0,1$  мм. При остроте зрения  $2'$  и тех же условиях обнаружения  $R = 0,15$  мм. В связи с тем что средняя острота зрения составляет  $2...4'$ , средняя чувствительность будет значительно ниже, а при снижении освещенности до сумеречной чувствительность контроля снижается в  $15...20$  раз, что соответствует  $R = 0,9...1,15$  мм.

Видимость объекта определяется контрастностью, цветом, яркостью, освещенностью, угловым размером определяемого объекта. Наиболее важными условиями видимости являются контрастность и угловые размеры объекта.

Контрастность определяется свойством объекта выделяться на окружающем фоне при различных оптических характеристиках объекта и фона. Контрастность может быть яркостной и цветовой. Яркостная контрастность выражается в относительных единицах:  $K = (B_{\phi} - B_0) / B_{\phi}$ , где  $B_0, B_{\phi}$  – яркость объекта и фона соответственно. При  $K > 0,5$  контрастность считается большой, при  $0,2 \leq K \leq 0,5$  – средней и при  $K < 0,2$  – малой.

На разрешающую способность влияет цвет объекта и фона. Цвета делят на ахроматические и хроматические. К первым относятся черный, белый, серый, ко вторым – все остальные. Хроматические цвета повышают остроту зрения при контроле желто-зеленых объектов на темном фоне и красных объектов – на белом фоне. По этим причинам их широко применяют при капиллярных методах дефектоскопии.

Приборы для контроля близкорасположенных поверхностей предназначены для анализа и измерения уже обнаруженных дефектов или обследования областей с предполагаемыми дефектами. Оптические приборы позволяют значительно расширить пределы возможности глаза путем увеличения угловых размеров контролируемых объектов, что позволяет видеть объекты, размеры которых находятся за пределами разрешающей способности невооруженного глаза. Для визуально-оптического контроля объектов целесообразно применять приборы с кратностью увеличения не более 20...30, так как с возрастанием кратности увеличения уменьшаются поле зрения, глубина резкости, производительность и надежность контроля. Чувствительность при этом составляет не менее 0,02 мм. Лупы позволяют повысить остроту человеческого глаза. Они выпускаются двух типов:

- ЛП – для просмотра деталей, мелких предметов и т. д.; бывают складные с 4-кратным увеличением; с ручкой, штативные – с 6, 7, 10, 20, 25-кратным увеличением;

- ЛИ (измерительные) – для линейных и угловых измерений (10-кратные), при этом лупа имеет сетку со шкалой, цена деления которой равна 0,1 мм. При контроле недоступных или скрытых поверхностей, а также поверхностей, наклоненных под углом более 30° к зрительной оси глаза, используются зеркала [106].

Приборы контроля удаленных поверхностей используют для обнаружения предполагаемых или возможных дефектов на объектах типа металлоконструкций строительных ферм производственных зданий, стреловых систем кранов и т. д. Это в основном бинокли, зрительные трубы и т. п.

К приборам диагностики и контроля труднодоступных, слабоосвещенных или скрытых мест (выявление дефектов внутренних поверхностей, полостей и т. п.) конструкций и сооружений относятся эндоскопы. Наиболее известными зарубежными фирмами в производстве эндоскопов являются *Olimpus* (Япония),

*EVEREST VIT* (США), *Karl Stort* (Германия) и др. Среди российских производителей нужно отметить МНПО «Спектр» (Москва) и ОАО «Оптимед» (Санкт-Петербург). Выпускаемую продукцию характеризует высокое качество и широкий ассортимент, однако цены на импортное оборудование ощутимо выше.

Основными параметрами эндоскопа являются диаметр рабочей части, длина рабочей части, угол направления наблюдения и угол поля зрения. Эндоскопы подразделяются на жесткие и гибкие.

Жесткие эндоскопы используются для контроля узлов, к которым имеется прямолинейный доступ (пустоты в стенах зданий, полости в машинах и механизмах, каналы и трубы малого диаметра, отверстия после шлифовальных и других чистовых работ). Жесткий эндоскоп (оптическая трубка) состоит из визуальной и осветительной системы. Осветительная система, в свою очередь, состоит из оптического волокна, которое расположено между двумя металлическими трубками: наружной и внутренней. Диаметр рабочей части эндоскопа составляет 1,7; 2,0; 2,7; 4,0; 6,0; 8,0 и 10 мм, длина в пределах 100...1000 мм с изменяемым шагом 100...200 мм. Основные углы наблюдения составляют 0, 30, 45, 75, 90 и 110°, угол зрения варьируется от 50° до 90° [103]. Увеличение поля зрения приводит к уменьшению детализации и наоборот.

Некоторые фирмы выпускают жесткие эндоскопы с более широкими параметрами. Так, *EVEREST VIT* для дистанционного визуального контроля предлагает стандартные поворотные эндоскопы с вращением поля зрения на 360° без поворота корпуса зонда и эндоскопы с переменным направлением обзора от 50° (передний обзор) до 120° (задний обзор). Составные эндоскопы могут поставляться длиной до 19,5 м. Размеры применяемых микрозондов могут изменяться от 0,5 до 2,7 мм и направлением обзора 0; 30; 70 и 90° [84]. Одним из преимуществ жестких эндоскопов является высокая разрешающая способность.

Гибкие эндоскопы предназначены для осмотра внутреннего или труднодоступного пространства, имеющего сложную геометрию.

В этих эндоскопах визуальная система и система передачи света состоит из волоконной оптики, смонтированной внутри гибкой трубки с управляемым дистальным концом, который может изгибаться в одной или двух плоскостях. Угол изгиба меняется от 90 до 180°. Диаметр рабочей части находится в пределах 4; 6; 8 и 10 мм, хотя встречаются и эндоскопы с диаметром рабочей части от 0,5 до 2 мм. Длина рабочей части изменяется от 500 до 3000 мм с шагом, как правило, 500 мм. Угол поля зрения составляет 50...60°, по заказу может быть увеличен до 90...100°. Гибкие эндоскопы имеют более низкую разрешающую способность, чем жесткие.

В последнее время фирмы изготовители придают гибким эндоскопам новые функции и возможности. Так, компания *EVEREST VII* предлагает волоконно-оптические гибкие эндоскопы с фронтальным и боковым обзором и зондами диаметром от 2 до 12 мм. Универсальность обзора достигается 2- или 4-сторонней артикуляцией конца зонда и сменными оптическими насадками. Кроме того, эти эндоскопы совместимы для работы с цифровыми фотовидеокамерами, а также с другими средствами измерения. Рабочей средой вышеуказанных эндоскопов являются воздух, вода, бензин, керосин.

О широких возможностях телевизионных эндоскопов, позволяющих получить важную визуальную информацию, сообщают авторы [59, 119]. По данным американской фирмы *Kues*, занимающейся ремонтом различных промышленных объектов, только визуальная информация является основанием в определении способа последующего ремонта. Это касается прежде всего скрытых полостей конструкций, которые могут быть обследованы с помощью эндоскопов.

Для документирования результатов контроля используются эндоскопические системы как с жесткими, так и гибкими волоконно-оптическими эндоскопами. Они обычно состоят из оптико-механического адаптера с видеокамерой, присоединяемых к окуляру эндоскопа, блока управления и монитора.

Гибкие эндоскопы имеют недостатки, одними из которых являются невысокая разрешающая способность и ограничения по длине гибкой трубки. Однако замена в системе передачи изображения волоконно-оптического жгута на электронику позволила повысить не только разрешающую способность, но и увеличить длину гибкой трубки. Таким образом, современные эндоскопы позволяют проводить диагностику на более высоком уровне.

Наряду с обзорными эндоскопами промышленность выпускает эндоскопы, позволяющие проводить визуально-измерительный контроль с использованием сменной оптики. Объектив меняется в зависимости от направления осмотра, размеров исследуемой области (угол обзора) глубины исследуемой области (глубина резкости) и возможностей измерения. При этом предусмотрена возможность легкого съема и установки объектива при помощи осевого пружинного замка или крепления двойной спиралью. Эти методы присоединения гарантируют сохранность и правильное положение оптики даже при самом сложном контроле.

Применяемые зонды, используя сменную оптику, в свою очередь, позволяют расширить круг решаемых задач. Наиболее востребованным является зонд диаметром 6,1 мм. Он имеет достаточно малый диаметр, но при этом сохраняет прочностные свойства и дает хорошее освещение. Зонд может иметь самую различную длину и сменную измерительную оптику. Выпускается значительное количество специальных зондов (включая зонды для контроля сварных швов, для скрытого наблюдения при исследовании участков с низким уровнем освещения и летающий зонд с соплом для выхода струи сжатого воздуха из его наконечника для



облегчения ввода в труднодоступные места), которые используются при техническом диагностировании.

В большинстве случаев при обследовании объектов в таких специализированных областях, как авиация, космонавтика, электроника, требуются зонды уменьшенных размеров. В этих случаях можно применять самые тонкие в мире зонды компании *EVEREST VIT* диаметром 3,9 и 5 мм, обычно используемые при исследовании летательных аппаратов, например при контроле двигателей вертолетов и силовых газотурбинных двигателей [84].

Зонды больших диаметров, например 8,4 мм, отличаются качественным освещением объекта контроля, дополнительной жесткостью и прочностью. Областью их применения являются паровые коллекторы, теплообменники, технологическое оборудование в электроэнергетике, конверторы в сталелитейной промышленности, резервуары комплексной подготовки нефти и газа на промыслах.

Выпускаемые видеоэндоскопы способны выполнять измерения с высокой точностью, обрабатывать и сохранять изображения, проводить детальный анализ обнаруженных дефектов, а также оценивать динамику развития дефектов во времени. Специальные объективы позволяют изменять направление обзора, фокусное расстояние и угол обзора.

Большими возможностями обладают видеоэндоскопы серии Long Steer VideoProbe XL-PRO компании *EVEREST VIT*. Long Steer является единственным на рынке сверхдлинным видеоэндоскопом с пневматическим управлением и артикуляцией. Зонды диаметром 6,1 мм и длиной до 18 м, а также диаметром 10 мм и длиной до 30,5 м позволяют решать самые сложные задачи. Видеоэндоскопы серии VideoProbe XL-PRO, включающие CCD цветную видеокамеру с разрешением 500 НТВ-линий, имеют дополнительные возможности: запись изображений на карту памяти – до 900 изображений, возможность создания струк-

туры каталогов для хранения изображений объектов контроля, ввод логотипа компании, многоязычность [84].

Одним из важнейших направлений обеспечения безопасности магистральных и других трубопроводов является внутритрубная дефектоскопия с использованием специальных роботизированных дефектоскопов – видекроулеров. Они включают в себя устройство дистанционного управления скоростью и направлением движения кроулера, фокусировкой камеры и освещением объекта контроля, а также устройством автоматической подачи видеокабеля. Современные видеокроулеры, например ROVVER 400, 600, 900 (*EVEREST VIT*), могут выполнять обследование трубопроводов диаметром от 100 мм до 1520 мм и длиной до 200 м.

Однако этот метод диагностирования имеет ряд недостатков, основные из которых:

- высокая стоимость оборудования;
- достаточно объемные подготовительные работы;
- необходимость значительных временных затрат для обработки результатов контроля;
- отсутствие возможности контроля таких наиболее нагруженных участков трубопроводов, как тройники, задвижки, отводы и другие элементы.

Для контроля состояния внутренних элементов баков, цистерн, котлов, подземных хранилищ и других резервуаров с входным отверстием, а также тепловыделяющих элементов, реакторов и других конструкций используются камеры наблюдения с длиной кабеля управления до 180 м. Их система дистанционного управления обеспечивает повороты видеокамеры в нескольких плоскостях, автоматическую фокусировку, оптическое и цифровое увеличение. Камеры глобального наблюдения серии Ca-Zoom (*EVEREST VIT*) могут работать в воде, запыленных резервуарах и жидкости до глубины 45 м, обладают радиационной стойкостью.

Фирмы, производящие эндоскопы, стремятся к достижению высоких технических характеристик и потребительских качеств продукции: расширению возможностей создаваемой аппаратуры, уменьшению массогабаритных характеристик и специального исполнения для работ в полевых условиях.

Точность измерений, достигаемая при использовании эндоскопов, позволяет добиться значительного повышения качества диагностики, а также определить остаточный ресурс. Это особенно необходимо организациям, имеющим ответственное оборудование, выход из строя которого может привести к большим катастрофам (авиационные двигатели, оборудование АЭС, ТЭС и других опасных производственных объектов).

Основными областями применения эндоскопов являются следующие:

- водоснабжение и канализация – обнаружение коррозии, трещин, разрывов, засоров и посторонних предметов в трубах и баках, контроль состояния проточной части насосных систем;
- автомобильная промышленность – контроль качества изготовления и сборки двигателей, гидропневмосистем, качества сварки и окраски, зубьев шестерен, гильз цилиндров, клапанов, коррозии деталей кузова и других труднодоступных мест;
- химическая и нефтехимическая промышленность – контроль промышленных коммуникаций, сосудов высокого давления, теплообменников, трубопроводов, цистерн, баков;
- газоперекачивающие станции – контроль камер сгорания, состояния лопаток, топливной системы и т. п.;
- строительство (строительные конструкции) – проверка внутренних полостей, арматуры и гидроизоляции стен, проверка состояния силовых элементов перекрытий, трубопроводов;
- машиностроение – контроль полостей пресс-форм, трубопроводов, полостей сварных конструкций, деталей механических передач и т. д.;

- авиационная и космическая промышленность – контроль стенок баков, цистерн, силовых элементов корпусных узлов, форсунок камер сгорания и т. д.;
- металлургическая промышленность – контроль трубных изделий, пустотелых отливок, полостей различных конструкций.

Визуально-оптический контроль может органично сочетаться с измерительным. Так, при проведении сварочных работ приходится выполнять большой объем измерительных работ, которые устанавливаются ГОСТами или ТУ. Внешний осмотр и обмеры сварных швов и соединений – это первые контрольные операции при приемке изделий. Такому контролю подвергаются все сварные швы, независимо от того, как они будут использоваться в дальнейшем. При этом выявляются такие наружные дефекты, как трещины, подрезы, непровары, наплывы, прожоги, незаваренные кратеры, поверхностные поры, смещение свариваемых деталей и т. п. [76].

Для измерения формы и размеров изделий и сварных соединений, угловых и линейных величин полуфабрикатов, деталей, сборочных единиц, а также поверхностных дефектов следует применять исправные, прошедшие метрологическую поверку инструменты и приборы: лупы измерительные по ГОСТ 25706, линейки измерительные по ГОСТ 427, угольники поверочные по ГОСТ 3749, штангенциркули по ГОСТ 166, угломеры с нониусом по ГОСТ 5378, микрометры по ГОСТ 6507, нутромеры метрические по ГОСТ 10 и индикаторные по ГОСТ 868, шаблоны по ТУ 102.338–83 и др. [56].

Следует отметить, что трещины, поры, питтинг могут быть выявлены визуальным контролем при наличии хорошего контраста между дефектным участком и остальной поверхностью изделия, чего можно добиться за счет:

- улучшения освещения;
- хорошей предварительной подготовки контролируемой поверхности (очистка наждаком, шлифовка, полировка).

Для обеспечения необходимого уровня освещения обычно используются осветители, состоящие из источника света с блоком питания и оптических элементов (конденсоры, светофильтры, модуляторы, растры, дефлекторы, объективы, поляроиды, световоды и т. д.) [81].

Освещенность контролируемых поверхностей должна быть достаточной для надежного выявления дефектов и соответствовать требованиям ГОСТ 23479, но в любом случае должна быть не менее 300 ЛК [56]. Стандартом DIN EN 13018 установлен минимальный уровень освещенности исследуемой поверхности в 500 ЛК. Действительно, в некоторых случаях для гарантированного обнаружения дефекта освещенность должна составлять 1000 ЛК, а зачастую и много больше. Однако излишняя освещенность в случаях контроля, при малых углах зрения относительно контролируемой поверхности приводит к так называемому эффекту ослепления, что может привести к пропуску некоторых дефектов. Отсюда следует, что для уверенного контроля направление освещения должно совпадать с направлением осмотра.

Кроме того, для увеличения контрастности контролируемых поверхностей, повышения контрастной чувствительности глаза и снижения общего утомления контролера рекомендуется окраску стен, потолков, рабочих столов и стендов выполнять в светлых тонах (белый, голубой, желтый, светло-зеленый, светло-серый) [56].

Таким образом, для надежного выявления дефектов при визуальном контроле необходим комплекс как простейших измерительных приборов и инструментов, так и сложнейших электронно-оптических систем.

## Глава 9

# СРЕДСТВА УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ

К средствам НК относят контрольно-измерительную аппаратуру для получения информации о качестве исследуемых материалов и объектов.

По видам контролируемых параметров средства НК (СНК) разделяют:

- на дефектоскопы (приборы или установки), предназначенные для обнаружения дефектов типа нарушений сплошности (трещин, раковин, расслоений, непроваров и т. д.);
- средства технической диагностики для предсказания возникновения различного рода дефектов, в том числе нарушений сплошности, изменения размеров и физико-механических свойств изделий на период их эксплуатации;
- средства для контроля геометрических характеристик (наружных и внутренних диаметров, толщины стенок, покрытий, слоев, ширины и длины изделия, степени износа и т. д.);
- средства для измерения физико-механических и физико-химических характеристик (электрических, магнитных и структурных параметров, отклонений от заданного химического состава, измерения твердости, пластичности, коэрцитивной силы, контроля качества упрочненных слоев, содержания и распределения ферритной фазы и т. п.).

## 9.1. Ультразвуковые дефектоскопы

*Классификация ультразвуковых дефектоскопов.* К числу наиболее широко применяемых методов неразрушающего контроля металлических конструкций относится акустический.

Приборы акустического НК можно разделить по назначению на следующие группы [72]:

- ультразвуковые дефектоскопы (УЗД);
- ультразвуковые толщиномеры (УЗТ);
- приборы акустической эмиссии;
- акустические приборы для измерения физико-механических свойств.

Самую большую группу составляют ультразвуковые дефектоскопы.

В зависимости от области применения их можно классифицировать:

- на ультразвуковые дефектоскопы общего назначения;
- ультразвуковые дефектоскопы специализированные;
- ультразвуковые программируемые дефектоскопы на базе портативного компьютера (ПК) со встроенной дефектоскопической платой.

По функциональным возможностям УЗД делятся на следующие:

- для обнаружения несплошностей (пороговые дефектоскопы);
- обнаружения несплошностей, измерения координат их залегания и измерения отношения амплитуд сигналов от несплошностей;
- обнаружения несплошностей, измерения координат их залегания, измерения отношения амплитуд сигналов от несплошностей и измерения эквивалентных размеров несплошностей по их отражающей способности;

- обнаружения несплошностей, измерения их реальных размеров и визуализации несплошностей в заданных объемах или сечениях объекта контроля.

По конструктивному исполнению УЗД можно подразделить:

- на портативные;
- переносные;
- передвижные;
- стационарные.

Портативные – дефектоскопы с автономным питанием при массе менее 8 кг, не требующие для переноса или эксплуатации более одного дефектоскописта.

Переносные – дефектоскопы массой более 8 кг, которые требуют для переноса и эксплуатации более одного дефектоскописта и могут быть приведены в рабочее состояние за время не более одной рабочей смены (8 ч).

Передвижные – дефектоскопы, перемещаемые вдоль контролируемого изделия каким-либо механическим транспортным средством.

Стационарные – дефектоскопы (дефектоскопические установки), которые используются на одном специально оборудованном участке.

В зависимости от степени участия дефектоскописта при контроле дефектоскопы различаются:

- на ручные, в которых все операции выполняет дефектоскопист;
- механизированные, в которых процесс сканирования объекта контроля осуществляется без полного или частичного участия дефектоскописта;
- автоматизированные, в которых процесс определения координат отражателей относительно начала отсчета и представления результатов контроля в виде дефектограммы и протокола контроля осуществляется без участия дефектоскописта;



- автоматические, в которых все операции контроля, включая оценку качества объекта контроля, выполняются без участия дефектоскописта.

Современный ультразвуковой дефектоскоп представляет собой сложное многофункциональное микропроцессорное устройство. Его основными составными частями являются: электронный блок, преобразователи, акустический блок, механизмы сканирования, средства калибровки.

Устройство, основные технические характеристики, схемы включения и методики поверки УЗД в РФ регулировались следующими стандартами: ГОСТ 23049–84 «Дефектоскопы ультразвуковые. Основные параметры и общие технические требования», ГОСТ 23667–85 «Дефектоскопы ультразвуковые. Методы измерения основных параметров». В настоящее время ГОСТ 23049–84 отменен, поэтому на установленные им параметры и технические требования можно ориентироваться как на справочные.

УЗК нашел самое широкое распространение практически во всех отраслях промышленности, в связи с чем постоянно увеличивается количество фирм, занятых как производством соответствующей УЗ-аппаратуры, так и оказывающих услуги по обследованию различных объектов с ее использованием.

По оценке [61] ежегодная потребность российского рынка в УЗ-аппаратуре НК может составлять более 500 универсальных толщиномеров и более 1000 дефектоскопов только общего назначения. Кроме того, к ним необходимо поставлять ультразвуковые преобразователи как в комплекте, так и в качестве расходного материала, что в общем объеме продаж может составлять более 20 %.

Такая потребность в новых приборах НК обусловлена эксплуатационным износом и моральным устареванием техники. Как показывает мировой опыт, обновление УЗ-приборов производится один раз в 7...10 лет.

*Требования, предъявляемые к современным ультразвуковым дефектоскопам.* Несмотря на то что методики УЗК и правила браковки в разных отраслях промышленности значительно различаются, существует возможность сформулировать некоторые общие требования к современным ультразвуковым дефектоскопам (УЗД).

УЗ-дефектоскоп должен обеспечивать выполнение контроля по всем основным нормативным документам, используемым в настоящее время:

- РД РОСЭК 001–96 для грузоподъемных механизмов;
- ОП 501 ЦД–97 для контроля энергетического оборудования;
- ВСН 012–88 для магистральных трубопроводов;
- ПНАЭГ-7-010–89 для оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок.

УЗД должен работать с прямыми и наклонными пьезоэлектрическими преобразователями (ПЭП), изготовленными по совмещенной и раздельно-совмещенной схемам, обеспечивать контроль по схеме «тандем» и предусматривать режим работы дефектоскопа в качестве толщиномера.

Ультразвуковой дефектоскоп должен работать на различных частотах ввода ультразвука (ГОСТ 14782–86 «Соединения сварные. Методы ультразвуковые») предусматривает следующую сетку частот: 1,25; 1,8; 2,5; 5,0 и 10,0 МГц).

Время непрерывной работы дефектоскопа с подзаряженным источником автономного питания должно быть не менее 8 ч.

Прибор должен быть портативным, оснащен ручкой или ремнем для переноски, иметь несколько устойчивых положений на горизонтальной плоскости, должен допускать установку на полу и иметь предельный вес с источником автономного питания менее 4 кг.

Корпус прибора должен иметь достаточную механическую прочность и пылевлагонепроницаемость, диапазон рабочих температур должен находиться в пределах от –10 до +45° С.

В УЗД должен быть предусмотрен режим работы с системой временной регулировки чувствительности (ВРЧ), глубина регулировки ВРЧ должна быть не менее 40 дБ.

*Сравнительные характеристики ультразвуковых дефектоскопов.* Современным УЗ дефектоскопам присущи следующие качества и характеристики:

- универсальность, т. е. возможность применения для контроля материалов и их соединений с различными акустическими свойствами;
- наличие меню пользователя, позволяющее выбрать необходимый технический параметр для информации или управления;
- возможность различных режимов включения пьезоэлектрических преобразователей: совмещенный, отдельный и раздельно-совмещенный;
- наличие системы автоматической сигнализации обнаружения дефектов (АСД);
- блок цифрового отсчета, отображающий любую из координат отражателя, а также амплитуду измеряемого эхо-импульса в той или иной форме;
- запоминание изображения на дисплее («заморозка») с накоплением новой информации;
- отсечка;
- представление информации на экране в виде *A*- и *B*-разверток;
- запоминание разверток типа *A*;
- использование фильтров и высокочастотного сигнала;
- расположение органов управления под пленочным покрытием;
- память программ настройки;
- глубиномер и запоминание отчетов координат;
- один или два строба системы автоматической сигнализации дефекта;

- временная регулировка чувствительности с достаточно большим числом точек настройки;
- сервисные функции (удержание пика, блокировка клавиатуры от случайного нажатия и др.);
- связь с ПК для передачи и дальнейшей обработки информации, а также документирования результатов контроля;
- автономное питание;
- многоканальность.
- малый вес, портативное исполнение.

В научных и технических публикациях, а также в справочной и рекламной литературе приводится большой объем информации о разработанных и производимых УЗ-дефектоскопах. Тем не менее сведения о выпускаемых приборах часто содержат разный набор параметров, характеризующих данное изделие. Поэтому перед потребителем стоит непростая задача подобрать прибор, обеспечивающий как точность и достоверность контроля, так и удобство работы применительно к конкретным задачам.

Основные технические характеристики УЗ-дефектоскопов общего назначения приведены в [71, 99, 105, 124]:

- диапазон частот ультразвука;
- диапазон толщин контролируемых изделий;
- максимальная величина коэффициента усиления и пределы его регулировки;
- наличие и характеристики системы ВРЧ;
- амплитуда зондирующего импульса и объем хранимой информации.

Сравнительный анализ технических характеристик дефектоскопов отечественных и зарубежных фирм (*Kraufkrämer* (USN 52R), «Система Стармане» (DI0-562), ЗАО «Алтек» (УД2-102), ООО «АКС» (А1212), НПК «Луч» (УД2-70), ЦНИИТМАШ (УДЦ-201П), *Panametrics* (ЕРОСН 4)) представлен в [41] с использованием следующих обозначений:

- $H_{\max}$  – максимальная глубина прозвучивания (продольная волна в стали);
- $f$  – частота (частотный диапазон);
- $A_{\text{ДД}}$  – диапазон регулировки усиления;
- $\Delta_A$  – минимальный шаг регулировки усиления;
- ВРЧ – временная регулировка чувствительности;
- ДД – динамический диапазон (глубина регулировки ВРЧ);
- $F$  – частота следования зондирующих импульсов;
- $\Delta_T$  – температурный диапазон;
- ЖК – жидкокристаллический дисплей;
- ЭЛ – электролюминесцентный дисплей;
- $R$  – число точек на экране;
- $S_{\text{экв}}$  и  $D_{\text{экв}}$  – соответственно эквивалентная площадь и эквивалентный диаметр дефектов (по их отражающей способности);
- АРД – семейство кривых, описывающих зависимость амплитуды эхо-сигнала, отраженного от плоскодонного отверстия объекта, от глубины его залегания или различных значениях диаметра (или площади) плоскодонного отверстия;
- DAC – семейство кривых, описывающих зависимость максимумов амплитуды эхо-сигналов от отражателей одинаковой площади, расположенных на разных расстояниях в одном и том же материале.

*Возможности современных ультразвуковых дефектоскопов.* Микропроцессорные ультразвуковые дефектоскопы имеют более широкие функциональные возможности и обладают рядом преимуществ:

- обеспечение воспроизводимости параметров контроля при проведении периодических испытаний за счет цифрового выражения всех режимов настройки дефектоскопа;
- фиксация в памяти прибора параметров, которые были определены заранее для различных рабочих режимов контроля путем тщательной настройки перед проведением испытаний, что

обеспечивает быструю и безошибочную установку этих параметров даже при неблагоприятных условиях работы;

- объективная регистрация данных, полученных при контроле, и их документирование позволяют принимать наиболее верные решения о состоянии объекта в условиях, когда стоимость ошибки в оценке состояния или затраты на повторное исследование могут быть значительными. В этом случае полученные распечатки протоколов контроля с изображениями сигналов позволяют привлекать к анализу дефектов экспертов без проведения дополнительных испытаний;

- накопление протоколов с объективными данными о состоянии объекта в течение всего периода его эксплуатации позволяет наблюдать развитие дефектов и определять на этой основе фактический остаточный ресурс оборудования;

- распечатки с изображением сигналов от дефектов могут служить составной частью каталога эксплуатационных дефектов, характерных для данного типа оборудования. Такой каталог может использоваться в качестве учебного пособия для правильной интерпретации различных дефектных ситуаций [126].

Применение микропроцессорных дефектоскопов позволяет:

- существенно облегчить труд и снизить психофизическую нагрузку на оператора, так как освобождает его от многих измерительных операций;

- повысить производительность труда за счет резкого сокращения (в десятки раз) времени на настройку при сменах объекта контроля.

Современные микропроцессорные дефектоскопы значительно повышают надежность и достоверность контроля:

- за счет возможности одновременной обработки и отображения в реальном времени УЗ-сигналов и информации об отражателях и параметрах настройки;

- наличия «заморозки» (накопления) сигнала и измерением максимальных параметров сигнала в этом режиме при многократном сканировании дефекта;
- предварительного проведения настройки дефектоскопа, что снижает уровень ошибок;
- задания через «меню» времени прохождения УЗ-сигнала, что повышает точность измерения координат;
- одновременного измерения двух координат дефекта, что необходимо при контроле сложных по геометрии изделий;
- запоминания осциллограммы дефектного участка или полного архивирования результатов контроля.

*Новые функциональные возможности современных дефектоскопов.* Значительное число дефектоскопов снабжаются функциональными возможностями, которые или улучшают управление прибором, или дают дополнительную информацию об отражателе, что увеличивает рыночную привлекательность разработки.

Так, если в процессе контроля приходится часто менять ПЭП и изменять настройки, то определенное удобство оператору доставит способность прибора автоматически распознавать подсоединенный ПЭП, информация о котором была ранее внесена в память (Powerlink Technology). После распознавания ПЭП программа управления сама без помощи оператора устанавливает необходимые значения параметров настройки.

Во многих приборах производится накопление огибающей изображения на экране в процессе сканирования (Smartview Function). Накопление позволяет надежно определить и зафиксировать максимум амплитуды при сканировании, что очень полезно при контроле типа тел вращения (труб, прутов и т. д.). Эта функция реализована в дефектоскопах: USN58R, USN60, УДЦ-201П, УД 2-102 «Пеленг» и др. В УДЦ-201П измеряется ширина «замороженной» огибающей при прозвучивании при разных углах ввода, что дает возможность оценивать тип дефекта и его ориентацию в вертикальной плоскости [132].

Весьма важной является функция работы УЗД в режиме толщиномера (Auto-V Operation). Она позволяет одновременно измерять как толщину объекта, так и скорость ультразвука, что весьма удобно при измерении толщины изделия, скорость звука в котором точно неизвестна или переменна по толщине. Для измерений используется двухканальная система. Такую функцию имеет большинство приборов, разработанных в последнее время.

Новые «интеллектуальные» возможности открывает использование так называемой «ловкой ручки» (Smart-Knob Control), которая позволяет изменять несколько параметров настройки. В начале с помощью меню вызывается параметр, значение которого требуется изменить. Затем при повороте «ловкой ручки» изменение сначала происходит плавно, с наименьшим возможным для данного параметра шагом. При дальнейшем повороте ручки шаг изменений автоматически увеличивается и достигается быстрое и удобное изменение параметра как в небольших, так и в широких пределах. Эту возможность имеют многие УЗД общего назначения.

Имеются и другие полезные опции, среди которых DGS (Distance Gain Size), отображающая кривую эквивалентного размера отражателя как функцию расстояния до него (Trigonometric Flaw Lokation Function), которая вносит автоматическую коррекцию на кривизну при расчете координат дефекта, и многие другие. Следует ожидать дальнейшего увеличения «интеллектуальных функций».

*Использование разверток B, C, 3D. Визуализация дефекта.* Распознавание типа дефекта (протяженный или компактный, плоский или круглый) имеет важное значение при оценке пригодности изделия. Решение этой задачи ведется по нескольким направлениям. Одно из них связано с использованием развертки типа B, целью построения которой может быть, например, определение условных размеров дефекта. Развертка B представляет



собой зависимость амплитуды эхо-сигнала от глубины и одного из направлений сканирования (вид сбоку). Детектированные эхо-сигналы отображаются на плоскости, для определения типа и ориентации дефекта проводится прозвучивание под разными углами или используется схема «тандем». Применение развертки *B* для контроля железнодорожных рельсов приводится в работе [74].

Другим направлением является визуализация дефекта, что требует построения развертки типа *C*. Развертка типа *C* – зависимость амплитуды эхо-сигнала от двух направлений сканирования (вид сверху). В развертке *C* детектированные эхо-сигналы также отображаются на плоскости. Чаще всего для этого используют стационарные установки. Однако развитие микропроцессорной техники и технических средств отображения информации делают возможным получение изображения дефектов на переносном УЗ-дефектоскопе общего назначения. В качестве примера можно привести УЗ цифровой прибор Sono-Checker фирмы *ТОКИМЕС*, позволяющий получить изображение дефектов непосредственно на цветном экране. Следует отметить, что некоторые параметры прибора уступают параметрам УЗД общего назначения, однако наглядность представления результатов стимулирует развитие этого направления.

Получило развитие направление прозвучивания дефекта под разными углами многоэлементными ПЭП, объединенных в фазированную решетку (*Phased Array*). Последующая математическая обработка позволяет получить изображение дефекта, определить его форму, ориентацию и значительно уменьшить погрешность измерения истинных размеров дефектов. Применение систем, таких как *Tomosean Focus*, обеспечивает большие преимущества при контроле изделий сложной формы и высокой скорости сканирования.

Хорошие результаты по достоверности определения дефектов, улучшению разрешающей способности получены с исполь-

зованием автоматизированных систем «Авгур» [6]. Эта система дает возможность получить двух- (развертки  $B$ ,  $C$ ) и трехмерное (3D) цветные изображения с возможностью изменения масштаба. Система «Авгур» позволяет производить математическую обработку данных, в том числе с применением методов акустической голографии, и реконструировать трехмерное изображение дефектов. Сканирование поверхности изделия осуществляется или вручную, или автоматически в пределах заданного поля. Высокое разрешение по фронту (около 2,5 мм) позволяет точно определить координаты дефектов и следить за их ростом. Применение систем «Авгур» на стадии строительства промышленного объекта позволяет получать УЗ-«портрет» ответственных сварочных соединений, а в дальнейшем – осуществлять их мониторинг в процессе эксплуатации.

С усовершенствованием многоэлементных ПЭП, миниатюризацией микропроцессорных приборов, увеличением их скорости действия и объема памяти применение этих методов контроля достаточно перспективно.

*Пути совершенствования ультразвуковых дефектоскопов.* К настоящему времени в РФ разработано, производится и используется большое количество типов УЗД, различающихся областью применения, функциональными возможностями, надежностью, весом и габаритами. Однако существует возможность разработать универсальную модель, пригодную для обеспечения основного объема УЗ-контроля. Эта базовая модель (или ряд однотипных моделей) имела бы широкий набор возможностей и широкий диапазон измерения различных параметров. Остальные приборы, ориентированные на решение задач конкретной отрасли, учитывая специфику нормативно-технической документации, были бы намного проще в изготовлении, настройке, а следовательно, и дешевле.

Пути совершенствования УЗД несколько. В первую очередь имеется устойчивая тенденция к увеличению объема памяти

и быстроедействие процессорных систем, что уже в ближайшем будущем позволит применять для УЗД общего назначения математические методы обработки сигналов и данных, что пока под силу только стационарным исследовательским комплексам. А это, в свою очередь, приведет к значительному повышению точности измерения характеристик дефектов (размеров, форм и ориентации). Улучшится и разрешающая способность, особенно по фронту, что потребует высокоточных, надежных и по возможности универсальных устройств позиционирования и сканирования ПЭП.

Достигнутый уровень таких параметров электронного блока, как максимальная величина коэффициента усиления, пределы и шаг его измерения, длительность развертки, параметры зондирующего импульса, в целом соответствует потребностям контроля и поэтому не предполагает в скором будущем радикальных изменений.

Однако следует ожидать все большего разнообразия дополнительных возможностей, особенно сервисных, так как практически все фирмы свои новые модели оснащают новыми «разумными» функциями. Много усилий затрачивается на уменьшение массы и габаритов дефектоскопов, и в частности – за счет разработки более эффективных аккумуляторных батарей.

Большую важность имеют надежность и механическая прочность конструкции дефектоскопов, в том числе прочность корпуса. Контроль многих объектов производится в полевых условиях и вдали от населенных пунктов, это устанавливает повышенные требования к эксплуатации УЗД без поломок, а также продолжительности автономного питания.

Все рассматриваемые дефектоскопы общего назначения обладают сходным набором функций и близкими техническими характеристиками, отличаясь лишь удобством интерфейса или дополнительными функциями, облегчающими работу оператора.

Однако российские дефектоскопы в целом, не уступая лучшим зарубежным приборам, более приспособлены к нашим условиям и имеют стоимость в 3...4 раза ниже импортных [62].

Уровень технического развития позволяет полагать, что в ближайшем будущем получат широкое распространение программируемые дефектоскопы на базе ПК или ноутбука со встроенной дефектоскопической платой. Достоинство таких комплексов заключается в большом объеме памяти, высокой скорости обработки полученных результатов и хранении нескольких программ обработки. В состав дефектоскопической платы входят аналоговая часть дефектоскопа – генератор зондирующих импульсов и приемное устройство. Кроме того, плата содержит аналогово-цифровой преобразователь, сигнальный процессор, блок памяти и другие устройства.

Примером такого решения является система USLT 2000, выпускаемая фирмой *Krautkramer* [126]. Эта система представляет собой встроенную в ПК испытательную УЗ-систему, которая отличается высокой точностью измерений и широким частотным интервалом. Кроме обычных возможностей, она позволяет выполнять сравнение эхо-сигналов, наблюдать динамику сигналов в реальном масштабе времени, производить усреднение. Система имеет большой удобный экран с высоким разрешением и высокой скоростью обновления информации.

## 9.2. Ультразвуковые толщиномеры

Определение толщины стенок объектов ответственного назначения от долей до сотен миллиметров является одним из важнейших этапов контроля технического состояния. Ультразвуковые толщиномеры в настоящее время являются одними из наиболее широко распространенных средств НК, позволяющими

осуществлять такой контроль при одностороннем доступе. С их помощью обеспечивается технологический и эксплуатационный контроль объектов различного назначения: строительных конструкций, трубопроводов, сосудов высокого давления, машин и механизмов и т. д.

Следует отметить, что измерение толщины является одной из стандартных задач, решаемых УЗ-дефектоскопами общего назначения, однако в подавляющей части отраслей промышленности толщинометрия является самостоятельной задачей, которая потребовала создания специальных приборов – УЗ-толщиномеров. Принцип измерения толщины ультразвуковым методом основан на измерении времени между излучением зондирующего импульса и приемом первого отраженного импульса. Контроль, как правило, осуществляется ультразвуковым эхо-импульсным методом с применением раздельно-совмещенных (РС) или прямых совмещенных (ПС) пьезоэлектрических преобразователей.

Производством УЗ-толщиномеров занимаются более 16 иностранных компаний и не менее 8 из РФ и СНГ, например ЗАО «Взлет» (Санкт-Петербург), МНПО «Спектр» (Москва) и др. Эти приборы отличаются малым весом и габаритами, высокими метрологическими параметрами и простотой в исполнении [18, 61]. Они обеспечивают измерение толщины металлических и неметаллических (стекло, керамика, пластик) изделий от долей миллиметра до 500 и более миллиметров.

УЗ-толщиномеры обладают высоким быстродействием, простотой управления, возможностью передачи данных на компьютер, встроенной памятью с возможностью запоминать до 8000 значений толщины с использованием буквенно-цифровых идентификаторов. Применяемые программы позволяют наблюдать на экране компьютера процесс измерения в реальном масштабе времени.

При анализе технических решений, используемых при создании УЗ-толщиномеров, можно выделить три основные груп-

пы этих приборов [126], отличающихся друг от друга наличием специальных систем не только для измерения толщины, но и для решения других задач дефектоскопии – выявления неметаллических включений, расслоений металла, коррозионных изменений и т. д. К ним относятся следующие:

- традиционные толщиномеры, в том числе с памятью;
- толщиномеры с дополнительным экраном (развертка типа *A*);
- толщиномеры с регистрацией рельефа изделия.

Отличительной чертой современных толщиномеров является возможность хранения и регистрации результатов измерений, вследствие чего повышается достоверность контроля и улучшение условий работы оператора. Объем памяти, позволяющий запомнить до десятков тысяч значений толщины, обеспечивает сохранность данных, полученных оператором, в течение длительного времени.

Важной частью каждого прибора является его интерфейс с оператором. В интерфейс входят клавиатура, индикатор, программное и методическое обеспечение приборов. Результаты измерений могут выводиться в компьютер через стандартный интерфейс (как правило, RS-232).

Подавляющее большинство современных толщиномеров имеет режим «быстрого сканирования», при котором в ходе перемещения ПЭП по поверхности изделия запоминается минимальная толщина из всех полученных значений, что очень важно при контроле коррозированных изделий.

Большое значение при контроле изделий имеет наличие автоматической настройки отдельных режимов работы (автоматическая корректировка в показаниях прибора, запоминание характеристик преобразователей), контроль наличия акустического контакта. Так, при отсутствии информации о качестве акустического контакта результаты полученных измерений не могут рассматриваться как достоверные.

Толщиномеры с дополнительным экраном (развертка А) в значительной степени напоминают УЗ-дефектоскопы, однако имеют несколько ограниченные функции (отсутствие системы ВРЧ и др.), но снабжены специальными сервисными функциями, расширяющими возможности измерения толщин изделий. Так, например, когда измерения производятся при наличии внутренних дефектов, А-развертка позволяет устранить их влияние на результаты измерений толщины.

Определенный интерес для пользователей представляет толщиномер с регистрацией рельефа поверхности, который снабжен датчиком пути и имеет возможность привязки измеряемой толщины к координатам исследуемого участка. В этом случае получается изображение рельефа изделия, наглядно показывающее состояние поверхности и, возможно, наличие поверхностных или внутренних дефектов, например коррозионных повреждений на внутренней поверхности трубопровода.

Современные толщиномеры дают возможность проводить настройку режимов работы (чувствительность, диапазон прозвучивания и т. д.) как в ручном, так и в автоматическом режимах, что снижает зависимость результатов измерений от работы оператора.

Наличие меню позволяет выбирать различные режимы работы, обращаться к дополнительным функциям (изменение режима измерения, настройки, сохранение результатов и их регистрации).

Большой интерес вызывают УЗ-толщиномеры *Panametrics*, имеющие сертификаты Госстандарта России. Портативный толщиномер 26 MG при полном комплекте датчиков позволяет измерять толщину материалов от 0,5 до 500 мм с разрешением по выбору 0,01 или 0,1 мм при температурах от  $-20$  до  $+50$  °С. Толщиномер 36 DL Plus является наиболее универсальным прибором и позволяет замерять толщину материала через слой защитного покрытия или краски. Он может повысить производитель-

ность труда там, где необходим точный ручной контроль труб, резервуаров и других объектов. Толщиномер 25 DL HP специально разработан для работы с такими материалами, как резина и стекловолокно, которые невозможно или трудно контролировать, используя традиционные толщиномеры [108].

Проблемой зависимости показаний толщиномеров с РС ПЭП от качества акустического контакта и шероховатости поверхности изделия, а также сложной процедуры настройки на материал контролируемого изделия занимались авторы [100]. Они поставили задачу разработки толщиномера, предусматривающего автоматическую процедуру настройки ПЭП на материал с автоматическим учетом расхождения и затухания продольных волн в контролируемом материале и не зависящего от качества акустического контакта, с коррекцией измерений на больших толщинах. Разработанный толщиномер «Взлет-УТ» производит измерение временного интервала не по фиксированному уровню, а по уровню, отсчитываемому от максимальной амплитуды измеряемого сигнала.

Это дает следующие преимущества [113]:

- независимость результатов измерений от качества акустического контакта;
- автоматический учет изменения амплитуды сигнала, связанного с затуханием продольных волн в объекте контроля (отсутствует необходимость в наборе образцов для настройки на материал изделия);
- параметры ПЭП автоматически определяются непосредственно самим прибором.

Следует отметить, что отечественные УЗ-толщиномеры по своим функциональным возможностям практически не уступают импортным, а некоторые, как, например, «Взлет-УТ», по некоторым параметрам превосходят их, в то же время имея стоимость в несколько раз ниже.



Как показывает практика, значительное количество российских потребителей нуждается в простых и дешевых толщиномеров, способных работать при низких температурах, свойственных отечественному климату. Поэтому выбор надежного прибора, отвечающего высоким требованиям, как всегда, остается за пользователем.

### **9.3. Ультразвуковые пьезоэлектрические преобразователи**

При ультразвуковом контроле для возбуждения и приема ультразвуковых колебаний применяются ультразвуковые пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП).

ПЭП – это узел прибора для неразрушающего контроля акустическими методами, преобразующий электрическую энергию в акустическую и обратно, принцип работы которого основан на пьезоэлектрическом эффекте. Преобразователи классифицируют по следующим признакам [73].

1. По типу волны, возбуждаемой в объекте контроля, различают преобразователи продольных, сдвиговых, поверхностных или других типов волн.

2. По углу ввода УЗ-колебаний в изделие различают:

- прямые преобразователи, которые вводят и (или) принимают УЗ-колебания по нормали к поверхности объекта в точке ввода;
- наклонные преобразователи, которые вводят и (или) принимают УЗ-колебания в направлениях, отличных от нормали к поверхности объекта контроля.

3. По способу размещения функции излучения и приема различают:

- совмещенные ПЭП – такие, у которых один и тот же пьезоэлемент работает как в режиме излучения, так и в режиме приема;

- раздельно-совмещенные ПЭП – такие, у которых в одном корпусе размещены два или более пьезоэлемента, одни из которых работают только в режиме излучения, а другие – только в режиме приема упругих колебаний.

4. По способу осуществления акустического контакта:

- контактные ПЭП – такие, рабочая поверхность которых при работе соприкасается с поверхностью объекта контроля или имеет расстояние до нее меньше половины длины волны в контактной жидкости;

- иммерсионные ПЭП – такие, которые работают при наличии между поверхностями преобразователя и объекта контроля слоя жидкости толщиной больше пространственной длительности акустического импульса.

5. Особую группу составляют фокусирующие преобразователи, обеспечивающие фокусировку акустической энергии в определенной области пространства.

Наибольшее применение в практике УЗ-контроля получили:

- прямые совмещенные преобразователи, возбуждающие продольные волны, обычно называемые просто – прямые ПЭП;

- наклонные совмещенные преобразователи, возбуждающие поперечные волны, обычно называемые просто – наклонные ПЭП;

- раздельно-совмещенные прямые (или с углами излучения и приема до  $8^\circ$ ) преобразователи, возбуждающие продольную волну, обычно называемые просто – РС ПЭП.

В конструкцию типового преобразователя входят следующие основные элементы (рис. 57).

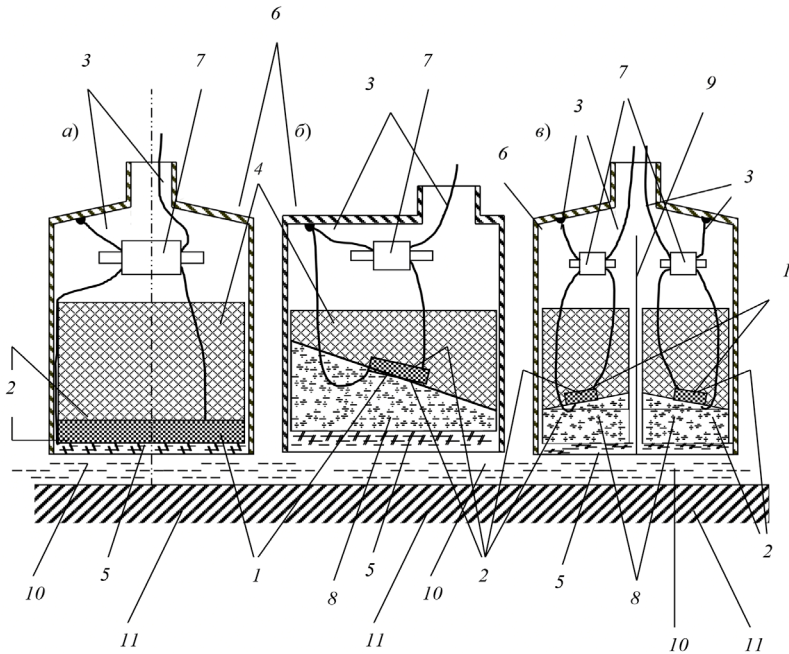


Рис. 57. Схема устройства ультразвуковых пьезоэлектрических преобразователей: *а* – прямого; *б* – наклонного; *в* – раздельно-совмещенного; 1 – пьезоэлемент; 2 – электроды; 3 – проводники; 4 – демпфер; 5 – протектор; 6 – корпус; 7 – индуктивность; 8 – призма; 9 – акустический экран; 10 – слой контактной жидкости; 11 – контролируемый объект

1. Пьезоэлемент – служит для преобразования электрических колебаний в упругие (обратный пьезоэлектрический эффект) или упругих колебаний в электрические (прямой пьезоэлектрический эффект).

2. Электроды – служат для равномерного распределения по поверхности пластины электрического заряда, подводимого к пластине в режиме возбуждения или возникающего на пластине в режиме приема.

3. Проводники – служат для подводки и снятия электрического напряжения к пьезоэлементу.

4. Демпфер – предназначен для гашения свободных колебаний пьезоэлемента, т. е. для получения коротких импульсов, а также для предупреждения механических повреждений пластин, особенно тонких.

5. Протектор – выполняет следующие функции:

- защита пьезоэлемента или призмы от износа;
- улучшение согласования пьезоэлемента с контролируемым изделием;
- улучшение акустического контакта при контроле контактными способом.

6. Корпус – служит:

- для защиты элементов ПЭП от механических повреждений и воздействия наружной среды;
- экранирования пьезоэлемента и проводников от электромагнитных помех;
- компоновки элементов ПЭП в форму, удобную для эксплуатации.

7. Индуктивность – электрическое согласование. Часто индуктивность резонансного контура генератора размещают внутри ПЭП или подключают к нему в виде сменных элементов. Она обеспечивает такой режим работы дефектоскопа и преобразователя, при котором достигается наибольший коэффициент преобразования электрической энергии в упругую и обратно.

8. Призма – предназначена для создания необходимого типа волны и требуемого угла ввода УЗ-колебаний в изделие.

9. Акустический экран – служит для акустической и электрической изоляции излучающей и приемной частей РС ПЭП.

Для приемно-излучающего элемента используют пластины из керамики (цирконата свинца, титаната свинца, ниобата свинца, титаната бария и др.), обладающей пьезоэлектрическим эффектом, или, значительно реже, пьезокварца.

Толщина  $d$  пьезоэлектрической пластины выбирается так, чтобы ее собственная частота соответствовала частоте возбужденных или принимаемых УЗ-колебаний:

$$d = \frac{\lambda_n}{2} = \frac{c_n}{2f_0}, \quad (31)$$

где  $\lambda_n$  и  $c_n$  – длина волны и скорости звука в материале пластины соответственно;  $f_0$  – собственная частота пластины.

Для объективного контроля качества основные характеристики ПЭП нормируются.

При подаче на пьезоэлемент электромагнитных колебаний напряжением  $U_r$  он из-за обратного пьезоэффекта будет излучателем упругой энергии с амплитудой акустического давления  $P_0$ . Коэффициент преобразования  $K_u$  при излучении будет:

$$K_u = \frac{P_0}{U_r}. \quad (32)$$

При падении акустической волны с амплитудой  $P_n$  на пьезоэлемент в режиме приема на обкладках элемента возникает напряжение  $U_n$ , и коэффициент преобразования  $K_n$  при приеме будет:

$$K_n = \frac{U_n}{P_n}. \quad (33)$$

Если преобразователь совмещенный (один пьезоэлемент работает как излучатель и приемник), то он характеризуется двойным коэффициентом преобразования по напряжению:

$$K = K_u K_n = \frac{P_0 U_n}{U_r P_n}. \quad (34)$$

Коэффициент преобразования по току имеет аналогичное выражение.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) определяет изменение величины коэффициента преобразования от частоты  $f$ . Параметры АЧХ следующие:

- рабочая частота, соответствующая максимуму АЧХ;
- полоса пропускания  $\Delta f = f_1 - f_2$ , где  $f_1, f_2$  – частоты, при которых АЧХ ниже максимальной на 3 дБ при излучении либо на приеме, или на 6 дБ в режиме двойного преобразователя. При этом у обычных преобразователей добротность  $Q = \frac{f}{\Delta f} = 8 \dots 10$ , а у специализированных –  $Q = 0,5 \dots 2$ .

Реверберационно-шумовая характеристика (РШХ) – зависимость амплитуды реверберационных шумов преобразователя от времени. Она характеризует возможность выявления поверхностных дефектов («мертвая зона») и измеряется длительностью  $\tau_p$  от начала развертки при заданном коэффициенте усиления дефектоскопа.

На РШХ оказывает большое влияние коэффициент затухания волн в демпфере и призме. В связи с этим для уменьшения РШХ применяют раздельно-совмещенные прямые и наклонные ПЭП.

Выбор ПЭП определяется следующими факторами:

- видом сварного соединения;
- наиболее вероятным расположением и ориентацией дефекта;
- наличием ложных сигналов и т. д.

При расчете оптимальных параметров ПЭП должны учитываться такие факторы, как условие достижения максимальной чувствительности дефектоскопа, обеспечение возможности разрешения двух близко залегающих отражателей и уменьшение уровня помех, минимальные размеры «мертвой зоны», стабильность акустического контакта.

Размер и форма пьезоэлементов оказывают значительное влияние на уровень реверберационных шумов и форму сигнала. Увеличение поперечных размеров пьезоэлемента сужает характеристику направленности и повышает чувствительность в дальней зоне, однако при этом увеличивается протяженность ближней зоны, что понижает вероятность обнаружения в шве дефектов.

Пьезоэлемент малых размеров не обеспечивает необходимую мощность излучения, имеет при этом недостаточную разрешающую способность и точность определения координат дефектов из-за широкой диаграммы направленности. По данным многих исследователей, оптимальные размеры пластин составляют  $af \approx 12 \dots 15 \text{ мм} \cdot \text{МГц}$ .

Для повышения вероятности обнаружения дефекта в ближней зоне необходимо стремиться к тому, чтобы пьезоэлемент и дефект находились в их дальних зонах, что может выполняться при соблюдении следующего условия [1]:

$$a \leq \sqrt{0,8\lambda r} \text{ при } r \geq 8b^2 / \lambda, \quad (35)$$

где  $r$  – приведенное расстояние между дефектом и пьезоэлементом.

Рабочая частота ПЭП определяется толщиной материала изделия и коэффициентом затухания в материале. Для сталей строительных МК, обладающих низким уровнем структурных помех, коэффициент затухания невелик и составляет  $0,01 \dots 0,075 \text{ см}^{-1}$ . Многочисленными работами установлено, что оптимальный диапазон рабочих частот для контролируемых соединений толщиной  $4 \dots 15 \text{ мм}$  составляет  $4 \dots 5 \text{ МГц}$ , толщиной  $15 \dots 40 \text{ мм}$  –  $2,5 \text{ МГц}$  и толщиной  $40 \dots 100 \text{ мм}$  –  $1,5 \dots 2 \text{ МГц}$ . Однако эти значения могут уточняться в зависимости от требуемого уровня чувствительности, состояния поверхности и т. д.

На разрешающую способность контроля большое влияние оказывает степень демпфирования пьезоэлемента. Пьезоэлектрические преобразователи с малым демпфированием имеют невысокую разрешающую способность и поэтому применяются тогда, когда необходима высокая чувствительность. Сильно демпфированные ПЭП применяются тогда, когда нужна высокая разрешающая способность, например при толщинометрии или при обнаружении поверхностных дефектов. Они могут использоваться для контроля сварных швов малых толщин.

Таким образом видно, что дефектоскоп, являясь универсальным прибором, может быть использован для контроля практически любых изделий, в то же время вид геометрии и типоразмер сварного шва требуют применения самых различных ПЭП. При этом для контроля криволинейных поверхностей необходимо использовать малогабаритные, миниатюрные или притертые под типоразмер ПЭП, для нагретых поверхностей – высокотемпературные ПЭП.

Большинство современных УЗ-толщиномеров базируется на эхо-импульсном методе и использует раздельно-совмещенные ПЭП. При многих достоинствах они имеют ряд недостатков, обусловленных конструкцией самого ПЭП [101]:

- нелинейность зависимости времени прихода эхо-импульса от толщины;
- ограниченность диапазона толщин, перекрываемых ПЭП одного типа;
- отсутствие осевой симметрии диаграммы направленности;
- малый срок службы из-за разрушения кромок призм и повреждения акустического экрана.

Одним из решений устранения перечисленных недостатков является применение прямых совмещенных ПЭП:

- первого типа (без линии задержки);
- второго типа (с линией задержки).

Использование ПС ПЭП второго типа в эхо-импульсных толщиномерах имеет ряд дополнительных преимуществ:

- линейная зависимость времени задержки эхо-сигнала от толщины;
- более равномерная зависимость амплитуды эхо-сигналов от толщины изделий;
- лучшая чувствительность в дальней зоне;
- большая протяженность в ближней зоне акустического поля;



- осевая симметрия диаграммы направленности.

Однако главный недостаток ПС ПЭП – это наличие «мертвой зоны» (или зоны нечувствительности, представляющей собой неконтролируемый поверхностный слой, где отраженный от дефекта импульс совпадает на экране дефектоскопа с импульсом зондирующим) из-за собственных реверберационных колебаний ПЭП после зондирующего сигнала.

При увеличении частоты излучения величина «мертвой зоны» уменьшается, так как уменьшаются длина волны и период колебаний. Наличие «мертвой зоны» не позволяет проводить контроль тонких пластин и выявлять дефекты в поверхностных слоях изделий.

Размеры зоны нечувствительности  $x$  можно найти из выражения:

$$x = \frac{c_{\text{пр}}(\tau_u + \tau_n)}{2}, \quad (36)$$

где  $c_{\text{пр}}$  – скорость продольных волн;  $\tau_u$  – длительность зондирующего импульса;  $\tau_n$  – длительность переходного процесса.

Поэтому ПС ПЭП первого типа имеют ограничения по минимальной измеряемой толщине, не позволяя работать при толщине менее 3...4 мм, а второго – по максимальной. И хотя такие преобразователи выпускаются рядом фирм, они не нашли массового применения и используются для решения ограниченного круга задач. Таким образом, видно, что, выбирая тот или иной вид ПЭП, можно существенно расширить круг поставленных и решаемых задач.

#### 9.4. Образцы для ультразвукового контроля

Образцом называют средство ультразвукового контроля, предназначенное для хранения и воспроизведения значений физиче-

ских величин (геометрических размеров, скорости звука, затухания), используемых для проверки или настройки параметров дефектоскопа, толщиномера и преобразователей [73]. Они подразделяются на стандартные образцы (СО) и стандартные образцы предприятия (СОП).

*Стандартные образцы.* В соответствии с [35], к стандартным относятся образцы СО-1, СО-2, СО-3. В европейской международной практике широко применяются образцы К1, К2, VW, СВУ.

Стандартный образец СО-1 (рис. 58) изготавливают из органического стекла марки ТОСП по ГОСТ 17622–72. Коэффициент затухания продольной ультразвуковой волны в образце при частоте  $(2,5 \pm 0,2)$  МГц и температуре  $(20 \pm 5)$  °С составляет  $(0,30 \pm 0,04)$  см<sup>-1</sup>. Скорость продольных волн в образце равна  $(2670 \pm 133)$  м/с.

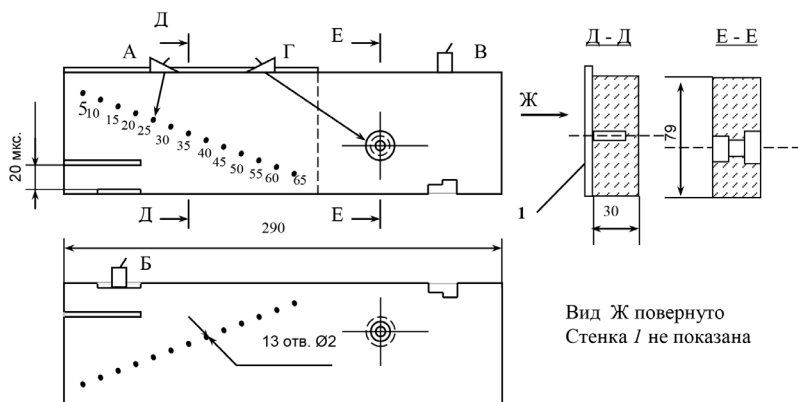


Рис. 58. Стандартный образец СО-1

Стандартный образец СО-1 предназначен для проведения следующих процедур:

- определения условной чувствительности в мм глубины залегания цилиндрического отверстия (ПЭП в положении А);

- оценки точности работы глубиномера (прямой ПЭП, положение Б) для дефектоскопов, у которых глубиномер калиброван в единицах времени;
- оценки лучевой разрешающей способности прямого ПЭП (прямой ПЭП в положении В). При этом, если все три отражателя разрешаются, то на экране дефектоскопа наблюдается три импульса с определенными расстояниями между ними;
- оценки лучевой разрешающей способности наклонного ПЭП (наклонный ПЭП в положении Г). При этом на экране дефектоскопа наблюдаются три импульса от поверхности цилиндров с определенными расстояниями между ними.

Стандартный образец СО-2 (рис. 59) изготавливают из стали 20 по ГОСТ 1050 или стали Ст.3 по ГОСТ 13637–93. Скорость продольной волны в образце при температуре  $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$  равна  $(5900 \pm 59)$  м/с.

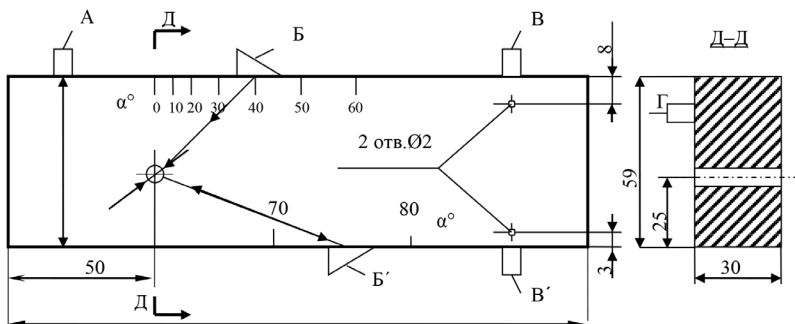


Рис. 59. Стандартный образец СО-2

СО-2 служит для настройки и проверки параметров контроля при УЗК изделий из малоуглеродистых и низколегированных сталей и определения условной чувствительности при контроле любых материалов. Он используется:

- для определения погрешности глубиномера (прямой ПЭП в положении А);

- измерения угла ввода луча (наклонный ПЭП в положении Б или Б');
- проверки «мертвой зоны» дефектоскопа с преобразователем (ПЭП в положении В или В');
- определения условной чувствительности в децибелах (ПЭП в положении Б или Б');
- определения предельной чувствительности (с использованием опорного отражателя диаметром 6 мм, ПЭП в положении Б или Б');
- определения ширины основного лепестка диаграммы направленности (перемещение наклонного преобразователя около положения Б или Б');
- настройки глубиномера дефектоскопа с прямым ПЭП (ПЭП в положении А или Г);
- настройки чувствительности дефектоскопа с использованием опорного сигнала диаметром 6 мм (наклонный ПЭП в положении Б или Б').

При контроле сварных соединений из металлов, отличающихся по акустическим характеристикам от малоуглеродистых и низколегированных сталей, должен применяться стандартный образец СО-2А, изготовленный из соответствующего материала.

Стандартный образец СО-3 (рис. 60) изготавливают из стали 20 по ГОСТ 1050 или стали Ст3 по ГОСТ 13637–93. Скорость продольной волны в образце при температуре  $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$  равна  $(5900 \pm 59)$  м/с.

СО-3 служит:

- для определения точки выхода УЗ-луча;
- определения условной чувствительности для наклонного ПЭП;
- определения предельной чувствительности для наклонного ПЭП;
- настройки глубиномера для наклонного ПЭП;

- настройки чувствительности для наклонного ПЭП.

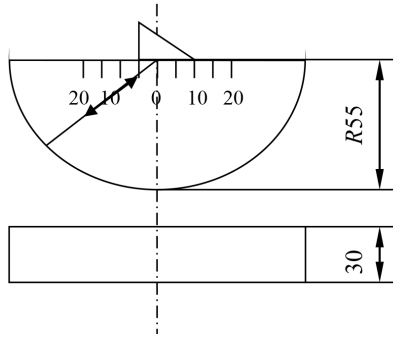


Рис. 60. Стандартный образец СО-3

Все указанные операции выполняют в положении наклонного ПЭП, когда его точка выхода совпадает с центром «0» образца. Три последние операции могут выполняться только для объектов из малоуглеродистых и низколегированных сталей.

Стандартный образец К1 (рис. 61) изготавливают из углеродистой стали. В отверстие диаметром 50 мм запрессовывают цилиндр из оргстекла. Скорость продольной волны в образце при температуре  $(20 \pm 5)$  °С равна  $(5920 \pm 30)$  м/с; сдвиговых –  $(3255 \pm 15)$  м/с.

К-1 предназначен:

- для настройки глубиномера дефектоскопа и проверки линейности развертки (положения установки прямых ПЭП  $A_1, \dots, A_4$  на рис. 62);
- настройки глубиномера дефектоскопа для сдвиговых волн (положение В наклонного ПЭП на рис. 62);
- настройки скорости развертки для сдвиговых волн;
- определения точки выхода наклонного ПЭП;
- определения угла ввода наклонного ПЭП;
- проверки «мертвой зоны» прямых или РС ПЭП;

- проверки разрешающей способности прямого ПЭП;
- задания условной чувствительности дефектоскопа с прямым ПЭП;
- задания условной чувствительности дефектоскопа с наклонным ПЭП;
- настройки чувствительности дефектоскопа при работе с наклонным ПЭП.

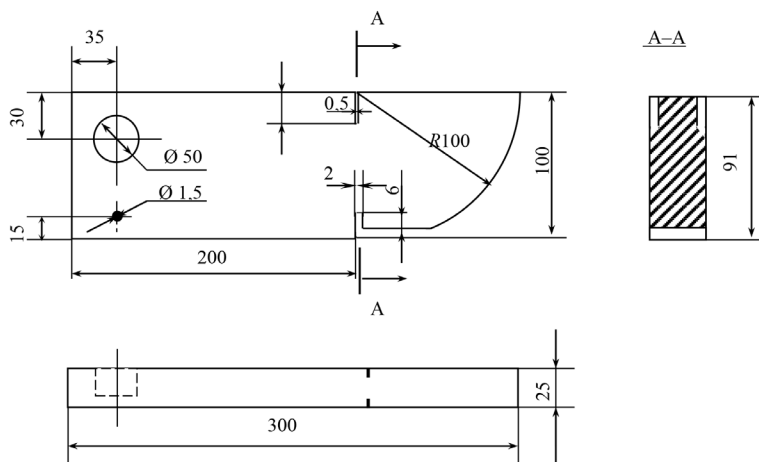


Рис. 61. Стандартный образец К1

*Стандартные образцы предприятия.* Стандартные образцы предприятия (СОП) широко применяются для настройки глубиномера и (или) чувствительности дефектоскопа. Они воспроизводят акустические свойства материала, конфигурацию, а также форму и шероховатость поверхности контролируемого объекта. В СОП включают искусственные отражатели, которые располагают на различных глубинах, за счет чего имитируют естественные дефекты изделий. Типы образцов и области их применения определяют стандарты и другие НТД, регламентирующие проведение УЗК.

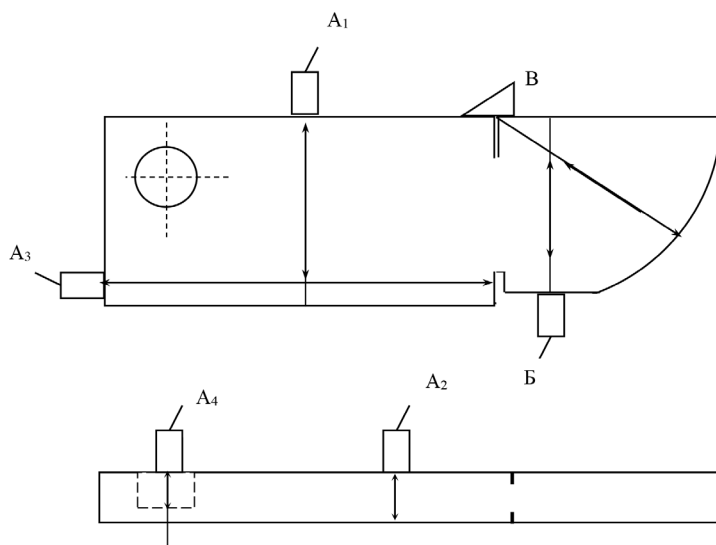


Рис. 62. Использование образца К1 для настройки глубиномера

Широкое распространение получили СОП с искусственными несплошностями в виде плоскодонных дисковых отражателей (ПДО), ориентированных перпендикулярно УЗ-лучу, и цилиндрических отверстий (ЦО), образующая которых направлена перпендикулярно УЗ-лучу.

СОП с ПДО можно условно разбить на четыре типа [73]:

- образцы типа А. Предназначены для настройки чувствительности дефектоскопа и определения эквивалентных размеров дефектов (ЭРД) при работе с прямыми ПЭП;
- образцы типа Б. Предназначены для выполнения настройки и определения ЭРД при контроле цилиндрических изделий небольшого диаметра (до 150 мм) по образующей;
- образцы типа В. Предназначены для выполнения настройки чувствительности и определения ЭРД при контроле плоских изделий наклонными ПЭП;

- образцы типа Д. Предназначены для выполнения настройки чувствительности и определения ЭРД при контроле зоны сплавления антикоррозионной наплавки с основным металлом.

Общими требованиями, предъявляемыми к СОП, являются:

- однотипность акустических свойств (затухания, скорости УЗ-колебаний образца и изделия). Они однотипны по затуханию, если средняя амплитуда донных сигналов в контролируемых изделиях ниже донных сигналов в СОП не более чем на 2 дБ (при равных толщинах) или превышает их не более чем на 4 дБ. Они однотипны по скорости, если скорости отличаются не более чем на 3 % (к СОП для толщинометрии предъявляются более жесткие требования);

- отсутствие в материале СОП естественных несплошностей, выявляемых при поисковой чувствительности, заданной для данного материала;

- поверхности ввода звука в СОП и изделия должны быть обработаны одинаковым способом и иметь одинаковую шероховатость;

- в СОП, используемых ЭРД, выполняют на каждой глубине ряд отверстий разного размера. При этом площади торцов ближайших по размеру отверстий должны отличаться не менее чем в два раза;

- расстояние между отражателями, а также отражателей от боковых стенок должны быть такими, чтобы исключить их взаимное, непредусмотренное влияние друг на друга;

- каждый образец должен иметь маркировку с регистрационным номером и паспорт, куда заносятся результаты аттестации и проверок.

Другие требования к СОП (глубины отражателей, допуски на изготовление отражателей и т. д.) задаются ведомственной нормативно-технической документацией на контроль.



## Глава 10

# СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Самыми распространенными строительными материалами, применяемыми при возведении промышленных и гражданских зданий, мостов, тоннелей, гидротехнических и других сооружений, остаются бетон и железобетон. В технически развитых странах на одного жителя приходится в год более 1 м<sup>3</sup> бетонных и железобетонных изделий. В России этот показатель почти втрое ниже, но все же объем применения железобетонных конструкций очень высок [52]. Это требует разработки надежных способов и средств диагностического контроля, которые бы позволили дать объективную оценку состояния железобетонных конструкций и оценить их остаточный ресурс.

Условия затвердевания бетонной композиционной смеси, а также ее меняющийся состав, состоящий из различных видов вяжущих материалов, наполнителей, специальных добавок и воды, вносят существенные трудности в проведение контроля. Физико-механические свойства строительных изделий могут определяться как на образцах, вырезанных из изделий, так и на образцах, изготовленных по той же технологии, что и контролируемая партия. Высокая надежность в первом случае может обеспечиваться только при большой выборке объектов контроля и стабильном процессе их изготовления. Однако такой контроль в современных условиях маловероятен. Объективность

контроля во втором случае также стоит под вопросом вследствие различных условий изготовления образцов-свидетелей и крупногабаритных конструкций. Для эксплуатируемых конструкций затруднительно смоделировать необходимые условия изготовления исследуемых образцов, а использовать разрушающие методы контроля зачастую не представляется возможным.

Поэтому повышение достоверности и надежности контроля может быть достигнуто за счет привлечения неразрушающих методов, обеспечивающих высокую производительность контроля непосредственно в конструкциях и сооружениях. Такая постановка вопроса особенно актуальна при обследовании зданий и сооружений, когда не известны характеристики бетона и арматуры. Кроме того, возрастающие объемы строительства многоэтажных зданий из монолитного железобетона также требуют использования неразрушающего контроля при проведении мониторинга [60].

Надежность результатов НК строительных конструкций из бетона и железобетона в значительной степени зависит от возможностей применяемой аппаратуры и методик исследования. При определении прочности бетона можно использовать различные методы [135]:

- классической деформации с использованием приборов типа молотка Кашкарова;
- упругого отскока (с использованием склерометра (метод Шмидта) или более современных приборов);
- отрыва со скалыванием;
- ударно-импульсный;
- ультразвуковой.

Каждый из описанных методов имеет свои преимущества и недостатки. Область применения первого и второго метода – оценка прочности поверхностных слоев бетона толщиной до 20...30 мм, т. е. практически защитного слоя бетона.

Грубая и пористая поверхность бетона плохо смачивается контактными жидкостями, и надежный акустический контакт с ней создать очень трудно. Поэтому эхо-импульсная аппаратура с жидкостным акустическим контактом не нашла широкого практического применения и осталась в основном на стадии лабораторных исследований [135].

Решить проблему акустического контакта позволили низкочастотные УЗ-преобразователи с сухим точечным контактом (СТК) и протектором меньшей длины волны [87]. С их помощью стало возможно вести контроль бетона как продольными, так и поперечными акустическими волнами.

Исследования структурной реверберации УЗ-волн в бетоне и других акустических помех, мешающих приему эхо-сигналов, показали, что для дефектоскопии бетона лучше использовать поперечные волны, чем продольные [127]. Полученные результаты позволили создать простые в эксплуатации приборы для эхо-импульсной дефектоскопии железобетонных конструкций. Они работают на поперечных УЗ-волнах, излучение и прием которых выполняется с помощью матричных решеток преобразователей с СТК.

В настоящее время для контроля металлических конструкций используются высокочастотные ультразвуковые колебания, а для железобетона – низкочастотные (из-за быстрого затухания в нем высокочастотных колебаний).

Для контроля бетонных и железобетонных конструкций широко используются методы сквозного и поверхностного прозвучивания. При сквозном прозвучивании можно оценить характеристику бетона и состояние конструктивного элемента в целом с учетом имеющихся дефектов, что позволяет оценить несущую способность контролируемого объекта. Этот метод является наиболее информативным при техническом обследовании строительных сооружений. Заслуживает внимания разработан-

ный и выпускаемый МНПО «Спектр» ультразвуковой дефектоскоп А 1220, который производится серийно и эксплуатируется в странах Восточной и Западной Европы [60].

Минимальные диаметры дефектов, обнаруживаемые дефектоскопом А 1220, равны:

- 50 мм до глубины 400 мм, если дефект протяженный;
- 80 мм до глубины 250 мм, если дефект сосредоточенный.

Основная область применения дефектоскопа – поиск полостей, трещин и неуплотненного бетона в массивах с толщинами до 0,5...1 м в зависимости от качества бетона. В частности, его используют для поиска незабетонированных каналов с преднапряженной арматурой в мостах, для обнаружения отклонений бетона в стенках топливных резервуаров и т. п.

При поверхностном прозвучивании железобетонных конструкций используются ультразвуковые приборы, которые отличаются простотой использования, высокая достоверность и точность измерений, а также высокая конструктивная надежность. Ультразвуковой тестер УК 1401 МНПО «Спектр», являющийся одним из наиболее широко применяемых приборов в России, позволяет контролировать прочность железобетонных конструкций как в процессе их изготовления, так и в процессе эксплуатации [64]. Ультразвуковой универсальный прибор «Пульсар 1.0» НПП «Карат» обеспечивает работу как со смазкой, так и с сухим контактом при поверхностном, сквозном и угловом прозвучивании на произвольной базе. Он позволяет измерять скорость прохождения ультразвуковых колебаний, определять прочность бетона (тяжелого, легкого), производить поиск дефектов, а также оценивать пористость, трещиноватость и анизотропию композитных материалов.

Метод сквозного и поверхностного прозвучивания реализован в приборе «Бетон-32» ЗАО «Интротрест», предназначенном для контроля прочности строительных материалов в строящихся

и эксплуатируемых зданиях и сооружениях. В основу метода положено измерение времени распространения УЗ-колебаний в контролируемом объекте и дальнейшая корреляция измерения с прочностными характеристиками данного материала. Ряд европейских и американских компаний выпускают аналогичные ультразвуковые приборы для сквозного и поверхностного прозвучивания по стандартной схеме с вязким акустическим контактом. Это фирма *Krautkramer*, Германия (USD-10 NF, USM-23 LM), фирма *Starmans*, Чехия (DIU-562 LF), и др. Стоимость этих приборов значительно выше отечественных, в то же время техническая информация об их реальных возможностях и примерах эффективного применения отсутствует [130, 131].

Для определения параметров армирования (расположение и направление арматуры, ее диаметр, толщина защитного слоя бетона) широко используется магнитный метод. Без такой информации нельзя рассчитать несущую способность конструкции, определить опасные участки, восстановить документацию и т. д. Например, выпускаемые приборы ИПА-МГ4 (СКБ «Стройприбор») и «Поиск-2.3/2.4» (НПП «Карат») предназначены для контроля толщины защитного слоя бетона и расположения стержневой арматуры диаметром от 3 до 40 мм (ИПА-МГ4) и от 3 до 50 мм («Поиск-2.3») по ГОСТ 22904.

Для повышения производительности труда, получения достоверных данных и более надежного расчета остаточного ресурса необходимо сочетать различные методы и методики в едином комплексе. Так, например, проведение исследований высокопроизводительными приборами (ударно-импульсным прибором «Оникс-2.4» и ультразвуковым «Пульсар-1.0») следует сочетать с трудоемкими, но точными измерениями прибором «Оникс-ОС» для корректировки в процессе измерений их калибровочных коэффициентов. Однако наиболее достоверные результаты испытания бетона на прочность, особенно в монолитных конструкциях

ответственного назначения, можно получить сочетанием неразрушающих и разрушающих методов контроля.

Методы НК обладают такими неоспоримыми преимуществами, как:

- получение экспресс-информации;
- снижение материальных и временных затрат при диагностировании;
- проведение исследований в труднодоступных местах, а также опасных местах, где применение разрушающего контроля приведет к ослаблению конструкции.

В то же время методы НК зачастую не дают необходимой точности результатов. Кроме того, существует ряд ограничений на использование приборов НК при обследовании крупногабаритных конструкций. Поэтому у испытателей появляется некоторая неуверенность в полученных значениях прочности. Особенно остро это проявляется тогда, когда отличия максимальных напряжений (которые могут возникать от действующих и прогнозируемых нагрузок) составляют несколько процентов от расчетных сопротивлений бетона. При этом ставится под сомнение дальнейшая эксплуатация конструкции без усиления. В этих условиях незаменимыми являются разрушающие методы контроля. Пробы для разрушающего контроля в этом случае необходимо брать в зонах, наиболее приближенных к местам НК, и в количестве, позволяющем корректировать достоверность данных НК.

## Глава 11

# ОСНОВЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Промышленная безопасность машин, оборудования, различных конструкций и сооружений в значительной степени определяется не только уровнем материально-технической базы, но и состоянием стандартов, научно-технической документации, метрологическим обеспечением и уровнем сертификации [79].

Метрологическое обеспечение средств неразрушающего контроля – комплекс мероприятий, обеспечивающий точность и достоверность результатов качества сварных соединений. Объектами метрологического обеспечения являются [103]:

- средства и методики измерения;
- средства и методики испытания и контроля;
- методики аттестации средств измерения;
- техническая документация на объекты испытания и контроля.

Метрологические требования к перечисленным объектам существенно различаются по характеру и объемам. Наиболее полно требования сформулированы к средствам измерений по допуску их к применению и обслуживанию в процессе эксплуатации. Фонд метрологических нормативных документов, регламентирующих эти требования, насчитывает более 2000 наименований нормативных документов [83].

Внедрение средств неразрушающего контроля качества связано с их метрологическим обеспечением, которое следует пред-

усматривать на стадии выдачи технического задания на разработку системы контроля качества. При этом следует, кроме основных технических требований, указывать условия приемки средств контроля, типы и способы изготовления контрольных образцов, методы проверки правильности показаний дефектоскопа. Развитие метрологического обеспечения средств НК зависит от наличия обоснованных нормированных параметров, которые могут быть установлены при разграничении понятий «измерение» и «контроль» [115].

Под измерением понимают способ количественного определения свойств материальных объектов, выраженный через физические величины. Измерение может входить в качестве составной части в процесс контроля. Когда качество сварного шва определяется только наличием или отсутствием дефектов, то измерение в процессе контроля отсутствует. Если размер дефекта определяется, то контроль включает в себя и процесс измерения.

Контроль – это способ определения соответствия свойств изделия установленным требованиям. Согласно ГОСТ 56542–2019, при составлении технических условий на неразрушающий контроль необходимо указывать все требования, определяющие показатели качества и эксплуатационные характеристики средств контроля и их метрологического обеспечения.

С целью получения достоверных и воспроизводимых результатов средства контроля должны подвергаться следующим процедурам [73]:

- аттестации после изготовления или перед вводом в эксплуатацию. Аттестацию осуществляют предприятия, изготовившие средства контроля (при наличии соответствующих полномочий, выданных органами Госстандарта), или специализированные предприятия Госстандарта. Аттестация проводится по программе, разработанной владельцем средств контроля и согласованной с органами Госстандарта;



- периодическим поверкам в процессе эксплуатации. Поверки осуществляют специализированные предприятия Госстандарта или ведомственные метрологические службы, получившие на это разрешение Госстандарта. Объемы и периодичность поверок предписываются инструкциями по эксплуатации средств контроля или методической документацией на проведение контроля. Сведения об аттестациях и периодических поверках заносятся в паспорт на средство контроля либо оформляются отдельным свидетельством.

В процессе работы приборов следует обеспечить надежность корреляционных связей между сигналами и измеряемыми физическими величинами, независимость результатов их измерений от мешающих факторов, создать при этом, при возможности, простую доступную систему настройки в самых разнообразных условиях контроля, что может быть достигнуто с помощью стандартных образцов.

В настоящее время широко применяются образцы, имитирующие контролируемые изделия и дефекты в сварном шве. Образцы изготавливаются из того же материала, что и изделия, а размеры и форма делаются близкими к соответствующему сварному соединению. Имеется четыре группы образцов: испытательные, контрольные, градуировочные, рабочие (настроечные).

Испытательные образцы служат для всестороннего исследования разрабатываемых средств НК в процессе исследовательских и государственных испытаний. Виды и типоразмеры дефектов должны находиться в диапазоне предельных характеристик, для контроля которых разработан прибор. Аттестацию образцов следует проводить, основываясь на различных физических принципах, которые гарантируют однозначное объективное всесторонне определение действительных свойств образца, его характеристик и параметров.

Контрольные образцы – это специальные образцы с искусственными дефектами или с одним рядом дискретных значений определяемого прибором параметра. Они входят в комплект прибора и поставляются вместе с ним. При настройке дефектоскопа

на контрольные образцы его индикатор должен давать определенные показания, зафиксированные в инструкции по эксплуатации. Эти данные – показатель работоспособности и пригодности к эксплуатации дефектоскопа, подвергающегося поверке.

Градуировочные стандартные образцы – это специальные образцы с искусственными дефектами, имеющими последовательно изменяющийся ряд параметров, или с последовательно изменяющейся характеристикой параметра; отличаются значительно большим количеством, меньшим интервалом между изменяющимся контролируемым параметром, более высокой точностью аттестации. Эти образцы служат для градуировки приборов при их выпуске организациями-производителями, а также используются метрологическими службами для поверки прибора.

Рабочие, или настроечные, образцы представляют собой элементы или модели конкретных изделий, подлежащих контролю. Дефекты и контролируемые параметры таких образцов должны соответствовать граничным значениям, допускаемым для годных изделий, и определяться исходя из технолого-конструкторских требований. При этом возможно применение искусственных и естественных дефектов, однако при использовании искусственных дефектов должен быть обоснованы их вид, форма, размеры, местоположение, должно быть указано, какому реальному дефекту эквивалентен данный искусственный дефект. Для обеспечения воспроизводимости образцов на каждый из них должны иметься технические условия, в которых указываются параметры образцов, характеристики и методы их проверки. В некоторых случаях, например для электромагнитных средств НК, к техническим условиям должна прикладываться технологическая инструкция по изготовлению образца с указанием требований к заготовкам, операции по обработке и контролю заготовок вплоть до получения готового образца. Каждый образец должен иметь паспорт (свидетельство, аттестат), в котором указываются действительные параметры и характеристики данного конкретного образца.

## Глава 12

# МАТЕРИАЛЫ, МЕТОДЫ И МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 12.1. Замена материала рабочего органа как путь повышения надежности дорожно-строительных машин

Исходя из определения эффективности, рассматриваемой ГОСТ Р ИСО 9000–2015<sup>35</sup> как соотношение между достигнутым результатом и использованными ресурсами, следует вывод о том, что своего максимального значения она достигает при работе каждой машины как можно дольше с максимальной производительностью и при минимальных затратах. Существует ряд факторов, приводящих к уменьшению технической производительности ДСМ. В частности, это [136]:

- осуществление капитального ремонта машины, снижающего ее производительность до 70...85 % относительно новой машины;
- износ зубьев и режущих кромок у рабочих органов, сказывающийся на снижении эффективности работы машины;

---

<sup>35</sup> ГОСТ Р ИСО 9000–2015 «Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь».

- износ шин, грунтозацепов, башмаков, приводящий к снижению тягового усилия;
- предупредительно-плановые ремонты;
- характер выполняемых работ – циклический или непрерывный.

Для пояснения последнего обстоятельства на рис. 63 приведены временные зависимости изменения тягового усилия  $P(t)$  для скрепера, бульдозера (машины циклического действия) и автогрейдера (машина непрерывного действия) на различных этапах рабочего цикла  $t_{\text{ц}}$ . Циклограмма скрепера показана на рис. 63 а, бульдозера – на рис. 63, б, и автогрейдера – на рис. 63, в. Цифрами на рис. 63 обозначены рабочие операции цикла: 1 – резание и копание грунта; 2 – транспортирование грунта; 3 – разгрузка; 4 – холостой ход; 5 – добор грунта и его перемещение; 6 – выглубление отвала; 7 – зарезание; 8 – квазиустановившийся режим копания; 9 – разворот (поворот).

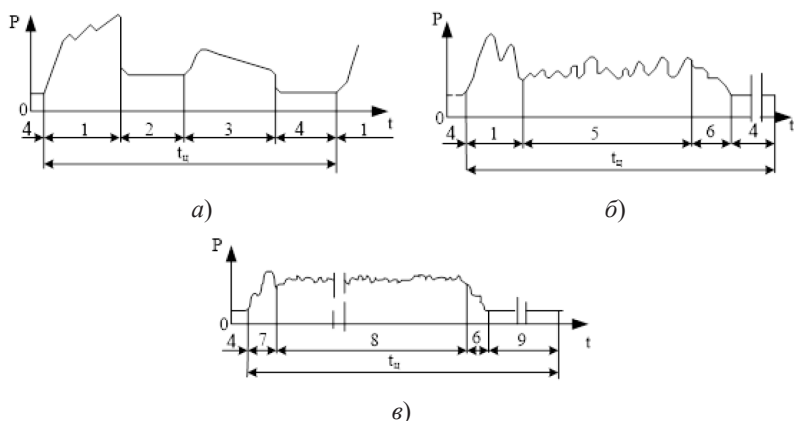


Рис. 63. Зависимость  $P = f(t)$

В работах циклического характера основная операция (воздействие рабочего оборудования на среду) занимает лишь часть

продолжительности цикла  $t_{ц}$ . Далее осуществляются вспомогательные операции (транспортирование, разгрузка и холостой ход), которые необходимы для возвращения к основной операции. Для разных машин доли основных и вспомогательных операций в циклах различны. Производительность машин непрерывного действия выше производительности машин циклического действия, что связано с непрерывным воздействием рабочего оборудования на среду в течение всего цикла. Рабочие и вспомогательные операции выполняются одновременно. Необходимые повороты и развороты машин для возобновления цикла являются непродолжительными по времени.

При наполнении ковша скрепера (рис. 63, а) тяговое усилие на колесах движителя повышается в 2–3 раза, при этом буксование движителя зачастую достигает до 100 %. При зарезании отвалом бульдозера (рис. 63, б) тяговое усилие также повышается в несколько раз относительно холостого хода. Значительные скачки тягового усилия в процессе работы автогрейдера отсутствуют (рис. 63, в).

Повышение производительности ДСМ может быть достигнуто либо за счет организационных мероприятий (сокращение простоев, улучшение загрузки ДСМ, улучшение организации производства, укрепление трудовой дисциплины, повышение квалификации и культурно-технического уровня машинистов и ИТР), либо путем технического совершенствования машин – их модернизации, компьютеризации работ, расширения наборов сменных рабочих органов, применения адаптирующегося рабочего оборудования и приспособлений, внедрения новых ДСМ для сокращения ручного труда и сбережения ресурсов [137].

Основную роль в оценке прочности рабочего элемента играет величина силы сопротивления копанью  $P_{к}$ , которая складывается из силы сопротивления грунта резанию  $P_{р}$ , сопротивления стружки  $P_{сц}$  и сопротивления перемещению призмы волочения  $P_{пв}$  [138]:

$$P_k = P_p + P_{cc} + P_{пв}.$$

Рассмотрим для определенности в качестве рабочего органа нож отвала бульдозера или автогрейдера. Согласно [138], конечное выражение для определения усилия копания выглядит следующим образом:

$$P_k = 10 \cdot C \cdot h^{1,35} \cdot (1 + 2,6 \cdot l) \cdot (1 + 0,01 \cdot \delta) + \Delta \cdot K_{сж} \cdot l \cdot h + g \cdot \frac{l \cdot (H - h)^2}{2 \cdot \operatorname{tg} \varphi_0 \cdot K_p} \cdot \gamma_r \cdot \operatorname{tg} \rho,$$

где  $C$  – число ударов плотномера;  $h$  – глубина резания;  $l$  – длина режущей кромки ножа;  $\delta$  –  $R_k = 10$  – угол резания;  $\rho$  – угол трения грунта по грунту;  $\Delta$  – коэффициент, связанный с величиной высоты отвала  $H$ ;  $g$  – ускорение свободного падения;  $K_{сж}$  – активная удельная (на единицу площади поперечного сечения стружки  $F$ ) сила сопротивления вырезаемой стружки продольному сжатию;  $\gamma_r$  – плотность грунта;  $\varphi_0$  – угол естественного откоса;  $K_p = (1,05 \dots 1,35)$  – коэффициент, учитывающий степень разрыхления грунта.

Видно, что правую часть данного соотношения составляют величины, связанные с характеристиками грунта, геометрическими параметрами ДСМ или с технологическими характеристиками процесса копания грунта. Сведения о материале рабочего органа ДСМ появляются после вычисления напряжений от действующего усилия  $P_k$  и сравнения его величины с пределом прочности или текучести материала для вычисления запаса прочности. При этом очевидно, что чем выше значения этих физико-механических материалов, тем больше запас прочности и, соответственно, выше уровень эксплуатационной надежности.

Одним из путей повышения надежности эксплуатации ДСМ является увеличение прочностных характеристик материалов, используемых для изготовления рабочих органов.

В настоящее время существует несколько направлений повышения прочности материалов за счет получения мелкозернистой структуры. В научно-технической литературе говорится о порошковых методах, осаждении из газовой фазы. Выделяются методы, связанные с интенсивной пластической деформацией [139].

Широкое распространение получил метод ТЦО материалов и их сварных соединений. Теоретические основы данного метода изложены в работе [140]. Отечественная и зарубежная техническая литература, посвященная прикладному применению данного направления, достаточно обширна. Во всех этих публикациях отмечается, что после термоциклической обработки в различных сталях и сварных соединениях фиксируется измельчение исходного зерна с одновременным повышением механических характеристик, в качестве которых взяты предел прочности, предел текучести и твердость [141].

В статье [142] изложены первые результаты исследований влияния количества циклов термической обработки сталей 09Г2С и 30MnB5 на размер зерна и физико-механические характеристики сталей (пределы прочности и текучести). Описаны методики и оборудование, примененные для проведения испытаний и анализа результатов. Кроме того, показано, что для данных сталей выполняется соотношение Холла – Петча, которое связывает предел текучести и предел прочности поликристаллического материала с размером зерна. В данной статье представлены результаты дополнительных исследований, которые касаются следующих моментов.

1. Анализ приведенных циклограмм работы некоторых типов ДСМ (см. рис. 63) показывает, что на протяжении рабочего цикла тяговое усилие, а следовательно, и нагрузки на рабочий орган машины не являются постоянными. Они носят циклический характер. Поэтому были проведены исследования циклической прочности рассматриваемых материалов.

2. Проведены фрактографические исследования поверхностей изломов образцов из сталей 09Г2С и 30МnВ5 при различных температурах.

3. Проведены исследования по определению микротвердости сварных швов и околошовных зон сталей 09Г2С и 30МnВ5.

Объектом исследований были выбраны широко применяемые в дорожно-строительных машинах стали 09Г2С и 30МnВ5. Цель исследований заключалась в сравнительном анализе микроструктуры и комплекса физико-механических характеристик данных сталей и их сварных соединений после термоциклической обработки для определения возможности замены стали 09Г2С на сталь 30МnВ5.

В табл. 14 приведен химический анализ сталей [143].

Таблица 14

**Химический состав сталей**

Марка стали	Химический состав, %								
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	B
09Г2С	0,11	0,68	1,33	0,008	0,015	0,03	0,02	0,03	–
30МnВ5	0,027–0,33	≤0,40	1,15–1,45	≤0,035	≤0,025	–	–	≤0,40	0,0008–0,0050

Сталь 09Г2С подвергалась отжигу при температуре 900 °С. Термообработка стали 30МnВ5 проводилась по режиму закалка (860...900) °С плюс отпуск (400...600) °С.

Термоциклическая обработка заключалась в проведении десяти циклов «нагрев до 780 °С – охлаждение».

Методики, форма образцов и оборудование для проведения металлографических исследований для определения размера зерна (металлографический микроскоп Olympus SpinSR10) и испытаний на растяжение (универсальная электромеханическая машина Instron 5969) описаны в [144].



Циклические испытания материалов проводились на серво-гидравлической испытательной системе UTM 100 кН, показанной на рис. 64.



Рис. 64. Испытательная система UTM 100 кН

Серво-гидравлическая испытательная система UT-04-0100 предназначена для статических и циклических испытаний металлических, деревянных, железобетонных и композитных материалов на сжатие, растяжение, изгиб, малоцикловую усталость, механику разрушения при комнатной температуре, раскрытие трещин в диапазоне нагрузок от 0 до 100 кН с целью определения их физико-механических характеристик.

В рамках данных исследований испытания проводились при нормальной и пониженных температурах от +20 до -80 °С

(выдержка в криокамере). Образцы вырезались из одношовной трубы диаметром 720 мм и толщиной стенки 10 мм. Испытания проводились по схеме изгиба вращающегося образца, цикл нагружения – симметричный, коэффициент асимметрии цикла составлял величину 0,1. Испытания образцов проводились на базе  $10^6$  циклов.

Фрактографический анализ изломов образцов сталей проводился с использованием сканирующего электронного микроскопа TESCAN VEGA с термоэмиссионным вольфрамовым катодом (рис. 65).



Рис. 65. Сканирующий электронный микроскоп TESCAN VEGA

Данный микроскоп позволяет получать СЭМ-изображения и проводить анализ элементного состава в реальном времени в одном окне программного обеспечения TESCAN Essence™, что значительно упрощает получение данных как о морфологии поверхности образца, так и о его локальном элементном составе и делает СЭМ TESCAN VEGA эффективным аналитическим

решением для проведения регулярного контроля качества материалов, анализа отказов и различных лабораторных исследований.

Диапазон энергий пучка, падающего на образец, от 200 эВ до 30 кэВ. Ток пучка – от 1 пА до 2 мкА с непрерывной регулировкой. Для изменения тока пучка в качестве устройства смены апертур используется электромагнитная линза. Увеличение – непрерывное от  $2\times$  до  $1\,000\,000\times$ .

Для полноты информации о свойствах исследуемых материалов приведем сведения об оборудовании, использованном для изучения распределения микротвердости по зонам сварного шва. Для стали 30MnB5 эти результаты подробно описаны в статье [145].

Измерение микротвердости в сварных соединениях осуществлялось с использованием универсального твердомера DuraVision-30 (рис. 66).



Рис. 66. Универсальный твердомер DuraVision-30

В конструкции твердомера имеется монолитная чугунная рама, за счет которой повышаются точность и стабильность измерений. Твердомер имеет возможность измерять твердость раз-

личными методами без изменения конструктива прибора, что свидетельствует об универсальности данного аппарата. Твердомер DuraVision-30 находит свое применение и в лабораторных условиях, и в производственном процессе.

Указанный прибор обладает следующими положительными качествами:

- нагрузки, возможные для применения, 30...30 000 Н;
- возможность установить рабочее расстояние до 400 мм;
- возможность исследования достаточно больших образцов массой до 200 кг;
- возможность функционировать как в ручном, так и в автоматическом режиме;
- возможность позиционировать место измерения при помощи лазера;
- организация освещения при помощи диодов;
- применение принципа замкнутого контура closed loop при осуществлении нагрузки на исследуемый объект.

В проведенных исследованиях измерение микротвердости проводилось при нагрузке 10 Н с выдержкой в течение 10 с.

В табл. 15 сведены результаты испытаний на растяжение (предел текучести  $\sigma_{0,2}$ , предел прочности  $\sigma_b$ ) и по определению среднего размера зерна  $d$  исследуемых сталей после термоциклической обработки.

Таблица 15

**Механические свойства сталей после термоциклической обработки**

Сталь	Характеристика	Количество термических циклов $N$								$S_\sigma$ , МПа
		0	1	2	3	4	6	7	10	
09Г2С	$\sigma_{0,2}$ , МПа	357	371	385	392	404	405	409	410	2,9
	$\sigma_b$ , МПа	446	468	482	491	499	502	503	507	4,4
	$d$ , мкм	32	16	13	11	10	9	8	7,5	–

Сталь	Характеристика	Количество термических циклов $N$								$S_{\sigma}$ , МПа
		0	1	2	3	4	6	7	10	
30MnB5	$\sigma_{0,2}$ , МПа	400	410	415	420	480	500	600	610	26,5
	$\sigma_b$ , МПа	650	750	760	785	850	950	998	1700	66,5
	$d$ , мкм	20	10	9	8	7	6	3	1,5	–

На рис. 67 представлены зависимость среднего размера зерна  $d$  от количества  $N$  циклов термоциклической обработки.

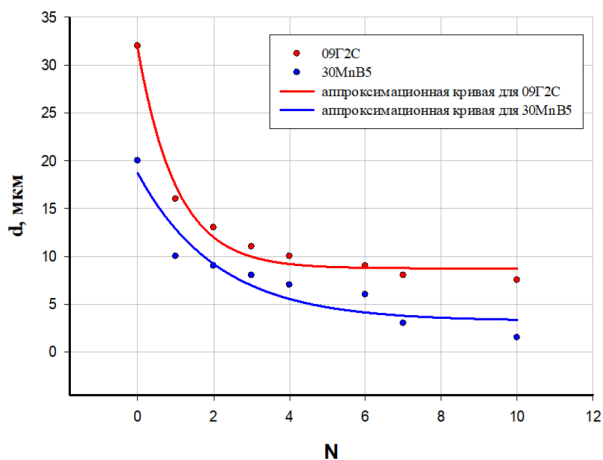


Рис. 67. Зависимость  $d = f(N)$

Зависимости  $d = f(N)$  описываются следующими аппроксимационными соотношениями, полученными при обработке данных в программе Sigma Plot. Здесь и далее для каждого соотношения приведено значение коэффициента регрессии  $R$ .

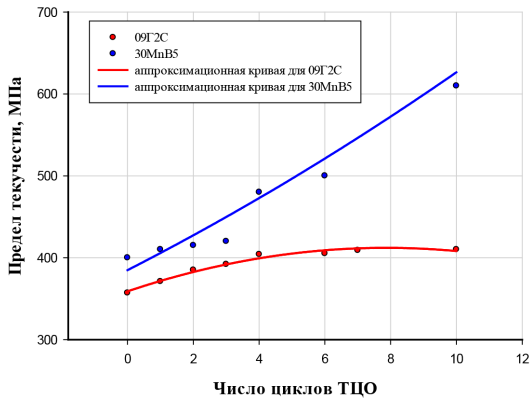
Общий вид:  $d = d_0 + a \times e^{-bN}$ .

Сталь 09Г2С:  $d_0 = 8,735$  мкм;  $a = 22,965$  мкм;  $b = 0,978$ ;  $R = 0,99$ .

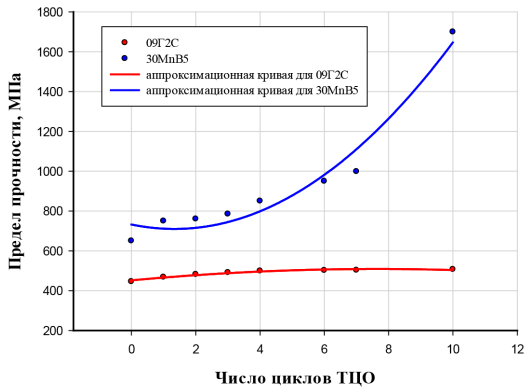
Сталь 30MnB5:  $d_0 = 3,237$  мкм;  $a = 15,456$  мкм;  $b = 0,476$ ;  $R = 0,95$ .

Рассмотрим зависимости предела текучести и предела прочности исследуемых сталей от числа циклов термической обработки.

На рис. 68 приведены зависимости  $\sigma_{0,2} = f(N)$  (рис. 68, а) и  $\sigma_b = f(N)$  (рис. 68, б).



а)



б)

Рис. 68. Зависимости  $\sigma_{0,2} = f(N)$  и  $\sigma_b = f(N)$

Общий вид аппроксимационных зависимостей функций  $\sigma_{0,2} = f(N)$  и  $\sigma_b = f(N)$  следующий.

Общий вид для предела текучести:  $\sigma_{0,2} = \sigma_{0,2}^0 + a_{0,2}N + b_{0,2}N^2$ .

Общий вид для предела прочности:  $\sigma_b = \sigma_b^0 + a_bN + b_bN^2$ .

Коэффициенты, входящие в данные соотношения, имеют следующие численные значения.

Сталь 09Г2С:  $\sigma_{0,2}^0 = 358,97$  МПа;  $a_{0,2} = 13,52$  МПа;  $b_{0,2} = -0,86$  МПа;  $R = 0,99$ .

$\sigma_b^0 = 451,83$  МПа;  $a_b = 14,96$  МПа;  $b_b = -0,98$  МПа;  $R = 0,98$ .

Сталь 30MnB5:  $\sigma_{0,2}^0 = 384,87$  МПа;  $a_{0,2} = 20,55$  МПа;  $b_{0,2} = 0,36$  МПа;  $R = 0,95$ ;

$\sigma_b^0 = 732,43$  МПа;  $a_b = -33,34$  МПа;  $b_b = 12,48$  МПа;  $R = 0,98$ .

Полученные зависимости показывают, что для стали 09Г2С изменения предела текучести и предел прочности заканчиваются после четвертого цикла термической обработки. Аналогичные характеристики для стали 30MnB5 показывают постоянное увеличение вплоть до 10-го цикла.

Если рассмотреть значения  $\sigma_{0,2}$  и  $\sigma_b$ , вычисленные по полученным зависимостям  $\sigma_{0,2} = f(N)$  и  $\sigma_b = f(N)$  в качестве средних значений, то можно объединить все экспериментальные данные в одну совокупность по соответствующим характеристикам и сталям и оценить значения средних квадратичных отклонений величин пределов текучести и прочности, а именно:

$$S_{\sigma} = S_{\sigma_{0,2}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\sigma_{0,2i}^3 - \sigma_{0,2i}^T)^2}{n-1}} \quad \text{и} \quad S_{\sigma} = S_{\sigma_b} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\sigma_{bi}^3 - \sigma_{bi}^T)^2}{n-1}}.$$

Здесь величины с индексом «э», где они в формулах относятся к экспериментальному результату, а с индексом «т» – к расчетному (по соответствующему соотношению). Величина  $n$  представляет собой количество экспериментальных точек по значениям  $N$ ,

в нашем случае  $n = 8$  (см. табл. 15). Вычисленные значения  $S_{\sigma}$  приведены в табл. 15.

Знание  $S_{\sigma}$  позволяет оценить коэффициенты вариации для значений пределов прочности и текучести исследуемых сталей. Для этого по всем экспериментальным значениям определяются средние величины пределов текучести  $\bar{\sigma}_{0,2}$  и прочности  $\bar{\sigma}_b$  (для каждой стали). Коэффициент вариации  $\omega$  определяется как отношения:

$$\omega_{0,2} = \frac{S_{\sigma_{0,2}}}{\bar{\sigma}_{0,2}} \quad \text{и} \quad \omega_b = \frac{S_{\sigma_b}}{\bar{\sigma}_b}.$$

Для 09Г2С:  $\bar{\sigma}_{0,2} = 391$  МПа; Для 30MnB5:  $\bar{\sigma}_{0,2} = 479$  МПа;  $\bar{\sigma}_b = 930$  МПа.

Примем для упрощения максимальное значение коэффициента вариации одинаковым для обеих сталей. Это значение 7 % для предела прочности стали 30MnB5.

Тогда, согласно<sup>36</sup>, с вероятностью 0,99 разность между двумя средними будет значимой при различии в 1,2 раза. Для меньших коэффициентов вариации эта величина будет меньше.

По представленным в табл. 15 величинам физико-механических характеристик получается, что по пределу текучести сталь 30MnB5 превышает величину 1,2 относительно стали 09Г2С после 4-го цикла ТЦО. По пределу прочности это превышение идет уже сразу после исходного состояния (0 циклов ТЦО).

В табл. 16 приведены результаты испытаний образцов сталей на циклическую прочность для трех значений частоты нагружения.

---

<sup>36</sup> Биргер И. А., Пановко Я. Г. Прочность. Устойчивость. Колебания. Справочник : в 3 т. Том 1. М. : Машиностроение, 1968. 831 с.



Таблица 16

## Результаты циклических испытаний

Сталь	Частота циклов $\omega$ , Гц	Показатель сопротивления усталости $\text{tg } \alpha_n$	Напряжение, соответствующее долговечности $N = 10^6$ циклов, МПа	Временное сопротивление разрыву $\sigma_b$ , МПа	$\chi = \frac{\sigma_{N=10^6}}{\sigma_b}$
09Г2С	2,0	0,2655	115	490	0,234
	2,7	0,3293	105	490	0,214
	100	0,1337	310	490	0,632
30МпВ5	2,0	0,0877	540	950	0,568
	2,7	0,1311	480	950	0,505
	46,7	0,1600	250	950	0,263

Сталь марки 09Г2С с увеличением частоты циклического нагружения показывает повышение циклической прочности, а сталь 30МпВ5, наоборот, снижение. Таким образом, при выборе материала для рабочих органов дорожно-строительных машин, работающих в одинаковых (похожих) условиях эксплуатации, при низких частотах нагружения целесообразнее использовать борсодержащую сталь 30МпВ5 вместо низколегированной стали 09Г2С.

На рис. 69 показаны фотографии (СЭМ-снимки) изломов образцов стали 30МпВ5, испытанных при разных температурах.

В результате визуального осмотра поверхности изломов очаги разрушения не выявлены. Характерные дефекты строения изломов не обнаружены. На поверхности изломов всех шести образцов характерно наличие трех зон, имеются утяжки.

На всех изображениях, представленных на рис. 69, цифрами обозначены: 1 – зона зарождения трещины; 2 – зона распространения трещины; 3 – зона утяжки; 4 – зона долома.

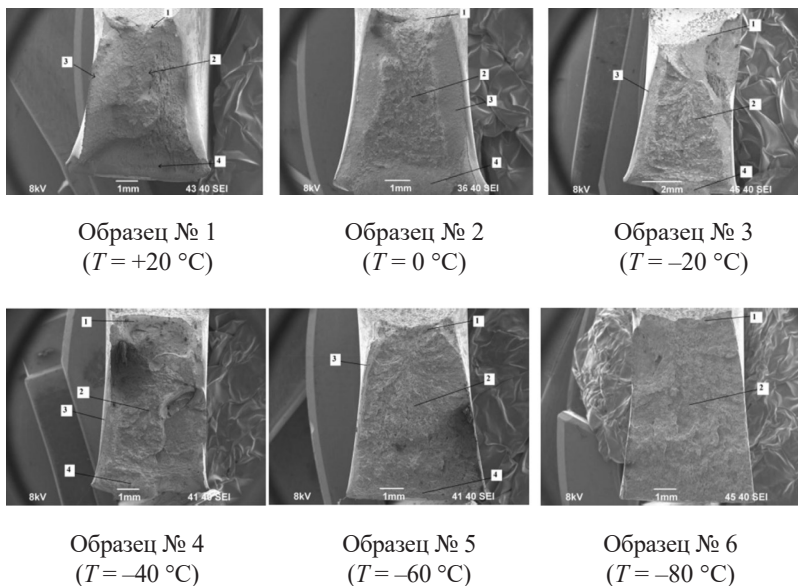


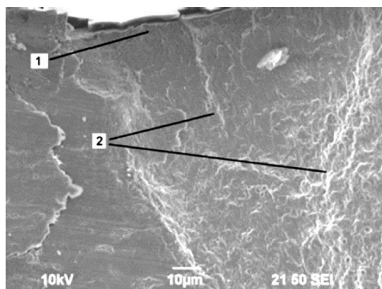
Рис. 69. Излом образцов из стали 30MnB5

На рис. 70 приведены СЭМ-снимки отдельных зон излома образца из стали 09Г2С.

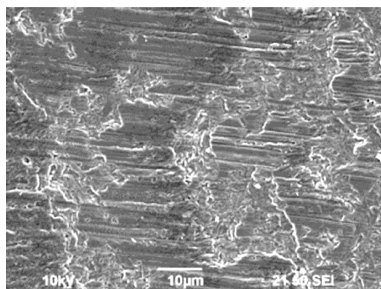
С понижением температуры испытания меняются размеры и соотношение площадей зон в изломах. Самая большая утяжка и долом у образцов № 1 и 2, у образца № 6 они не обнаруживаются (см. рис. 69). Зоны зарождения трещины по размерам близки у всех образцов, что задано наличием U-образного концентратора. Зона распространения трещин увеличивается по мере понижения температуры и при  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$  занимает практически всю площадь излома (см. рис. 69).

Из очагов разрушения выходят трещины, которые распространяются вглубь образца. В зоне стабильного роста трещин наблюдаются усталостные линии, их параллельное расположение позволяет классифицировать их как вязкие бороздки. Однако

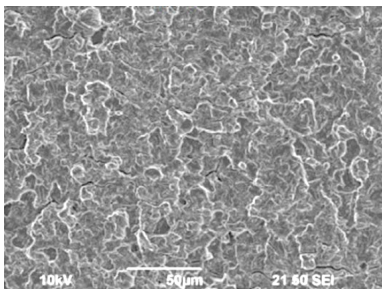
общее очертание фигур на фрактограмме фасеточное, что говорит о хрупком (квасихрупком) разрушении.



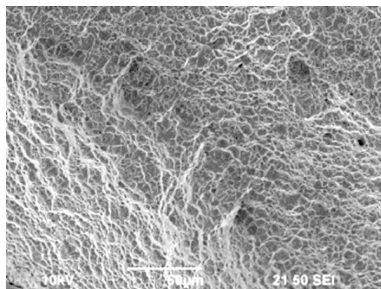
Очаг разрушения



Зона стабильного роста трещин



Зона ускоренного развития трещин



Зона доелома

Рис. 70. Зоны разрушения образца из стали 09Г2С

Зона ускоренного развития трещин в образце из стали 09Г2С (рис. 70) образована транскристаллитным разрушением. Имеются вторичные трещины (на снимке очага разрушения обозначены цифрой 2). Трещины короткие и не ветвящиеся, что характерно для вязких материалов. Топология зоны – фасетки квазискола; таким образом, наряду с признаками хрупкого разрушения имеются признаки пластической деформации. Разрушение при этом носит смешанный (хрупко-вязкий) характер.

Зона долома представляет собой совокупность ямок, вытянутых в направлении разрушения (равноосные ямки и ямки сдвига); таким образом, финал разрушения проходил по вязкому механизму.

В целом разрушение данного образца с линейным надрезом можно квалифицировать как хрупко-вязкое, а сам излом – квазихрупким.

На рис. 71 показаны точки измерения микротвердости в сварном шве с привязкой к его отдельным зонам – основной металл, зона термического влияния (ЗТВ) и собственно сварной шов.

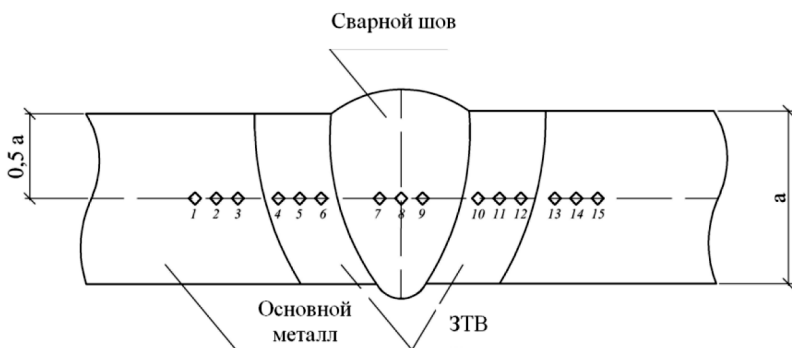


Рис. 71. Точки измерения микротвердости

Распределение микротвердости по точкам измерения для образца из стали 30MnB5 (толщина 3 мм) показано на рис. 72. Там же точками с привязкой к упомянутым выше зонам сварного шва показаны значения микротвердости для образца из стали 09Г2С<sup>37</sup>.

<sup>37</sup> Файрушин А. М., Каретников Д. В., Романчук А. С. Исследование влияния вибрационной обработки стали 09Г2С в процессе сварки на металл сварного шва // Современные проблемы машиностроения. Сб. научных трудов XI Международной научно-технической конференции. Томск. 2017. С. 50–58.

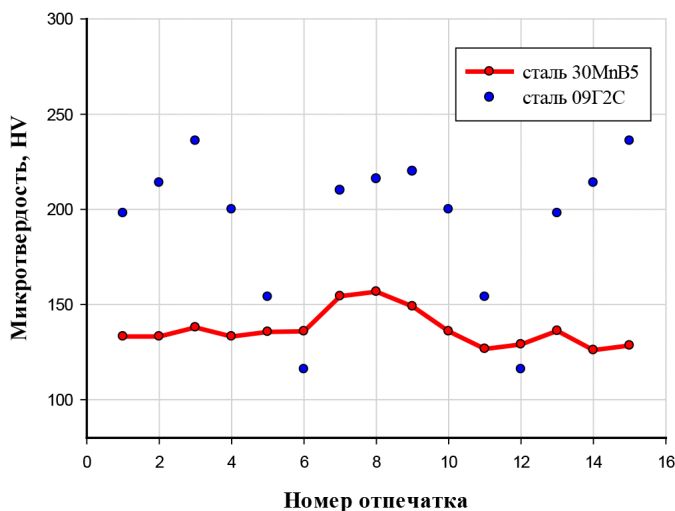


Рис. 72. Изменение микротвердости в различных зонах сварного соединения

Видно, что распределение микротвердости для различных зон сварного шва образца из стали 30MnB5 достаточно равномерное. Даже в зоне сварного шва превышение над зоной основного металла и ЗТВ незначительно – порядка (20...30) единиц. Для стали 09Г2С этот разброс значительно выше. Кроме того, микротвердость самого соединения значительно выше по сравнению со сталью 30MnB5. Это говорит о том, что сталь 09Г2С, имея высокий уровень микротвердости, оказывается более хрупкой (относительно стали 30MnB5). Это означает наличие низкой пластичности и повышенной чувствительности к концентраторам напряжений.

Проведенные исследования влияния количества циклов термической обработки сталей 09Г2С и 30MnB5 показали следующее. С увеличением числа циклов структура стали 09Г2С практически не изменяет значение среднего размера зерна начиная

с четвертого цикла. Средний размер зерна у стали 30MnB5 уменьшается вплоть до 10-го цикла.

Установлена прямая зависимость уровня пределов пластичности и прочности от среднего размера зерна, а следовательно, и от количества циклов термического воздействия «нагрев – охлаждение». Чем мельче зерно, тем выше механические характеристики.

Распределение микротвердости для различных зон сварного шва образца из стали 30MnB5 достаточно равномерное. Уровень микротвердости стали 09Г2С выше и имеет больший разброс. Данное обстоятельство является положительным моментом в вопросе чувствительности к концентраторам напряжений.

Исследования вибрационных характеристик сталей показали, что при низких частотах предпочтительнее использование изделий из стали 30MnB5.

Таким образом, сталь 30MnB5 с точки зрения эксплуатационных характеристик ДСМ предпочтительнее стали 09Г2С для изготовления ножей, отвалов и других элементов рабочего оборудования дорожно-строительных машин.

## Библиографический список

1. *Алешин Н. П., Князев В. Д., Землянский А. В.* Автоматизация проектирования методов и средств ультразвукового контроля сложных объектов с неоднородными физико-акустическими параметрами // Дефектоскопия. 1995. № 9. С. 14–19.
2. *Алипов А. В.* [и др.]. Акустико-эмиссионный метод диагностики резервуарных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 1996. № 7. С. 24–25.
3. *Аль Малюль Р. М.* Надежность тонкостенных металлических конструкций при коррозионном износе : дис. ... д-ра техн. наук. М., 1997. 313 с.
4. *Бабаев А. В.* Изменение сопротивления усталости сварных соединений с технологическими дефектами под влиянием остаточных напряжений // Информ. мат-лы ИЭС им. Е. О. Патона. 1977. Вып. 2. С. 71–78.
5. *Бабич Э. А., Кузьмин В. А., Любезнов В. Н.* Результаты экспертного технического диагностирования сосудов насосно-аккумуляторных станций // Безопасность труда в промышленности. 2000. № 2. С. 21–23.
6. *Бадалян В. Г., Вопилкин А. Х.* Опыт применения УЗ экспертной системы с когерентной обработкой данных «Авгур» для контроля сварных швов промышленных объектов // Тяжелое машиностроение. 2003. № 3. С. 27–30.
7. *Бархатов В. А.* Развитие методов ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений // Дефектоскопия. 2003. № 1. С. 28–55.
8. *Белов В. М.* Дефектоскопия потенциально опасных участков трубопроводов методом акустической эмиссии // Безопасность труда в промышленности. 1994. № 7. С. 14–17.
9. *Белокур И. П.* Дефектология и неразрушающий контроль : учеб. пособие. Киев : Выща шк., 1990. 207 с.
10. *Белокур И. П., Коваленко В. А.* Дефектоскопия материалов и изделий. Киев : Техника, 1989. 196 с.
11. *Щербаков А. П., Пушкарев А. Е., Манвелова Н. Е.* Рабочие механизмы строительных машин и способы технологического обеспечения прочности сварных соединений из высокопрочных сталей // Недвижимость : экономика, управление. 2020. № 1. С. 63–68.

12. *Бельчук Г. А., Гатовский К. М., Кох Б. М.* Сварка судовых конструкций. Л. : Судостроение, 1980. 448 с.
13. *Бородин Ю. П., Харебов В. Г.* Система диагностического мониторинга опасных производственных объектов // Контроль. Диагностика. 2003. № 3. С. 28–32.
14. *Винокуров В. А., Куркин С. А., Николаев Г. А.* Сварные конструкции. Механика разрушения и критерии работоспособности. М. : Машиностроение, 1996. 576 с.
15. *Галунов В. А.* Методы и средства НК бетона и железобетонных изделий // В мире НК. 2002. № 2 (16). С. 24–25.
16. *Щербаков А. П.* Влияние деформационного воздействия на магнитные свойства различных зон сварных соединений из конструкционной стали Ст3 // Мат-лы Международной научно-технической конференции молодых ученых [Белгород, 25–27 мая 2020 г.]. Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2020. С. 3052–3056.
17. *Гиллер Г. А., Мозильнер Л. Ю.* Современные ультразвуковые толщиномеры. Новые возможности // В мире НК. 1999. № 5. С. 6–9.
18. *Глазков Ю. А., Беда П. И.* К проблеме обеспечения дефектоскопической контролепригодности деталей технических объектов // Контроль. Диагностика. 1998. № 1. С. 10–14.
19. *Голубев А. И., Шляфернер А. М.* Эффективные способы защиты металлических конструкций от коррозии в процессе эксплуатации // Промышленное строительство. 1982. № 2. С. 18–20.
20. *Щербаков А. П.* Выбор материала и метода повышения износостойкости элементов строительных машин // Вестник СибАДИ. 2020. № 17(4). С. 464–475.
21. *Щербаков А. П.* Экспериментальные исследования влияния термической обработки на свойства сварных соединений рабочих механизмов дорожно-строительных машин // Вестник СибАДИ. 2020. № 17(6). С. 664–675.
22. *I. Polyansky, I. Sizov, U. Mishigdorzhyn, V. Butukhanov.* Improvement of the heat resistance of carbon steels by thermocycling thermochemical treatment with self-protective pastes based on boron carbide and aluminum // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 116. Pp. 1–5.
23. *Floreen S., Hayden H. W.* The deformation and fracture of stainless steels having microduplex structures (Deformation characteristics and fracture strength of Cr-Ni stainless steels with fine scale two-phase ferrite plus austenite microstructures) // ASM Transactions Quarterly. 1968. Vol. 61. Pp. 489–499.
24. *Мьяльников В. В.* Влияние частоты нагружения на усталость конструкционных материалов // Наука и техника. 2019. № 5. С. 52–55.



25. Прохоров В. Ю., Быков В. В. Пути повышения долговечности и износостойкости подшипника скольжения навесного технологического оборудования // НиКа. 2017. № 1. С. 71–74.
26. Безлюдько Г. Я., Мужижкий В. Ф., Попов Б. Е. Магнитный контроль (по коэрцитивной силе) НДС и остаточного ресурса стальных МК // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 1999. № 9. Т. 65. С. 53–57.
27. Зайцев А. И. Перспективные направления развития металлургии и материаловедения стали // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2019. Т. 75. № 4. С. 417–426.
28. Ведяков И. И., Одесский П. Д. Современные отечественные стандарты и вопросы расширения применения металлических конструкций в строительстве // Вестник НИЦ «Строительство». 2019. № 3(22). С. 42–53.
29. Щербаков А. П., Пушкарев А. Е., Виноградова Т. В. Анализ влияния термоциклической обработки сталей 09Г2С и 30MnB5 на прочностные характеристики рабочих органов дорожно-строительных машин // Вестник СибАДИ. 2021. № 18(2). С. 180–190.
30. Горижкий В. М., Дубов А. А., Денин Е. А. Исследование структурной повреждаемости стальных образцов с использованием метода магнитной памяти металла // Контроль. Диагностика. 2000. № 7. С. 23–27.
31. Городович В. В. [и др.]. Опыт ОАО «ВНИКТИНЕФТЕХИМ-ОБОРОДУВАНИЕ» в проведении акустико-эмиссионного контроля объектов нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности // Тезисы доклада XVI Российской научно-технической конференции «Неразрушающий контроль и диагностика» [СПб. : 9–12 сентября, 2002].
32. Щербаков А. П. К методике повышения прочностных свойств металла в различных зонах сварных соединений металлоконструкций строительных машин // Мат-лы Международной научно-технической конференции молодых ученых [Белгород, 25–27 мая 2020 г.]. Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2020. С. 3042–3044.
33. ГОСТ 14782–86. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые.
34. ГОСТ 16504–81. Испытания и контроль качества. Термины и определения.
35. ГОСТ 3242–97. Дефекты соединений при сварке металлов плавлением. Классификация, обозначение и определение.
36. Губайдуллин Г. А. Приборный комплекс оперативного контроля прочности бетона // В мире НК. 2002. № 2. С. 21–22.

37. Гуменюк В. А., Сульженко В. А., Яковлев А. В. Современные возможности и тенденции развития акустико-эмиссионного метода // В мире НК. 2000. № 3 (9). С. 8–12.
38. Гурвич А. К., Демидко В. Г., Химченко Н. В. Классификация дефектов сварных стыковых соединений по данным ультразвукового контроля // Автомат. сварка. 1979. № 4. С. 38–39.
39. Данилов В. Н., Воронков В. А. О построении АРД-диаграмм // В мире НК. 2001. № 2 (12). С. 20–22.
40. Денисов Л. С. Повышение качества сварки в строительстве. М. : Стройиздат, 1982. 160 с.
41. Дубов А. А. Диагностика прочности оборудования и конструкций с использованием магнитной памяти металла // Контроль. Диагностика. 2001. № 6. С. 19–29.
42. Дубов А. А. Диагностика трубопроводов и сосудов с использованием метода магнитной памяти металла // Безопасность труда в промышленности. 1997. № 6. С. 27–31.
43. Дубов А. А., Встовский Г. В. Интерпретация основного диагностического параметра, используемого при контроле труб, по методу магнитной памяти металла // Контроль. Диагностика. 1999. № 3. С. 3–8.
44. Дубов А. А. Метод магнитной памяти металла – новое направление в технической диагностике оборудования и конструкций. Итоги развития и внедрения. Вопросы стандартизации // Контроль. Диагностика. 2000. № 11. С. 31–32.
45. Дубов А. А., Демин Е. А., Миляев А. И., Стеклов О. А. Опыт контроля напряженно-деформированного состояния газопроводов с использованием метода магнитной памяти металла в сравнении с традиционными методами и средствами контроля напряжений // Контроль. Диагностика. 2002. № 4. С. 53–56.
46. Дубов А. А. Способ определения предельного состояния металла // Тезисы докладов XVI Российской научно-технической конференции «Неразрушающий контроль и диагностика» [СПб., 9–12 сентября 2002 г.].
47. Еремин К. И., Ницета С. А. Оценка остаточного ресурса строительных металлоконструкций по результатам натурных испытаний // Заводская лаборатория. 1997. № 3. С. 39–41.
48. Ермолов И. Н., Останин Ю. Я. Методы и средства неразрушающего контроля качества. М. : Высш. шк., 1988. 368 с.
49. Жук Н. П. Курс теории коррозии и защиты металлов. М. : Металлургия, 1976. 472 с.
50. Звездов А. И. Бетон и железобетон – проблемы и решения // Промышленное и гражданское строительство. 2002. № 9. С. 4–6.

51. *Иванов В. И., Власов И. Э.* Некоторые проблемы неразрушающего контроля // Дефектоскопия. 2002. № 7. С. 82–93.
52. *Иванов Е. А.* [и др.]. Аттестация – критерий технологической дисциплины НК на опасных производственных объектах // В мире НК. 2002. № 3(17). С. 8–10.
53. *Иванов П. М.* Прогнозирование долговечности элементов стальных строительных ферм покрытия промышленных зданий с агрессивной средой : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1983. 20 с.
54. Инструкция по визуальному и измерительному контролю РД 34.10.130–96. – СПб. : ДЕАН, 2001. 120 с.
55. *Казаков О. Н., Сайфутдинов М. И.* Эффективность применения метода акустической эмиссии при диагностике магистральных нефтепроводов // Безопасность труда в промышленности. 2000. № 4. С. 25–27.
56. *Кальгин Ю. А.* Современные тенденции в реализации приборов неразрушающего контроля // Тезисы докладов XVI Российской научно-технической конференции «Неразрушающий контроль и диагностика» [СПб. : 9–12 сентября, 2002].
57. *Кеткович А. А., Филинов М. В.* Компьютерная телевизионная дефектоскопическая система ДХ2 для контроля внутренней поверхности трубопроводов // Контроль. Диагностика. 1998. № 1. С. 45–46.
58. *Клевцов В. А., Коревицкая М. Г., Тухтаев Б. Х.* Неразрушающий контроль при мониторинге возведения многоэтажных зданий из монолитного железобетона // Промышленное и гражданское строительство. 2002. № 9. С. 34–36.
59. *Клевцов В. А., Коревицкая М. Г.* Об организационно-технических проблемах НК прочности бетона // В мире НК. 2002. № 2(16). С. 16–17.
60. *Клюев В. В., Ковалев А. В., Самокрутов А. А.* Рынок средств УЗК – современное состояние // В мире НК. 2001. № 1(11). С. 34–39.
61. *Козут Н. С.* Трещиностойкость конструкционных материалов. Львов : Высша школа : Изд-во при Львовском ун-те, 1986. 160 с.
62. *Козлов В. Н., Подольский В. И., Самокрутов А. А., Шевалдыкин В. Г.* Оценка состояния железобетонных опор контактной сети ультразвуковым прибором поверхностного прозвучивания // В мире НК. 2000. № 1(7). С. 46–47.
63. *Коллакот Р.* Диагностика повреждений ; пер. с англ. М. : Мир, 1989. 512 с.
64. *Коллинз Дж.* Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение. М. : Мир, 1984. 624 с.
65. *Колоколова Н. Н.* Экспертиза технического состояния действующих производств // Безопасность труда в промышленности. 1996. № 5. С. 43–44.
66. Контроль качества сварки / Под ред. В. Н. Волченко. – М. : Машиностроение, 1975. 328 с.

67. Коррозия : справочник / Под ред. Л. Л. Шрайера. М. : Металлургия, 1981. 632 с.
68. Коцаньда С. Усталостное разрушение металлов ; пер. с польск. М. : Металлургия, 1976. 455 с.
69. Кретов Е. И. УЗ-дефектоскопы на российском рынке // В мире НК. 1998. № 2. С. 6–9.
70. Кретов Е. Ф. Классификация приборов акустического контроля // В мире НК. 2002. № 1. С. 9–10.
71. Кретов Е. Ф. Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении : учеб. пособие. СПб. : Радиоавионика, 1995. 328 с.
72. Марков А. А., Захарова О. Ф., Масыгин В. В. Применение развертки типа В для обнаружения трещин в зоне отверстий болтовых стыков железнодорожных рельсов // Дефектоскопия. 1999. № 6. С. 78–92.
73. Махненко В. И., Великоиваненко Е. А., Розынка Г. Ф. Распределение напряжений и деформаций вдоль фланговых швов // Автоматическая сварка. 1985. № 5. С. 3–10.
74. Машиностроение. Энциклопедия. Измерения, контроль, испытания и диагностика / Под ред. В. В. Клюева. М. : Машиностроение, 1996. 464 с.
75. Методика технического диагностирования криогенных резервуаров с термоизоляционным кожухом на основе вакуума. СПб. : ФГУП «ЦНИИ им. академика А. Н. Крылова», ООО «ПУСК», 2001. 44 с.
76. Маркушев М. В. К вопросу об эффективности некоторых методов интенсивной пластической деформации, предназначенных для получения объемных наноструктурных материалов // Письма о материалах. 2011. Т. 1. С. 36–42.
77. Gleiter, H. Nanostructured materials: basid concepts and microstructure // Acta materialia. 2000. Vol. 48. № 1. 29 p.
78. Московенко И. Б. Низкочастотный акустический контроль физико-механических свойств строительных и огнеупорных изделий // В мире НК. 2002. № 2(16). С. 26–28.
79. Нейфельд И. Е., Фалькевич А. С., Ливищ Л. С. Контроль качества сварных соединений в строительстве. М. : Стройиздат, 1968. 176 с.
80. Неразрушающий контроль и диагностика : справочник / Под ред. В. В. Клюева. М. : Машиностроение, 2003. 656 с.
81. Неразрушающий контроль металлов и изделий: справочник / Под ред. Г. С. Самойловича. М. : Машиностроение, 1976. 456 с.
82. Оборудование для дистанционного визуально-измерительного контроля в промышленности компании EVEREST VIT. Рекламный проспект. URL: [www.everestvit.com](http://www.everestvit.com)

83. Павлий А. В., Глабец С. Н., Рюмишн В. В. Вихретоковая дефектоскопия: аппаратура и возможности // В мире НК. 2000. № 1. С. 3–5.
84. Панасюк В. В., Андрейкив А. Е., Ковчик С. Е. Методы оценки трещиностойкости конструкционных материалов. Киев : Наук. думка, 1977. 277 с.
85. Пат. 2082163, Российская Федерация. Ультразвуковой низкочастотный преобразователь / В. Н. Козлов, А. А. Самокрутов, В. Г. Шевалдыкин.
86. Valiev, R. Z., Murashkin, M. Yu., Semenova, I. P. Grain boundaries and mechanical properties of ultrafine-grained metals // Metallurgical and Materials Transactions. Vol. 41, issue 4. 2010. 816 p.
87. Бубликов Ю. А. Основные направления повышения свойств конструкционных сталей феррито-перлитного класса // ВЕЖПТ. 2014. № 11(72). С. 81–82.
88. Пашин В. М. [и др.]. Программно-аппаратурный комплекс и новые возможности в акустико-эмиссионной диагностике корпусных конструкций // Тяжелое машиностроение. 2003. № 3. С. 22–26.
89. Полтавцев С. И., Стеклов О. И. Проблемы и пути повышения долговечности и надежности сварных конструкций объектов повышенной опасности // Сварочное производство. 1996. № 5. С. 2–3.
90. Постановление Правительства РФ от 28.03.2001 № 241.
91. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий / под ред. В. В. Клюева. М. : Машиностроение, 1986. Кн. 1. 488 с.
92. Пронякин В. Т., Дубинин Г. В., Грушин С. А. О возможности выявления сверхтонких дефектов ультразвуковым методом // Дефектоскопия. 1983. № 7. С. 91–93.
93. Пронякин В. Т., Рыбаков Н. К., Панченко Ю. А. Ультразвуковая дефектоскопия сварных соединений тонкостенных изделий // Сварочное производство. 1998. № 4. С. 45–47.
94. Пустовой В. Н. [и др.]. Опыт применения акустико-эмиссионного метода для контроля серповидных подвесок локомотива // В мире НК. 2002. № 1(15). С. 57–60.
95. Реклама компании «ИНТЕРЮНИС». URL: [www.jnterunis.ru](http://www.jnterunis.ru)
96. Реклама научно-технической ассоциации «Тестрон». URL: [www.testron.ru](http://www.testron.ru)
97. Ринкевич А. Б., Смородинский Я. Г. Анализ параметров и технических характеристик современных ультразвуковых дефектоскопов общего назначения // Дефектоскопия. 2002. № 9. С. 3–26.
98. Розина М. В., Яблонник Л. М., Васильева В. Д. Неразрушающий контроль в судостроении. Л. : Судостроение, 1983. 152 с.
99. Самокрутов А. А. [и др.]. А1208 – простой и сложный ультразвуковой толщиномер // В мире НК. 2003. № 2(20). С. 38–40.

100. Семенко Н. Г. Метрологическое обеспечение контроля и испытаний // Дефектоскопия. 1997. № 4. С. 96–100.
101. Сирота Г. А. Технические эндоскопы – приборы для визуального контроля труднодоступных объектов // В мире НК. 2000. № 2(8). С. 4–7.
102. Система неразрушающего контроля. Аттестация лабораторий // Сб. документов Гос. предприятия НТЦ по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России. 2000. Сер. 28. Вып. 1. 100 с.
103. Соколов А. Г. Сравнительный анализ технических ультразвуковых дефектоскопов // В мире НК. 2002. № 1(15). С. 12–16.
104. Соснин Ф. Р. Визуальный контроль сварных соединений заводская лаборатория // Диагностика материалов. 1998. Т. 64. № 2. С. 62–64.
105. Средства измерений и испытаний строительной продукции, прошедшие сертификационные испытания // Бюлл. строительной техники. 2001. № 6. С. 20–21.
106. Средства неразрушающего контроля фирмы PANAMETRICS. Рекламный проспект. URL: [www.pergam.ru](http://www.pergam.ru)
107. Суворов А. Л. Дефекты в металлах. М. : Наука, 1984. 176 с.
108. Сыркин М. М. Повышение достоверности автоматизированного ультразвукового контроля // Дефектоскопия. 2003. № 2. С. 11–23.
109. Технические средства диагностирования / Под общ. ред. В. В. Клюева. М. : Машиностроение, 1989. 516 с.
110. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. акад. Б. Е. Патона. М. : Машиностроение, 1974. 778 с.
111. Толунов А. В., Розозин В. Б., Шерман О. А. Ультразвуковая толщинометрия: повышение помехоустойчивости // В мире НК. 2000. № 3(9). С. 17–18.
112. Троицкий В. А., Радько В. П., Демидко В. Г. Дефекты сварных соединений и средства их обнаружения. Киев : Выща шк., 1983. 144 с.
113. Троицкий В. А., В Козлов. С., Демидко В. Г. Классификация сварных швов по дефектности на основании результатов магнитографического контроля // Автомат. сварка. 1980. № 7. С. 55–58.
114. Троицкий В., А. Трущенко А. А., Белокур И. П. Контроль качества сварки. Киев : Наук. думка, 1983. 64 с.
115. Троицкий В. А., Радько В. П., Демидко В. Г., Бобров В. Т. Неразрушающий контроль качества сварных конструкций. Киев : Техніка, 1986. 159 с.
116. Троицкий В. А. Особенности неразрушающего контроля и диагностики строительных сооружений // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2002. № 2. С. 24–29.
117. Щербаков А. П. К выбору методов ускоренных коррозионных испытаний конструкционных сталей / А. П. Щербаков // Мат-лы Международной

научно-технической конференции молодых ученых [Белгород, 25–27 мая 2020 г.]. Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2020. – С. 3045–3051.

118. *Труфяков В. И.* Усталость сварных соединений. Киев : Наук. думка, 1973. 216 с.

119. *Трущенко А. А.* Сквозные дефекты сварных соединений // Дефектоскопия. 1978. № 6. С. 52–57.

120. *Финкель В. М.* Портрет трещины. М. : Металлургия, 1981. 160 с.

121. *Хананетов М. В.* Контроль качества сварных соединений. М. : Стройиздат, 1979. 136 с.

122. *Чистяков В. В., Молотков С. Л.* Сравнительный анализ технических возможностей ультразвуковых дефектоскопов общего назначения // В мире НК. 2002. № 2(16). С. 40–44.

123. *Чоклов Д.* Влияние подрезов на усталостную прочность стыковых сварных соединений углеродистой стали // Сб. СЭВ по сварке. 1977. № 2. С. 29–36.

124. *Чуйков С. П., Чуприн В. А.* Технологические возможности ультразвуковых дефектоскопов фирмы «Намикон» // Техническая диагностика и НК. 1995. № 4. С. 35–38.

125. *Шевальдыкин В. Г., Самокрутов А. А., Козлов В. Н.* Поперечные ультразвуковые волны в эхо-импульсной дефектоскопии опор трубопроводов // Тезисы доклада XXXI Международной конференции «Диагностика трубопроводов» [М., 2001. С. 182].

126. *Шелихов Г. С., Глазков Ю. А.* Неразрушающий контроль при исследовании причин отказов авиационной техники // Контроль. Диагностика. 1998. № 1. С. 14–16.

127. *Ширяев А. М., Белоусов П. К.* Акустико-эмиссионный контроль контейнеров для жидкого хлора // Тезисы доклада XVI Российской научно-технической конференции «Неразрушающий контроль и диагностика» [СПб. : 9–12 сентября, 2002].

128. *Штенгель В. Г.* О контроле технического состояния эксплуатируемых массивных железобетонных конструкций // В мире НК. 2000. № 4(10). С. 14–16.

129. *Штенгель В. Г.* О методах и средствах НК для обследования эксплуатируемых железобетонных конструкций // В мире НК. 2002. № 2(16). С. 12–15.

130. *Щербинский В. Г., Артемьев С. А., Красковский А. С.* Процессорный ультразвуковой дефектоскоп общего назначения // Дефектоскопия. 1999. № 1. С. 32–34.

131. Шербинский В. Г., Алешин Н. П. Ультразвуковой контроль сварных соединений. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. 496 с.
132. Юшин А. В., Быков С. П., Димов С. В. Акустико-эмиссионный контроль мостовых кранов // Тезисы доклада XVI Российской научно-технической конференции «Неразрушающий контроль и диагностика» [СПб. : 9–12 сентября, 2002].
133. Krause, M. Ultrasonic imaging of concrete members using an array system / M. Krause, F. Mielentz, B. Milchman // Insight, 2000. V 42. No 7. P. 447–450.
134. Nondestructive Testing Encyclopedia. URL: <http://www.ndt.net/article/az/ndtmain.htm>
135. Underwood, A. C. It pipe to understand pipeline standarts // Welding Design and Fabrication, 1979. V. 52. № 2. P. 56–61.
136. Scherbakov, A., Babanina, A., Graboviy, K.: Acting Stresses in Structural Steels During Elastoplastic Deformation. In: Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 1259, pp. 298–311 (2021). URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-57453-6\\_26](https://doi.org/10.1007/978-3-030-57453-6_26)
137. Scherbakov, A., Babanina, A., Kochetkov, I., Khoroshilov, P.: Technical condition of welded load-bearing metal structures of operated agricultural hoisting cranes. In: E3S Web of Conferences, vol. 175, 11005 (2020). URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017511005>
138. Scherbakov, A., Babanina, A., Matushevich, A.: Passive Probe-Coil Magnetic Field Test of Stress-Strain State for Welded Joints. In: Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 1259, pp. 312–323 (2021). URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-57453-6\\_27](https://doi.org/10.1007/978-3-030-57453-6_27)
139. Scherbakov A., Monastyreva D., Smirnov V.: Passive fluxgate control of structural transformations in structural steels during thermal cycling. In: E3S Web of Conferences, vol. 135, 03022 (2019). URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913503022>
140. Scherbakov A., Sklyarova A., Pushkarev A., Petrov A.: Destruction of Welded Metal Structures of Construction Machines Operated in Corrosive Environments. In: Smart Innovation, Systems and Technologies, vol. 247, pp. 557–573 (2022). URL: [https://doi.org/10.1007/978-981-16-3844-2\\_50](https://doi.org/10.1007/978-981-16-3844-2_50)
141. Scherbakov A., Lukashuk E., Pushkarev A., Vinogradova T.: The Influence of Deformation and Thermal Effects on the Structure and Properties of the Metal of Welded Structure Elements of Lifting Cranes. In: Smart Innovation, Systems and Technologies, vol. 247, pp. 539–555 (2022). URL: [https://doi.org/10.1007/978-981-16-3844-2\\_49](https://doi.org/10.1007/978-981-16-3844-2_49)
142. Scherbakov A., Babanina A., Solovyeva E., Aleksandrovskiy M.: Mechanisms of construction machines and selection of steels for the manufac-



ture of welded metal structures. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 1001, 012012 (2020). URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1001/1/012012>

143. Scherbakov, A., Babanina, A., Solovyeva, E., Aleksandrovskiy, M.: Materials and Methods of Experimental Studies of Welded Metal Structures of Construction Machines. In: Lecture Notes in Civil Engineering, vol. 130 LNCE, pp. 572–586 (2021). URL: [https://doi.org/10.1007/978-981-33-6208-6\\_57](https://doi.org/10.1007/978-981-33-6208-6_57)

144. Scherbakov, A., Babanina, A., Breskich, V., Klyovan, V.: The Impact of External Influences on the Characteristics of Metals of Welded Structures of Construction Machines. In: Lecture Notes in Networks and Systems. Vol. 247, pp. 973–982 (2022). URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-80946-1\\_88](https://doi.org/10.1007/978-3-030-80946-1_88)

145. Scherbakov, A., Babanina, A., Kuzbagarova, E., Kuzbagarov, A. : Phased Passive Fluxgate Control of Structural Changes in Low-Carbon and Low-Alloy Steels of Construction Machines. In: Lecture Notes in Networks and Systems. Vol. 247, pp. 143–157 (2022). URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-80946-1\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-030-80946-1_15)

## Оглавление

Список сокращений . . . . .	3
Введение . . . . .	5
<b>Глава 1. Специальные знания о сварных соединениях в судебной экспертизе . . . . .</b>	<b>7</b>
1.1. Основные формы использования специальных знаний в судопроизводстве и принципы судебно-экспертной деятельности . . . . .	7
1.2. Нормативные основы проведения судебно-экспертных исследований . . . . .	17
1.3. Научно-методическое обеспечение производства судебных экспертиз . . . . .	24
<b>Глава 2. Виды дефектов . . . . .</b>	<b>36</b>
2.1. Классификация сварочных дефектов . . . . .	37
2.2. Дефекты формирования сварного шва . . . . .	40
2.3. Дефекты металлургического, гидродинамического, термодинамического происхождения . . . . .	46
2.4. Эксплуатационные дефекты . . . . .	59
<b>Глава 3. Влияние дефектов на работоспособность сварных соединений . . . . .</b>	<b>76</b>
3.1. Влияние плоскостных и объемных дефектов . . . . .	80
3.2. Критерии оценки дефектов сварных соединений . . . . .	89

<b>Глава 4. Контроль качества сварных соединений . . . . .</b>	<b>93</b>
4.1. Предупредительный контроль . . . . .	97
4.2. Контроль основных и сварочных материалов . . . . .	98
4.3. Контроль подготовки изделий под сварку, сварочного оборудования и технологии сварки . . . . .	102
4.4. Контроль квалификации сварщиков . . . . .	105
4.5. Разрушающие методы контроля качества . . . . .	107
4.6. Неразрушающие методы контроля качества . . . . .	128
<b>Глава 5. Выбор методов контроля . . . . .</b>	<b>205</b>
5.1. Факторы, влияющие на выбор методов контроля . . . . .	210
5.2. Чувствительность методов неразрушающего контроля . . . . .	220
5.3. Разрешающая способность аппаратуры . . . . .	222
5.4. Достоверность результатов контроля . . . . .	222
5.5. Общие требования к контролерам-дефектоскопистам . . . . .	223
5.6. Техника безопасности при контроле качества . . . . .	224
<b>Глава 6. Диагностический мониторинг . . . . .</b>	<b>225</b>
<b>Глава 7. Контроль качества сварных соединений в строительстве . . . . .</b>	<b>232</b>
7.1. Контроль качества сварных соединений арматурных конструкций . . . . .	232
7.2. Контроль качества строительных железобетонных конструкций . . . . .	235
<b>Глава 8. Средства визуально-оптического и измерительного контроля . . . . .</b>	<b>242</b>
<b>Глава 9. Средства ультразвукового контроля . . . . .</b>	<b>253</b>
9.1. Ультразвуковые дефектоскопы . . . . .	254

9.2. Ультразвуковые толщиномеры . . . . .	267
9.3. Ультразвуковые пьезоэлектрические преобразователи . . . . .	272
9.4. Образцы для ультразвукового контроля . . . . .	280
<b>Глава 10. Средства контроля бетонных и железобетонных конструкций . . . . .</b>	<b>288</b>
<b>Глава 11. Основы метрологического обеспечения . . . . .</b>	<b>294</b>
<b>Глава 12. Материалы, методы и методики экспериментальных исследований . . . . .</b>	<b>298</b>
12.1. Замена материала рабочего органа как путь повышения надежности дорожно-строительных машин . . . . .	298
Библиографический список . . . . .	318

Научное издание

**Щербаков** Александр Павлович,  
**Иванов** Дмитрий Валерьевич

**ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ  
СУДЕБНО-ЭКСПЕРТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ  
ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗДАНИЙ, СООРУЖЕНИЙ  
И ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН**

Монография

Редактор *Т. В. Середова*  
Корректор *Е. Н. Апринцева*  
Компьютерная верстка *О. Н. Комиссаровой*

Подписано к печати 26.10.2022. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.  
Усл. печ. л. 19,3. Тираж 500 экз. Заказ 125. «С» 63.  
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.  
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.  
Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А.