

Міністерство освіти і науки України
Дніпровський державний технічний університет
(ДДТУ)

**Г. І. Камель, Ю. А. Гасило,
П. С. Івченко, Р. Я. Романюк**

КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ ЗВАРЮВАННЯ

Том 1. Неруйнівні методи контролю

(для студентів вищих навчальних закладів)

Навчальний посібник

*Рекомендовано
Міністерством освіти і науки України
як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів*

Кам'янське
«ДДТУ»
2018

УДК 621.791.015(075.8)

К65

Рецензенти:

В. П. Волков — проректор з науково-педагогічної роботи Запорізького національного університету, д.т.н., професор, заслужений працівник освіти України;

А. В. Єршов — д.т.н., професор кафедри фізики Запорізького національного технічного університету;

О. Я. Качан — начальник відділу прогресивної техніки, зам. начальника управління головного технолога АТ “Мотор Січ”, д.т.н., професор

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки України як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів
(лист № 1/11-23.2-24 від 01.06.2018 р.)*

Камель Г. І.

К65 Контроль якості зварювання. Т. 1. Неруйнівні методи контролю: навчальний посібник / Г. І. Камель, Ю. А. Гасило, П. С. Івченко, Р. Я. Романюк. — Кам’янське : ДДТУ, 2018. — 241 с.

Навчальний посібник містить теоретичні та експериментальні відомості навчальної дисципліни “Контроль якості зварювання”. В першому томі наведено загальні питання якості та методів контролю зварювання, охарактеризовано ультразвукові дефектоскопи та дефекти зварних з’єднань. Детально розглянуто методи неруйнівного контролю якості зварних з’єднань, особливо проаналізовано акустичні, радіографічні методи та методи контролю течієшукуванням.

Посібник призначений для студентів (магістрів) вищих навчальних закладів спеціальності: “Технологія та устаткування зварювання” при вивченні дисципліни: “Контроль якості зварювання” та може бути корисним для підготовки інженерів та фахівців з даного напрямку, а також викладачам даної дисципліни.

УДК 621.791.015(075.8)

ISBN 978-966-175-178-0

ISBN 978-966-175-179-7 (Т. 1)

© Г. І. Камель, Ю. А. Гасило,
П. С. Івченко, Р. Я. Романюк, 2018
© ДДТУ, 2018

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1. ЯКІСТЬ І МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ЗВАРЮВАННЯ.....	8
1.1. Фактори якості зварювання.....	8
1.2. Вхідний контроль.....	11
1.2.1. Контроль основних матеріалів.....	11
1.2.2. Контроль зварювальних матеріалів.....	13
1.2.3. Контроль кваліфікації зварників.....	17
1.2.4. Контроль зварювального устаткування.....	20
1.2.5. Контроль технології.....	21
1.3. Операційний контроль технологічного процесу зварювання.....	23
1.3.1. Контроль підготовки деталей під зварювання.....	23
1.3.2. Контроль складання деталей, що зварюються.....	25
1.3.3. Контроль процесу зварювання.....	26
1.3.4. Контроль зварних з'єднань.....	27
1.4. Приймальний контроль зварних виробів.....	28
1.5. Вибір методів контролю якості зварювання.....	29
1.5.1. Види неруйнівного контролю, класифікація і коротка характеристика.....	29
1.5.2. Комплексний підхід до вибору методу контролю без руйнування.....	34
Контрольні запитання.....	38
2. УЛЬТРАЗВУКОВІ ДЕФЕКТОСКОПИ.....	39
2.1. Параметри зондувального імпульсу.....	39
2.2. Частота проходження зондувальних імпульсів.....	41
2.3. Параметри розгортки дефектоскопів.....	42
2.4. Параметри прийомного тракту дефектоскопів.....	44
2.5. Динамічний діапазон посилення, регулювання посилення.....	45
2.6. Тимчасове регулювання чутливості (ТРЧ).....	46
2.7. Форма відображення ехо-імпульсів на екрані дефектоскопів.....	48

2.8. Характеристики екранів дефектоскопів.....	50
2.9. Пам'ять налаштувань і результатів вимірювань.....	53
2.10. Стробування зон контролю та сигналізація про дефекти.....	54
2.11. Похибки вимірюваних величин.....	55
2.12. Робота від акумуляторів, робоча температура.....	57
Контрольні запитання.....	57
3. ДЕФЕКТИ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ.....	59
3.1. Типові дефекти і їх класифікація.....	59
3.2. Кристалізаційні тріщини в металі шва.....	60
3.3. Холодні тріщини.....	80
3.4. Пори у зварних швах.....	99
3.5. Неметалеві включення у зварних швах.....	105
3.6. Інші дефекти зварних з'єднань.....	110
3.7. Вплив технологічних дефектів на міцність зварних з'єднань при статичних і змінних (динамічних) навантаженнях.....	121
Контрольні запитання.....	132
4. МЕТОДИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ (НК) ЯКОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ.....	133
4.1. Характерні ознаки методів НК.....	133
4.2. Візуально-вимірювальний контроль (ВВК).....	136
4.3. Радіаційний метод.....	138
4.4. Магнітні методи контролю.....	144
4.5. Капілярні методи.....	146
4.6. Вихрострумові методи.....	150
4.7. Безразкові методи випробувань.....	152
4.8. Економічні аспекти неруйнівного контролю.....	156
Контрольні запитання.....	159
5. АКУСТИЧНІ МЕТОДИ КОНТРОЛЮ.....	160
5.1. Теоретичні основи акустичних і ультразвукових методів контролю.....	160
5.2. Активні акустичні методи НК.....	169
5.2.1. Методи проходження і відбиття хвиль, комбіновані методи.....	169

5.2.2. Спектрально-акустичний метод	173
5.2.3. Дослідження пошкодженого зварного з'єднання із застосуванням спектрально-акустичного методу	175
5.3. Пасивні акустичні методи НК	185
5.3.1. Акустико-емісійний метод	185
5.3.2. Вібраційний і шумо-діагностичний методи	195
Контрольні запитання	195
6. РАДІОГРАФІЧНИЙ МЕТОД КОНТРОЛЮ	196
6.1. Джерела іонізуючого випромінювання	196
6.1.1. Рентгенівські апарати	196
6.1.2. Гамма-апарати	203
6.1.3. Джерела високоенергетичного фотонного вип- ромінювання	207
6.2. Детектори промислової радіографії	209
6.2.1. Радіографічні плівки	209
6.2.2. Ксерорадіографічні пластини	213
6.2.3. Металеві активуємі екрани-перетворювачі	214
6.2.4. Посилюючі металеві і флуоресцентні екрани	215
6.3. Матеріали для радіографічного контролю	216
6.3.1. Еталони чутливості	216
6.3.2. Касети, маркувальні знаки, тримачі	218
6.4. Технологія контролю	219
Контрольні запитання	224
7. МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ГЕРМЕТИЧНОСТІ АБО КОНТРОЛЬ ТЕЧІЄШУКАННЯМ	225
7.1. Капілярні методи	226
7.2. Компресійні методи	227
7.2.1. Рідинні методи	227
7.2.2. Газові методи	228
7.3. Вакуумні методи	234
Контрольні запитання	236
ЛІТЕРАТУРА	238
ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ	240

ВСТУП

Промислова продукція — кінцевий результат діяльності промислових підприємств. Результатом діяльності підприємств зварювального виробництва є зварні вироби. Продукція зварного виробництва характеризується наступними особливостями: різноманіттям номенклатури, типів і розмірів; високими вимогами до якості зварних з'єднань; випуском зварних виробів підприємствами машинобудування і приладобудування з різним технічним рівнем і серійністю виробництва; необхідністю атестації технологічних процесів зварювання, технологічного, контрольного і випробувального устаткування; потребою високої кваліфікації робітників і фахівців зварювального виробництва

Великогабаритні зварні вироби (каркасно-листові, оболонкові, рамні, балочні) є складовими основами механізмів, споруд або машин, їх часто називають зварними конструкціями. Наприклад, до зварних конструкцій відносяться кузови автомобілів, фюзеляжі літаків тощо.

До зварних виробів пред'являють певні вимоги, від виконання яких залежить їх якість і придатність до експлуатації. Якість зварних виробів є комплексним поняттям і являє сукупність певних характеристик. Окремі характеристики продукції об'єднуються в групи або показники якості. Показники якості залежно від характеру вирішуваних завдань класифікуються за різними ознаками. Розрізняють наступні групи показників якості: призначення, надійність, технологічність та ін.

Стосовно зварних конструкцій (виробів), у яких застосовують нероз'ємні з'єднання, первинне значення мають показники призначення і надійності.

Показники призначення обумовлюють галузь практичного використання продукції і характеризуються експлуатаційними (службовими) характеристиками виробів.

Показники надійності характеризують властивість продукції виконувати задані функції і зберігати при цьому експлуатаційні характеристики в заданих межах.

До показників призначення, наприклад, паливного бака, відносяться об'єм робочої рідини і її максимальний тиск в ньому.

Показники призначення зварних виробів значною мірою визначатимуть властивості зварних з'єднань і характеризуватимуться їх показниками якості. При визначенні показників якості зварних з'єднань рекомендується обирати найнеобхідніші і найважливіші властивості. До їх кількості відносять, наприклад, міцність і герметичність (для паливного бака).

До властивостей зварних з'єднань відносять також пластичність, корозійну стійкість, зносостійкість та ін.

Ці властивості визначатимуть вимоги до зварних з'єднань, які забезпечуються певними конструктивними і технологічними характеристиками зварного з'єднання. До конструктивних характеристик відносять форму і геометричні розміри зварного шва і зварних точок.

До технологічних характеристик відносять рівень залишкових напружень, величину деформацій, розміри і кількість дефектів та ін.

Перераховані характеристики в сукупності визначають якість зварних з'єднань і є основою для оптимізації технологічного процесу, під якою розуміють знаходження найкращого технологічного вирішення здійснення процесу, що забезпечує якість і надійність зварних виробів.

Таким чином, якість зварних виробів визначається сукупністю властивостей зварних з'єднань.

Викладений у навчальному посібнику матеріал стане у нагоді студентам, викладачам, фахівцям при вирішенні професійних завдань контролю якості зварювання у науково-дослідній, технологічній, проектній, організаційній, педагогічній та консультативній діяльності.

1. ЯКІСТЬ І МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ЗВАРЮВАННЯ

1.1. Фактори якості зварювання

Якість продукції — це сукупність властивостей продукції, що обумовлюють її придатність задовольняти певні потреби відповідно до її призначення.

Під контролем якості продукції розуміють відповідність показників якості продукції встановленим вимогам, які можуть бути зафіксовані в стандартах, кресленнях, технічних умовах, паспорті виробу та іншій нормативно-технічній документації (НТД).

Показники якості зварних з'єднань визначаються тією або іншою сукупністю наступних властивостей:

- міцністю;
- надійністю;
- відсутністю дефектів;
- структурою металу шва та біляшовної зони;
- корозійною стійкістю;
- кількістю та характером виправлень тощо.

Надійність — це властивість виробу виконувати задані функції, зберігаючи свої експлуатаційні показники в заданих межах протягом необхідного проміжку часу або необхідного напруження.

На якість зварних з'єднань впливають багато факторів. Основні з них можна розділити на дві групи: технологічні і конструктивно-експлуатаційні.

До технологічних факторів можна віднести зварювальні матеріали, устаткування, підготовку та складання, процес зварювання, оператора (зварника).

До конструктивно-експлуатаційних факторів відносять основний метал, конструкцію виробу, умови експлуатації, методи та систему контролю, норми з якості.

Для того щоб керувати якістю зварювання, необхідно передбачити контроль всіх факторів, від яких залежить якість продукції.

Залежно від місця виконання контролю на тому або іншому етапі виробництва (на стадії технологічного процесу) розрізняють:

- вхідний (попередній контроль);
- операційний (поточний контроль);
- приймальний (остаточний контроль готової продукції).

Вхідний контроль містить у собі контроль основних і зварювальних матеріалів, що комплектують вироби і готові зварні вузли та деталі, які надходять від інших підприємств або дільниць.

На етапі попереднього контролю проводиться також перевірка працездатності зварювального устаткування і кваліфікації виконавців робіт.

Операційний контроль — це контроль технологічного процесу зварювання, який виконується після завершення певної операції (контроль підготовки під зварювання, контроль складання під зварювання шва тощо), контроль безпосередньо процесу зварювання.

Приймальний контроль — це контроль готового зварного з'єднання після завершення всіх технологічних операцій з його виготовлення.

Приймальний контроль включає зовнішній огляд виробу, визначення його розмірів, а також випробування. При приймальному контролі перевіряється відповідність виготовленої продукції вимогам нормативно-технічної документації.

За результатами такого контролю ухвалюють рішення щодо придатності конструкції до експлуатації. Приймальний контроль

є найбільш відповідальною заключною операцією всього процесу виготовлення зварного з'єднання.

Крім цього залежно від обсягу перевірки зварних швів контроль може бути:

- суцільний;
- вибірковий.

Суцільний контроль виконують для відповідальних зварних конструкцій.

Вибірковий — для контролю виробів крупносерійного та масового виробництва.

За місцем проведення контроль може бути:

- стаціонарним;
- пересувним.

Стаціонарний контроль виконується на спеціально обладнаному контрольному пункті або у спеціальному приміщенні (наприклад, рентгеноконтроль виконують в ізольованих боксах).

Пересувний контроль здійснюється безпосередньо на робочому місці (наприклад, ультразвуковий контроль).

За призначенням контроль поділяється на:

- приймальний;
- статистичний.

Приймальний контроль має бракувальний характер і проводиться з метою відокремлення готової продукції від браку.

Статистичний контроль використовується в крупносерійному і масовому виробництві у системі керування якістю продукції. Статистичний контроль є засобом профілактичного впливу на хід технологічного процесу з метою його коректування і виключення появи браку.

За можливістю використання проконтрольованої продукції контроль може бути:

- руйнівним;
- неруйнівним.

Руйнівний контроль застосовують для отримання контрольованих кількісних показників продукції. У деяких випадках контроль проводять з частковим порушенням цілісності матеріалу виробу, тобто шляхом випробувань без руйнування виробу.

Неруйнівний контроль не здійснює вплив на цілісність продукції та побічно характеризує її якість.

За засобами контролю та одержання інформації контроль поділяється на:

- візуальний;
- інструментальний.

Візуальному контролю піддають 100 % виробів.

Інструментальний контроль є більш досконалий, оскільки здійснюється за допомогою різноманітних технічних засобів контролю.

1.2. Вхідний контроль

1.2.1. Контроль основних матеріалів

Спочатку основний матеріал перевіряють на наявність сертифікату, заводського маркування і товарного знаку виготовлювача.

У сертифікаті вказується марка і хімічний склад, номер плавки, маса і номер партії, результати всіх випробувань, що відповідають стандарту на матеріал, номер стандарту, тип профілю і розміри.

Після контролю сертифікату метал піддають зовнішньому огляду з метою виявлення поверхневих дефектів, порушення форми та ін.

У випадку відсутності дефектів метал сортують за типорозмірами і маркують.

Під *типорозміром металу* розуміють метал конкретного типу (форми) і виконання з певними значеннями контрольованих параметрів, наприклад, лист певної товщини.

Маркування металу виконують ударним способом (клеймом), електрогравіюванням і нанесенням фарбою марки металу, наприклад, уздовж поздовжньої кромки листа. Матеріал зберігається в закритих приміщеннях у стійких штабелях або на стежах.

Основний матеріал приймають партіями, і, якщо він не відповідає вимогам технічної документації, то складається акт-рекламація (претензія) підприємству-виготовлювачеві матеріалу.

Перевірений метал піддають пробному зварюванню, після якого проводять механічні або технологічні випробування, аналіз хімічного складу і металографічний аналіз зварного шва.

В основному металі можуть бути дефекти, пов'язані з відливанням зливка і викликані його наступною обробкою тиском.

До дефектів зливка відносять:

- гарячі і холодні тріщини;
- газову пористість і усадочні раковини;
- неметалеві включення, оксидні плівки та ін.

Дефекти лиття при наступній обробці зливків тиском призводять до утворення розшарувань, волосовин, розкриття тріщин при гарячій деформації та ін.

Під *розшаруваннями* розуміють ланцюжок неметалевих часток після прокатки.

Волосовини — дрібні тріщини, що утворилися з газових пухирів або неметалевих включень при обробці тиском.

При обробці тиском якісного металу можуть утворитися дефекти, пов'язані тільки з технологією обробки металів тиском. До таких дефектів відносять:

- загини;
- вм'ятини;
- риси;
- ковальські тріщини та ін.

Під *згинами* розуміють втиснені у поверхню металу задирки, підйоми, горбики.

Вм'ятини утворюються на поверхні у вигляді місцевих заглиблень, які викликані попаданням сторонніх часток на поверхню металу або валків.

Риски — дефекти у вигляді канавок на поверхні заготовок при прокатці.

Грубі дефекти виявляються візуально, а більш дрібні — методами дефектоскопії.

Невиявлені та неусунуті дефекти у основному металі можуть призвести до їхнього розкриття при зварюванні і появі нових дефектів у зварному шві на їх основі.

Відповідно до загальної кваліфікації дефекти в основному металі є металургійними дефектами, тому що вони виникають при литті і обробці тиском, які відносяться до металургійних процесів.

1.2.2. Контроль зварювальних матеріалів

Якість зварних з'єднань у значній мірі залежить від зварювальних матеріалів. У зв'язку з цим, перш ніж використовувати матеріали для зварювання, їх необхідно піддавати вхідному контролю.

Контроль зварювальних матеріалів аналогічно, як і основного матеріалу, включає:

- 1) перевірку наявності сертифікату, у якому наводяться дані відповідно до вимог державних стандартів (ДСТ), технічних умов і паспортів;
- 2) перевірку збереження упакування та наявності на ній етикеток;
- 3) зовнішній огляд;
- 4) пробне зварювання з випробуванням отриманих зварних з'єднань (перевірку технологічних властивостей зварювальних матеріалів).

При недотриманні цих умов партія зварювальних матеріалів бракується, а питання про її використання вирішується службою

головного зварника підприємства після повної перевірки партії за всіма показниками, встановленими для даного виду зварювальних матеріалів.

До зварювальних матеріалів відносять: електроди, присадочний дріт, флюси і захисні газы.

Контроль електродів. Контроль електродів здійснюється відповідно до ГОСТ 9466—75, ГОСТ 9467—75, ГОСТ 10052—75.

Електроди приймають партіями. Вони упаковані у пачки, які мають етикетку з вказівкою марки, стандарту, заводу-виготовлювача.

Контроль зовнішнього вигляду здійснюють вибіркою певної кількості електродів з пачки.

При цьому контролюють:

- розміри електродів (довжину, діаметр, товщину покриття);
- щільність покриття, наявність зовнішніх дефектів покриття: рисок, тріщин, сколов покриття, пор. На кожний з дефектів встановлюються норми бракування;
- концентричність покриття, тобто різнотовщинність покриття по довжині електрода.

Потім перевіряють міцність покриття шляхом падіння його на сталеву плиту з висоти (0,5—1 м).

Перевіряють покриття на вологостійкість після перебування у воді протягом доби.

При проведенні пробного зварювання оцінюють:

- легкість займання дуги;
- стабільність горіння дуги;
- ступінь розбризування металу;
- рівномірність плавлення покриття;
- віддільність шлаків тощо.

Також можуть перевірятися механічні і технологічні властивості покриття (у випадку нестабільного горіння дуги та виникнення пор і тріщин).

Примітка: передбачені державними стандартами властивості витримуються на електродах, які пройшли просушку в сушильних печах згідно режиму: витримка при температурі 150—180 °С, час витримки 1,5—3 год.

Після зварювання зварні з'єднання руйнують і оглядають злами, проводять механічні випробування, хімічні та металографічні дослідження.

Після перевірки електроди зберігаються в герметичних контейнерах у сухих приміщеннях. При тривалому зберіганні електроди перед зварюванням просушують.

Контроль зварювального і наплавочного дроту. Контроль зварювального і наплавочного дроту здійснюється відповідно до ГОСТ 2246—70, ГОСТ 10543—82 — на сталеві дроти та ГОСТ 7871—75 — на алюмінієвий дріт.

Контролю підлягають:

- граничні відхилення розмірів діаметру дроту і овальність;
- стан поверхні (дріт не повинен мати слідів окислів, бруду, мастила, тріщин, розшарувань тощо);
- міцність дроту на розрив;
- вміст азоту у дроті;
- хімічний склад дроту.

Зварювальний дріт поставляють у бухтах, котушках або касетах. Дріт постачається з металевими бирками, у яких зазначені стандарт, марка і завод-виготовлювач. Кожна партія має сертифікат.

При надходженні дроту здійснюють його очищення від антикорозійних змащувань і окислів. Очищення від змащувань окислів і фарб виконують механічними або хімічними способами (механічний спосіб — для сталей, хімічний спосіб — для алюмінієвих сплавів).

Після очищення дріт намотується на касети. При намотуванні здійснюють контроль за поверхневими дефектами.

У деяких випадках проводять хімічний аналіз дроту, а потім здійснюють пробне зварювання з аналізом хімічного складу і механічних властивостей наплавленого металу. При зварюванні звертають увагу на властивості дуги, шлаків, характер плавлення.

Дріт повинен зберігатися на складах в умовах, що виключають іржавіння та забруднення поверхні. З метою виключення утворення іржі використовують спеціальний обміднений дріт.

При тривалому зберіганні обов'язково необхідно прожарювати порошковий дріт і перевіряти механічні та технологічні властивості при зварюванні зразків.

Контроль флюсу. Контроль флюсу здійснюється відповідно до ГОСТ 9087—81.

Контролю підлягають:

- однорідність, забруднення і гранулометричний склад флюсу;
- об'ємна маса флюсу;
- вологість флюсу;
- вміст вуглецю і сірки у верхньому шарі зварного з'єднання, наплавленому під шаром флюсу на тавровому зразку;
- хімічний склад флюсу.

Зварювальний флюс упаковують у герметичні мішки, які перевіряють на наявність етикеток. У етикетках зазначають марку, стандарт і завод-виготовлювач.

Зварювальний флюс контролюють на розмір зерна шляхом просівання через сито з вічками, що відповідають верхній і нижній межах розмірів зерен. Потім флюс перевіряють на вміст вологи. Вологість не повинна перевищувати 0,1 %.

Пробу масою 100 г просушують при температурі 300 °С і зважують через певні інтервали часу. Просушування припиняють, коли результати зважування стають однаковими. Кількість вологи визначається по різниці між першим і останнім зважуванням.

Флюс використовують одночасно з дротом при пробному зварюванні. При виконанні зварювання оцінюють стійкість горіння дуги, а після зварювання — віддільність шлакової кірки при невеликому простукуванні шва гумовим молотком.

У необхідних випадках контролюють механічні властивості і хімічний склад наплавленого металу.

Флюс більш чутливий до вологи, ніж електрод, тому флюс повинен зберігатися в герметичних ємностях і перед зварюванням обов'язково піддаватися просушуванню.

Контроль захисного газу. Захисний газ поставляють у балонах, що мають етикетки, у яких зазначені марка, хімічний склад, завод-виготовлювач. Газ згідно етикетці перевіряють на наявність домішок. Газ контролюють на наявність вологи шляхом подачі струменя на фільтрувальний папір. При наявності вологи газ пропускають через осушувач, заповнений силікагелем (кристалічна речовина). Для просушки аргону використовують осушувачі з титановою стружкою, яка нагрівається до температури 400—450 °С.

На прийнятті зварювальні матеріали працівниками відділу технічного контролю (ВТК) складається приймальний акт. На неякісні матеріали складається рекламацийний акт, що направляється виготовлювачеві.

1.2.3. Контроль кваліфікації зварників

На підставі загальних правил на підприємствах складаються відомчі інструкції з атестації зварників.

Контроль кваліфікації зварників здійснюють зварювальною лабораторією відділу головного зварника (ВГЗ). При цьому на кожного зварника заводиться формуляр, де, крім звичайних відомостей про робітника, наводяться дані про його кваліфікацію (зварювальні матеріали, способи зварювання, просторові положення, розряд). Періодично формуляр доповнюється відомостями з атестації зварників.

Система атестації відповідає загальнодержавним правилам атестації зварників, які затверджені органами Держпраці або іншими галузевими організаціями, що виконують нагляд за проведенням зварювальних робіт на підприємствах галузі.

Атестація проводиться при використанні нових матеріалів, типів виробів і видів зварювання, до яких допускається зварник. Атестація проводиться шляхом перевірки теоретичних знань і практичних навичок зварника згідно програм, розроблених стосовно специфіки зварювальних робіт на підприємстві.

Процедура атестації включає здачу загального, спеціального і практичного іспитів.

Загальний іспит перевіряє знання основних положень теорії і практики зварювального виробництва, а спеціальний іспит — знання особливостей технології зварювального виробництва конкретних об'єктів, зварювання яких виконує зварник.

Атестацію зварників починають з проведення практичного іспиту, на якому перевіряють практичні навички зварника.

Перевірка теоретичних знань і практичних навичок здійснюється атестаційною комісією на підприємствах або в атестаційних центрах. Результати атестації оформляються протоколом і відображаються як у формулярі зварника, так і в його атестаційному посвідченні.

Атестація поділяється на:

- первинну;
- додаткову;
- періодичну;
- позачергову.

Первинну атестацію проходять зварники, що не мали раніше допуску до зварювальних робіт. Посвідчення зварника видається на два роки.

Додаткову атестацію проходять зварники, що пройшли первинну атестацію, перед їх допуском до виконання зварювальних робіт, які не зазначені у їхніх атестаційних посвідченнях, а

також після перерви понад шість місяців у виконанні зварювальних робіт.

Періодична атестація (переатестація) проводиться не рідше одного разу в один—два роки з метою продовження зазначеного терміну дії атестаційних посвідчень.

Позачергову атестацію проходять зварники після їх тимчасового відсторонення від роботи за порушення технології зварювання або повторення незадовільної якості зварних з'єднань.

Відповідно до “Правил атестації зварників і фахівців зварювального виробництва” (НПАОП 0.00—1.16—96), атестацію повинні проходити і фахівці зварювального виробництва, що здійснюють керівництво та технічний контроль за проведенням зварювальних робіт, а також беруть участь у роботі атестаційних комісій і органів з підготовки та атестації зварників і фахівців зварювального виробництва. Фахівцям, що пройшли атестацію, видається сертифікат з терміном дії п'ять років.

До фахівців зварювального виробництва відносяться майстри, технологи і інженери з середньою або вищою технічною освітою із зварювального виробництва.

Зазначені вище Правила адаптовані до європейських норм. До об'єктів, підконтрольним Держпраці України, відносяться:

- об'єкти котлонагляду (парові водогрійні котли, посудини хімічного, нафтохімічного машинобудування);
- підйомні споруди (крани, підйомники, ліфти);
- об'єкти газового нагляду (газопроводи);
- об'єкти вугільної і гірничорудної промисловості (шахтні і ліфтові установки);
- об'єкти нафтогазовидобувної промисловості;
- об'єкти металургійного виробництва;
- технологічні трубопроводи підприємств.

1.2.4. Контроль зварювального устаткування

Якість зварних з'єднань у значній мірі залежить від справності зварювального устаткування.

Мета і призначення даного контролю — забезпечити утримання зварювального устаткування у робочому стані відповідно до паспортних даних на кожну машину або апарат.

На підприємстві розробляється система планово-попереджувального ремонту (ППР), що є сукупністю організаційно-технічних заходів щодо нагляду, обслуговування та ремонту устаткування, проведених згідно заздалегідь складеного плану. План включає ремонтні роботи і профілактичні огляди.

Під *ремонтними роботами* розуміють малі (поточні) і середні ремонти.

Поточний ремонт здійснюється на робочому місці, а середній ремонт — у майстерні підприємства. Між ремонтами здійснюються профілактичні огляди.

Міжоглядовий цикл зварювального устаткування становить 150—200 год. Міжремонтний цикл — 900—1000 год.

Повний ремонтний цикл, тобто час між введенням устаткування в експлуатацію і першим капітальним ремонтом, наприклад, для механізованого зварювального устаткування, становить 13—14 тис. год.

Метою оглядів є перевірка працездатності устаткування.

При оглядах, наприклад, зварювальних апаратів перевіряють стан струмопідвідних дротів, електричних контактів, справність регулюючих механізмів, зношування подаючих елементів, зазори в кінематичних системах, ступінь забризкування захисних пристроїв, стан струмопідвідних елементів тощо.

У машинах для контактного зварювання перевіряють надійність і справність систем подачі води та повітря, зношування робочих поверхонь електродів і роликів, стан електричних контактів у зварювальному контурі машини та ін.

При використанні складально-зварювального устаткування, наприклад, для дугового зварювання, контролюють поверхні притискних елементів, стан і форму зварювальних підкладок, справність тепловідвідних пристроїв, працездатність приводів та ін.

Будь-яку контрольно-вимірювальну апаратуру перевіряють порівнянням її показників з показниками еталонних засобів вимірювань. Дана операція проводиться метрологічною службою підприємства і називається *метрологічною перевіркою*.

Нове устаткування і оснащення перевіряють на відповідність технічним параметрам, зазначеним у паспорті.

Після капітального ремонту виконується атестація устаткування, що включає внесення змін у паспорт.

На допуск устаткування до експлуатації оформляється свідоцтво, що знаходиться у зварника або налагоджувальника. За справний стан і безаварійну роботу устаткування між ремонтами відповідають також зварник і налагоджувальник. При цьому встановлюються певні норми обслуговування зварювального устаткування.

Результати профілактичних оглядів, малих і середніх ремонтів відображаються в журналах, передбачених системою ППР.

1.2.5. Контроль технології

Контроль технології виготовлення зварних виробів включає контроль за:

- підготовкою заготовок;
- справністю зварювальних пристосувань;
- складанням вузлів під зварювання;
- станом зварювальних матеріалів;
- придатністю зварювального устаткування;
- дотриманням встановлених режимів зварювання.

Зварні заготовки перевіряють на правильність їх загальної форми, розмірів і геометрії оброблення кромки, що зварюються.

Останні також контролюють на наявність забруднень, іржі і конденсованої вологи.

У зварювальних пристосувань перевіряють справність затискних пристроїв, придатність зварних поверхонь, а також флюсових, мідних або вугільних підкладок і тепловідвідних елементів.

У зібраних вузлах перевіряють основні габаритні розміри, величини зазорів у стиках і зсуву кромek, що зварюються, якість прихваток і наявність відхилень розмірів. При застосуванні попереднього підігріву за допомогою термопар і термічних олівців контролюють задану температуру перед початком та у процесі зварювання.

Зварювальні матеріали перевіряють на правильність режимів підготовки.

У зварювальних машинах і апаратах перевіряють справність регулюючих механізмів, наявність приладів, якість і довжину струмопідвідних дротів, стан електричних контактів і струмопідвідних мундштуків. У контактних машин контролюють форму і стан поверхні електродів. На установках для зварювання в атмосфері захисних газів перевіряють справність газових редукторів, витратомірів, шлангів, сопел на пальниках і газозахисних пристроях тощо.

Режим зварювання контролюють у першу чергу з метою дотримання параметрів процесу візуальним спостереженням по приладах і по зовнішньому вигляді зварного шва. При виготовленні відповідальних конструкцій і серійному виробництві контроль здійснюють шляхом безперервного запису параметрів режиму за допомогою самописних приладів.

Кожний технологічний варіант виготовлення зварних виробів має свої певні особливості.

1.3. Операційний контроль технологічного процесу зварювання

Система операційного контролю у зварювальному виробництві включає чотири операції:

- контроль підготовки;
- контроль складання;
- контроль процесу зварювання;
- контроль отриманих зварних з'єднань.

1.3.1. Контроль підготовки деталей під зварювання

Передбачає контроль обробки лицьової та зворотної поверхонь, а також торцевих кромek деталей, що зварюються.

Поверхні кромek, що зварюються, повинні бути зачищені від забруднень, змащення, іржі та окалини на ширину 20—40 мм від стику. Підготовку поверхні виконують механічним способом (з використанням металевих щіток, шабера) і хімічним травленням.

Перед обробкою поверхні здійснюють її знежирення ганчір'ям або волосяними щітками. Знежирення виконують за допомогою розчинників (гас, бензин, ацетон). Після знежирення необхідна механічна або хімічна обробка.

Для контролю використовують еталони або контрольні зразки. Для відповідальних конструкцій з алюмінієвих сплавів кількісним показником якості підготовленої поверхні є електричний контактний опір двох деталей, що зварюються.

При виготовленні деталей, що зварюються, використовують різні способи розрізання металу. Різання виконують механічним і термічним способами.

При різанні механічним шляхом на поверхні торцевих кромek мають місце відколи, місцеві відриви, тріщини

При термічній обробці спостерігається оплавлений шар. Тому після термічної обробки необхідно робити механічне шліфування торцевих кромок з наступним їх контролем.

Контроль торцевих кромок при зварюванні товстостінних конструкцій включає перевірку форми та геометричних параметрів оброблення кромок. До геометричних параметрів обробки кромок під зварювання відносять величину притуплення кута скосу кромок і радіус округлення кореня обробки.

Для контролю геометричних параметрів оброблення кромок використовується міряльний інструмент і шаблони.

У деяких випадках при підготовці деталей, що зварюються, виконують контроль розмітки, наприклад, при контактному зварюванні нахлєсних з'єднань контролюють крок між зварними точками, а при дуговому зварюванні стикових тонколистових з'єднань контролюють відстань від стику до притиску. Розмітка початку та кінця шва контролюється, якщо при складанні стикових з'єднань не встановлюються вивідні планки і кресленням передбачається наступне відрізання.

Геометричні параметри підготовки кромок, що зварюються, узаконені відповідними державними або галузевими стандартами. Відхилення від встановлених значень, як правило, призводять до утворення зварювальних дефектів.

Так, наприклад, у результаті завищення кута скосу кромок відбувається перевитрата електродного металу та зростають деформації. Зменшений кут скосу кромок утрудняє надійне проплавлення вершини кута обробки і призводить до непроварення кореня шва. Збільшення величини притуплення викликає непровар, а зменшення — пропал (ГОСТ 16037—80).

При підготовці деталей, що зварюються, з алюмінієвих сплавів необхідно контролювати час зберігання деталей перед зварюванням. Цей час не повинен перевищувати 3 год. для механічної обробки та 8 год. — для хімічного травлення.

1.3.2. Контроль складання деталей, що зварюються

Складання — установка деталей, що зварюються, у відповідне положення однієї відносно іншої.

При складанні стикових з'єднань звертають увагу на складальні зазори і зсуви торцевих кромek. Відхилення цих величин вбік збільшення приводять до пропалів.

Важливу роль грає контроль положення стику деталей, що зварюються, стосовно осі джерела. При зварюванні неплавким електродом контролюють величину дугового проміжку.

При складанні нахлисних з'єднань контролюється величина нахлисту, а при зварюванні таврових з'єднань — перпендикулярність деталей, що зварюються.

При складанні деталей типу тіл обертання контролюють їх співвісність. У всіх випадках контроль здійснюється відповідно до креслення виробу.

З метою фіксації зібраних деталей у встановленому положенні виконують прихватку, що не допускає зсув деталей при наступному зварюванні або транспортуванні від складального до зварювального місця.

Прихватку часто виконують ручним дуговим зварюванням покритим електродом. При цьому контролюється відстань між прихватами, довжина прихваток і їх кількість.

При перевірці якості прихваток необхідно звертати увагу на стан поверхні і висоту прихваток. Забруднені і прихватки з невилученими шлаками можуть призвести до шлакових включень у металі шва, а прихватки великої висоти — до непровару.

Після виконання прихваток здійснюють зачищення поверхні прихваток, а також знімають посилення та бризки металу. Практично завжди посилення прихваток не допускається, тому що воно може викликати непровар або зменшення ширини зварного шва в зоні прихватки.

При зварюванні дуже відповідальних стикових з'єднань з торців деталей, що зварюються, встановлюють вивідні техноло-

гічні планки, на яких починають і закінчують зварювання. Планки повинні мати товщину і форму обробки кромek, що відповідають зварювальним деталям. При складанні планок зі зварювальними деталями контролюють точність їх стикування. При розмітці початку та кінця шва, коли кресленням передбачається механічна обрізка, вивідні планки не використовують.

Зібрані, але не зварені протягом дня конструкції підлягають повторному контролю.

1.3.3. Контроль процесу зварювання

Контроль включає:

- візуальне спостереження за процесом плавлення металу і формування шва;
- контроль стабільності параметрів режиму;
- контроль працездатності устаткування.

При контактному зварюванні контролюють постановку зварювальних точок, а при дуговому зварюванні — стійкість горіння дуги і стабільність захисту від окислення. Зовнішній вигляд зварного шва, що утвориться, і форми зварних точок характеризують правильність режиму зварювання, тому постійний контроль за режимом зварювання по показниках контрольно-вимірювальних приладів і візуальні спостереження за процесом дозволяють оперативно реагувати на можливі відхилення і багато в чому забезпечують якість зварних з'єднань.

При зварюванні відповідальних конструкцій використовують системи автоматичного керування і регулювання параметрів режиму за допомогою датчиків автоматичного контролю, вбудованих у зварювальне устаткування. У деяких випадках ведуть безперервний запис параметрів.

При двосторонньому зварюванні та зварюванні товстостінних конструкцій обов'язковим є контроль першого (кореневого) шва (проходу). Контролюють також порядок накладення і кількість шарів, стан поверхні кожного шару, якість зачищення попе-

реднього шва, час перерв між проходами, послідовність виконання зварних швів тощо.

При двосторонньому зварюванні алюмінієвих сплавів перед накладенням другого шва зі зворотної сторони корінь першого шва вирубують або фрезерують і потім ведуть контроль вибірки.

При контролі складних конструкцій необхідно звертати увагу на дотримання послідовності і режимів виготовлення конструкцій, тому що якісне виконання зварних з'єднань на вузлах або підвузлах не гарантує якості конструкції в цілому.

1.3.4. Контроль зварних з'єднань

Після зварювання зварні з'єднання, як правило, контролюють візуальним способом. Огляду піддають зварний шов і біляшовну зону. Як правило, контроль проводять неозброєним оком. При виявленні поверхневих дефектів розміром менше 0,1 мм використовують оптичні пристрої, наприклад, лупу 4—7 кратного збільшення. Необхідність застосування для візуального огляду оптичних приладів з вказівкою кратності їхнього збільшення повинна бути обумовлена в технічній документації на контроль.

При контролі недоступних для зовнішнього огляду зварних з'єднань використовують оптичні прилади, наприклад, ендоскоп на основі гнучких світлопровідних трубок.

Якщо технологічний процес передбачає механічну обробку зварних швів, то контроль виконують і після її проведення.

Зварні вироби, що піддаються термообробці, також контролюються після її проведення. Зовнішній огляд, як правило, поєднують з виміром конструктивних елементів зварних швів або точок з метою виявлення відхилення за розмірами і формою швів та точок від вимог стандартів, креслень, технічних умов і інструкцій зі зварювання виробів.

Основними конструктивними елементами зварних швів є:

- ширина шва;
- висота посилення і проплаву;

- плавність переходу від посилення до основного металу та ін.
- У зварних точках контролюють:
- форму і діаметр;
 - глибину відбитка;
 - відстань між точками та ін.

При огляді виявляють, як правило, поверхневі пори, тріщини всіх видів і напрямків, напливи, пропали, свищі, підрізи, незаварені кратери, непровари та інші дефекти-несуцільності. Якість вважається незадовільною, якщо будуть виявлені недопустимі дефекти.

Норми допустимих дефектів вказуються в НТД і приводяться на кресленнях виробів. При відсутності кількісних показників дефектів контроль здійснюють по еталонах або контрольних зразках. Це порівняння доцільне при аналізі нерівномірності та величини лусочок, зони кольорів мінливості, форми катета кутових швів тощо.

При виявленні та виправленні недопустимих дефектів зварні з'єднання повторно піддають контролю.

1.4. Приймальний контроль зварних виробів

Приймальний контроль включає перевірку зовнішнього вигляду виробу та визначення його розмірів (візуальний контроль). Для відповідальних зварних виробів проводять випробування. Випробування поділяють на руйнівні та неруйнівні.

Неруйнівні випробування часто називають фізичними методами контролю. До них відносять: радіографічний, радіохвильовий, ультразвуковий, магнітний, вихрострумний, акустичний, капілярний, контроль герметичності та ін.

Неруйнівні випробування дозволяють визначити у зварних швах внутрішні або наскрізні дефекти, недоступні зовнішньому огляду. Ці випробування непрямым чином характеризують показники працездатності зварних виробів.

Руйнівні випробування дозволяють оцінити прямим шляхом показники якості зварних виробів.

До руйнівних випробувань відносять:

- механічні випробування;
- аналіз хімічного складу;
- випробування на корозійну стійкість.

Ці випробування, як правило, проводяться на вибіркових натурних зразках або на спеціальних виробах, підготовлених для випробувань і виготовлених за стандартною технологією. За результатами випробувань оформлюється протокол.

При позитивних результатах випробувань зварні вироби маркують, консервують в упакування або тару та перевіряють наявність і комплектність супровідної документації. До такої документації відносять паспорт, у якому дається висновок про придатність виробу до експлуатації.

При негативних результатах складається відомість зауважень, відповідно до якої виконується доробка (ремонт) виробу і потім повторні випробування.

1.5. Вибір методів контролю якості зварювання

Порівняльні особливості руйнівних і неруйнівних методів контролю якості наведено в табл. 1.1.

Однак жоден з методів контролю не є універсальним, тому важливим є не тільки правильний вибір методу контролю, але й комбінування ряду методів, сполучення руйнівних і неруйнівних випробувань.

1.5.1. Види неруйнівного контролю, класифікація і коротка характеристика

Всі дефекти викликають зміну однієї або декількох фізичних характеристик металів і їх сплавів — щільності, електропровідності, магнітної проникності, пружних властивостей тощо.

Таблиця 1.1. Особливості руйнівних і неруйнівних методів контролю якості

Руйнівні	Неруйнівні
<i>Переваги</i>	<i>Недоліки</i>
Випробування безпосередньо спрямовані на виміри міцності або експлуатаційної надійності. Вони імітують один або кілька станів. Кореляція між вимірами і експлуатаційними властивостями матеріалів, як правило, тісна та не викликає розбіжностей. Вимірюють руйнівні навантаження або терміни служби до руйнування (відмова).	Побічно оцінюють або вимірюють властивості, що не мають безпосереднього значення при експлуатації. Необхідні спеціальні дослідження для встановлення кореляційного зв'язку між результатами НРК і експлуатаційною надійністю або міцністю. Там, де зв'язок не доведений, призначення норм для оцінки результатів контролю утруднене. Випробування тільки якісні або альтернативні (придатний або непридатний)
<i>Недоліки</i>	<i>Переваги</i>
Випробування проводять на зразках, а не на об'єктах, фактично застосовуваних в експлуатації. Випробування можна проводити тільки вибірково — на частині виробів з партії, а якість від деталі до деталі може мінятися. При одиничних випробуваннях визначають тільки одну або кілька властивостей, що впливають на надійність виробу. Мало застосовні в умовах експлуатації без припинення роботи. Вплив експлуатації може вимірятися тільки при вибіркового випробуванні серії виробів, що пропрацювали певний час. Вартість великого обсягу випробувань і витрата дорогих матеріалів — високі. Механічна обробка зразків трудомістка, вимагає великої витрати часу висококваліфікованих робітників	Випробування проводять безпосередньо на виробі і на їх небезпечних ділянках. Випробування можна проводити на будь-яких виробі з партії, навіть на всіх, якщо це економічно вигідно. Можна застосовувати комплекс методів, що виявляє різні властивості матеріалу або з'єднання. Застосовують в установках без припинення роботи. Повторний контроль тих самих виробів і стиків дозволяє виявляти вплив експлуатації на них. Вироби з дорогих матеріалів не руйнують. Попередня обробка виробів, час випробувань і їх вартість, як правило, значно менші, ніж при руйнівному контролі

Фізичну основу методів неруйнівного контролю складає дослідження змін характеристик металів і виявлення дефектів, що є причиною цих змін.

Методи неруйнівного контролю відповідно до ГОСТ 18353—79 класифікують на наступні види: візуально-вимірний, акустичний, магнітний, оптичний, капілярний, течішуканням, радіаційний, радіохвильовий, тепловий, електричний, електромагнітний вихрових струмів.

Види неруйнівного контролю — це умовне угруповання методів, об'єднане спільністю фізичних характеристик.

Акустичні методи. Засновані на реєстрації пружних коливань, порушуваних у контрольованому об'єкті.

Застосовують для виявлення поверхневих і внутрішніх дефектів. Акустичні методи дозволяють вимірювати геометричні параметри при однобічному доступі до виробу.

Магнітні методи. Засновані на реєстрації магнітних полів розсіювання над дефектами або магнітними властивостями контрольованого об'єкта.

Застосовують для виявлення поверхневих і підповерхневих дефектів у виробах, виготовлених з феромагнітних матеріалів (магнітопорошковий, магнітографічний, магнітоіндукційний, феррозондовий та інші методи).

Оптичні методи. Засновані на взаємодії світлового випромінювання з контрольованим об'єктом.

За характером взаємодії розрізняють методи наскрізного, відбитого, розсіяного та індукційного випромінювання (останнім терміном визначають оптичне випромінювання об'єкта під дією зовнішнього впливу, наприклад, люмінесценцію).

Оптичні методи широко застосовують у зв'язку з великою розмаїтістю способів одержання первинної інформації (амплітуда, фаза, ступінь поляризації, частота або частотний спектр, час проходження світла через об'єкт, геометрія переломлення та відбиття випромінювання).

Капілярні методи. Засновані на капілярному проникненні індикаторних рідин у порожнину поверхневих дефектів.

При цьому методі контролю на очищену поверхню деталі наносять проникаючу рідину, що заповнює порожнини поверхневих дефектів. Потім рідину видаляють, а частину, що залишилася у порожнинах дефектів, виявляють нанесенням проявника, який утворює індикаторний рисунок (колірний, люмінесцентний, люмінесцентно-світловий, фільтруючих часток, радіоактивних рідин тощо).

Методи течієшукуванням. Засновані на реєстрації індикаторних рідин і газів, що проникають у наскрізні дефекти контрольованого об'єкта.

Застосовують для визначення герметичності працюючих під тиском зварних посудин, балонів, трубопроводів тощо (гідравлічне обпресування, аміачно-індикаторний метод, контроль за допомогою гелієвого і галоїдного течієшукачів).

Радіаційні методи. Засновані на реєстрації і аналізі проникаючого іонізуючого випромінювання.

Проникаюче випромінювання (рентгенівське, гама, потоки нейтронів), проходячи крізь товщу виробу, по різному послабляється в дефектній і бездефектній області і несе інформацію про внутрішню будову речовини та наявність дефектів всередині контрольованих об'єктів.

Радіохвильові методи. Засновані на реєстрації зміни параметрів електромагнітних хвиль радіодіапазону, взаємодіючих з контрольованим об'єктом.

Як правило, застосовують хвилі надвисокочастотного (НВЧ) діапазону довжиною 1—100 мм для контролю діелектриків, магнітодіелектриків, напівпровідників і тонкостінних металевих об'єктів (де радіохвилі не дуже сильно згасають).

Теплові методи. Засновані на реєстрації змін теплових або температурних полів контрольованого об'єкта.

За характером взаємодії з об'єктом контролю розрізняють пасивний (на об'єкт не впливає зовнішнє джерело) і активний методи (об'єкт нагрівають або охолоджують від зовнішнього джерела).

Вимірюваним інформаційним параметром є температура або тепловий потік.

Електричні методи. Засновані на реєстрації параметрів електричного поля, взаємодіючого з контрольованим об'єктом, або поля, що виникає в контрольованому об'єкті в результаті зовнішнього впливу.

Первинними інформаційними параметрами є електричні ємність або потенціал.

Електромагнітний метод вихрових струмів. Заснований на реєстрації змін взаємодії електромагнітного поля котушки з електромагнітним полем вихрових струмів, що наводяться цією котушкою в контрольованому об'єкті.

Особливості виявлення дефектів різними методами контролю наступні:

РД (радіаційна дефектоскопія) — об'ємні внутрішні і поверхневі несуцільності в будь-яких матеріалах, у стикових швах.

УЗД (ультразвукова дефектоскопія) — внутрішні і поверхневі несуцільності в будь-яких матеріалах, окрім грубозернистих стикових і нахлестних швів.

МД (магнітна дефектоскопія) — поверхневі і підповерхневі несуцільності у ферромагнітних матеріалах і стикових швах.

КД (капілярна дефектоскопія) — поверхневі несуцільності в будь-яких матеріалах і з'єднаннях.

ТЧД (дефектоскопія течієшукуванням) — наскрізні несуцільності в будь-яких матеріалах і з'єднаннях.

Обмеження у виявленні дефектів:

РД — несуцільності малого розкриття (тріщини), розташовані під кутом більше 7° до променя, виявляються погано; для кутових швів метод малоефективний.

УЗД — чавун і аустенітні сталі не контролюються; однорідні злипання виявляються погано; об'ємні несучільності (включення) виявляються гірше, ніж плоскі тріщиноподібні.

1.5.2. Комплексний підхід до вибору методу контролю без руйнування

Вибір методу контролю визначається характером одержання необхідної інформації, особливостями контрольованого об'єкта і можливістю його застосування в конкретних виробничих умовах.

У табл. 1.2 і 1.3 наведено короткі характеристики розглянутих вище методів неруйнівного контролю з вказівками переваг і обмежень їхнього використання.

Таблиця 1.2. Короткі характеристики методів неруйнівного контролю

Методи контролю	Фізичний ефект	Розпізнавання дефекту	Визначення розташування дефекту	Визначення розмірів дефекту	Область застосування
1	2	3	4	5	6
Візуальний	Блиск, колір, контраст форми	Так	Так	Обмежено	Великі поверхневі дефекти (тріщини тільки після травлення)
Магнітні	Розсіювання потоку	Так	Так	Обмежено	Поверхневі тріщини
Магнітними частками	Проникність	Так	Обмежено	Обмежено	
Магнітною індукцією	—	—	—	—	Несплавлення, контроль структури, вимір товщини шару
Капілярні	Капілярний ефект	Так	Так	Немає	Поверхневі пори, поверхневі тріщини

Продовження табл. 1.2.

Електричні Потенціометричні	Електропровідність	Немає	Обмежено	Так	Вимір глибини тріщин
Вихровими струмами	Електропровідність	Так	Обмежено	Так	Контроль будьяких металів, вимір товщини шару
Радіографічний	Поглинання	Так	Обмежено	Обмежено	Об'ємні внутрішні дефекти
Рентгєнівський	Інтерференція	Немає	Немає	Немає	
Радіоактивне випромінювання	Поглинання	Так	Обмежено	Обмежено	Об'ємні внутрішні дефекти
Гама-випромінювання Бета-частинки	Поглинання	Обмежено	Немає	Немає	Вимір товщини
Акустичні	Поглинання	Обмежено	Немає	Обмежено	Плоскі і об'ємні внутрішні дефекти
Ультразвуковий Пропущенням Ехо-імпульсний	Відбиття	Так	Так	Обмежено	—
Акустичною емісією	Шум	Тільки поширення	Так	Немає	Визначення поширення тріщини, течішуканням
Акустичним датчиком	Специфічний резонанс	Так	Немає	Визначення розмірів дефекту	Контроль виливків
Термічні	Різниця температур	Так	Так	Обмежено	Контроль сплавлення, зовнішні дефекти

Таблиця 1.3. Переваги і обмеження по застосуванню методів неруйнівного контролю

Методи контролю	Найбільш істотні переваги перед іншими методами контролю	Обмеження по застосуванню
1	2	3
Візуальний	Немає необхідності в застосуванні складних приладів, швидкість операцій	Складна геометрія, недостатня чутливість
Магнітні Магнітними частками	Легкість оцінки, малий вплив поверхні, висока швидкість контролю	Тільки феромагнітні матеріали
Магнітною індукцією	—	Шорстка поверхня
Капілярні	Немає необхідності в застосуванні складних приладів	Необхідність розкриття дефектів з поверхні, пористі матеріали не підлягають контролю
Електричні Потенціометричний	Ширина тріщини не впливає, висока швидкість контролю	Електропровідність. Вплив контактів, нерівність поверхні, обмежена глибина проникнення, тільки для електропровідних шарів
Вихровими струмами	Немає необхідності в застосуванні складних приладів	—
Радіографічні Рентгенівський	Документація	Товщина зразків, площинність, двомірний поділ, кристалічна структура
Радіоактивне випромінювання	Документація, легкість експлуатації	Низька чутливість, товщина зразка
Гамма-випромінювання Бета-частинки	Безконтактність виміру	Низька чутливість, товщина зразка

Продовження табл. 1.3.

Акустичні	—	Оцінка результатів може бути виконана тільки кваліфікованим персоналом
Ультразвуковий	Великий діапазон, широка область застосування	—
Пропущенням		
Ехо-імпульсний		
Акустичною емісією	Контроль закінчених конструкцій, швидка оцінка	Тільки для контролю під навантаженням, шумові перешкоди
Акустичним датчиком	Простий контроль цілих частин	Вплив геометрії і допусків
Термічні	Плоска двомірна оцінка, без-контактність	Тільки у випадку однорідної геометрії

Для визначення внутрішніх дефектів зварних з'єднань (тріщин, непроварів, включень) застосовують радіаційний і ультразвуковий методи контролю; у більш рідких випадках — магнітний.

Перевага радіаційного методу — одержання результатів у документальній формі; недолік — низьке виявлення плоских дефектів, тривалість операцій, використання гостродефіцитної плівки.

Перевага ультразвукового методу — висока чутливість і продуктивність; недолік — далеко не всі установки дають відображення дефектів у документальній формі.

Магнітні та електромагнітні методи дають задовільну інформацію про дефекти у відносно тонкому матеріалі, у більш товстому матеріалі — лише в поверхневих шарах.

Метод вихрових струмів призначений для виявлення дрібних дефектів на поверхні металів.

Метод течішуканням призначений для перевірки герметичності — наявності наскрізних дефектів.

При остаточному рішенні про вибір методу контролю і обсяги його застосування необхідно провести оцінку вартості (витрати на устаткування, його ремонт, матеріали, електроенергію, зарплату персоналу, охорону праці, проведення екологічних заходів та ін.). Далі необхідно провести зіставлення повної суми витрат, витрачених на контроль, з ефективністю, що досягається в результаті зменшення витрат, викликаних браком і виправленням дефектних місць.

Контрольні запитання

1. Що називається якістю продукції?
2. Назвіть і охарактеризуйте показники якості зварних з'єднань.
3. Назвіть і охарактеризуйте види контролю зварювання.
4. Що відноситься до руйнівного контролю продукції?
5. Що таке неруйнівний контроль продукції?
6. Охарактеризуйте контроль вхідних матеріалів зварювання.
7. Що відноситься до контролю зварювальних матеріалів?
8. Як здійснюється контроль кваліфікації зварників?
9. Охарактеризуйте контроль зварювального устаткування.
10. Охарактеризуйте складові контролю технології зварювання.
11. Що включає операційний контроль технологічного процесу зварювання?
12. Як здійснюється контроль складання деталей, що зварюються?
13. Що включає контроль процесу зварювання?
14. Що таке приймальний контроль зварних виробів?
15. Як здійснюється вибір методів контролю якості зварювання?
16. Охарактеризуйте види неруйнівного контролю.

2. УЛЬТРАЗВУКОВІ ДЕФЕКТОСКОПИ

Кількість сучасних ультразвукових дефектоскопів безупинно росте, що утрудняє їх вибір. Виробниками заявляється все більша кількість характеристик, які змушують користувачів зробити вибір на користь тієї або іншої моделі.

2.1. Параметри зондувального імпульсу

Зондувальним імпульсом називається акустичний імпульс, випромінюваний перетворювачем. Форма зондувального імпульсу залежить від форми прикладеного напрямку і характеру навантаження та значною мірою визначається підключеним перетворювачем. Без підключеного перетворювача імпульс являє собою однобічний поштовх напруги, що убиває за експонентним законом.

Незважаючи на розходження в конструкціях приладів загальний принцип збудження коливань залишається незмінним. Конденсатор у дефектоскопі заряджається до деякої напруги, потім керуючим сигналом від тактового генератора замикається електронний вимикач, у результаті чого конденсатор розряджається через опір, що демпфірує (або індуктивність), включений паралельно коливальному елементу. Цей імпульс розряду збуджує в коливальному елементі згасаючі механічні коливання. Такий спосіб збудження називають *ударним* (рис. 2.1).

Крива розряду і період механічних коливань у значній мірі залежить від ємності конденсатора C та опору резистора R . Для оптимального узгодження приладу з конкретним перетворювачем у деяких дефектоскопах є можливість перемикання величин C та R . Однак, оскільки власна частота коливань п'єзоелемента залежить прямо від його товщини, для ефективного збудження різних перетворювачів необхідний додаток різної енергії. У протилежному випадку, збудження ударним імпульсом досить великого п'єзо-

елемента буде порівняне з коротким ударом часового молоточка по величезному дзвону.

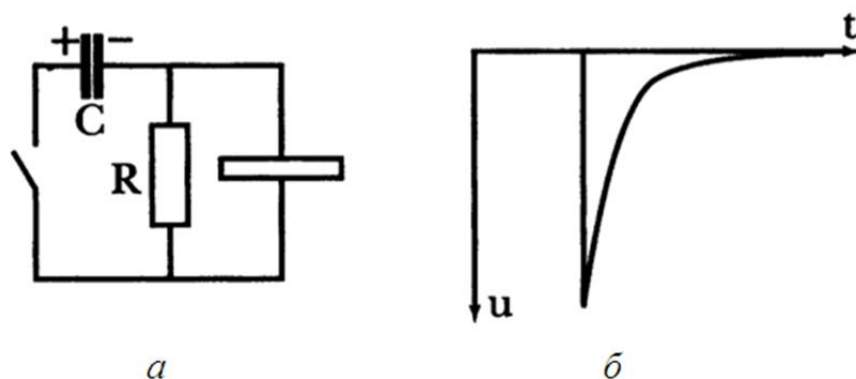


Рис. 2.1. Схема ударного збудження (а) і схема розряду при ударному збудженні (б)

Для підвищення ефективності збудження п'єзокристалів використовують генератори прямокутних імпульсів (рис. 2.2).

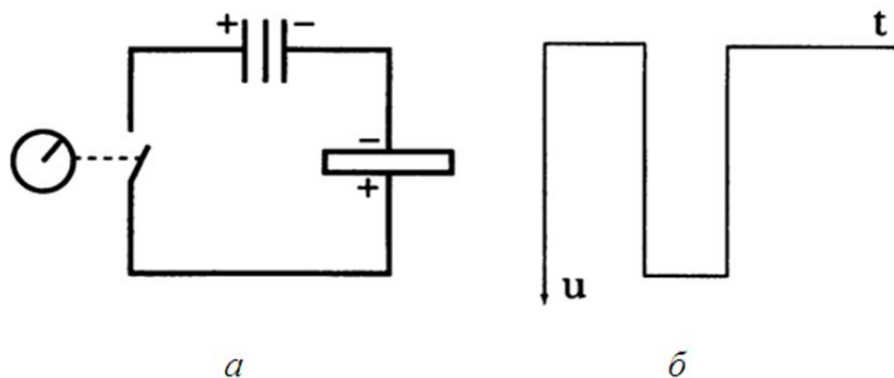


Рис. 2.2. Схема генератора прямокутних імпульсів (а) і схема розряду при ударному збудженні (б)

Електронний ключ у генераторі прямокутних імпульсів відключає випромінювач у необхідний момент часу, дозволяючи формувати імпульси необхідної тривалості.

Таким чином, вся енергія імпульсу може бути прикладена до п'єзоелементу протягом регульованого періоду. Довжина імпульсу визначає коливальні характеристики п'єзоелемента.

Теоретично для найбільш ефективного збудження коливань тривалість імпульсу збудження повинна дорівнювати половині періоду основної частоти п'єзопластини: для 5 МГц це 100 нс, для 2,5 МГц — 200 нс і т.д. Збудження імпульсами невідповідної тривалості може призвести до перекручування форми ехо-імпульсів, збільшенню їхньої тривалості.

Найбільша ефективність генератора прямокутних імпульсів і зростання амплітуди ехо-сигналів спостерігається на частотах нижче 4—5 МГц. На частотах вище 10 МГц різниця між ударним збудженням і збудженням імпульсами прямокутної форми практично відсутня.

2.2. Частота проходження зондувальних імпульсів

Частота проходження зондувальних імпульсів (ЗІ) є однієї з основних характеристик, що визначає продуктивність контролю, тобто максимальну швидкість сканування поверхні об'єкта контролю, при якій ще можливе виявлення дефекту.

Крім частоти проходження ЗІ на реальну продуктивність впливають: діаметр випромінюючої поверхні перетворювача, умови контролю, геометрія і стан поверхні та ін.

Тому така характеристика є досить відносною. Однак максимальна частота проходження ЗІ дозволяє оцінити граничну продуктивність самого дефектоскопа в певних умовах. Наприклад, якщо умовно прийняти ширину діаграми спрямованості перетворювача на певній глибині, рівною 5 мм, тоді, з огляду на те, що для реєстрації дефекту за ДСТ необхідно не менш 3-х імпульсів на дефект, можна приблизно оцінити максимально можливу для контролю швидкість руху перетворювача.

Таким чином, при частоті проходження 500 Гц максимальна продуктивність такого приладу складе близько 50 м/хв., що цілком достатньо навіть для автоматизованого контролю. І навпаки, при частоті проходження 10 Гц, максимальна швидкість руху складе близько 1 м/хв.

Багато приладів мають перемикаючу частоту посилок ЗІ “висока/низька” для того, щоб можна було проводити контроль матеріалів з різним згасанням, оскільки в матеріалах з малим згасанням при високій частоті посилок ЗІ може відбутися накладення ехо-імпульса на власний зондувальний імпульс.

Крім того, частота проходження зондувальних імпульсів, як правило, автоматично регулюється залежно від тривалості розгорнення та інших параметрів настроювання. Тобто недоцільно для виробу довжиною 2 м, посилати зондування з частотою 1 кГц, оскільки під час інтервалу між посиленнями імпульсів, прилад повинен прийняти ехо-сигнал, а з такої глибини він може ще не повернутися.

2.3. Параметри розгортки дефектоскопів

Тривалість розгортки являє собою інтервал часу проходження імпульсу, протягом якого відбитий ехо-сигнал може бути виведений на екран. Як правило, вказується в мікросекундах або міліметрах. Говорячи про розгортку в міліметрах, завжди мають на увазі певний матеріал з відомою швидкістю звуку (як правило, це сталь 45 зі швидкістю приблизно 5950—6000 м/с).

Часто називають максимальну тривалість розгортки “глибиною прозвучування”. Така назва абсолютно невірна, тому що побічно створюється у споживача думка про те, що більша тривалість розгортки відповідає високій потужності випромінювання приладу.

Насправді глибина прозвучування (тобто максимальна відстань у матеріалі, при якій можна одержати сигнал від відбивача із

заданим співвідношенням сигнал/шум) залежить у першу чергу від амплітуди зондувального імпульсу, згасання звуку в матеріалі об'єкту контролю, анізотропії його властивостей, геометрії та ін. Тобто цілком ймовірно, що на приладі з тривалістю розгортки 5 м дефект, розташований на такій глибині не буде виявлятися, тому що потужність підсилювача і параметри перетворювача не дозволяють цього зробити.

Під *мінімальною розгорткою* розуміється найменший інтервал часу, який можна розтягти на весь екран дефектоскопа. Відповідно, чим менше такий інтервал, тим зручніше працювати з малими товщинами і близько розташованими дефектами, оскільки можна відобразити малу зону контролю на весь екран.

Також необхідно звернути увагу на нижній діапазон товщин контролюваного матеріалу, тобто діапазон 2—3000 мм вказує, що розгортка до 2 мм на екрані дефектоскопа не буде відображатися. На екрані дефектоскопа може бути відображений радіосигнал (рис. 2.3, *а*) або половина (після детектора) його, як показано на рис. 2.3, *б*. Як видно з порівняння цих зображень, більш зручним є зображення, наведене на рис. 2.3, *б*.

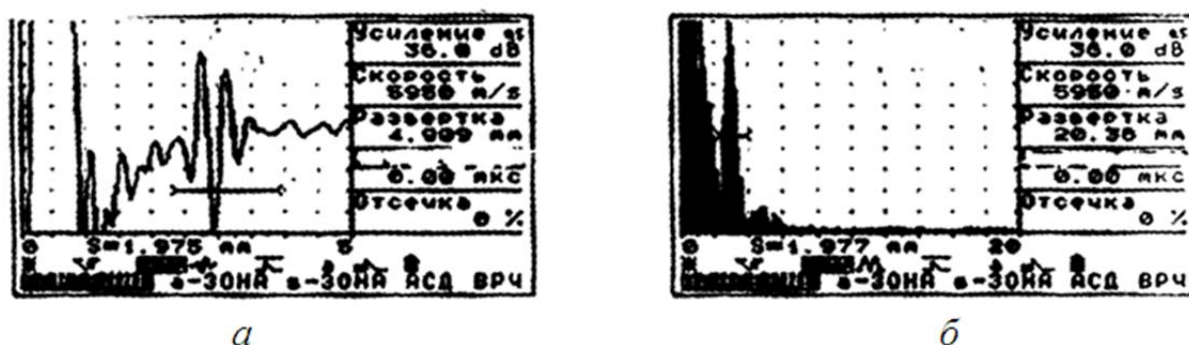


Рис. 2.3. Сигнал, відбитий від близькорозташованого до поверхні отвору у зразку (прямий ехо-сигнал 10 МГц): *а* — режим радіосигналу, розгортка 5 мм, *б* — режим повного детектора, розгортка 20 мм

Важливим є також крок зміни розгортки. Чим він менший, тим краще, тобто точніше можна виставити розгортку на екрані.

Однак, як правило, крок розгортки залежить від частоти оцифрування сигналу та способу його обробки. В будь-якому разі краще мати можливість плавного регулювання розгортки з кроком від 1 мм. Менш зручні фіксовані розгортки, наприклад, 20, 50 мм і т.д. В останньому випадку користувач втрачає можливості виставити сигнал у потрібне місце на екрані.

Ще один важливий параметр дефектоскопа — величина затримки розгортки.

Затримка розгортки — початковий часовий інтервал, що не буде відображатися на екрані дефектоскопа. Він вказується в мікросекундах. Таким чином, щоб контролювати виріб на наявність дефектів на глибині від 900 до 1000 мм досить встановити розгортку більше 1 м, але тоді працювати з таким сигналом буде незручно, тому що на екрані він виглядатиме як тонка лінія.

З огляду на те, що сигнали з глибини до 900 мм нас не цікавлять, набагато зручніше виставити затримку розгортки порядку 300 мкс (що по сталі складе саме близько 900 мм) і тривалість розгортки всього 100 мм.

Часто затримку розгортки роблять ще і негативною, тобто до моменту безпосереднього входження імпульсу в матеріал. Це дозволяє прив'язатися до власного зондувального імпульсу, а також вивести його на екран, що важливо для ряду операцій перевірки (визначення коефіцієнта перетворення ехо-сигналу, перевірки правильності завдання тривалості зондувального імпульсу тощо).

2.4. Параметри прийомного тракту дефектоскопів

Під *частотним діапазоном* розуміють мінімальну і максимальну межу прийнятих приймачем частот, при яких рівень амплітуди прийнятого сигналу падає не більш, ніж на задану величину від шуканого значення. Як правило, такий рівень встановлюють рівним -3 дБ або -6 дБ.

Підсилювачі прийомного тракту дефектоскопів діляться на резонансні (тобто заздалегідь погоджені на певну “резонансну” частоту контурами) і широкосмугові (тобто працюючі у всьому зазначеному діапазоні частот).

Для одержання високої роздільної здатності при використанні високодемпфованих перетворювачів необхідно мати дефектоскоп з широкою смугою частот, щоб забезпечити одержання ехо-імпульсів з малою тривалістю (тобто не утримуючих перехідних коливань) і, відповідно, можливість виявлення дрібних і близько розташованих дефектів. З іншої сторони, надмірне збільшення смуги частот веде до зростання рівня шумів і погіршенню чутливості, тому в широкосмугових дефектоскопах з високою верхньою межею (15—25 МГц), як правило, встановлюють декілька частотних піддіапазонів, обраних користувачем.

У випадку дефектоскопа з резонансним підсилювачем прийомного тракту роздільна здатність значно нижча, крім того, для підключення перетворювача потрібне перемикання приладу на конкретну частоту, що веде до обмеження номенклатури використовуваних перетворювачів у рамках заздалегідь встановлених частот приймача. Як правило, це 1,25; 1,8; 2,5; 5 і 10 МГц. Для широкосмугового дефектоскопа номенклатура частот обмежена тільки верхньою і нижньою межами частотного діапазону.

Важливою є також можливість електричного демпфірування сигналу (входу приймача і виходу генератора). Така функція дозволяє підвищити роздільну здатність слабодемпфованого перетворювача електричним способом, зменшити розмір мертвої зони і, в окремих випадках, підвищити співвідношення сигнал/шум.

2.5. Динамічний діапазон посилення, регулювання посилення

Один з основних параметрів приймача дефектоскопа — це діапазон прийнятих сигналів. З однієї сторони необхідно, щоб при вхідній напрузі порядку декількох десятків мікр вольт їхні

сигнали ще якось різнилися на рівні шумів, з іншого боку, напруга в кілька десятків вольтів повинна відображатися без обмежувачих ефектів. Динамічний діапазон посилення визначає відношення максимальної і мінімальної меж прийнятих сигналів. Величина діапазону вказується в дБ.

Необхідно враховувати, що динамічний діапазон і реальна величина посилення це різні поняття, оскільки в динамічний діапазон входить ще і послаблення сигналу за допомогою вбудованих атенуаторів і підсилювачів з негативним коефіцієнтом. Наприклад, у приладі УД2В—П46 динамічний діапазон 110 дБ, а реальне посилення 80 дБ. Тобто при 0 дБ реальне посилення вхідного сигналу негативне і дорівнює -30 дБ. У той же час реальна величина посилення також не дає об'єктивної картини, тому що цілком можливо, що у приладі з посиленням 130 дБ шуми можуть забивати значну частину екрана вже на 100 дБ.

З огляду зручності користування приладом важливе значення також має можливість змінювати величину посилення з різними кроками.

2.6. Тимчасове регулювання чутливості (ТРЧ)

Оскільки амплітуда ехо-сигналів убуває по глибині через згасання ультразвуку в матеріалі і фізики звукового поля, оцінювати сигнали при однаковому посиленні не має сенсу. Для цього є два взаємозалежних шляхи:

1. Вирівнювання амплітуд сигналів, шляхом побудови кривої ТРЧ (рис. 2.4, *a*). Посилення змінюється по глибині з таким розрахунком, щоб сигнали від однакових відбивачів мали на екрані однакову амплітуду незалежно від глибини їхнього розташування. У цьому випадку поріг оцінки може бути прийнятий фіксованим.

2. Будується крива амплітуда-відстань (АВК) протилежна кривій ТРЧ і всі оцінки сигналів здійснюються по відношенню не

до фіксованого порога, а до кривої лінії, що змінюється по глибині (рис. 2.4, б).

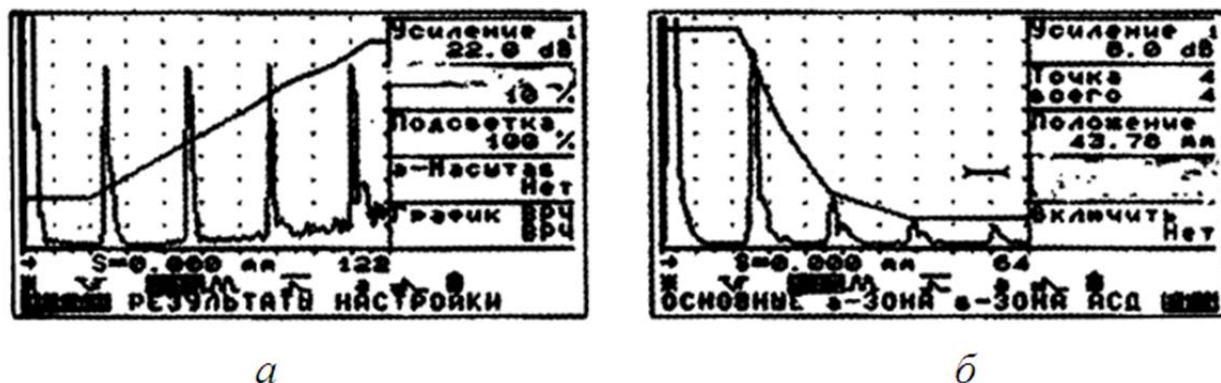


Рис. 2.4. Вирівнювання амплітуд ехо-сигналів за допомогою ТРЧ (а) і контроль за допомогою АВК (б)

У випадку досить великих зон контролю перший спосіб кращий за рахунок більшого діапазону настроювання, тому що визначення по АВК неминуче буде обмежене відношенням сигналів до 20 дБ, тобто в межах 10—100 % висоти екрана.

Основною характеристикою ТРЧ є глибина, тобто величина, що визначає співвідношення реальних амплітуд сигналів, які можна вирівняти за допомогою ТРЧ. Чим даний показник більший, тим відповідно краще. Крім того, найчастіше об'єкт контролю має складну форму, анізотропію властивостей по глибині тощо і форма кривої ТРЧ далека від прямолінійної. Тоді мають значення ще дві характеристики ТРЧ: кількість точок побудови кривої та максимальна крутість кривої ТРЧ (тобто максимальна кількість дБ, які можна задати за одиницю часу при введенні параметрів ТРЧ). Кількість точок кривої ТРЧ, що використовується на практиці, рідко перевищує 10, однак найчастіше в приладах закладено набагато більше.

2.7. Форма відображення ехо-імпульсів на екрані дефектоскопів

На сьогоднішній день існує досить багато способів відображення сигналів. Найпоширеніший з усіх — у вигляді А-розгорнення (A-scan), тобто звичайне двомірне відображення зміни амплітуди на вході дефектоскопа протягом часу. Більш інформативні В-розгорнення (зображення у вигляді точок різної яскравості, чим більше амплітуда, тим темніший струм), С-розгорнення, TOFD-побудова та 3D-розгорнення. Існує ще ряд інших більш спеціальних форм подання сигналів.

Однак зображення В, С та інших розгорнень вимагає використання дефектоскопа разом з комп'ютером, датчиками шляху та ін., тому що на самому екрані дефектоскопа потужна інформативна картинка перетворюється в скупку сукупність тільки білих і чорних точок (без півтонів), кількість яких залежить від роздільної здатності екрана. У дефектоскопах відображаються, як правило, квазі-В-розгорнення, тобто створені згідно часу, заданого оператором (без координатного пристрою).

А-розгорнення у свою чергу зустрічаються чотирьох видів (рис 2.5):

- високочастотний реальний сигнал (радіосигнал);
- повністю детектований сигнал (сума позитивної та негативної напівхвилі радіосигналу);
- позитивний детектований сигнал;
- негативний детектований сигнал.

Однонапівперіодне детектування необхідно, в основному, тоді, коли потрібно точно визначати час проходження сигналу (вимір товщини стінок, локалізація дефекту та ін.), тому що при такому виді розгорнення отримуються більш сурові фронти імпульсу.

Повне детектування має переваги при визначенні амплітуди сигналів, оскільки зображує усе ехо від фази.

(“peak freeze”). У цьому випадку вид екрана подібний до зображення еквалайзера програвача, коли верхня лінія сигналу залишається на екрані, а малі сигнали поблизу великих відбивачів не видні, оскільки будуть маскуватися фронтом/зрізом ехо-імпульса.

Принципово інший спосіб полягає в збереженні тільки одного максимального значення сигналу в кожному зондувальному імпульсі, так званого “огинаючого піку”. У цьому випадку висока роздільна здатність дозволяє виявляти малі дефекти поблизу великих сигналів, а також у ряді випадків, оцінювати довжину і форму дефектів.

2.8. Характеристики екранів дефектоскопів

На всі сучасні дефектоскопи встановлюються рідкокристалічні індикатори (РКІ) або електролюмінесцентні дисплеї (ЕЛД). Про переваги і недоліки цих типів сперечаються вже не перший рік, однак останнім часом всі провідні закордонні виробники або перейшли на РКІ, або пропонують їх як опцію.

Більшість індикаторів на рідких кристалах, які використовуються у сучасних дефектоскопах, мають трансрефлективний тип. Трансрефлективні індикатори використовують білий або срібний напівпрозорий матеріал, що відбиває частину зовнішнього світла, а також пропускає світло заднього підсвічування. Оскільки ці індикатори як відбивають, так і пропускають світло, то можуть використовуватися в широкому діапазоні яскравостей освітлення. Частота відновлення екрану, як правило, становить не більше 20—25 Гц, що, однак, цілком достатньо, з огляду на устрій людського зору.

Багато приладів мають регульовану яскравість і контрастність зображення. Підсвічування РКІ виконується люмінесцентне та світлодіодне. У першому випадку краща яскравість дисплея досягається ціною вузького температурного діапазону (оскільки світлодіодне підсвічування підігріває індикатор і дозволяє пра-

цювати при більш низьких температурах) та меншої довговічності. Меншу інерційність та кращу якість мають РК-дисплеї з активною матрицею, у яких кожний піксель керується окремим тонкоплівочним транзистором (thin-film transistor, TFT). Подібні дисплеї значно більш швидкодіючі і можуть бути багатобарвними, але при прямому сонячному світлі зображення на них практично не видно.

У таблиці 2.1 наведено особливості зображення РКІ та ЕЛД.

Таблиця 2.1. Особливості зображень на екрані

Тип освітлення	Пряме сонячне світло	Офісне освітлення	Приглушене світло	Дуже слабе світло
Якість зображення РКІ (монохром)	Дуже добре (без підсвічування)	Добре (без підсвічування)	Добре (з підсвічуванням)	Дуже добре (з підсвічуванням)
Якість зображення РКІ (кольоровий)	Дуже погано	Добре	Добре	Дуже добре
Якість зображення ЕЛД	Погано	Добре	Дуже добре	Дуже добре

Переваги РКІ:

- їх абсолютна нешкідливість для зору, тобто негативні випромінювання відсутні, можна працювати з приладом як завгодно довго, не стомлюючи зір;
- відсутність мерехтіння і спотворення;
- мале енергоспоживання. Напруга живлення монохромного РКІ лише 5 В, що обумовлює гарні характеристики споживання енергії та, як наслідок, малу кількість акумуляторів і великий ресурс їхньої роботи до підзарядки;
- низький показник власних шумів, тому РКІ практично не впливають на рівень загальних шумів приладу;
- довговічність і надійність, пов'язані з його принципом дії та конструкцією РКІ.

Недоліки РКІ:

- невеликий кут огляду (близько 50°);
- менша яскравість і контрастність, ніж в ЕЛД, що обмежує відстань до очей оператора.

ЕЛД мають відмінні характеристики яскравості і контрастності внаслідок принципу роботи, заснованого на світінні люмінофора під впливом змінної напруги, що прикладається. Частота відновлення екрана ЕЛД вища, ніж у РКІ. Вони забезпечують гарні візуальні характеристики при спостереженні за екраном з відстані або під кутом, що особливо корисно для промислових стаціонарних пристроїв. Однак, поряд з цим, ЕЛД мають ряд істотних недоліків:

- швидка стомлюваність оператора та негативні випромінювання, шкідливі для очей оператора;
- напруга живлення 12 В, що означає значне енергоспоживання, необхідну більшу кількість акумуляторів (та відповідну більшу їх вагу), що не дуже добре для переносних приладів;
- досить високий рівень власних шумів, пов'язаний з високою напругою, що необхідна для світіння люмінофора (170—210 В).

Основні характеристики екранів сучасних дефектоскопів наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2. Порівняльні характеристики екранів дефектоскопів

Найменування та виробник	Тип екрана і його розмір	Роздільна здатність
УД2В—П46 “Кропус”	РКІ або ЕЛД 110×65 мм	240×128
USM—25DAC, USM—22B, USM—23EX “Krautkramer”	РКІ 96,5×72	320×240

Продовження табл. 2.2

USN—52L “Krautkramer”	РКІ 114×76 мм, 60 Гц	480×320
ЕPOCH III “Panametrics”	ЕЛД або РКІ 72×96 мм	ЕЛД 256×320 РКІ 240×320
ЕPOCH IV “Panametrics”	ЕЛД РКІ	ЕЛД 320×240 РКІ 320×240
MASTERSCAN 340 “Panametrics”	8-ми кольоровий РКІ з активною матрицею або монохромний РКІ 102,7×77 мм	320×234
DIO—562 “Starmans”	РКІ 120×65 мм	256×128
УД4—Т “Votum”	РКІ (TFT) 115×86 мм	320×240
УД2—70 “Ультракон-Сервис”	8-ми кольоровий РКІ 150×110 мм	320×240
A1212 “Майстер” “АКС”	РКІ 80×70 мм	320×240
УИУ “СКАНЕР” “Алтеc”	ЕЛД 110×50 мм	160×80
УДЦ—201П “ЦНИИТМАШ”	ЕЛД	240×128
УД2—102, 103 “Пеленг” Алтек”	РКІ або ЕЛД 108×57,5 мм	240×128

2.9. Пам'ять налаштувань і результатів вимірювань

Всі сучасні цифрові дефектоскопи мають енергозалежну пам'ять налаштувань і результатів вимірювань.

Пам'ять налаштувань приладу дозволяє зберегти в дефектоскопі певну кількість налаштувань, що містять всі параметри контролю (розгорнення, зони контролю, параметри датчика та ін.) для того, щоб надалі викликати їх з пам'яті, не задаючи їх заново вручну. Іноді є можливість зберегти саме зображення на екрані приладу в момент запису налаштування.

Зображення можна зберегти на комп'ютері, вставити в протокол звіту про контроль та ін.

Можливість привласнювати налаштуванням логічні буквенно-цифрові імена на російській або англійській мовах — одна з найбільш необхідних особливостей. Набагато простіше задати ім'я, наприклад, “Контроль труби діаметром 30 мм”, ніж потім згадувати, що зберігається під ім'ям “Налаштування № 5”.

Не менше значення має можливість перейменування налаштувань з клавіатури дефектоскопа, тобто безпосередньо на дільниці контролю. Надалі за допомогою спеціального програмного забезпечення (ПЗ) можна зберігати, перейменовувати та записувати налаштування у дефектоскоп, формуючи, таким чином, необхідні блоки налаштувань для конкретного виду робіт. Подібне ПЗ є у різних виробників і поставляється разом з приладом або продається окремо.

Пам'ять результатів дозволяє зберігати для подальшої обробки чисельні значення: амплітуду, товщину, відстань до дефекту, швидкість у матеріалі та ін. За допомогою ПЗ на комп'ютері можна обробити дані, сформувати протоколи, розрахувати статистику тощо.

2.10. Стробування зон контролю та сигналізація про дефекти

Під зоною контролю (стробом) розуміють деяку переміщувану по екрані в горизонтальному і вертикальному напрямках лінію регульованої довжини. З появою сигналу в зоні, обмеженою цією лінією, спрацьовує автоматична сигналізація дефектів (АСД). Крім того, перша зона, як правило, використовується для виміру (відстані до перетинання першої зони з фронтом сигналу або до максимального піка сигналу в зоні, максимальної амплітуди в зоні та ін.).

Зони контролю називають незалежними у випадку, якщо установки (положення, ширина) однієї із зон не впливають на установки інших. Не менш важливе значення має також індивідуальна логіка визначення дефектів (тобто логіка сигналізації — сигнал вище/нижче порогу тощо). У такий спосіб можна контролювати, наприклад, одночасне перевищення сигналом порогу у першій зоні контролю та падіння донного сигналу нижче порогу у другій.

Вихід на зовнішнє АСД використовується в основному для промислового контролю, коли для візуалізації дефекту необхідно приєднати деяку зовнішню звукову або світлову схему сигналізації.

2.11. Похибки вимірюваних величин

Всі сучасні дефектоскопи вимірюють тільки два типи величин: час приходу сигналу і його амплітуду. Інші величини — відстань (товщина) і швидкість звуку — є похідними від часу. Таким чином, теоретична точність виміру приладом всіх величин залежить від двох параметрів: похибки виміру тимчасових інтервалів та похибки виміру амплітуди. Реальна ж точність виміру залежить від величезної кількості факторів: температури навколишнього середовища, акустичного контакту, якості поверхні тощо. Тому, говорячи про точність вимірів, як правило, мають на увазі точність самого приладу, а реально досяжна точність вимірів уже визначається методикою та умовами контролю.

Точність визначення часу приходу сигналу залежить як від частоти дискретизації сигналу при оцифруванні, так і від способу обробки отриманих даних. Чим вища частота оцифрування, тим на більшу кількість точок розбивається кожний період сигналу і, відповідно, тим більший обсяг отриманих про сигнал даних і вища точність. Частота оцифрування сучасних дефектоскопів коливається в межах від 5 до 60 МГц.

Інший, не менш важливий фактор — це спосіб обробки даних, який надходить двома способами.

У першому випадку обробляють у реальному часі весь обсяг отриманих даних (у рамках розгорнення), а на екран виводять картинку відповідної роздільної здатності. Тоді точність вимірів визначається кількістю отриманих даних (тобто частотою оцифрування). Такі дефектоскопи, як правило, можуть використовуватися для прецизійних вимірів товщини з розподільною здатністю 0,01 мм і вище.

Другий спосіб полягає у виділенні з усіх даних тільки тієї частини, яка потрібна для виводу на екран і подальшої обробки. Точність обчислень залежить від кількості точок по горизонталі екрана та, відповідно, залежить від тривалості розгорнення. Похибка складає певний відсоток від глибини. Точність встановлення зон контролю (стробів) також визначається екранним розгорненням. Такі дефектоскопи не можна використовувати для точного виміру товщини, однак їх можливостей буває цілком достатньо для пошуку і локалізації дефектів у тому випадку, якщо прецизійне визначення їхніх координат не потрібне.

При вимірі амплітуди також існує ряд особливостей. Стандартний спосіб виміру полягає у визначенні амплітуди сигналу у % щодо висоти екрана або у дБ щодо порога спрацьовування. Другий варіант, у загальному випадку, є просто різновидом першого, тому що дБ визначають як відношення положення піку сигналу на екрані до положення порогу на екрані.

Точність визначення, як правило, знаходиться в межах 1 дБ, що цілком відповідає всім існуючим методикам. Однак, проблеми виникають у тому випадку, якщо необхідно порівняти амплітуди сигналів, які досить сильно відрізняються друг від друга, тобто в 10 разів і більше. У цьому випадку порівняння на екрані провести неможливо, оскільки обидва сигнали разом не поміщаються на екрані, тобто одного ще не видно, а другий уже зашкалює. Тоді необхідно або будувати криву ТРЧ і вирівнювати

сигнали вручну по екрану і потім враховувати параметри ТРЧ, або міняти посилення для кожного сигналу і потім враховувати зміну посилення. І те і інше вкрай незручно та трудомістко.

Більш зручним варіантом є вимір амплітуди сигналів щодо опорного рівня. Деякий сигнал, що цікавить, на вході приймають за опорний і всі інші виміри амплітуди проводять відносно нього. Для цього необхідно, щоб сам дефектоскоп мав апаратну підтримку даної функції. При такому способі виміру не має значення величина посилення — прилад враховує її автоматично, звільняючи користувача від цієї необхідності. Крім того, можна легко обчислити реальну напругу кожного сигналу у вольтах, а отже, без застосування осцилографа і іншої апаратури легко оцінити коефіцієнт перетворювача шукача.

2.12. Робота від акумуляторів, робоча температура

Принципово існує два типи акумуляторних приладів: зі спеціальними акумуляторними складниками та звичайними стандартного (типового) розмірами акумуляторами.

В акумуляторному складнику використовуються підібрані за опором та ємністю елементи і, як наслідок, ефективність заряду буде більша. При цьому негативним моментом є необхідність звертатися безпосередньо до виробника за новим акумулятором (термін служби 1—3 роки). У той же час стандартні акумулятори продаються в будь-якій країні світу у магазині, як і зарядний пристрій до них.

Робоча температура визначається типом екрана. Для РКІ ця температура знаходиться в межах від 0 до 500 °С, а для ЕЛД становить від 20 до 550 °С.

Контрольні запитання

1. Що називається зондувальним імпульсом дефектоскопа?
2. Охарактеризуйте принцип роботи дефектоскопів.

3. Охарактеризуйте параметри розгорнення дефектоскопів.
4. Охарактеризуйте параметри прийомного тракту дефектоскопів.
5. Що таке діапазон прийнятих сигналів дефектоскопа?
6. Для чого використовується крива ТРЧ? Які її характеристики?
7. Які існують способи відображення ехо-імпульсів на екрані дефектоскопу?
8. Назвіть види А-розгорнення дефектоскопа.
9. Охарактеризуйте режим “обтікаючого сигналу” дефектоскопа.
10. Охарактеризуйте екрани дефектоскопів. Назвіть їх переваги та недоліки.
11. Охарактеризуйте пам’ять налаштувань та результатів дефектоскопів.
12. Що називається стробуванням зон контролю дефектоскопу?
13. Яка точність вимірів дефектоскопів?
14. Якими способами здійснюється обробка інформації, що надходить до дефектоскопу.

3. ДЕФЕКТИ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ

3.1. Типові дефекти і їх класифікація

Якість зварних з'єднань значною мірою визначає експлуатаційну надійність і економічність конструкцій. Наявність у зварних з'єднаннях дефектів — відхилень від заданих властивостей, форми і суцільності шва, властивостей і суцільності біляшовної зони може призвести до порушення герметичності, міцності і інших експлуатаційних характеристик виробу, а при деяких обставинах викликати аварію його в процесі виготовлення, монтажу або експлуатації. У реальних умовах виробництва дефекти виникають досить часто. Кількість їх — об'єктивний показник раціональності прийнятого технологічного процесу, придатності і кондиції використовуваних зварювальних матеріалів та основного металу, кваліфікації кадрів, наявності необхідного комфорту для праці зварників, оптимальності і технічного стану устаткування та оснащення, загальної культури виробництва, характерної для даного підприємства.

Роботи з контролю якості виробу, виявлення та усунення дефектів трудомісткі і істотно впливають на вартість продукції. Зниження ймовірності утворення дефектів навіть за рахунок збільшення витрат на допоміжні та основні технологічні операції є економічно доцільним. Методи контролю якості зварних з'єднань досить різноманітні. Завдання контролю якості усе більше зводяться до попередження виникнення, а не до виявлення вже наявних дефектів.

Дефекти, що з'являються у зварних з'єднаннях, різняться за місцем розташування (зовнішні і внутрішні) і причинами виникнення.

Залежно від причин виникнення їх можна розділити на дві групи. До першої групи відносяться дефекти, пов'язані з металур-

гійними, термічними і гідродинамічними явищами, які відбуваються в процесі утворення, формування та кристалізації зварювальної ванни і охолодження зварного з'єднання. Це кристалізаційні і холодні тріщини в металі шва та біляшовній зоні, пори, шлакові канали, флокени, зона несплавлення, утяжини, відхилення від необхідних міцнісних і пластичних властивостей металу шва і зварного з'єднання, а також несприятливі зміни властивостей металу біляшовної зони.

До другої групи дефектів, які мають назву дефекти формування швів, відносяться непровари, подрізи, напливи, прожоги, кратери, несиметричність розташування кутових швів, зменшення розмірів швів та ін. Виникнення подібних дефектів, як правило, обумовлене неправильним технологічним процесом, порушенням режиму зварювання, несправністю устаткування, низькою кваліфікацією робітників, поганою підготовкою і складанням під зварювання елементів конструкції, неточним розташуванням кінця електрода стосовно зварюваних кромок, недоступністю місця зварювання і виникаючою через це незручністю виконання зварювальних маніпуляцій, а також іншими причинами, пов'язаними з культурою виробництва.

У процесі виготовлення зварних конструкцій спостерігаються зміни форми окремих елементів або всієї конструкції і відступи від передбачених проектом розмірів. Ці відхилення, що є також дефектами, викликані деформацією (викривленням) виробу та усадкою швів.

3.2. Кристалізаційні тріщини в металі шва

Кристалізаційними тріщинами називають макроскопічні і мікроскопічні несучільності, що мають характер надрізу та зароджуються у процесі первинної кристалізації металу шва. Ці тріщини можуть потім розвиватися при охолодженні металу у твердому стані. Характерною рисою кристалізаційних тріщин є

міжкристалічний вид руйнування. Вони тісно пов'язані з первинною структурою металу шва і розташовані уздовж напрямку росту стовпчастих кристалітів.

Залежно від орієнтації стосовно осі шва кристалізаційні тріщини бувають поздовжніми і поперечними (рис. 3.1, *а, б*).

Поздовжні тріщини можуть розташовуватися по осі шва в місці стику стовпчастих кристалітів або між сусідніми кристалітами, поперечні тріщини — між сусідніми кристалітами. Іноді спостерігаються дефекти, що є комбінацією поздовжніх і поперечних тріщин (рис. 3.1, *в*).

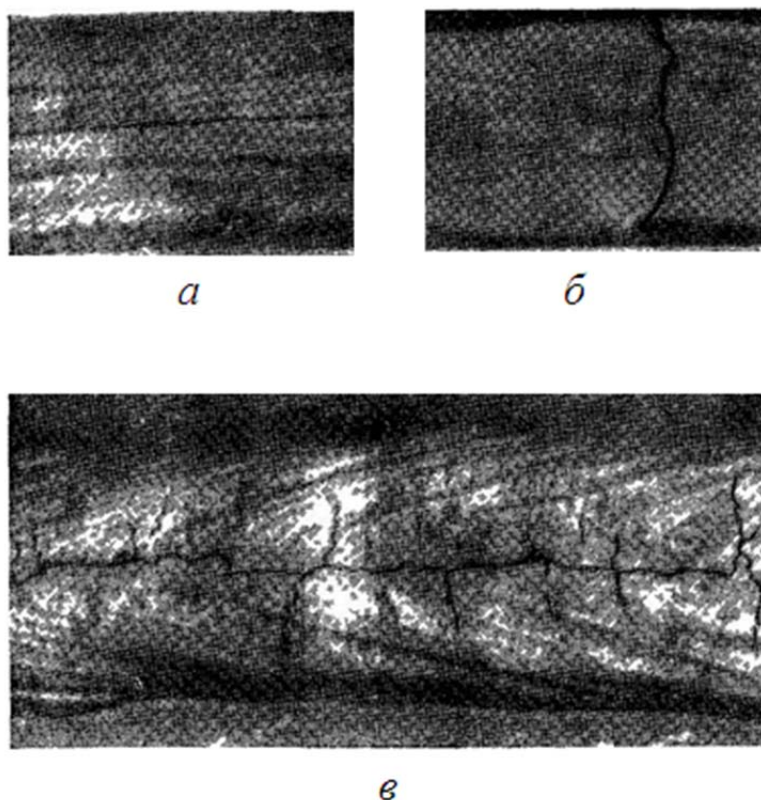


Рис. 3.1. Кристалізаційні тріщини в металі шва: *а* — поздовжня; *б* — поперечна; *в* — поздовжня та поперечні

При дуговому зварюванні кристалізаційні тріщини виходять (рис. 3.2, *а*) або не виходять (рис. 3.2, *б*) на поверхню шва.

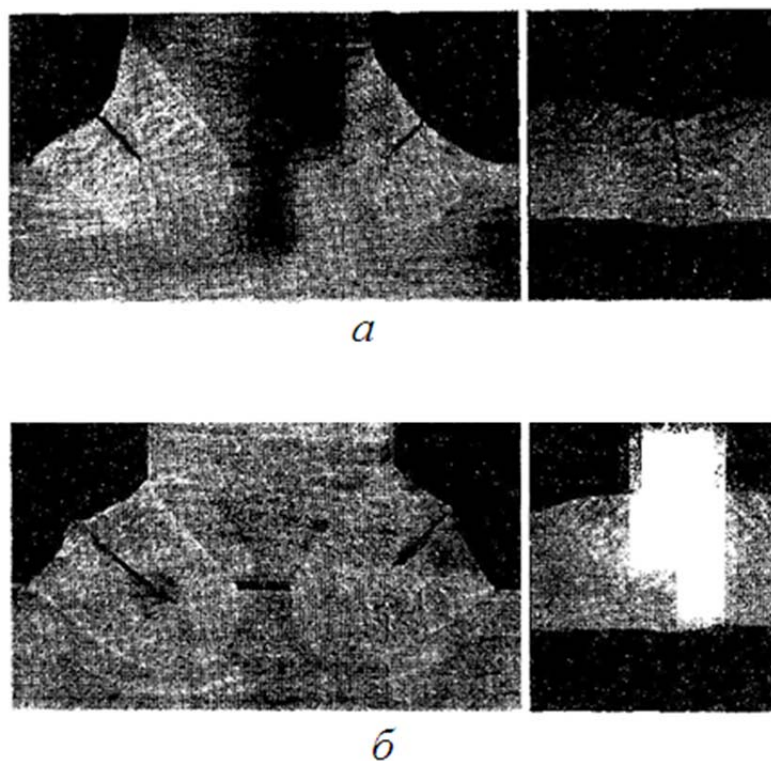


Рис. 3.2. Розташування кристалізаційної тріщини по перетину шва (дугове зварювання): *а* — тріщина, що виходить на поверхню шва; *б* — тріщина, що не виходить на поверхню шва

При електрошлаковому зварюванні тріщини утворюються, як правило, у середині перетину шва і не виходять на його поверхню. Поверхні тріщин, що виходять назовні шва, як правило, пофарбовані в кольори мінливості, тому що покриті тонкою плівкою окислів (рис. 3.3, *а*). Поверхня не вихідних назовні тріщин має сіро-білий колір без металевого блиску (рис. 3.3, *б*), що обумовлено відсутністю окислювальної дії повітря на метал.

Тріщини, що виходять на поверхню шва, виявляються при зовнішньому огляді і за допомогою магнітного порошку. Тріщини, що не виходять на поверхню шва, виявляються просвічуванням швів рентгенівськими або гамма-променями, перевіркою швів ультразвуком, при руйнуванні шва по його зламу або по макро- і мікрошліфах.

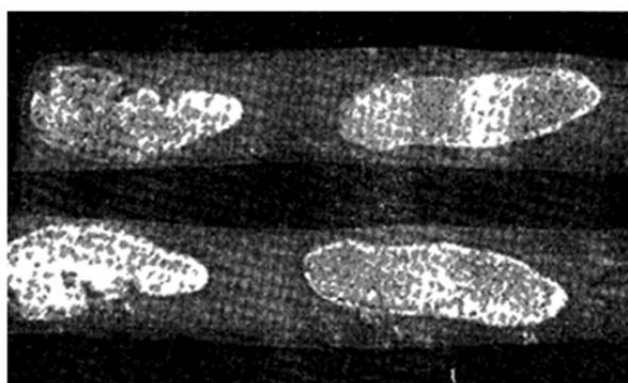
*а**б*

Рис. 3.3. Кристалізаційні тріщини у зламі шва: *а* — тріщини, що виходять на поверхню шва; *б* — тріщини, що не виходять на поверхню шва

Тріщини в переважній більшості випадків є недопустимим дефектом, тому що можуть послужити причиною (осередком) крихкого та корозійного руйнування конструкції або деталі в процесі виготовлення, а також експлуатації. Кристалізаційні тріщини є одним з основних видів браку при зварюванні.

Процес утворення кристалізаційних тріщин може бути описаний такою схемою. При затвердінні метал шва проходить крізь так званий ефективний інтервал кристалізації, у якому метал перебуває у твердо-рідкому стані. Цей інтервал починається з переплетіння та зрощення дендритів у твердий каркас і закінчується повним затвердінням металу. Твердо-рідкий стан металу характеризується підвищеною крихкістю, у зв'язку з чим ефективний

інтервал кристалізації називають також температурним інтервалом крихкості. При переході через нижню межу інтервалу крихкості (температура реального солідуса) пластичні властивості металу різко поліпшуються. Величина температурного інтервалу крихкості визначається хімічним складом металу шва.

Затвердіння металу шва відбувається в умовах впливу напружень, що розтягують, які виникають у результаті нерівномірного нагрівання і охолодження зварюваного металу, жорсткого закріплення деталей і утрудненого скорочення металу шва. Наявність напружень, що розтягують, викликає пластичну деформацію металу шва, причому інтенсивність її наростання збільшується зі зниженням температури. Якщо в період перебування металу шва у стані зниженої пластичності (у температурному інтервалі крихкості) величина деформації перевищить пластичність металу, то відбудеться поділ кристалітів, тобто утворення тріщин. Якщо пластична деформація металу під час перебування в температурному інтервалі крихкості не перевершить величини пластичності самого металу, то кристалізаційні тріщини не утворюються.

Таким чином, стійкість металу шва проти кристалізаційних тріщин визначається рядом взаємозалежних факторів. Основними з них є величина температурного інтервалу крихкості (чим ширше цей інтервал, тим більша ймовірність утворення тріщин), пластичність металу в цьому інтервалі та інтенсивність наростання пластичних деформацій в міру зниження температури металу (температура деформації).

При розробці технології зварювання приймають, що стійкість металу шва проти кристалізаційних тріщин (технологічна міцність металу шва) залежить від наступних факторів:

- величини і швидкості наростання діючих у процесі кристалізації металу шва напружень, що розтягують;

- хімічного складу металу шва, що визначає властивості його в період кристалізації і тривалість перебування в стані, який характеризується зниженою пластичністю;
- форми зварювальної ванни, що визначає напрямок росту стовпчастих кристалітів та характер їхнього змикання між собою;
- розташування міжкристалітних ділянок стосовно напружень, що розтягують, і характер зміни пластичної деформації;
- величини первинних кристалітів.

Вплив напружень, що розтягують. У реальних умовах зварювання практично неможливо повністю усунути вплив напружень, що розтягують, на метал, який кристалізується, у зварювальній ванні. Тому завдання зводиться до зменшення величини цих напружень, до віддалення моменту зростання їх до значення, що може викликати пластичну деформацію металу шва і призводить до його руйнування. Це може бути досягнуте шляхом раціонального конструювання вузлів і елементів, зменшення кількості і зосередження швів, вибору оптимальної форми оброблення кромки, усунення зайвої жорсткості вузлів та інших мір.

Зменшення впливу напружень, що розтягують, за рахунок технологічних заходів досягається шляхом попереднього підігріву, раціонального порядку накладення швів і вибору способів та режимів зварювання, що забезпечують мінімальну величину цих напружень. Позитивний вплив підігріву обумовлений віддаленням моменту виникнення напружень, що розтягують, і зниженням швидкості їхнього наростання в період, коли метал шва має знижену пластичність.

Попередній підігрів є досить ефективним заходом підвищення стійкості металу шва проти кристалізаційних тріщин при зварюванні конструкційних та інших сталей. Температура попереднього підігріву, при якій не спостерігається утворення тріщин, залежить від хімічного складу металу шва, конструкції і перетину

деталей, а також інших факторів і, як правило, змінюється в межах 150—500 °С.

Для ілюстрації даного твердження на рис. 3.4 наведена залежність між значенням температури підігріву і критичним вмістом вуглецю в металі шва.

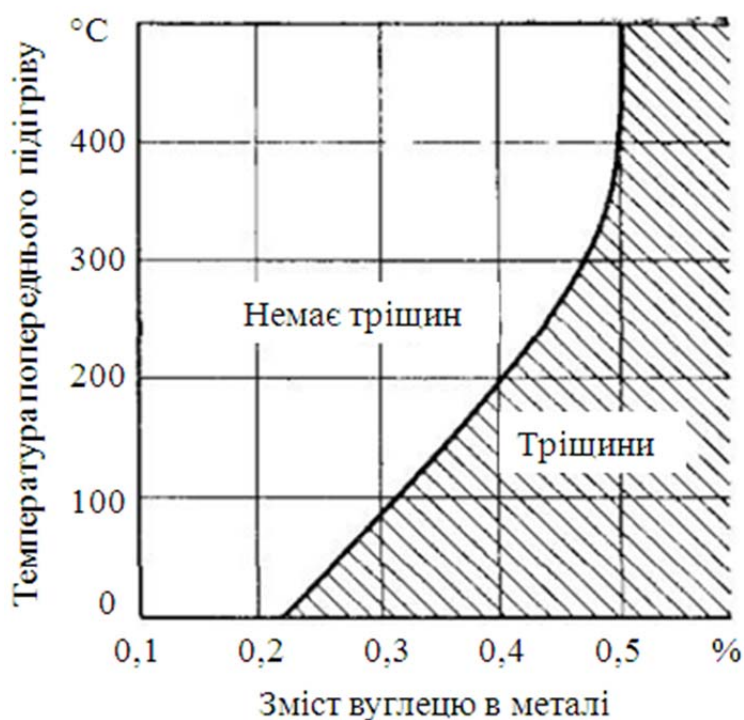


Рис. 3.4. Залежність між критичним вмістом вуглецю у металі шва та температурою підігріву (коефіцієнт форми провару дорівнює 4)

При раціональному порядку накладення швів можливе зварювання деталей з їхнім оптимальним закріпленням, що призводить до зниження напружень, які розтягують. На практиці досить часто, особливо при зварюванні під флюсом низьколегованих і середньолегованих сталей, спостерігається утворення тріщин на ділянках шва, що безпосередньо прилягають до складальних прихваток і планок, які служать для виводу початку та кінця шва за межі з'єднання.

При розплавленні складальної прихватки зазор між зварюваними кромками прагне збільшитися, в результаті чого ство-

рюються значні напруження, що розтягують. Ці напруження і призводять у деяких випадках до утворення тріщин на ділянках шва, що не встигли закристалізуватися. Для усунення цього рекомендується ставити прихватки з боку, зворотному накладенню першого шару (при двосторонньому зварюванні), або зменшувати відстань між прихватами.

Утворення тріщин на початку та в кінці шва обумовлене тим, що нежорсткі вивідні планки не можуть утримати кінці листів від розбіжності. Радикальним заходом запобігання таких тріщин є надійне закріплення кінців деталей, що зварюються, у пристосуванні або збільшенні жорсткості вивідних планок.

Вплив хімічного складу металу шва. Хімічний склад металу шва впливає на його стійкість проти кристалізаційних тріщин. Всі елементи, що входять до складу металу шва, умовно можуть бути віднесені до трьох основних груп,

Перша група — елементи, присутність яких знижує стійкість металу шва проти кристалізаційних тріщин. Такі елементи прийнято називати шкідливими.

Друга група — елементи, які залежно від їхнього сполучення і концентрації здійснюють позитивний (корисні домішки) або негативний (шкідливі домішки) вплив на стійкість металу шва проти кристалізаційних тріщин.

Третя група — елементи, присутність яких не здійснює вплив на стійкість металу шва проти кристалізаційних тріщин.

Сірка — шкідлива домішка. Підвищення вмісту сірки в металі шва різко знижує його стійкість проти кристалізаційних тріщин. Сірка практично нерозчинна у твердому залізі, а тому перебуває у швах сталі у вигляді неметалевих сульфідних включень. Безпосередньою причиною утворення кристалізаційних тріщин під дією сірки є легкоплавкі сульфідні прошарки, що розташовуються по межах кристалітів металу шва. Критичний вміст сірки у шві, тобто її вміст, вище якого спостерігається утворення трі-

щин, залежить від величини напружень, що розтягують, форми шва і його хімічного складу.

Для швів вуглецевих сталей найбільший вплив на утворення тріщин, крім сірки, здійснюють також вуглець і марганець.

На рис. 3.5 наведена залежність між критичним вмістом сірки, вмістом вуглецю і марганцю в металі шва.

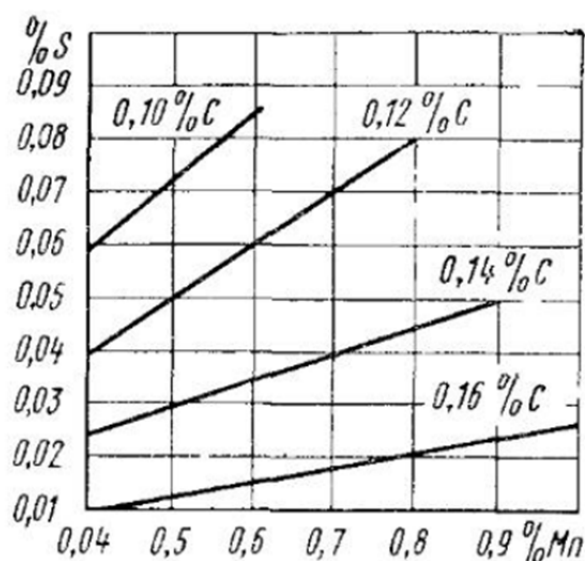


Рис. 3.5. Утворення тріщин залежно від вмісту сірки, марганцю і вуглецю у металі кутового шва. Поля діаграми вище кривих відповідають наявності, а нижче — відсутності тріщин (коефіцієнт форми шва дорівнює 1,5)

Всі інші фактори, що визначають стійкість металу шва проти кристалізаційних тріщин, приймаються постійними. Наведені дані свідчать про те, що зниження вмісту вуглецю призводить до зниження шкідливого впливу сірки (критичний вміст сірки підвищується). Марганець у певних межах знижує шкідливу дію сірки.

Сірка переходить у метал шва з основного та додаткового (присадкового) металів і з матеріалів, що входять до складу електродного покриття або флюсу. Відповідно до діючих стандартів вміст сірки в конструкційних сталях не повинен переви-

щувати 0,05 %, та, як правило, становить 0,03—0,04 %. Зниження вмісту сірки в сталі у порівнянні з цими кількостями можливе, але пов'язане з підвищенням вартості виплавки сталі.

З економічних міркувань доцільніше знижувати вміст сірки у зварювальних матеріалах, зокрема у зварювальному дроті. ГОСТ 2246—70 обмежує вміст сірки у низьковуглецевому і легovanому зварювальному дроті у межах 0,01—0,02 %. У деяких марках високолегованого дроту це обмеження становить 0,016 %. Жорстко обмежений вміст сірки і в електродних покриттях та зварювальних флюсах. Значний практичний інтерес являє знесірчення зварювальної ванни за рахунок застосування спеціальних флюсів і покриттів, при яких досягається перехід сірки з металу зварювальної ванни в шлаки.

Фосфор часто впливає на стійкість металу шва проти кристалізаційних тріщин і призводить до різкого зниження ударної в'язкості металу, особливо при знижених температурах. Інтенсивність впливу фосфору на утворення кристалізаційних тріщин пропорційна вмісту легкоплавких фосфоровмісних включень на межах кристалітів металу шва. Можливість утворення таких включень тим більша, чим вища концентрація фосфору і нижча його розчинність у твердому металі.

Оскільки розчинність фосфору в аустеніті менша, ніж у фериті, небезпека утворення кристалізаційних тріщин від дії фосфору значно більша в аустенітних швах. Найнебезпечніший фосфор для швів з чисто аустенітною структурою. Якщо ж на ранніх стадіях кристалізації металу шва, крім аустеніту утвориться і ферит, небезпека утворення тріщин значно зменшується, тому що більша частина фосфору розчиняється у металі. Фосфор є потенційною причиною кристалізаційних тріщин і у швах у деяких середньолегованих сталях.

Вплив фосфору і сірки на утворення кристалізаційних тріщин взаємно підсилюється тим, що місця ліквідації цих елементів у металі шва збігаються. Вуглець також підсилює шкідливий вплив

фосфору. При звичайних концентраціях фосфор у низьковуглецевих і низьколегованих швах кристалізаційних тріщин не викликає.

Фосфор потрапляє у метал шва з основного і електродного металів та з матеріалів, що входять до складу покриттів і флюсів. У конструкційних вуглецевих сталях вміст фосфору допускається не більше 0,055 %, а у легованих сталях — не більше 0,03 %. Відповідно до ГОСТ 2246—70 вміст фосфору у зварювальному дроті не повинен перевищувати 0,04 %. У електродне покриття та флюс фосфор попадає в основному з марганцевою рудою.

Вуглець є найважливішим елементом, що визначає структуру і властивості металу шва, його міцність та поведінку при експлуатації. Разом з тим вуглець чинить різко негативний вплив на стійкість металу шва проти кристалізаційних тріщин. У швах вуглецевих і низьколегованих сталях вуглець підсилює шкідливу дію сірки. При зварюванні високолегованих сталей вуглець сприяє утворенню по межах кристалітів легкоплавких плівок карбідного походження, що знижує стійкість швів проти кристалізаційних тріщин. Критичний вміст вуглецю залежить від конструкції вузла, наявності або відсутності попереднього підігріву, форми шва і вмісту в ньому інших елементів, у першу чергу сірки (рис. 3.5).

Вуглець попадає у метал шва з основного, електродного та присадкового металів. Щоб знизити вміст вуглецю у металі шва, застосовують зварювальний дріт і електродні стрижні з низьким вмістом вуглецю, зменшують частку основного металу у шві. За рахунок взаємодії металу з газовою та шлаковою фазами може відбуватися окислювання (вигорання) вуглецю, що також знижує його вміст у шві.

Оскільки вуглець є найбільш дешевим і недефіцитним елементом, що підвищує міцність металу шва, тому завдання раціональної технології зварювання повинно полягати у збереженні у

металі шва більш високої кількості вуглецю, що ще не викликає зниження стійкості проти тріщин.

Кремній сприяє утворенню кристалізаційних тріщин у швах вуглецевих сталей. Однак його шкідлива дія значно слабкіша, ніж вуглецю. У чисто аустенітних хромонікелевих швах кремній більш небезпечний щодо утворення кристалізаційних тріщин, ніж у швах вуглецевої сталі. Це обумовлено виділенням на межах кристалітів плівок силіцидів та інших легкоплавких неметалевих сполук. Поява феритної складової у структурі аустенітних швів підвищує їхню стійкість проти утворення тріщин.

Кремній переходить у шов з основного і додаткового металу, а також за рахунок відновлення його з електродного покриття або флюсу. Раціональна технологія зварювання повинна забезпечувати присутність у шві кремнію в кількості, що підвищує стійкість його проти пор, але не викликає зниження стійкості проти утворення тріщин. Розчиняючись у фериті, кремній підвищує його міцність, що є бажаним. Оптимальний вміст кремнію залежить від способу зварювання, типу шва і складу основного металу та при зварюванні вуглецевих і низьколегованих конструкційних сталей коливається в межах 0,15—0,6 %.

Нікель при невеликих концентраціях у металі шва не здійснює впливу на стійкість його проти виникнення кристалізаційних тріщин. При високих концентраціях (понад 1—2 %) нікель підсилює шкідливий вплив сірки, сприяючи цим утворенню кристалізаційних тріщин. Цей вплив нікелю обумовлений утворенням легкоплавких включень сульфіду нікелю.

Нікель є дорогим легуючим елементом. Розчиняючись у фериті, він підвищує міцність і ударну в'язкість металу шва при звичайних і понижених температурах при збереженні високої пластичності. Однак через порівняно високу вартість, нікель застосовують лише там, де заміна його іншим, більш дешевим елементом, не дає потрібного ефекту. При зварюванні вуглецевих і низьколегованих конструкційних сталей нікель потрапляє у шов з

основного і додаткового металів у кількостях, що не здійснюють негативного впливу на стійкість металу шва проти утворення тріщин.

Марганець зменшує шкідливий вплив сірки, підвищуючи стійкість шва вуглецевих, низьколегованих і хромонікелевих аустенітних сталей проти утворення кристалізаційних тріщин. Марганець має більш високу, у порівнянні із залізом, хімічну спорідненість з сіркою. При досить високій його концентрації у металі шва сірка зв'язується в тугоплавкий сульфід марганцю, включення якого є менш небезпечним щодо виникнення тріщин, ніж включення сульфиду заліза.

При високому вмісті марганцю у металі шва в присутності вуглецю можливе виникнення кристалізаційних тріщин, які викликані легкоплавкою карбідною евтектикою. У зв'язку з цим залежно від концентрації марганець впливає на стійкість швів проти утворення кристалізаційних тріщин. Так, наприклад, для швів, що містять 0,1—0,12 % С, підвищення вмісту марганцю до 2,5 % впливає на стійкість металу шва проти утворення тріщин. Підвищення вмісту марганцю від 2,5 до 4 % не чинить впливу, а подальше підвищення його вмісту зменшує стійкість металу шва проти утворення тріщин. При підвищенні вмісту вуглецю в металі шва позитивний вплив марганцю позначається в більш вузьких межах концентрацій. Так, при вмісті 0,13—0,2 % С корисний вплив марганцю відмічається при вмісті його до 1,8 %.

Марганець є постійною складовою сталі. Розчиняючись у фериті, він підвищує його міцність. Марганець потрапляє у метал шва з основного і додаткового металів, а також з матеріалів, що входять до складу покриття або флюсу.

Хром, подібно марганцю, зменшує шкідливий вплив сірки, підвищуючи стійкість швів проти утворення кристалізаційних тріщин. Маючи більш високу, ніж залізо, хімічну спорідненість з сіркою, хром зв'язує її в тугоплавкий сульфід хрому. Розчиняючись у фериті, хром підвищує міцність металу. При високому

вмісті хрому та вуглецю можливе утворення кристалізаційних тріщин по легкоплавких карбідних прошарках. Хром потрапляє у метал шва з основного і додаткового металів.

Кисень підвищує стійкість швів проти утворення кристалізаційних тріщин, які викликані сіркою. Разом з тим підвищення вмісту кисню знижує ударну в'язкість металу шва вуглецевих і низьколегованих конструкційних сталей і зменшує пластичність аустенітних швів. Кисень може потрапляти у метал шва з основного і додаткового металів, електродного покриття, флюсу, захисного газу або повітря.

Одним з найбільш широко застосовуваних технологічних методів підвищення стійкості шва проти утворення кристалізаційних тріщин є зменшення в ньому вмісту шкідливих і збільшення корисних елементів. Зміни хімічного складу металу шва в бажаному напрямку, як правило, досягають застосуванням додаткового металу з низькою концентрацією шкідливих домішок, зменшенням частки основного металу у металі шва, а також вибором типу покриття або флюсу, при металургійній взаємодії яких з металом зварювальної ванни відбувається очищення його від шкідливих елементів і легування корисними.

Частку основного металу у шві зменшують за рахунок застосування відповідних методів і режимів зварювання (на малих струмах, двома дугами, на присадковому дроті тощо). Найбільш діючий метод запобігання виникнення тріщин у металі шва за рахунок застосування основного металу з низьким вмістом шкідливих елементів не завжди виправданий, оскільки призводить до підвищення вартості основного металу.

Для конструкцій, що працюють при підвищених температурах, необхідно прагнути до того, щоб метал шва за хімічним складом був близький до основного металу. Варто уникати різного легування шва і основного металу, що може призвести в результаті процесів дифузії, що протікають при цих температурах, до утворення у зварному з'єднанні зони із зміненими властивос-

тями (наприклад, знеуглецьованої зони). Наявність структурної неоднорідності може викликати різку концентрацію напружень і передчасний вихід конструкції з ладу.

Вплив форми зварювальної ванни. Зміна способу і режиму зварювання призводить до зміни форми зварювальної ванни (форми шва) і, як наслідок, до зміни напрямку росту стовпчастих кристалітів і характеру їхнього взаємного зрощення.

Конфігурація шва характеризується коефіцієнтом форми — відношенням ширини шва до глибини проплавлення. При вузькому і глибокому проварі (коефіцієнт форми шва 0,8—1,2) кристаліти ростуть назустріч один одному та зустрічаються між собою торцями під кутом 180° або близьким до нього (рис. 3.6, а). При чашоподібній формі провару (коефіцієнт форми шва 1,3—5) кристаліти ростуть під гострим кутом один до одного і зустрічаються торцями або бічними гранями (рис. 3.6, б). При широкому і неглибокому проварі (коефіцієнт форми шва більше 5) кристаліти ростуть паралельно один одному та, не зустрічаючись, виходять на поверхню шва (рис. 3.6, в).

Вплив форми шва на стійкість його проти утворення кристалізаційних тріщин спостерігається при дуговому, електрошлаковому і електронно-променевому зварюванні. Збільшення коефіцієнта форми шва до певної межі (приблизно 6) призводить до підвищення стійкості металу шва проти утворення кристалізаційних тріщин. Подальше збільшення коефіцієнта форми шва знову призводить до зниження стійкості металу шва проти утворення кристалізаційних тріщин. Шви з таким великим значенням коефіцієнта форми зустрічаються головним чином при наплавленні, що виконується електродною стрічкою, і при зварюванні останнього проходу багат шарового шва.

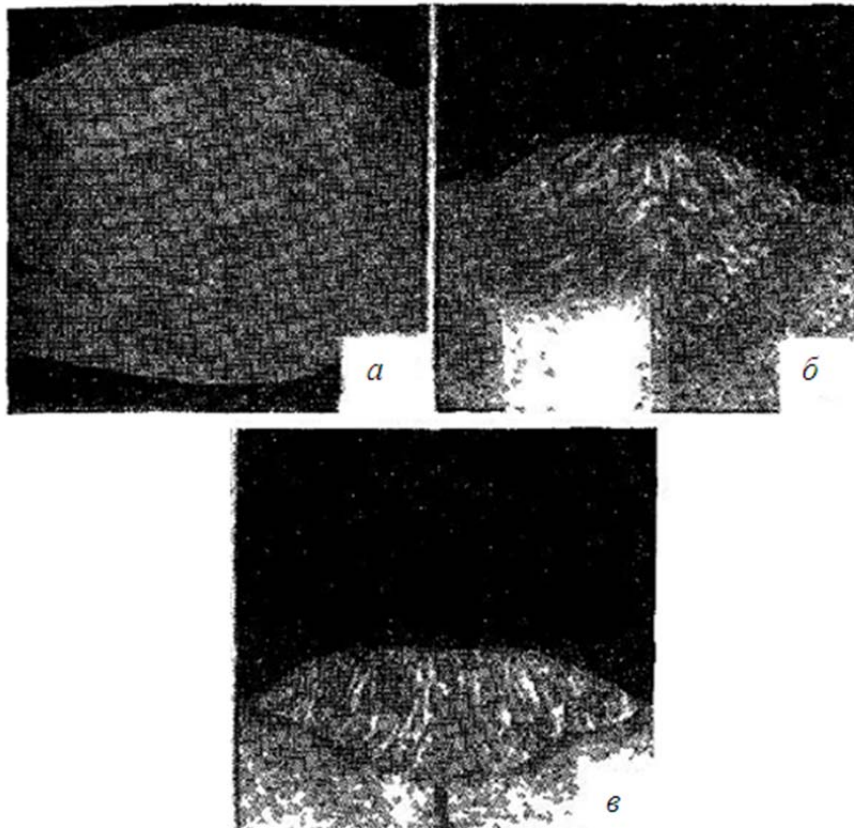


Рис. 3.6. Напрямок росту кристалітів залежно від форми провару:
a — вузька; *б* — чашоподібна; *в* — плоска

На рис. 3.7 наведена залежність між критичним вмістом вуглецю в металі шва і коефіцієнтом форми шва для дугового зварювання під флюсом вуглецевих конструкційних сталей. Всі інші фактори, що здійснюють вплив на стійкість шва проти утворення тріщин, практично постійні. Вміст кремнію у металі шва до 0,4 %, вміст сірки — до 0,04 %. Зі збільшенням коефіцієнта форми шва до певної межі критичний вміст вуглецю зростає. Залежно від значення коефіцієнта форми шва даний вміст вуглецю може бути вищим або нижчим критичного.

Аналогічний взаємозв'язок існує між коефіцієнтом форми шва і критичним вмістом інших елементів та поширюється на інші види зварювання плавленням. Несприятливі умови щодо форми зварювальної ванни створюються при зварюванні першого шару багат шарового шва та кутового шва з обробленням кро-

мок, де вимога забезпечення провару вершини кута визначає необхідність застосування швів з малим коефіцієнтом форми (рис. 3.8, *а, б*). З практики відомо, що подібні шви мають пониженою стійкість проти утворення кристалізаційних тріщин. Для поліпшення умов формування першого шару багат шарових швів збільшують кут оброблення і зменшують величину притуплення.

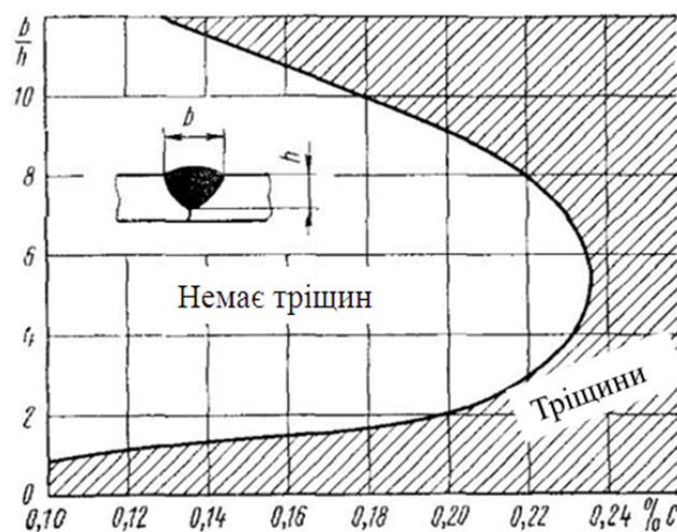


Рис. 3.7. Залежність між критичним вмістом вуглецю в металі шва і коефіцієнтом його форми при дуговому зварюванні вуглецевих сталей

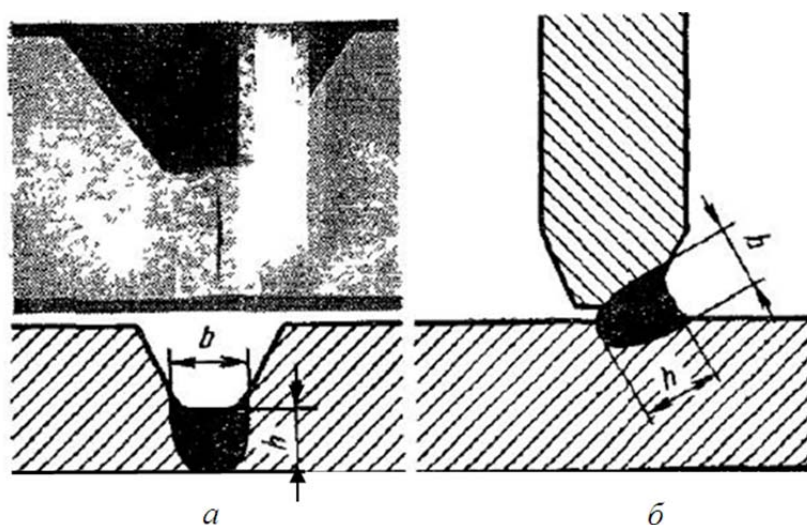


Рис. 3.8. Перший шар багат шарового шва: *а* — стыкового; *б* — кутового, з обробленням кромок

Несприятливі умови для кристалізації металу шва створюються при зварюванні стикових однобічних швів з повним проваром на флюсовій подушці. При цьому в результаті обмеженого тепловідводу від основи зварювальної ванни стовпчасті кристаліти ростуть назустріч один одному, що визначає велику ймовірність появи тріщин (рис. 3.9).



Рис. 3.9. Тріщина в однобічному шві

Зміна форми провару — один з широко застосовуваних технологічних методів підвищення стійкості металу шва проти утворення кристалізаційних тріщин. Більш високе значення коефіцієнта форми шва, поряд з іншими факторами, визначає більшу стійкість проти утворення кристалізаційних тріщин швів, виконаних дуговим зварюванням покритими електродами і електрошлаковим зварюванням, у порівнянні зі швами, звареними під флюсом. При типових для перших двох способів режимах зварювання коефіцієнт форми шва змінюється в межах 2,5—5 проти 1—2,5 при зварюванні під флюсом. Підвищенню стійкості швів проти утворення кристалізаційних тріщин при ручному дуговому зварюванні сприяє зниження частки основного металу у металі

шва, а при електрошлаковому зварюванні — і наявність супутнього підігріву.

На практиці існує думка, що шви з опуклою формою поверхні мають більш високу стійкість проти утворення кристалізаційних тріщин, ніж шви з увігнутою формою поверхні. Ця думка не відповідає дійсності. За інших рівних умов стійкість металу того чи іншого шва проти утворення кристалізаційних тріщин однакова. Тільки, як це видно на рис. 3.2, в опуклих швах тріщини не виходять, а в увігнутих швах виходять на їхню поверхню.

Вплив величини первинних кристалітів. Стійкість металу шва проти утворення кристалізаційних тріщин може бути підвищена шляхом подрібнювання первинної структури металу шва і зміни характеру первинної кристалізації. Подрібнювання первинної структури сприяє зменшенню ступеня хімічної неоднорідності, тобто концентрації шкідливих домішок по межах кристалітів.

Подрібнювання первинної структури металу шва може бути досягнуте за рахунок збільшення швидкості кристалізації. Для цього зменшують погонну енергію зварювання шляхом зниження сили зварювального струму, підвищення швидкості зварювання, збільшення кількості проходів. Однак при цьому знижується продуктивність зварювальних робіт. Зазначеного недоліку позбавлений спосіб введення додаткового металу з присадковим дротом, що призводить до охолодження металу зварювальної ванни та зменшення розмірів кристалітів.

Подрібнюванню первинної структури металу шва сприяє дрібнозерниста структура основного металу, оскільки ріст стовпчастих кристалітів починається з оплавленої поверхні основного металу. Подрібнювання зерен основного металу досягається у процесі його виробництва. Наклеп кромek деталей перед зварюванням також сповільнює ріст зерен основного металу під впливом зварювального нагрівання. Позитивний ефект може бути досягнутий і при відповідному наплавленні кромek перед зварюванням.

Подрібнювання первинних кристалітів і дезорієнтована будова металу шва можуть бути досягнуті введенням у зварювальну ванну модифікаторів.

Модифікаторами називають речовини, присутність малих кількостей яких змінює процес кристалізації. Модифікатори можуть бути двох типів.

До першого типу відносяться поверхнево-активні модифікатори, молекули яких, адсорбуючись на гранях зростаючих кристалітів металу, затримують їхній ріст і змінюють форму.

Модифікатори другого типу утворюють у рідкому металі дрібні тугоплавкі частки, що є зародками кристалітів. Ці частки повинні мати кристалічну структуру, близьку до металу, що модифікується.

Ефект модифікування при зварюванні сталі спостерігається, наприклад, при введенні титана через керамічний флюс або через електродне покриття. Для аустенітного шва модифікування має місце при виділенні карбідів ніобію або феритної фази.

Подрібнити первинну структуру металу шва можна шляхом механічних коливань зварювальної ванни у процесі її кристалізації, механічної вібрації електрода, електромагнітних коливань тощо. Подібний ефект має також накладення ультразвукових коливань. Всі ці способи викликають подрібнення кристалітів і перемішування розплаву, у результаті чого первинна структура подрібнюється.

Гарячі тріщини у біляшовній зоні. У біляшовній зоні зварних з'єднань конструкційних сталей і сплавів іноді спостерігаються гарячі тріщини, що проходять по межах зерен основного металу. Ці тріщини можуть поширюватися у метал шва або інші ділянки біляшовної зони.

Гарячі тріщини утворюються у біляшовній зоні у процесі зварювання при температурах нижче точки плавлення основного металу. При цьому на межах зерен збираються поверхнево-активні елементи, у тому числі шкідливі домішки. У результаті

на міжзернових межах утворюються легкоплавкі включення і прошарки. Величина взаємного проковзування зерен і відносна кількість міжзеренових меж, по яких воно відбувається, значно знижується зі зменшенням розміру зерен. Тому у дрібнозернистому основному металі стійкість проти утворення тріщин в біляшовній зоні більша, ніж при грубозернистому У зв'язку з цим катані і ковальські сталі та сплави по здатності протистояти виникненню і розвитку гарячих тріщин перевершують литі сталі та сплави.

Під впливом процесу зварювання неметалеві включення основного металу також зазнають істотних змін, що супроводжуються утворенням небезпечних щодо виникнення гарячих тріщин плівкоподібних включень сульфідів і фосфідів.

Зниження небезпеки утворення гарячих тріщин може бути досягнуте шляхом раціонального легування сталі або сплаву, удосконалення методів їхнього виготовлення, використання способів і режимів зварювання з мінімальним виділенням теплоти.

В основному металі необхідно обмежувати вміст шкідливих домішок, особливо сірки і фосфору, зв'язувати ці елементи у тугоплавкі сполуки, а також сприяти подрібнюванню та рівномірному розподілу їх в основному металі.

3.3. Холодні тріщини

На відміну від кристалізаційних тріщин холодні тріщини утворюються у зварних з'єднаннях при охолодженні їх до відносно невисоких температур, як правило, нижче 200 °С. До цього часу метал шва і біляшовної зони набуває високі пружні властивості, які властиві йому при нормальних температурах. Холодні тріщини є типовим дефектом зварних з'єднань з середньолегованих і високолегованих сталей перлітного та мартенситного класів. Значно рідше вони виникають у з'єднаннях з низьколегованих феритно-перлітних сталей і високолегованих сталей аустенітного

класу. Через переважне виникнення холодних тріщин у з'єднаннях з мартенситних і перлітних сталей, які сприйнятливі до загартування, тріщини цього типу іноді називають *гартівними*. Холодні тріщини найбільш часто вражають біляшовну зону, а рідше — метал шва.

Виявляють тріщини зовнішнім оглядом, за допомогою ультразвуку, по макро- і мікрошліфах, а також по зламу зразків. По зовнішньому вигляду холодні тріщини відрізняються від кристалізаційних і гарячих тріщин меншою шириною, що чітко проявляється на слабо протравлених макро- і мікрошліфах.

Залежно від розташування у зварному з'єднанні розрізняють поздовжні і поперечні тріщини, що залягають у металі шва і біляшовній зоні (рис. 3.10).

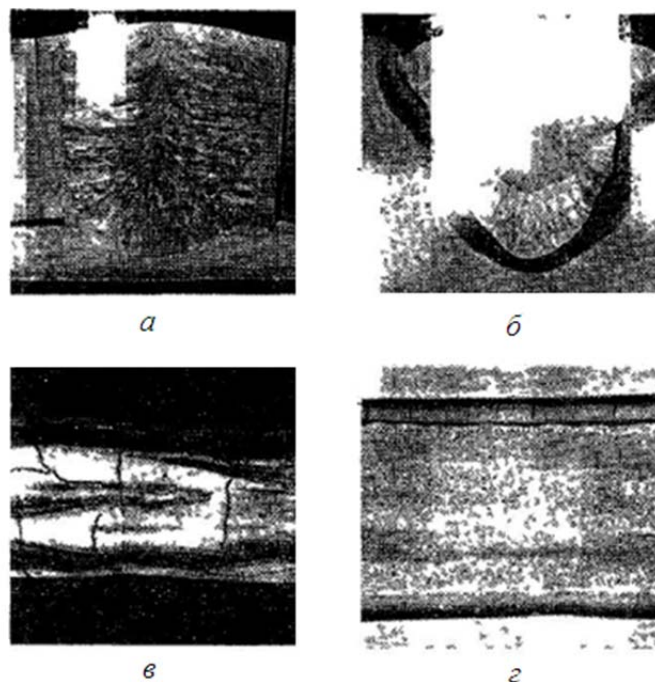


Рис. 3.10. Холодні тріщини: *а* — поздовжні біляшовні (відколи); *б* — поздовжні в зоні сплавлення (відриви); *в* — поперечні у металі шва; *г* — поперечні біляшовні

Особливо виділяють поздовжні тріщини, що залягають у зоні сплавлення шва з основним металом (рис. 3.10, *б*), які нази-

вають *відривами*. Поздовжні тріщини, розташовані у біляшовній зоні, називають *відколами* (рис. 3.10, а). Часто зустрічаються також поперечні і поздовжні тріщини, що переходять з біляшовної зони в шов. Перехід тріщин зі шва в біляшовну зону зустрічається значно рідше. Тріщини відзначених видів можуть виходити та не виходити на поверхню металу, що зварюється. Залежно від цього них називають *зовнішніми* або *внутрішніми* тріщинами.

Відколи є найбільш загальним і частим дефектом зварних з'єднань. Відриви зустрічаються, як правило, у зварних з'єднаннях зі сталей, що гартуються, у яких метал шва має аустенітну структуру. Таку структуру одержують шляхом відповідного легування швів з метою додавання їм високих пластичних властивостей і забезпечення високої опірності біляшовної зони утворенню відколів.

Поперечні тріщини в біляшовній зоні зустрічаються рідко та, як правило, тільки при зварюванні багат шарових швів.

Холодні тріщини у шві утворюються, головним чином, при підвищеному вмісті у металі шва вуглецю і легуючих елементів, близькому до вмісту їх в основному металі. Це буває рідко, оскільки з метою підвищення стійкості металу шва проти утворення кристалізаційних тріщин вміст вуглецю у шві, як правило, встановлюють більше низьким, ніж в основному металі.

Основним видом холодних тріщин у зварних з'єднаннях є біляшовні тріщини, у зв'язку з чим умови і причини їхнього утворення вивчені досить докладно.

Крім температури виникнення, зовнішнього вигляду і розташування у з'єднанні, найважливішою відмітною рисою холодних тріщин є їхнє затримане зародження і уповільнений розвиток. Вони виникають через деякий час після закінчення зварювання і потім повільно, протягом декількох годин та навіть доби, поширюються у металі.

Типовий приклад зародження і розвитку поздовжньої тріщини в біляшовній зоні одношарового стикового з'єднання сталі 35ХЗНЗМ товщиною 14 мм схематично показаний на рис. 3.11.

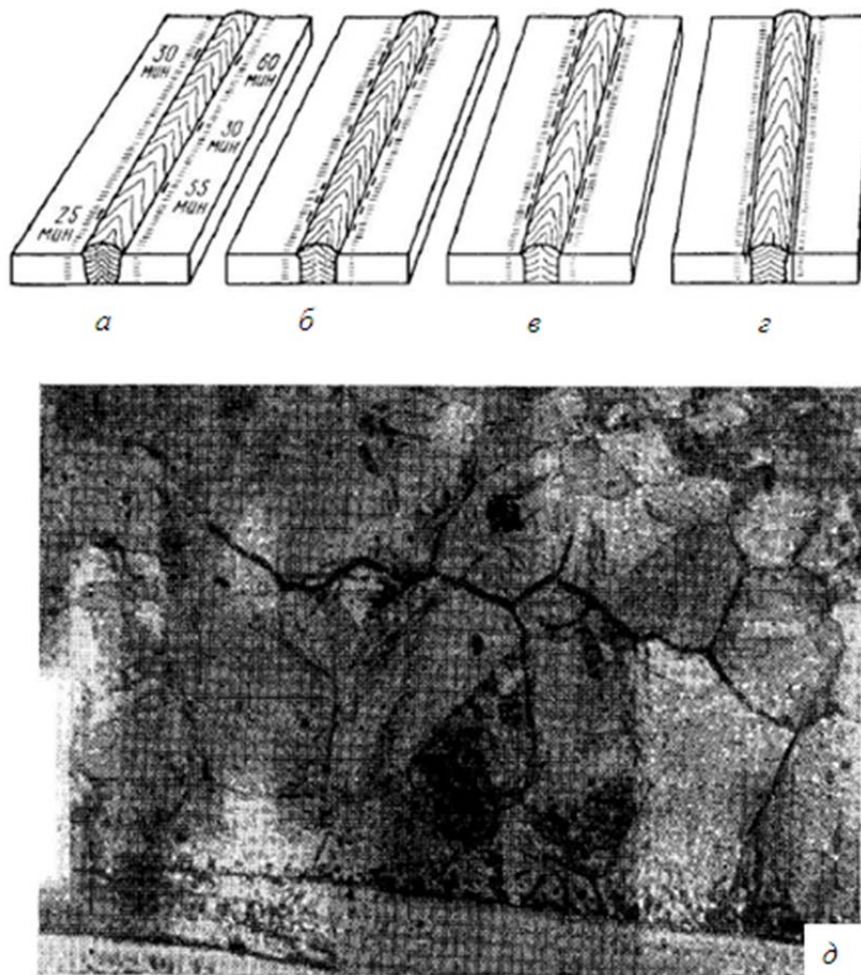


Рис. 3.11. Схема зародження і розвитку холодних біляшовних тріщин у стиковому з'єднанні сталі 35ХЗНЗМ: *а* — зародження перших мікротріщин; *б* — зародження нових мікротріщин і розвиток раніше виниклих через 6 год. після зварювання; *в* — наявність мікротріщин через 18 год. після зварювання; *г* — утворення наскрізних мікротріщин через 72 год. після зварювання; *д* — зародження мікротріщин по межах зерен, $\times 100$

Перша зародкова мікротріщина з'явилася через 25 хв. після зварювання під флюсом в один прохід при температурі близько 130 °С. Протягом першої години після зварювання з'явилося ще кілька мікротріщин (рис. 3.11, *а*) на межах зерен, які виходять на

поверхню листів, що зварюються. Вони чітко виявлялися за допомогою ультразвуку і під мікроскопом, але були невидимі неозброєним оком. Надалі з'являлися нові і розвивалися раніше виниклі мікротріщини (рис. 3.11, б, в). Цей процес відбувався повільно — макроскопічна тріщина утворилася лише на третю добу (рис. 3.11, г). Якщо початковий розвиток холодних тріщин йде по межах зерен, то надалі він може проходити як по межах, так і по тілу зерна (рис. 3.11, д).

Описана вище картина зародження і розвитку холодних тріщин може істотно змінюватися залежно від хімічного складу основного металу, розмірів і товщини деталей, що з'єднуються, умов їхнього закріплення перед зварюванням, способів і режимів зварювання та інших факторів. Фактори, що знижують опірність зварних з'єднань утворенню холодних тріщин, прискорюють їхнє зародження і розвиток, а фактори, що підвищують цю опірність, — сповільнюють.

Велика розмаїтість умов для виникнення холодних тріщин у реальних зварних конструкціях призводить до того, що в одних випадках макроскопічні холодні тріщини з'являються через кілька хвилин після зварювання, а в інших — після декількох годин і діб. Відомі приклади, коли тріщини виникали навіть після закінчення декількох десятків діб. Вони могли утворитися тільки внаслідок розвитку початкових мікротріщин, що виникли в з'єднанні в перші години після зварювання і потім припинили свій ріст через недостатню величину зварювальних напружень або з інших причин. Згодом при зберіганні конструкцій могли відбутися несприятливі зміни зовнішніх умов, що сприяють розвитку мікротріщин у макротріщини. В умовах монтажу і експлуатації зварної конструкції додатковим фактором, що може викликати не тільки поновлення росту мікротріщин, але і їхнє утворення, є підсумовування зварювальних напружень з напруженнями від зовнішніх навантажень.

Холодні тріщини найчастіше розвиваються переривчасто (стрибкоподібно), причому одночасно може розвиватися кілька мікротріщин. Якщо ж у з'єднанні при зварюванні накопичилась більша енергія пружної деформації, то після початкового періоду уповільненого розвитку холодна тріщина росте миттєво (вибухоподібно) та зі значним звуковим і механічним ефектом поширюється на весь перетин з'єднання. Окремі деталі при цьому розходяться в сторони.

Пояснити причини утворення холодних тріщин досить важко. При випробуванні на розтяг поперечних зразків зварного з'єднання, схильного до утворення відколів, руйнування відбувається поза біляшовної зони по основному металу або шву при досить високих напруженнях (більше 50 кгс/мм^2). Разом з тим замір поперечних зварювальних напружень у цих з'єднаннях показав, що вони низькі ($10\text{—}20 \text{ кгс/мм}^2$).

Незрозуміло, чому такі низькі напруження викликають руйнування найбільш міцної ділянки зварного з'єднання — металу біляшовної зони.

Знадобилися багаторічні дослідження, перш ніж були з'ясовані основні закономірності утворення холодних тріщин при зварюванні і було встановлено, що основними факторами, які визначають їхнє виникнення і розвиток у зварних з'єднаннях, є гартівні явища, сумарні напруження (зварювальні та від зовнішніх навантажень) і водень. Для викладення основних результатів цих досліджень розглянемо водневу і гартівну гіпотези утворення холодних тріщин, які запропоновані ще в 1944 р. і безупинно розвиваються дотепер.

Відповідно до водневої гіпотези основним фактором, що визначає стійкість біляшовної зони проти утворення тріщин, є водень, який надходить у біляшовну зону з металу шва. Гіпотеза ґрунтувалася на експериментальних фактах, які свідчать про те, що застосування низьководневих і аустенітних електродів приз-

водить до помітного підвищення опірності з'єднань утворенню відколів.

Відповідно до гіпотези водень, що попадає при зварюванні у метал шва, дифундує в біляшовну зону. Тут, накопичуючись у мікропорожнечках і недосконалостях атомних ґрат і перетворюючись із атомарного в молекулярний, він створює величезний тиск, під дією якого і відбувається руйнування металу, тобто утворення тріщин. Високу опірність утворенню біляшовних тріщин з'єднань з аустенітним швом пояснювали тим, що шви з аустенітною структурою в умовах зварювального термічного циклу утримують практично весь водень і переміщення водню у біляшовну зону не відбувається.

Воднева гіпотеза довгий час була загальноприйнятою, хоча і не ґрунтувалася на прямих даних про зв'язок відколів з вмістом водню в біляшовній зоні. Однак експериментальні дані, отримані методом вакуумного нагрівання окремих дільниць зварного з'єднання, а також шляхом спостереження за виділенням зі зварного з'єднання дифузійного водню, показали, що при однакових умовах зварювання вміст водню у біляшовній зоні при аустенітній структурі металу шва значно вищий, ніж при феритній. У цих дослідях здійснювалось одношарове наплавлення валиків під флюсом на сталь 30ХГС товщиною 30 мм. Дані про високий вміст водню у біляшовній зоні з'єднань з аустенітним швом також отримані і за допомогою локального спектрального аналізу.

Поряд з цим є численні відомості про значне підвищення стійкості біляшовної зони проти утворення тріщин при зниженні вмісту водню у металі шва. Так, наприклад, при зниженні вмісту водню у металі шва в 1,5—2 рази, що досягається при використанні постійного струму замість змінного, помітно підвищується стійкість біляшовної зони проти утворення холодних тріщин при зварюванні низьколегованим феритним дротом сталей типу 25ХГС.

Таким чином, водень в одних випадках істотно впливає на стійкість біляшовної зони проти утворення тріщин, а в інших, наприклад, при зварюванні середньолегованих сталей аустенітним дротом, його роль другорядна. Це дозволяє констатувати, що водень не є головним і тим більш єдиним фактором, що визначає утворення холодних тріщин у зварних з'єднаннях. Його вплив на їхнє утворення необхідно розглядати разом з дією інших факторів, обумовлених переважно гартівними явищами у біляшовній зоні і зварювальними напруженнями. У з'єднаннях з аустенітним швом позитивна дія інших факторів значно переважає над негативною дією водню.

Гартівна гіпотеза холодних тріщин заснована на великому експериментальному матеріалі досліджень гартівних явищ у металі взагалі і у зварних з'єднаннях зокрема. При цьому особливе значення мають дослідження, які встановили наявність і сутність уповільненого руйнування загартованих сталей і металів.

Відповідно до цієї гіпотези, механізм утворення холодних тріщин можна описати у такий спосіб. У процесі охолодження у біляшовній зоні зварного з'єднання сталей, що гартуються, утворюється характерна мартенситна структура металу і складний напружений стан, обумовлений підсумовуванням зварювальних і структурних напружень. Для більшості конструкційних сталей, при зварюванні яких спостерігається утворення холодних тріщин, структурні перетворення у біляшовній зоні закінчуються в основному при охолодженні до температур порядку 150 °С. До цього моменту завершується і формування напруженого стану у зварних з'єднаннях з цих сталей.

Характерною і відмінною рисою напруженого стану зварних з'єднань сталей з феритним або аустенітним швом, що гартуються, є виникнення складного розподілу поздовжніх зварювальних напружень (рис. 3.12).

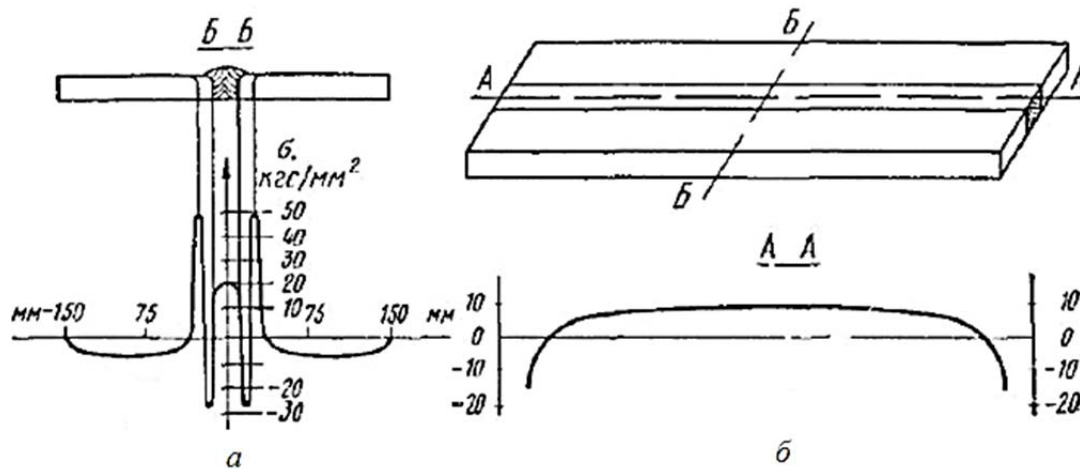


Рис. 3.12. Розподіл поздовжніх (а) і поперечних (б) напружень у зварних з'єднаннях сталей з феритним і аустенітним швами, що гартуються

Цей розподіл характеризується наявністю порівняно високих напружень стиснення у ділянці зони на межі зі швом і високими напруженнями розтягу у сусідній ділянці цієї зони, а також у зварному шві. Такий розподіл поздовжніх напружень обумовлено значним збільшенням обсягу металу біляшовної зони, що безпосередньо межує зі швом, внаслідок мартенситного перетворення. У поперечному напрямку виникають невеликі напруження розтягу у середній частині з'єднання (по довжині) і напруження стиснення по краях. У результаті на межі розділу шов—основний метал з'являються більші напруження, що сколюють, які сприяють уповільненню руйнуванню загартованої сталі і утворенню холодних тріщин типу відколів.

Уповільнене руйнування відбувається внаслідок зниження міцності деяких металів під впливом тривалого статичного навантаження при близьких до кімнатних температурах. В окремих випадках це зниження міцності дуже значне. Так, наприклад, для сталі з підвищеним вмістом вуглецю і легуючих елементів (типу 35ХГС) безпосередньо після загартування з високих температур (1200 °С) тривала міцність може скласти всього 10 % короткочас-

ної міцності. Причини уповільненого руйнування перегрітої загартованої сталі полягають у особливій її структурі.

Типова структура загартованої сталі, схильної до уповільненого руйнування, спостерігається на дільниці перегріву біляшовної зони. Вона характеризується крупним зерном і відповідно великими мартенситними голками, що виходять своїми торцями на межі зерен. У результаті змін у прикордонних областях зерен викривлюється атомна кристалічна будова металу. Можна допускати, що будовою і властивостями ці прикордонні дільниці зерен наближаються до аморфних тіл.

Як відомо, аморфні тіла можуть набувати значну деформацію у часі під дією постійного навантаження, недостатнього для помітного деформування тіл при короткочасній її дії. З погляду сучасної теорії про будову мартенситу відмічене викривлення кристалічних ґрат необхідно пов'язувати також і з тим, який мартенсит утворюється у біляшовній зоні — дислокаційний, відносно пластичний, або двоякий, досить крихкий. Останнє визначається вмістом вуглецю у сталі і температурою мартенситного перетворення.

Виходячи з уповільненого характеру руйнування зварних з'єднань і з огляду на наведені вище відомості про напружений стан і структуру біляшовної зони, що сприяють такому руйнуванню, зародження та розвиток холодних тріщин можна описати наступною схемою (рис 3.13).

Ще у процесі завершення структурних перетворень грубозернистий метал біляшовної зони з грубими мартенситними голками, підготовлений до уповільненого руйнування по межах зерен, піддається впливу складнонапруженого стану. Цей метал піддається природному випробуванню на стійкість проти уповільненого руйнування безпосередньо у процесі зварювання.

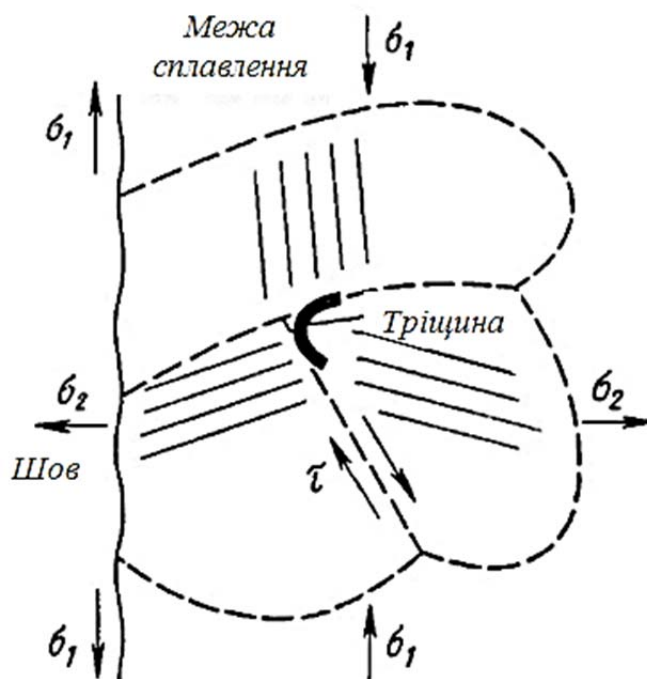


Рис. 3.13. Схема зародження біляшовної тріщини по межах зерен

Розглянутий вище складнонапружений стан на запропонованій схемі пояснюється у такий спосіб: у біляшовній зоні на межі зі швом діють поздовжні напруження стиснення σ_1 і поперечні напруження розтягу σ_2 . На межах дільниці, що примикає до шва, діють поздовжні напруження розтягу σ_1 і ті ж поперечні напруження розтягу σ_2 . При цих умовах на межі розділу виникають значний перепад поздовжніх напружень $(-\sigma_1) — (+\sigma_1)$ і значні напруження зсуву. По межах зерен біляшовної зони, які спрямовані під кутом 45° до осі шва, виникають значні дотичні напруження τ . Такий напружений стан сприяє зародженню тріщини уповільненого руйнування на стику трьох зерен (рис. 3.13), що надалі поступово розвивається у повній відповідності з викладеними вище поданнями.

Так зароджуються біляшовні тріщини всіх видів — поздовжні (відриви та відколи) і поперечні (біляшовні та перехідні у шов). Напрямок подальшого розвитку утвореної тріщини залежить від здатності металу тієї або іншої дільниці зварного з'єд-

нання протистояти її розвитку, а також від конкретного сполучення поздовжніх і поперечних напружень і, зокрема, від величини перепаду напружень на межі шов—біляшовна зона. При цьому, як правило, початкова стадія розвитку холодних тріщин пов'язана з межами крупних зерен.

Утворенню відривів у з'єднаннях легованих сталей з аустенітним швом крім перепаду напружень і наявності крупних зерен у біляшовній зоні сприяють низька пластичність і міцність зони сплавлення. Варто також враховувати, що такі причини уповільненого руйнування (розвитку холодних тріщин), як перегрів металу і великий перепад поздовжніх напружень, діють одночасно і спільно тільки на границі шов—біляшовна зона. Тому зазначена межа найбільшою мірою піддається утворенню поздовжніх тріщин. Крім того, метал біляшовної зони поблизу шва часто послаблюється розвитком високотемпературної хімічної неоднорідності і несприятливою видозміною неметалевих включень, обумовленою нагріванням до високих температур, близьких до точки плавлення.

Утворення поперечних тріщин також починається у біляшовній зоні на ділянці перегріву і, як правило, свідчить про високий рівень поздовжніх напружень у з'єднанні. У порівняно рідких випадках, переважно у з'єднаннях з багатошаровими швами, поперечні холодні тріщини можуть зароджуватися у біляшовній зоні на деякій відстані від ділянці перегріву, у місцях, де розвиваються досить високі напруження розтягу (рис. 3.12). Можливе також зародження поперечних тріщин у самому металі шва. Як правило, це має місце у багатошарових малопластичних швах.

Вище було розглянуте явище зародження холодних тріщин по межах зерен внаслідок порушення в них атомної будови металу. У реальних металах можливий і інший механізм утворення зародків таких тріщин, пов'язаний з наявністю неметалевих включень. Останні можуть розташовуватися у металі по межах і тілу зерен. Зародками холодних тріщин можуть стати неметалеві включення у їх несприятливій формі, хімічному складі і розташу-

ванні, а також гарячі тріщини — надриви, що виникають на дільниці крупного зерна біляшовної зони. У результаті неминучого нагрівання цієї дільниці до температур, близьких до солідуса, у ній відбуваються значні зміни вихідних неметалевих включень основного металу. Це має істотне значення при електрошлаковому і дуговому одношаровому зварюванні товстого металу.

Відзначені зміни відбуваються найбільшою мірою на тих дільницях з'єднання, де максимальний перегрів біляшовної зони сполучається з високими тимчасовими напруженнями розтягу при температурах, близьких до солідуса. Таке несприятливе сполучення умов має місце при зварюванні кільцевих швів товстостінних посудин

За допомогою електрошлакового і електронно-променевого переплавів можна істотно зменшити загальну кількість неметалевих включень у основному металі, гранично обмежити вміст легкоплавких включень сульфідного походження та перевести їх у більш тугоплавкі з'єднання, а також досягти рівномірного і дрібнодисперсного розподілу неметалевих включень у металі. При цьому значно підвищується стійкість зварних з'єднань проти утворення холодних тріщин. Аналогічні результати можна отримати, застосувавши попереднє напавлення кромки, які підлягають зварюванню.

Якщо напавлення виконати металом такого ж хімічного складу, що і метал кромки, то стійкість з'єднання проти утворення холодних тріщин, як правило, на 20—30 % перевищить стійкість з'єднання без напавлення. У цьому випадку ефект досягається внаслідок сприятливих змін складу і розподілу неметалевих включень у напавленому металі. Якщо ж застосувати напавлення металом, що не гартується, наприклад, аустенітним, то можливо майже повністю усунути небезпеку виникнення у з'єднаннях холодних тріщин.

Викладене дозволяє, з погляду гартівної гіпотези, пояснити вплив численних і різноманітних факторів на стійкість з'єднань

проти утворення холодних тріщин. Розглянемо це питання на прикладі зварних з'єднань середньолегованих сталей. Вихідним у цьому поясненні є положення про те, що стійкість з'єднань проти утворення холодних тріщин визначається, з одного боку, опірністю металу уповільненому руйнуванню та, з іншого, — напруженим станом у зварному з'єднанні. При цьому принципово важливо враховувати, по-перше, вплив різних факторів на зміну умов локальної пластичної деформації по межах зерен і, по-друге, їхній вплив на стійкість ділянок зварного з'єднання розвитку холодних тріщин.

Усі фактори, що викликають упорядкування атомної будови по межах зерен та утрудняють утворення зрушень по цих межах і сприяють залученню у пластичну деформацію тіла зерна, підвищують стійкість металу проти утворення холодних тріщин, утруднюючи їхнє зародження. Такий же вплив здійснюють фактори, що виключають або послаблюють можливість утворення зародків холодних тріщин від неметалевих включень, мікроскопічних гарячих тріщин-надривів тощо.

У зв'язку з викладеним вище вирішальний вплив на стійкість зварних з'єднань середньолегованих сталей проти утворення холодних тріщин здійснюють перегрів у біляшовній зоні, температурний інтервал мартенситного перетворення у цій зоні, а також у металі шва та швидкість охолодження біляшовної зони і металу шва у цьому інтервалі. Чим менший перегрів, вища температура мартенситного перетворення і повільніше охолодження, тим менше порушується атомна будова на межах зерен і відповідно утрудняється зародження тріщин. Крім того, чим вища пластичність мартенситу, тим більший його опір розвитку тріщин.

Утворення тріщини утруднюється ще і тим, що підвищення температури мартенситного перетворення та уповільнення охолодження, зменшуючи перепад поздовжніх напружень на межі шов—біляшовна зона, пом'якшують напружений стан на ділянці, де їхнє виникнення найбільш імовірне. Якщо обмежити перег-

рів і попередити утворення мартенситу або досить високо змістити температурний інтервал його утворення, то виникнення холодних тріщин не буде відбуватися. Їх не буде і у тому випадку, якщо досить сильно уповільнити охолодження у мартенситному інтервалі температур. Мартенсит при такому охолодженні у середньолегованих сталях відпускається (самовідпускається) і стає не схильним до уповільненого руйнування.

Звідси витікає, що найбільш простий і ефективний спосіб боротьби з холодними тріщинами полягає у регулюванні термічного циклу зварювання шляхом вибору відповідних методів і режимів зварювання, а також використання в необхідних випадках попереднього підігріву.

Ідеальний термічний цикл, що забезпечує найвищу стійкість проти утворення холодних тріщин, наведено на рис. 3.14. Для порівняння на цьому ж рисунку показані звичайні термічні цикли для електронно-променевого і електродугового зварювання. При такому ідеальному термічному циклі перегрів не розвивається внаслідок швидкого нагрівання і охолодження металу при температурах вище точки A_1 .

Повільне охолодження при температурах нижче точки A_1 сприяє розвитку у з'єднаннях з середньолегованих сталей перлітного і проміжного перетворень переохолодженого аустеніту у біляшовній зоні і металі шва та усуненню або зсуву мартенситного перетворення до області високих температур. Інакше кажучи, зменшується загартування металу зварного з'єднання, що підвищує опірність сталі уповільненому руйнуванню і стійкість проти утворення холодних тріщин.

Цьому також сприяє (причому досить активно) уповільнене охолодження зварного з'єднання у області температур мартенситного перетворення (нижче $350\text{ }^{\circ}\text{C}$). У результаті самовідпускання мартенситу при цих температурах упорядковується кристалічна будова металу у об'ємах, що примикають до меж зерен, підвищується пластичність металу в цілому та утруднюється виникнен-

ня і розвиток холодних тріщин. Реальні термічні цикли, близькі до ідеальних, можна одержати при електронно-променевому зварюванні з попереднім підігрівом або при багатошаровому дуговому зварюванні товстого металу з попереднім підігрівом.

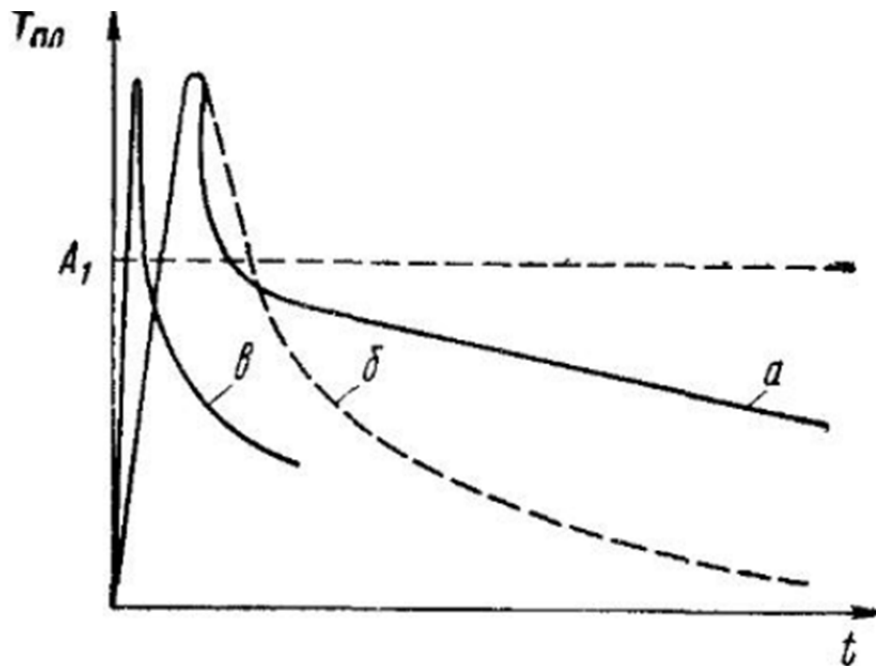


Рис. 3.14. Зварювальні термічні цикли: *a* — ідеальний, що забезпечує найвищу опірність з'єднань утворенню холодних тріщин; *б* — при електродуговому зварюванні; *в* — при електронно-променевому зварюванні

Крім відзначених вище основних факторів, які оказують вирішальний вплив на стійкість зварних з'єднань проти утворення холодних тріщин, є додаткові і похідні фактори, що також можуть впливати на цю стійкість. До них відносяться: вміст вуглецю і легуючих елементів в основному металі та шві, якість основного металу, деформаційний цикл зварювання, термообробка після зварювання та ін.

Зупинимося коротко на методах оцінки стійкості зварних з'єднань проти утворення холодних тріщин. Розрізняють методи якісної і кількісної оцінки стійкості зварних з'єднань проти утворення холодних тріщин.

Якісну оцінку проводять за допомогою технологічних проб на зварних зразках, у яких створюють умови, що сприяють утворенню холодних тріщин. Як правило, використовують закріплення елементів, що з'єднуються, на жорсткій основі плиті великої товщини тощо.

Зовнішнім оглядом і по макрошліфах встановлюють наявність або відсутність у контрольному шві технологічної проби холодних тріщин, визначають їхній вид і довжину. За цими показниками приблизно допускають, чи будуть у реальних зварних з'єднаннях виникати тріщини і які, тобто визначають придатність тих або інших марок сталей, зварювальних матеріалів, методів, режимів і інших умов зварювання для виготовлення конкретної зварної конструкції.

Оцінка стійкості за допомогою технологічних проб досить наближена. В одних випадках вона призводить до зайвого запасу цієї стійкості і обумовлює невиправдане зниження міцності основного металу внаслідок надмірного обмеження вмісту вуглецю і легуючих елементів, невиправданого застосування таких дорогих і важкоздійснимих технологічних методів підвищення стійкості, як попередній підігрів і наступна термообробка з'єднань тощо.

В інших випадках оцінка за допомогою технологічних проб може бути причиною недостатньої стійкості проти утворення холодних тріщин. Останнє, як правило, обумовлено тим, що в ряді випадків напружений стан і деформації реальної конструкції виявляються набагато більшими, ніж у технологічній пробі.

Розробляються і знаходять практичне застосування методи кількісної оцінки стійкості металу проти утворення холодних тріщин, які засновані на випробуваннях зварних з'єднань шляхом уповільненого руйнування.

Сутність методу, запропонованого Н. Н. Прохоровим, полягає в тому, що за допомогою спеціальних машин або пристроїв серія зварних зразків порівняно невеликих розмірів піддається

випробуванню на тривалий розтяг або вигин відразу ж по закінченні зварювання. Зварювання зразків, як правило, здійснюється в цих же пристроях. Випробування на розтяг, як і інші види “м'яких” навантажень, наприклад, крутіння, мають переваги, оскільки вони більш повно і точно виявляють схильність металів до уповільненого руйнування.

Переваги випробувань на вигин полягають у більшій простоті іспитових пристроїв, оскільки на них необхідно створювати значно менші зусилля, чим на пристроях для розтягу (рис. 3.15). При виборі способу навантаження необхідно враховувати реальні умови роботи випробовуваного з'єднання.

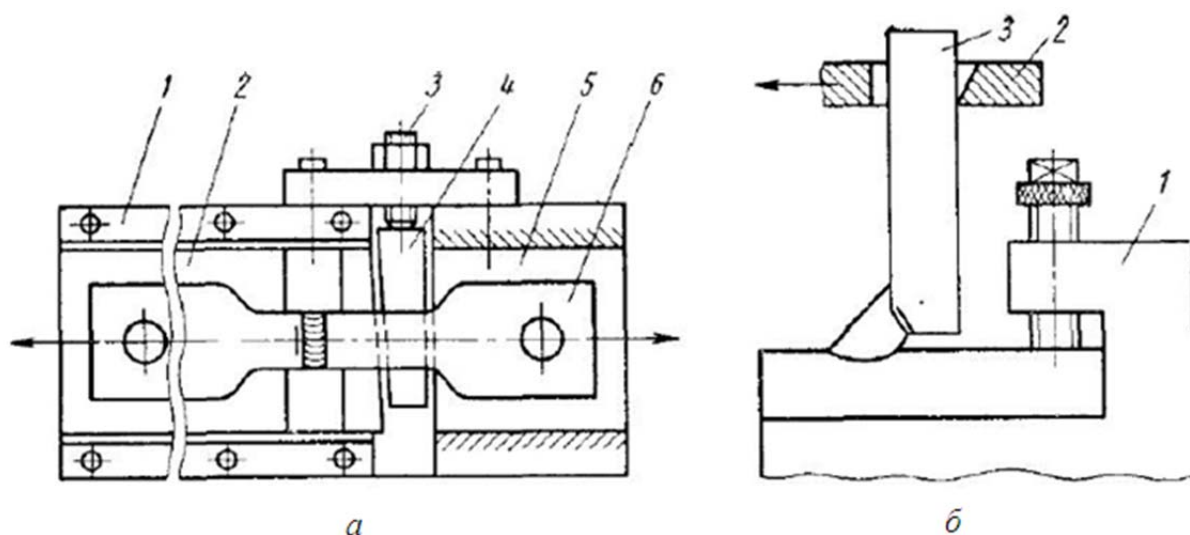


Рис. 3.15. Схеми пристроїв для випробування стійкості зварних з'єднань проти утворення холодних тріщин: *а* — шляхом розтягу (1 — станина, 2 — перша рухома плита, 3 — гвинт, 4 — клин, 5 — друга нерухома плита, 6 — зразок); *б* — шляхом вигину (1 — струбцина, 2 — тяга, 3 — зразок)

Випробування на уповільнене руйнування проводяться в наступному порядку. При випробуванні зразки ділять на три—чотири партії по 2—3 зразка у кожній. Спочатку визначають короточасну міцність, потім наступні партії випробовують при напруженнях, що становлять 50, 25 та 10 % короточасної міц-

ності, і для кожного напруження визначають час руйнування. Максимальну тривалість навантаження, як правило, встановлюють рівною 24 год., а в окремих випадках 72 год. За результатами випробування будують криві уповільненого руйнування.

З наведених на рис. 3.16 кривих, які відносяться до випадку випробування на розтяг одношарових стикових з'єднань, видно, що зазначеним методом можна кількісно оцінити вплив досить незначних і малопомітних змін структури та напруженого стану зварних з'єднань на їхню стійкість проти утворення холодних тріщин. Цей метод рекомендується для широкого практичного застосування.

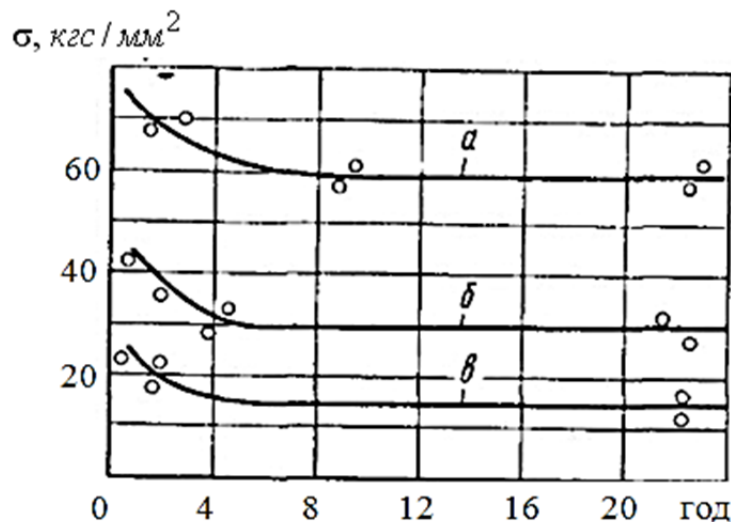


Рис. 3.16. Графік залежності міцності з'єднань (товщина металу 16 мм) від тривалості навантаження для сталей: а — 27ГСМ; б — 30Х2НГМ; в — 42Х2ГСНТ

Викладені вище закономірності і положення, що відносяться до утворення холодних тріщин (причини їхнього виникнення, способи попередження, методи оцінки стійкості металу), хоча і отримані на досвідному матеріалі, накопиченому при зварюванні легованих сталей, що гартуються, але мають загальний характер та можуть бути поширені також на сталі і сплави інших класів з певними уточненнями.

Зокрема, ці положення повністю придатні для аналізу процесів утворення холодних тріщин у зварних з'єднаннях високолегованих сталей, у біляшовній зоні яких утворюється мартенсит. Вони також можуть бути поширені і на випадок утворення холодних тріщин у з'єднаннях сплавів титана з високою межею текучості.

3.4. Пори у зварних швах

Порами називають заповнені газом порожнини у швах, які мають округлу, витягнуту або більш складну форму. Вони виникають при первинній кристалізації металу зварювальної ванни у результаті виділення газів. Пори розташовуються по осі шва або по його перетину, а також поблизу від межі сплавлення. При дуговому зварюванні пори виходять або не виходять на поверхню шва, розташовуються ланцюжком по осі шва або окремих його ділянок. Пори, що виходять на поверхню шва, іноді називають *свищами*. При електрошлаковому і дуговому зварюванні з примусовим формуванням пори не виходять на поверхню шва, що обумовлено більш раннім затвердінням частини металу зварювальної ванни, яка пов'язана з формуючими пристроями.

Пори можуть бути мікроскопічними (кілька мікрометрів) і великими (4—6 мм по висоті). Вихідні на поверхню пори виявляються при зовнішньому огляді. Пори, що не виходять на поверхню, виявляються тими ж методами, що і не вихідні на поверхню тріщини.

Пори — недопустимий дефект зварних швів для апаратури, що працює під тиском та під вакуумом або призначеної для зберігання та транспортування рідких і газоподібних продуктів. Для інших конструкцій пори не є настільки серйозним дефектом, як тріщини. Однак наявність пор за усіх умов небажано. Питання про допустимість пор вирішується залежно від умов експлуатації конструкції.

Основною причиною виникнення пор при зварюванні сталі є водень, азот і окис вуглецю. Роль інших газів (пари H_2O , CO_2 та ін.) незначна. Пористість швів при зварюванні алюмінію і його сплавів в основному викликається воднем. У швах на міді пори утворюються переважно при виділенні парів води.

Якщо утворення і виділення газів при зварюванні відбувається у період, коли металева ванна перебуває у рідкому стані і протікає інтенсивно, то пухирці газів встигають повністю виділитися. Їхнє виділення не тільки не призводить до утворення пор, але оказує рафінуючу дію на зварювальну ванну, знижуючи її газонасиченість. Якщо ж утворення і виділення газів відбувається у період затвердіння ванни і проходить повільно, то пухирці газу не встигають спливати та залишаються у металі у вигляді пор.

Утворення пор у швах на сталі при виділенні водню і азоту обумовлено різким зниженням їхньої розчинності у процесі затвердіння металу зварювальної ванни. Залізо і його сплави, що перебувають у рідкому стані, можуть розчиняти значні кількості водню і азоту. По мірі охолодження металу розчинність цих газів знижується. При зменшенні температури аж до температури плавлення розчинність знижується поступово і пухирці, що утворилися, вільно спливають на поверхню рідкої ванни. При затвердінні металу зниження розчинності водню і азоту відбувається стрибкоподібно. Наприклад, при затвердінні низьковуглецевої сталі розчинність азоту знижується в 4 рази, а водню — в 1,7 рази.

Більш низька розчинність водню і азоту у твердому металі у порівнянні з розчинністю їх у рідкому металі веде до збагачення розплаву цими газами, що сприяє зародженню газових пухирців на поверхні розділу рідкого та твердого металів. При різкому збільшенні кількості газу, що виділяється, не всі пухирці встигають спливати на поверхню зварювальної ванни та частина їх залишається у шві.

Пори від окису вуглецю виникають при недостатньому розкисненні металу зварювальної ванни. Розчинені у рідкій сталі вуглець і кисень реагують між собою згідно реакції:



Окис вуглецю, що утворюється при цьому, може дати початок зародкам газової фази або ж виділятися у вже існуючі пухирці інших газів. Для виникнення зародків окису вуглецю необхідні певний надлишок вмістів вуглецю і кисню над рівноважним і сприятливі умови для зародження газової фази.

У реальних умовах зварювання пористість швів, як правило, викликається спільною дією декількох газів. Якщо у процесі затвердіння металу зварювальної ванни сила внутрішнього тиску у газовому зародку або пухирці помітно перевищує барометричний тиск, метал буде кипіти і у шві з'являться пори. Сила внутрішнього тиску у газовому зародку або пухирці складається з парціальних тисків окремих газів.

Водень надходить в атмосферу дуги, а з неї у зварювальну ванну з іржі, вологи і інших забруднень, що перебувають на поверхні кромки, які зварюються, і присадкового металу, з захисного газу або з матеріалів, що входять до складу покриття або флюсу.

Зменшити розчинення водню у металі зварювальної ванни можна наступними заходами:

- обмеженням доступу водню і водяної пари у зону зварювання;
- зниженням парціального тиску водню і водяної пари в атмосфері дуги за рахунок зв'язування водню у HF і розведення його іншими газами;
- зниженням розчинності водню у рідкому металі внаслідок окислювання або легування останнього;
- зменшенням розчинення водню у металевій ванні технологічними способами (застосуванням постійного струму, змінами режиму зварювання, застосуванням відповідних зварювальних матеріалів тощо);

- видаленням водню з металевої ванни при її кипінні;
- збільшенням часу видалення водню з металевої ванни.

Основним способом обмеження надходження водню і водяної пари у зону зварювання є очищення кромки, що зварюються, від іржі, вологи, мастила, фарби та інших водневмісних речовин. При низькій температурі кромки варто також очищати від інею і вологи та просушувати. Щоб уникнути концентрації вологи на зварювальних кромках рекомендується їх нагрівати до температури 100 °C і вище. Іржу, мастило або фарбу можна випалювати киснево-ацетиленовим пальником або різак. Зварювальний дріт варто очищати від слідів волоочильного змащення і інших забруднень, уникати операції травлення дроту при його волочинні (краще робити відпуск). Зварювальні електроди необхідно надійно упаковувати і зберігати у сухому приміщенні. Захисний газ необхідно застосовувати з мінімальною вологістю. Флюс повинен бути добре прожарений.

Азот надходить у зону зварювання, а з неї у зварювальну ванну з навколишньої атмосфери, а також з розплавлених основного і додаткового металів. Уникнути пористості від азоту можна шляхом: обмеження розчинення азоту в рідкому електродному металі і металевій ванні до величин, менших розчинності азоту у твердому металі; підвищення розчинності азоту у твердому металі; зв'язування азоту у металі шва у стійкі нітриди.

Розчинення азоту у металі обмежують застосуванням газового або шлакового захисту зони зварювання від доступу повітря. Крім того, потрібно виключити усі інші можливості надходження азоту у зону зварювання. Вміст азоту в основному металі і зварювальному дроті не повинен перевищувати допустимого. Не можна виконувати прихватки, монтажні і підварочні шви електродом з стабілізуючим покриттям або покритими електродом з відбитою обмазкою. Вміст азоту в захисних газах повинен бути мінімальним.

Підвищення розчинності азоту у твердому металі і зв'язування його у стійкі нітриди вимагають додаткового легування металу шва елементами, що мають більшу хімічну спорідненість до азоту. До таких елементів належать титан, алюміній, церій, цирконій та ін. Вводити в металеву ванну нітридоутворюючі елементи доцільно лише тоді, коли немає можливості обмежити доступ азоту у зону зварювання.

До металургійних способів попередження пористості від азоту належить також дегазація рідкого металу при його кипінні. Зокрема, цей спосіб застосовують при зварюванні і наплавленні під флюсом металу з підвищеним вмістом азоту. Для цього іноді використовують зварювальний дріт з підвищеним вмістом вуглецю.

Серед кисневих з'єднань окис вуглецю і водяна пара відрізняються тим, що при температурах існування рідкої сталі вони перебувають у газоподібному стані. У зв'язку з цим одним з найважливіших завдань розкислення зварювальної ванни є попередження утворення цих газів під час затвердіння металу. Щоб уникнути пористості від виділення газоподібних кисневих з'єднань, у зону зварювання вводять елементи з високою хімічною спорідненістю з киснем, що утворюють тверді або рідкі окисли. З'єднуючись з киснем, ці елементи гальмують реакції утворення окису вуглецю і водяної пари. Ефективність дії елементів-розкислювачів характеризується їх розкислювальною здатністю, тобто здатністю знижувати концентрацію кисню у сталі.

Про розкислювальні здатності елементів можна судити з рис. 3.17, на якому показана кількість кисню, що перебуває в рівновазі з даною кількістю елемента. Кількість розчиненого в рідкому металі кисню буде тим меншою, чим вища хімічна спорідненість з киснем даного елемента та більша його концентрація у розплаві. Невеликі присадки титана і алюмінію можуть призупинити реакцію утворення окису вуглецю у рідкій сталі.

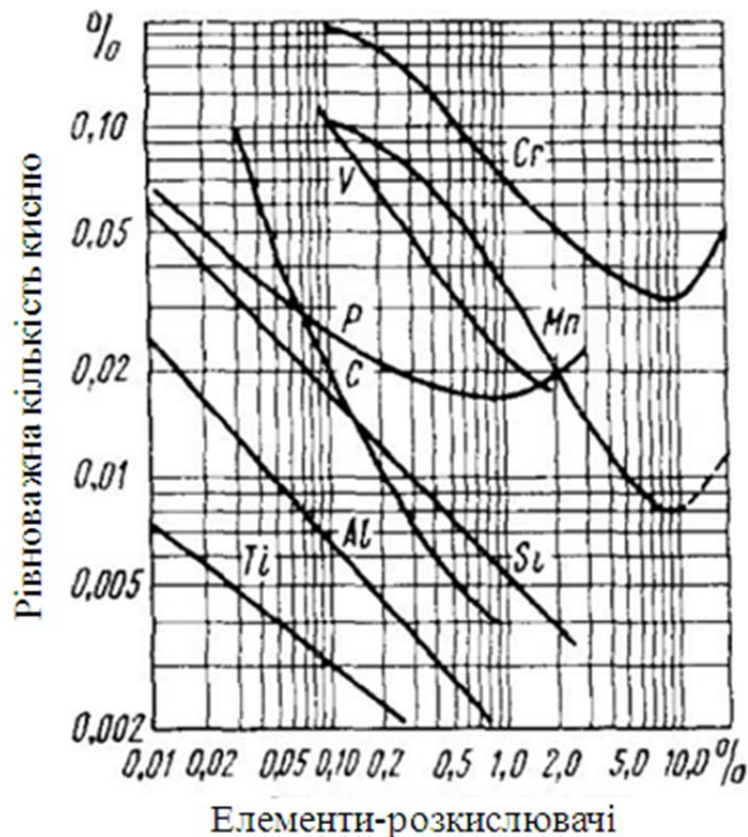


Рис. 3.17. Розкислювальна здатність елементів при температурі 1600 °С

Кремній при достатній його концентрації у розплаві також здатний призупиняти утворення окису вуглецю. Розкислювальна сила вуглецю практично не змінюється із зміною температури, тоді як розкислювальна сила кремнію при зниженні температури зростає. У рівноважних умовах при температурі затвердіння сталі кремній є кращим розкислювачем, ніж вуглець. Тому кремній здатний зупинити реакцію утворення окису вуглецю і зменшити кипіння сталі, що твердіє. Пов'язаний з титаном, алюмінієм, кремнієм і іншими сильними розкислювачами кисень вже не може взаємодіяти з вуглецем.

При зварюванні плавленням розкислення здійснюється шляхом введення елементів-розкислювачів у зварювальну ванну з основного металу, зварювального дроту, електродного покриття, керамічного флюсу тощо. При наявності достатньої кількості

зварювальних шлаків розкислення може здійснюватися за рахунок відновлення кремнію і марганцю з шлакової фази.

На пористість швів істотно впливає швидкість кристалізації зварювальної ванни. При великій швидкості кристалізації металу ріст кристалітів випереджує ріст і спливання пухирців газу, і останні заплутуються у металі, у результаті чого утворюється пора. Зниження швидкості зварювання, збільшення обсягу зварювальної ванни, зменшення тепловідводу у основний метал і збільшення його початкової температури знижують швидкість кристалізації металу та зменшують пористість швів. Деякий вплив здійснює і форма зварювальної ванни. Підвищення значення коефіцієнта форми шва призводить до зменшення ймовірності виникнення пор, оскільки при цьому поліпшуються умови для спливання пухирців у результаті дії зростаючих дендритів, що видавлюють.

3.5. Неметалеві включення у зварних швах

Неметалеві включення не відносяться до числа дефектів зварних швів, але впливають на їхню якість і властивості. Розглянемо різні типи неметалевих включень, що зустрічаються у зварних швах сталі.

Оксидні включення. У металі шва можуть утримуватися певні відсотки кисню, що перебуває у вигляді неметалевих оксидних або змішаних включень. Хімічний і мінералогічний склад цих включень залежить від хімічного складу металу шва. При низькому вмісті кремнію і марганцю у металі шва і відсутності інших легуючих елементів оксидні включення містять в основному FeO, інше — SiO₂ і MnO.

При підвищенні вмісту кремнію і марганцю у металі шва помітно збільшуються концентрації окислів цих елементів у складі оксидних включень, відповідно зменшується вміст у них окислів заліза. Загальна кількість оксидних включень у шві при

цьому також зменшується. Зі збільшенням співвідношення $[\% \text{Si}]:[\% \text{Mn}]$ у металі шва вміст SiO_2 у включеннях збільшується, а MnO — зменшується.

Введення алюмінію у метал шва зменшує загальну кількість оксидних включень і призводить до появи у їх складі герцініта $\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$. Подальше підвищення вмісту алюмінію супроводжується утворенням включень глинозему Al_2O_3 . При наявності хрому у шві утворюються включення хроміту $\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$. Продуктом розкислення зварювальної ванни ванадієм є окис ванадію V_2O_3 . Низька концентрація титану у металі шва призводить до утворення включень титанату заліза $\text{FeO} \cdot \text{Ti}_2\text{O}_3$, при високому його вмісті утворюється оксид титану Ti_2O_3 .

Виявлені у швах ручного дугового зварювання оксидні включення за мінералогічним складом можна розділити на наступні головні типи:

- змішані залізо-марганцеві оксиди, що являють собою непрозорі включення переважно кулястої форми. Їхньому утворенню сприяє висока окисленість металу шва при низькому вмісті кремнію і відсутності інших активних розкислювачів;
- залізо-марганцеві силікати, що мають вигляд напівпрозорих округлих включень з вкрапленнями темних часток;
- склоподібний кремнезем (прозорі частки кулястої або неправильної форми), зустрічається переважно в добре розкислених кремнієм швах.

При зварюванні під флюсом вигляд і склад оксидних включень залежать від складу флюсу. У швах, зварених під висококремністими марганцевими флюсами, включення переважно представлені висококремністими та залізо-марганцевими силікатами. Це округлі, прозорі і порівняно великі (0,002—0,02 мм) оксидні включення. Крім того, у таких швах багато міжкристалітних силікатних плівок. Плівки розташовані на межах між кристалітами

металу шва і іноді зливаються з круглими оксидними включеннями.

При висококремністих безмарганцевих флюсах у включеннях переважають округлі безбарвні виділення склоподібного кремнезему, спостерігаються і міжкристалітні силікатні плівки. У швах, зварених під низькокремністими і безкремністими флюсами, основну масу включень становлять алюмосилікати і шпінелі. При зварюванні у захисних газах вигляд і склад оксидних включень визначаються хімічним складом металу шва і вмістом у ньому кисню. Крім перерахованих видів включень зустрічаються і інші. Оксидні включення часто мають неоднорідний мінералогічний склад, вони також можуть утворювати складні кисневмісні включення, наприклад, окисульфіді.

Оксидні включення і силікатні плівки знижують ударну в'язкість і холодостійкість металу шва на вуглецевих і низьколегованих сталях. В аустенітних швах силікатні плівки зменшують пластичність металу шва при випробуваннях на розтяг і вигин, не впливаючи, при цьому, на величину ударної в'язкості.

Сульфідні включення. У зварних швах сталі, як правило, утримується 0,02—0,04 % S, що утворює сульфідні включення. На нетравлених шліфах ці включення мають вигляд темних плям, найчастіше неправильної форми. Розмір включень сильно зростає у напрямку від межі сплавлення металу шва з основним металом до середини шва. Найбільш великі включення спостерігаються у середині верхньої частини шва. При спеціальному травленні шліфів виявляються сульфідні плівки і ланцюжки дрібних сульфідних включень, які розташовані по межах кристалітів металу шва.

Склад, форма і розміри сульфідних включень залежать від хімічного складу металу шва. У сульфідних включеннях сірка в основному перебуває у вигляді з'єднань із залізом і марганцем. Підвищення вмісту у шві марганцю сприяє переважному зв'язуванню сірки у сульфід марганцю MnS. Окислювання зварювальної ванни окалиною зменшує вміст MnS у включеннях і збільшує

вміст сульфідів заліза FeS . При високому вмісті марганцю у шві підвищення кількості вуглецю зменшує вміст MnS у сульфідних включеннях. При малій кількості марганцю зміна концентрації вуглецю мало впливає на зв'язування сірки у формі MnS .

Кремній сильно зменшує вміст сульфідів марганцю у включеннях. Наявність хрому у металі шва сприяє зв'язуванню сірки у вигляді сульфідів хрому або змішаних хромо-марганцевих сульфідів. Підвищення вмісту вуглецю у металі шва помітно збільшує розмір сульфідних включень.

Залежно від ступеня розкислення металу зварювальної ванни утворюються сульфідні включення трьох типів. В окисленому металі, а також у присутності марганцю, хрому і кремнію утворюються переважно кулясті оксисульфідні включення. Під впливом невеликих добавок сильних розкислювачів (алюмінію, титану, цирконію та ін.) сульфідні включення набувають вид плівок і ланцюжків, які розташовуються по межах кристалітів металу шва. Введення алюмінію і цирконію у кількостях, більших необхідного для повного розкислення сталі, може викликати перетворення плівок і ланцюжків у включення кутастої неправильної форми.

Найнебезпечнішими відносно утворення кристалізаційних тріщин у зварних швах є сульфідні плівки і ланцюжки, розташовані по межах кристалітів

У зв'язку з більшою розчинністю сірки в рідкій сталі у порівнянні з киснем у процесі охолодження і затвердіння металу зварювальної ванни сульфідні включення утворюються при більш низьких температурах, ніж оксидні. Тому сірка може виділятися у вже існуючих оксидних включеннях з утворенням оксисульфідів. Аналогічно утворюються карбосульфідні і інші складні сульфідні включення.

Фосфоровмісні включення. Вміст фосфору у зварних швах сталі, як правило, невисокий — не більше 0,04—0,06 %. У швах вуглецевих і низьколегованих сталей фосфор переважно перебу-

ває у твердому розчині, а не у вигляді неметалевих включень. Це обумовлено низькою концентрацією фосфору у металі швів і відносно високою його розчинністю у фериті. У зв'язку з низькою розчинністю фосфору в аустеніті фосфоровмісні включення значно частіше зустрічаються у швах з аустенітною структурою. У цих включеннях фосфор може перебувати у вигляді фосфідів, фосфідних евтектик і фосфатів.

Фосфідні включення мають червоподібну форму і розташовуються по межах кристалітів металу шва. Залежно від напрямку перетину на шліфах вони мають вигляд міжкристалітних прошарків або включень округлої форми. Фосфідні евтектики перебувають у вигляді прошарків по межах кристалітів металу шва або зерен основного металу у біляшовній зоні.

Шкідливий вплив фосфору на властивості зварних з'єднань полягає у зниженні високотемпературних характеристик металу шва внаслідок ослаблення міжкристалітних меж (при виділенні легкоплавких включень) і в погіршенні механічних властивостей швів при нормальній і низькій температурах. Останнє обумовлено зниженням пластичності металу у результаті розчинення фосфору і наявністю на межах кристалітів крихких неметалевих прошарків. Оскільки розчинність фосфору в аустеніті нижча, ніж у фериті, небезпека утворення кристалізаційних тріщин і зниження механічних властивостей металу шва значно більша для швів з аустенітною структурою.

Для середньолегованих сталей шкідливий вплив фосфору і сірки щодо утворення кристалізаційних тріщин підсилюється тим, що місця ліквідації цих елементів у металі шва збігаються. Збагачені фосфором ділянки фериту лежать по межах первинних кристалітів, де накопичуються і сульфідні включення.

Нітридні включення. Залежно від надійності захисту зони зварювання від повітря вміст азоту у металі шва становить 0,01—0,1 %. Нітридні включення у зварних швах зустрічаються значно рідше, ніж оксидні або сульфідні. Це обумовлено низьким вміс-

том азоту у швах і меншою стійкістю нітридів при високих температурах. Утворення окремої нітридної фази у рідкій сталі можливе лише в присутності сильних нітридоутворюючих елементів (титана, цирконію). В основному нітридні включення виділяються у процесі охолодження або термообробки зварних з'єднань. Для їхнього утворення необхідна наявність у металі шва порівняно високої концентрації азоту, що є можливим, наприклад, при зварюванні відкритою дугою без захисту або ж при підвищеному вмісті азоту в основному металі.

Як правило, у зв'язку з швидким охолодженням і низькою концентрацією азоту у металі швів фіксується у вигляді твердого розчину. Якщо цей твердий розчин перенасичений азотом, то при роботі зварних з'єднань у нормальних умовах або при нагріванні з нього виділяються включення нітридів. Цим обумовлене так зване старіння металу шва. Через малу швидкість дифузії азоту у твердому металі цей процес проходить повільно.

У швах низьковуглецевих сталей з підвищеним вмістом азоту іноді виявляються голки нітриду заліза Fe_4N і залізонітридний евтектоїд, так званий *брауніт*. Нітридні голки спостерігаються лише у швах, які зварені на повітрі непокритим електродом або електродом з тонким покриттям.

3.6. Інші дефекти зварних з'єднань

Шлакові канали. Дефект являє собою заповнену шлаками несучільність (рис. 3.18, *а, б*). Канал, як правило, не виходить на поверхню шва. Ширина каналу збігається з шириною зазору між зварювальними кромками (рис. 3.18, *а*). Відстань між дефектами у багатьох випадках дорівнює або кратна довжині зварювальної ванни. Шлакові канали утворюються, головним чином, при зварюванні під флюсом у першому проході двосторонніх стикових швів, виконуваних на флюсовій або флюсомідній підкладках. Іноді вони спостерігаються при зварюванні одnobічних швів з

повним проваром кромок, значно рідше — при зварюванні кутових швів.

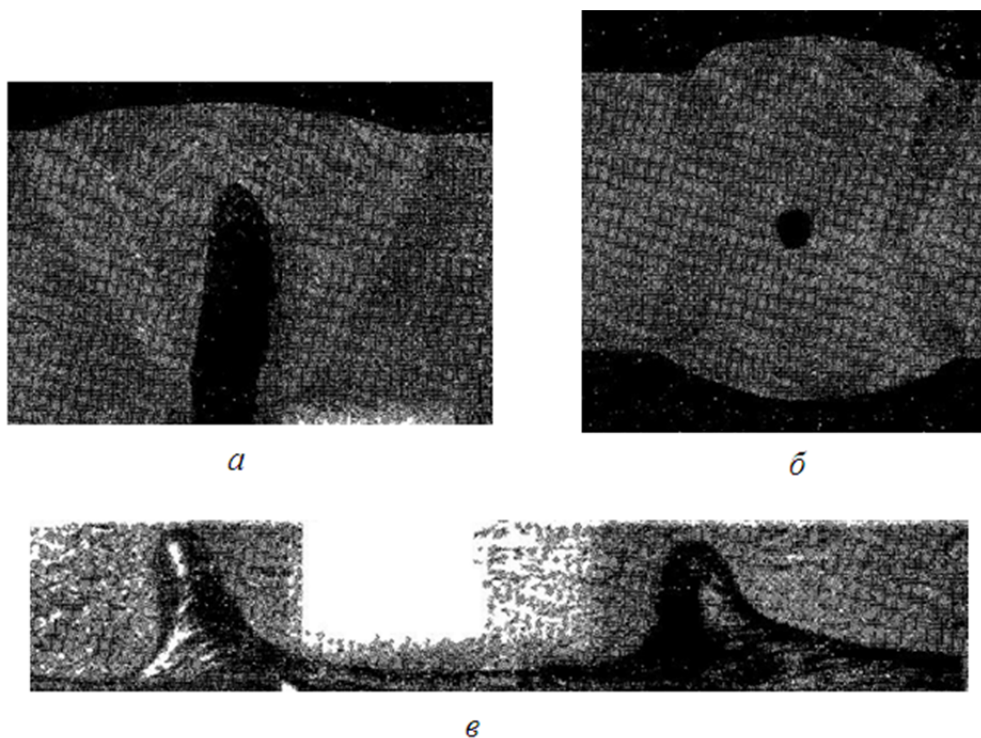


Рис. 3.18. Шлакові канали: *а* — після зварювання з одного боку, розріз поперек шва; *б* — після зварювання з одного боку, розріз уздовж шва; *в* — після зварювання з двох сторін

Імовірність утворення дефектів зростає зі збільшенням зазору. При зазорі до 3 мм дефекти подібного типу спостерігаються досить рідко. Після накладення шва з другої сторони канал при малому його проникненні у товщу першого проходу повністю заварюється, а при більш глибокому заляганні частково залишається у металі шва у вигляді округлого (рис. 3.18, *в*) або витягнутого по висоті шару шлакового включення.

На практиці для зниження імовірності появи шлакових каналів, як правило, застосовують ті ж заходи, що і для попередження утворення пор. Дуже схожі по конфігурації, але не заповнені шлаками дефекти спостерігаються і при зварюванні в захисних газах та покритих електродах.

Флокени. Після руйнування зразків, вирізаних з металу шва і випробуваних на розтяг або вигин, у зламі іноді виявляють срібlistі плями круглої або овальної форми, які називаються *флокенами*.

Вони мають більш крупнокристалічну будову, ніж інша частина зламу. У більшості випадків у середині флокену перебуває поря або шлакове включення, що є центром зародження дефекту. Такий дефект одержав назву "*риб'яче око*". Утворення флокенів пов'язане зі зниженням пластичності металу шва під впливом водню.

Шви низьколегованих хромонікелевих і хромонікелемолібденових сталей менш стійки проти утворення флокенів, ніж шви вуглецевих конструкційних сталей. У швах високолегованих хромонікелевих і марганцевих сталей утворення подібних дефектів не спостерігається. Наявність розглянутих дефектів призводить до деякого зниження пластичних властивостей зразків металу при статичних випробуваннях. Флокени можуть бути усунуті шляхом нагрівання зразка перед випробуванням до температури 150—250 °С, що сприяє більш повному видаленню водню з металу. Той же ефект досягається при тривалому зберіганні зразків перед випробуванням.

Флокени утворюються тільки у процесі руйнування зразків, випробовуваних безпосередньо після зварювання при статичному навантаженні, при напруженнях, у більшості випадків близьких до тимчасового опору металу або у випадках (навіть при підвищеному вмісті водню у металі шва), коли вини перевищують його межу текучості. Отже, немає підстав допускати, що при статичному навантаженні у реальній конструкції можуть створюватися умови для утворення у металі шва флокенів.

Зона несплавлення. При дуговому і електрошлаковому зварюванні у деяких умовах утворюється дефект, який називається *зоною несплавлення*.

Він характерний відсутністю сплавлення між основним металом і металом зварювальної ванни у частині периметра, а іноді і по усьому периметру шва (рис. 3.19, *а*, *б*). Несплавлення спостерігається при оплавленні кромок основного металу і достатній кількості металу зварювальної ванни. Дефект утворюється при дуговому зварюванні на підвищених швидкостях і силах струму більше 1500 А, а при електрошлаковому зварюванні — навіть у нормальному діапазоні режимів. Початковою стадією дефекту є глибокі підрізи по межі шва з одночасним збільшенням утовщення, кінцевою його стадією — відсутність сплавлення практично по усьому периметру шва.

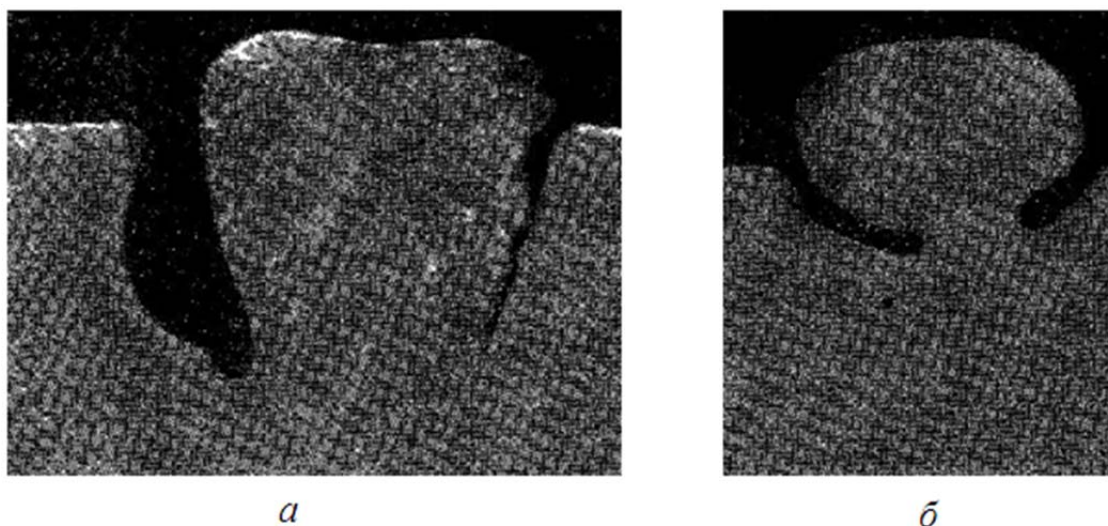


Рис. 3.19. Зона несплавлення при дуговому зварюванні

Утворення зони несплавлення тісно пов'язане з формуванням зварювальної ванни. Останнє може бути умовно розділене на дві стадії — утворення канавки в основному металі і наступне заповнення її металом зварювальної ванни. Якщо плівка розплавленого металу, що покриває поверхню канавки, до моменту її заповнення рідким металом встигла затвердіти, а запас теплоти, накопичений у зварювальній ванні, недостатній для повторного розплавлення основного металу, то змочування металом зва-

ривальної ванни основного металу не відбувається і утворюється зона несплавлення.

Для запобігання появи подібних дефектів застосовують заходи, що забезпечують зменшення розриву за часом між утворенням і заповненням канавки (зварювання на спуск, зварювання похилим електродом кутом уперед, зварювання двома і трьома дугами, зварювання з підігрівом та ін.), а також отримання сприятливої форми провару. Як правило, коефіцієнт форми шва, при якому не спостерігається утворення зони несплавлення, збільшується із зростанням швидкості зварювання.

У більшості випадків зазор, що утворився між основним металом і металом шва, заповнений шлаками. Зону несплавлення варто відрізнити від непровару і підрізу, що мають інші причини появи.

Утяжини. При зварюванні під флюсом на великих швидкостях двома і більше дугами спостерігається утворення своєрідних дефектів, що отримали назву *утяжини*.

Вони являють собою розташовані один від одного на відстанях, приблизно рівних довжині зварювальної ванни, усадкових рихлин (тріщин), що поширюються на 2—3 мм углиб шва і на 5—8 мм уздовж його осі. Будова утяжин збігається з будовою усадкових рихлин, що утворюються у кратері шва. Можна припустити, що поява утяжин пов'язана з порушенням хвилеподібного надходження металу у хвостову частину ванни.

Непровари. *Непроваром* називають місцеву відсутність сплавлення між зварювальними елементами, між металом шва і основним металом або окремими шарами при багат шаровому шві.

Залежно від розташування і характеру розрізняють непровар по товщині основного металу. При зварюванні стикових швів з обробленням кромки і кутових швів з обробленням і без оброблення кромки спостерігається непровар вершини кута і непровар по кромці. При багат шаровому зварюванні швів усіх типів іноді

зустрічається непровар між окремими шарами. Місце непровару у більшості випадків заповнено шлаками, що завдяки рідкотекучості та більш низькій температурі плавлення заповнює несучільність, яка утворюється при непроварі.

Непровар зменшує перетин шва і викликає значну концентрацію напружень, що іноді може призвести до утворення тріщини. Непровар по товщині металу, що зварюється, може бути викликаний неправильним вибором режиму зварювання, що не передбачає достатній запас глибини проплавлення, або порушенням режиму зварювання у процесі виконання даного шва (головним чином зменшенням сили струму).

Причиною непровару може також служити недостатньо точний напрямок кінця електрода на місці сполучення кромок. Досить часто непровари спостерігаються на початку і наприкінці шва. Це пов'язане з тим, що глибина провару на цій ділянці внаслідок несталого теплового процесу падає.

Неправильне поновлення процесу після його перерви, викликаного зміною електродів і зварювального дроту або інших причин, також призводить до непровару. При правильному поновленні процесу зварювання, що забезпечує достатнє перекриття перерваного шва наступним, непровар у більшості випадків не спостерігається. Для того щоб запобігти непровару на початку і в кінці шва, зварювання необхідно починати і закінчувати на спеціальних вивідних (кінцевих) планках або застосовувати особливі прийоми.

До непровару у кореня шва призводять усі перераховані вище причини, а також порушення режиму зварювання, що обумовлюють зміну положення першого шару шва в розділці. Нахил виробу або різка зміна швидкості при зварюванні з розділкою кромок може також викликати непровар кореня шва. У цьому випадку рідкий метал затікає перед дугою, що перешкоджає сплавленні його з холодним основним металом.

Непровар по кромці, як правило, є наслідком зміни форми шва внаслідок зменшення напруги дуги або збільшення швидкості зварювання. Це призводить до розбіжності форми шва або шару з формою розділення чи простору, що утворився між шарами. До того ж веде недостатньо точний напрямок електрода стосовно зварювальних кромок або шару (при цьому шов зміщується на одну сторону, друга кромка або шар не оплавляються дугою), а також неправильна послідовність накладення шарів при багатошаровому зварюванні. У всіх випадках основний метал не розплавляється, у результаті чого утворюється непровар.

При електрошлаковому зварюванні спостерігаються непровари по одній, двох кромках і місцеві непровари у поверхні елементів, що з'єднуються, або у середині шва. Непровар по двох кромках викликаний малою шириною шва, що пов'язане з низькою напругою або високою швидкістю зварювання. Непровар по одній кромці викликаний неточним веденням електрода по осі з'єднання, через що шов зміщується на одну з кромок, а друга кромка не оплавляється.

Непровар на поверхні деталей, що зварюються, виникає при збільшенні відстані від кінцевого положення електрода до повзуну і при малій тривалості зупинки електрода у кінцевому положенні. Непровар у середині деталей по їхній товщині при зварюванні двома рухливими електродами є наслідком великої відстані між останніми або впливу кінця електрода через його перегрів. Дільниця шва з непроваром, що перевершує регламентовану відповідними технічними документами величину, повинна бути видалена і заварена заново.

Підрізи. Підрізом називають місцеве зменшення товщини основного металу по межі шва. Підріз призводить до різкої концентрації напружень у тих випадках, коли він розташований перпендикулярно до напрямку головних напружень, що діють на зварне з'єднання. Для конструкцій, які працюють при вібраційних навантаженнях, підріз істотно знижує міцність зварного з'єднан-

ня. Найбільш часто підрізи виникають при зварюванні кутових швів і перших шарів багатшарових стикових швів (рис. 3.20).

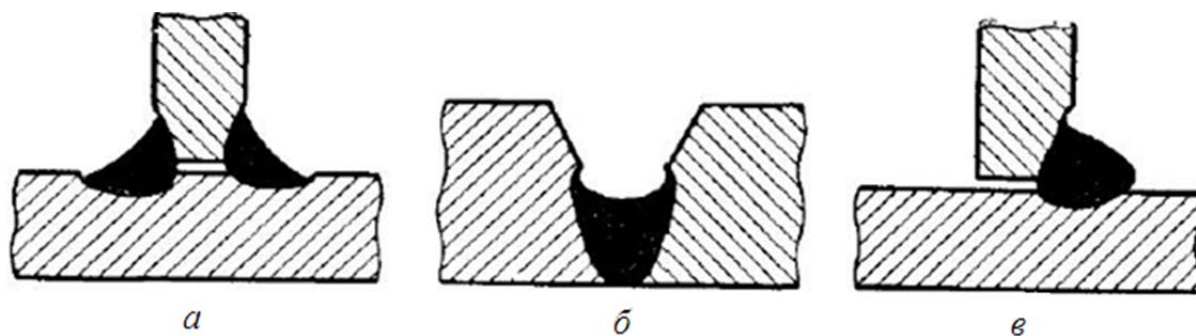


Рис. 3.20. Підрізи: *а* — двосторонній при зварюванні кутового шва; *б* — двосторонній при зварюванні першого шару багатшарового стикового шва; *в* — однобічний з напливом на другу кромку при зварюванні кутового шва

Значно рідше підрізи утворюються при зварюванні одношарових стикових швів з розділкою і без розділки кромки. Підрізи можуть бути двосторонніми, тобто розташовуватися з двох сторін шва, або однобічними — розташовуватися з однієї сторони шва. Типовими є двосторонні підрізи. При зварюванні кутових швів похилим електродом або з оплавленням кромки іноді спостерігається однобічний підріз з напливом металу на горизонтально розташовану деталь (рис. 3.20, *в*).

У більшості випадків підріз є наслідком надто високої напруги дуги або недостатньо точного ведення електрода по осі з'єднання. У першому випадку частина канавки, яка виплавлена дугою у основному металі, не заповнюється металом зварювальної ванни. Якщо ж ширина канавки менша, ніж ширина шва, який може сформуватися при даній кількості додаткового металу, то утворюється опуклий шов (рис. 3.21).

При неточному веденні електрода відбувається більш глибоке проплавлення однієї з кромки і метал зварювальної ванни не вистачає для повного заповнення канавки, що утворилася. При

зварюванні похилим електродом або вертикальним електродом з оплавленням кромки утворення підрізу пояснюється стіканням металу на горизонтально розташовану деталь. Утворення підрізів при зварюванні стикових швів без розділення кромок пов'язане також з поганим розтіканням металу.

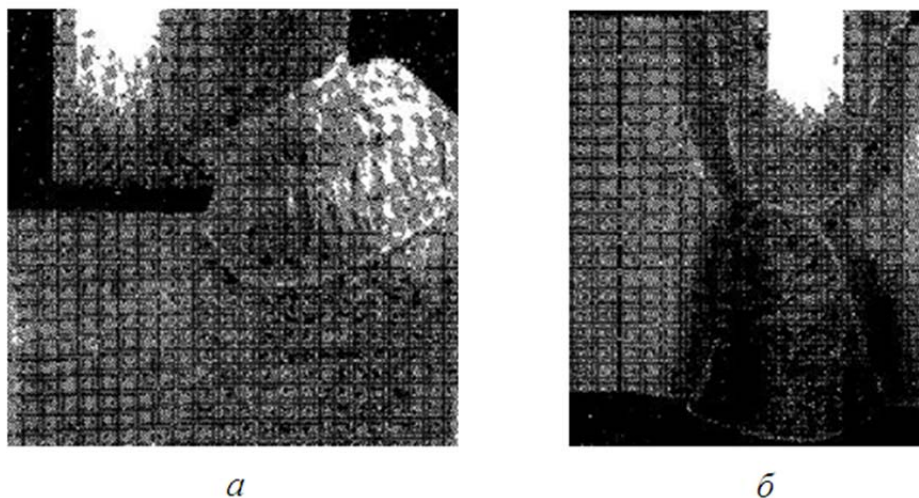


Рис. 3.21. Опуклий шов: *а* — кутовий; *б* — стиковий

При електрошлаковому зварюванні підрізи виникають на поверхні зварюваних деталей, які дотичні з повзунами, при підвищенні напруги процесу, збільшенні тривалості зупинки електроду в кінцевому положенні і поганому охолодженні повзунів.

Якщо розміри підрізу перевищують допустимі, то його гостру грань необхідно згладжувати механічним шляхом для створення плавного переходу від основного металу до металу шва. Якщо глибина підрізу перевищує 1—2 мм (залежно від товщини основного металу), то дефектну ділянку заварюють. Заварювати необхідно швом достатнього перетину. Підрізи, які утворилися в глибинних шарах багатошарового шва, якщо вони не були заварені при накладенні наступних шарів, стають внутрішніми дефектами. Такі підрізи, як правило, заповнені шлаками, які затекли у порожнину, що утворилася при підрізі.

Напливи. *Напливом* називають натікання металу шва на поверхню основного металу без сплавлення з ним. Напливи спостерігаються переважно при зварюванні одношарових стикових швів без розділення кромки і при зварюванні кутових швів похилим електродом або з оплавленням кромки та при наплавленні. Виникають напливи при неправильному виборі режиму зварювання або наявності на зварюваних кромках товстого шару окислини.

Для попередження утворення напливу необхідно збільшити ширину шва, підвищивши напругу дуги або зменшити кількість металу, що утворює посилення. Це досягається шляхом розміщення металу у зазорі між зварюваними кромками або у розділенні. Напливи — це зовнішній дефект, але через натікання металу на кромку виявлення їх при огляді шва утруднене. При електрошлаковому зварюванні напливи утворюються при нещільному затисненні повзунів і тоді, коли виїмка у повзуні значно перевищує ширину шва. У цьому випадку метал, що заповнює виїмку, не сплавляється з холодним основним металом. Усувають напливи механічним видаленням надлишкового металу.

Пропали. *Пропалами* називають порожнини у шві, які утворилися у результаті витікання зварювальної ванни. Пропали виникають при надлишковій силі струму, збільшенні зазору між зварюваними кромками, зміні положення (нахилу) електрода або виробу та нещільному приляганні флюсової, флюсомідної або сталевий підкладки до зварюваних листів. Пропали виявляються при зовнішньому огляді. Це недопустимий дефект зварного з'єднання. Місця пропалів повинні бути зачищені і заварені заново. Початковою стадією пропалу є провисання шва, що спостерігається при однобічному зварюванні. При зварюванні тонкого металу іноді утворюються специфічні дефекти, ззовні схожі на пропали, але не пов'язані з витіканням зварювальної ванни.

Кратер. *Кратером* називають поглиблення, що утворюється після обриву дуги наприкінці шва. На ділянці кратера шов

має зменшений перетин. У кратері, як правило, виявляються усадкові рихлини, які часто переходять у тріщину. Довжина кратера залежно від режиму зварювання становить 20—200 мм. При механізованих видах зварювання кратер утворюється тільки наприкінці даного шва, який, як правило, виводять на вивідну планку. При зварюванні вручну кратер виникає наприкінці ділянки шва, звареного кожним окремим електродом.

В особливо відповідальних конструкціях метал шва на ділянці кратера необхідно видаляти механічним шляхом або виплавити. Якщо зварювання вручну ведуть без вивідних планок, то кратер наприкінці шва необхідно ретельно заварювати і обривати дугу на завареній ділянці шва. Не слід виводити кратер на основний метал, тому що це призводить до утворення підрізів і опіків.

Шлакові включення. Шлаковими включеннями називають видимі неозброєним оком округлі або витягнуті включення шлаків, розташовані у металі шва як на межі сплавлення, так і між окремими шарами або у вершині провару. Вони, як правило, утворюються у результаті заповнення зварювальними шлаками несучільностей, що виникають при непроварах або підрізах.

При багатопрохідному дуговому зварюванні шлакові включення іноді виявляються на ділянках, де недостатньо ретельно було виконане очищення поверхні попереднього шару від шлакової кірки. Значно рідше шлакові включення утворюються в перетині одношарового шва або окремого шару.

Шлакові включення відносяться до внутрішніх дефектів шва. Ділянки шва, де їхня величина перевищує допустиму технічними умовами на даний вид продукції, вирубують і заварюють заново.

Опіки. Опіками називають невеликі ділянки металу, що підлягли розплавлюванню, на основному металі поза зварним швом. Ці ділянки мають знижену пластичність. Виникають опіки у результаті порушення дуги з метою звільнення кінця елект-

рода від обмазки, при контакті поверхні тримача, що перебуває під напругою, з виробом і при виводі кратера за межі шва на основний метал. Опіки відносяться до зовнішніх дефектів.

Нерівномірність ширини шва. Ширина шва, як правило, змінюється у результаті різких коливань напруги дуги або швидкості зварювання. Значні зміни ширини шва супроводжуються зміною глибини проплавлення, що може призвести до непровару.

3.7. Вплив технологічних дефектів на міцність зварних з'єднань при статичних і змінних (динамічних) навантаженнях

Досвід експлуатації зварних конструкцій показує, що технологічні дефекти можуть істотно знижувати працездатність зварних з'єднань. У конструкціях, що працюють в умовах статичного навантаження, дефекти нерідко стають осередками крихких тріщин, які виникають при низьких рівнях робочих напружень, а в конструкціях, що працюють при змінних навантаженнях, вони знижують межу витривалості зварних з'єднань. Механізм впливу дефектів на міцність в обох випадках різний, у зв'язку з чим вплив дефектів на міцність в умовах статичного і динамічного навантаження розглянуто окремо.

Вплив дефектів на статичну міцність зварних з'єднань. Гострі тріщиноподібні дефекти (тріщини, непровари, несплавлення, підрізи) нерідко стають осередками крихких руйнувань. Разом з тим далеко не кожний дефект становить небезпеку відносно цього. Для визначення надійності зварних конструкцій і встановлення вимог, що пред'являються до якості зварних з'єднань, необхідно мати відомості про вплив найбільш ймовірних дефектів на міцність з'єднань в умовах, близьких до реальних.

Прийнято вважати, що дефекти послаблюють робочий перетин з'єднань, викликають у них концентрацію напружень і об'ємність напруженого стану. При цьому приймають, що механічні

властивості матеріалу у зоні дефекту змінюються незначно. При такій ситуації реальну загрозу для конструкцій, що працюють в умовах природно низьких температур (до -60°C), можуть представляти дефекти відносно великих розмірів. Інакше кажучи, коли матеріал зварного з'єднання має великий запас в'язкості, основний вплив на міцність здійснює відносна величина дефекту. Це підтверджується цілим рядом досліджень, проведених у нашій країні та за кордоном.

При більш низьких температурах картина істотно змінюється: основним фактором, що визначає міцність, стає інтенсивність напружень у зоні дефекту.

Залежність величини номінальних руйнівних напружень від температури у цьому випадку можна представити у такий спосіб: при позитивних і природно низьких температурах (до -60°C) руйнування мають в'язкий і квазікрихкий характер, а руйнівні напруження перевищують величину межі текучості матеріалу.

Надалі, у міру зниження температури, в'язкість матеріалу продовжує зменшуватися, і врешті-решт настає момент, коли релаксація напружень у вершині дефекту стає неможливою. У цих умовах крихка тріщина виникає і поширюється при низькому рівні номінальних напружень (рис. 3.22, крива *а*). Температура, при якій починає спостерігатися це явище, називається *нижньою критичною*. Вона залежить від ряду факторів і насамперед від пластичних властивостей металу шва.

Здавалося б, при природно низьких температурах не слід побоюватися дефектів відносно малих розмірів, однак практика показує, що крихкі руйнування від таких дефектів все ж спостерігаються. Подібні руйнування свідчать про існування інших факторів, що сприяють підвищенню чутливості металу швів до технологічних дефектів. Схематично цей вплив можна представити зміною положення нижньої критичної температури (рис. 3.22, крива *б*), що відповідає різкому зниженню міцності зварного з'єднання.

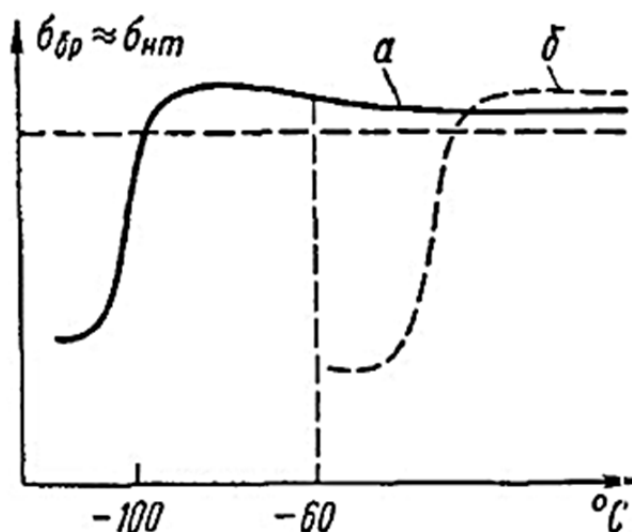


Рис. 3.22. Вплив температури на міцність зварних швів з малим плоским дефектом ($\sigma_{бр}$ — руйнівні напруження за перетином бруто; $\sigma_{нт}$ — руйнівні напруження за перетином нетто): a — метал шва у вихідному стані; b — метал крихкий

Ймовірно, це пов'язане з тим, що локальні механічні властивості матеріалу у зонах дефектів зазнають зміни. Найбільш часто ці зміни пов'язані з деформаційним старінням сталі, що значно знижує її опір виникненню крихкої тріщини. Іноді зменшення в'язкості матеріалу обумовлено водневою крихкістю. У зв'язку з цим розглянемо найбільш характерні умови, що сприяють локальній крихкості швів у зоні дефектів, і їхній вплив на міцність зварних з'єднань.

Вплив попереднього навантаження. Погіршення пластичних властивостей сталі у вершин дефекту на практиці може бути пов'язане з природним старінням металу у зонах концентрації пластичних деформацій, які виникають при попередньому перевантаженні конструкцій. Характерним прикладом може слугувати експандування зварних труб, коли загальні деформації порівняно невеликі (1,2—1,6 %), у той час як місцеві деформації можуть досягти значної величини (10 % і більше).

У якості прикладу на рис. 3.23 показана залежність величини номінальних руйнівних напружень від температури, отримана при випробуванні зразків-пластин з сталі ВСт3сп зі стиковими швами, виконаними електродами ОММ5. Приблизно однакові розміри непроварів у цих зразках забезпечувалися збільшенням притуплення кромки у центральній частині пластин. Крихкість металу внаслідок пластичного деформування і наступного старіння сталі підвищує чутливість зварного з'єднання до технологічних дефектів і збільшує небезпеку утворення руйнувань від них.

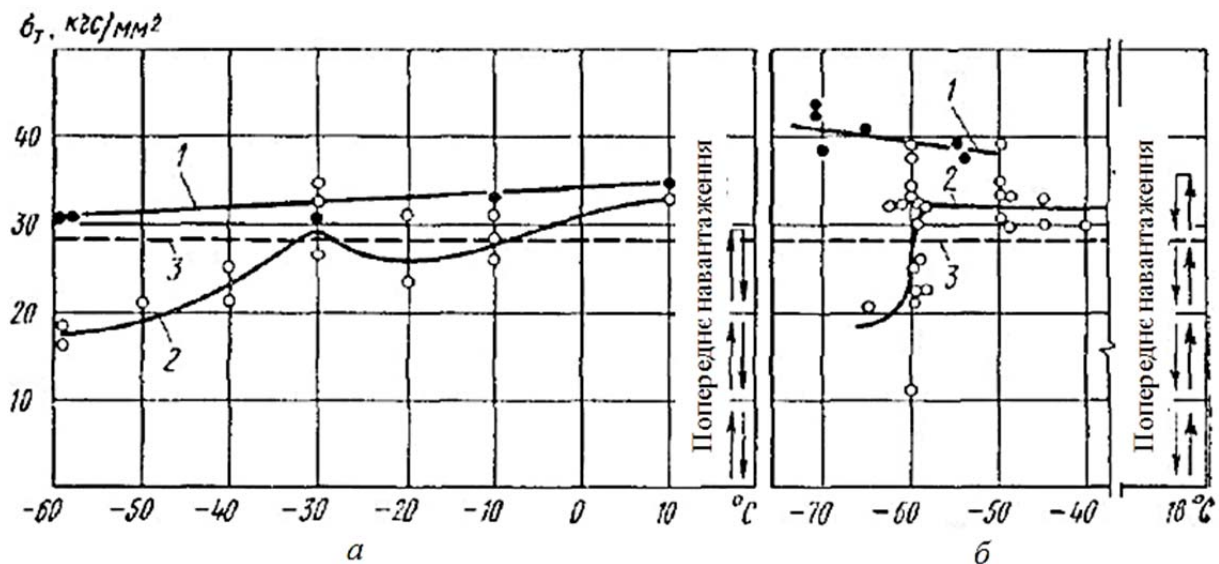


Рис. 3.23. Залежність руйнівних напружень від температури випробування зразків: а — з наскрізним надрізом; б — з внутрішнім непроваром; 1 — зразки не піддавалися попередній обробці; 2 — зразки після загальної деформації розтягу на 0,4 % і наступного штучного старіння при температурі 250 $^{\circ}\text{C}$ протягом 2 год.; 3 — межа текучості металу шва при кімнатній температурі

Вплив термопластичних деформацій. Під час охолодження зварного з'єднання у зоні дефекту можуть виникати термопластичні деформації, що викликають динамічне старіння металу. У результаті виникає локальна крихкість і, як наслідок, відбувається зниження опірності металу виникненню крихких тріщин. По-

дібні умови спостерігаються, наприклад, у тому випадку, коли дефект розташований на ділянці замикання кільцевих швів або ступенів при зворотно-ступінчастому зварюванні. Поряд з протіканням термопластичних деформацій у подібних випадках виникають і високі залишкові напруження розтягу. Більш небезпечними з погляду виникнення крихких руйнувань є непровари, що піддаються повторному нагріванню.

У якості прикладу на рис. 3.24 представлені результати випробування двох серій зразків зі сталі ВСт3сп з непроварами у поперечному стиковому шві, який виконаний електродами ОММ5.

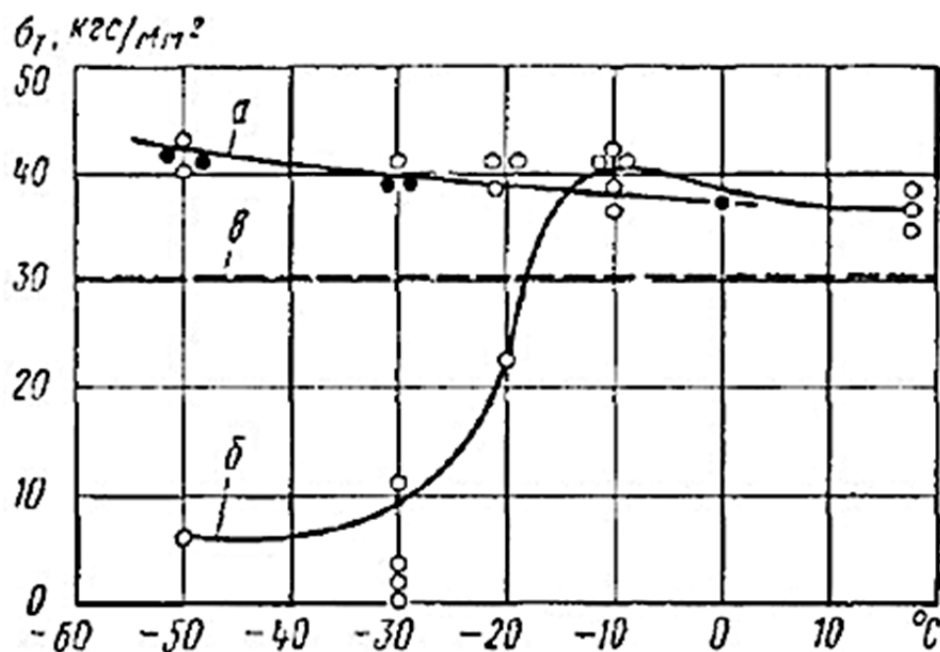


Рис. 3.24. Залежність міцності від температури випробування зразків: а — з внутрішнім непроваром у шві, який виконано напрохід, б — те ж при секційному зварюванні; в — межа текучості металу шва при кімнатній температурі

Зразки першої серії зварені напрохід, у зразках другої серії спочатку зварені крайні ділянки шва, а після їхнього охолодження — середня ділянка. Міцність зразків у випадку зварювання напрохід є досить високою у всьому діапазоні температур

випробувань (включаючи $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$), а у випадку секційного виконання швів різке зменшення міцності спостерігалось вже при температурі $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Це можна пояснити крихкістю металу у зоні дефекту, що пов'язане зі старінням сталі, яке супроводжується протіканням термопластичних деформацій, і дією високих залишкових напружень розтягу.

Вплив водневої крихкості. У процесі зварювання нерідко відбувається збагачення зварних з'єднань воднем. Інтенсивність цього процесу залежить від збігу ряду обставин, серед яких особливу роль грає пластичне деформування металу. У подібних умовах поглинання водню сталлю зростає майже в 100 разів. У зв'язку з цим крихкість сталі у вершин дефектів-концентраторів термопластичних деформацій може збільшуватися завдяки водневій крихкості.

Дані, отримані при випробуванні зразків, свідчать про те, що збільшення вмісту водню у шві істотно підвищує чутливість з'єднання до непровару (рис. 3.25).

Зразки виготовлені зі сталі 09Г2С з непроварами у поперечному стиковому шві, який виконано секційно електродами УОНИ—13/55. Міцність збагачених воднем з'єднань (зварювання здійснювалося електродами зі зволоженим покриттям) значно знижувалася вже при температурі $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, у той час як міцність з'єднань, виконаних просушеними електродами, виявилася досить високою у всьому діапазоні природно низьких температур.

Вплив крихкості, пов'язаний збільшенням вмісту вуглецю у швах. При зварюванні середньовуглецевих сталей спостерігаються випадки підвищення вмісту вуглецю у металі швів, зокрема при неякісному очищенні кромки після повітряно-дугового різання вугільним електродом. З підвищенням вмісту вуглецю зменшується в'язкість металу, і можна чекати, що чутливість швів до технологічних дефектів у цьому випадку буде підвищеною. Випробування зразків зі сталі 17ГС з гострим штучним надрізом у поперечному стиковому шві, звареному спе-

ціальними електродами, підтвердили таке припущення. Зі збільшенням вмісту вуглецю чутливість шва до гострих концентраторів напружень зростає. Це проявляється як у підвищенні температури, що відповідає переходу металу з в'язкого у крихкий стан, так і в підвищенні критичної температури, при якій міцність зварного з'єднання починає різко знижуватися.

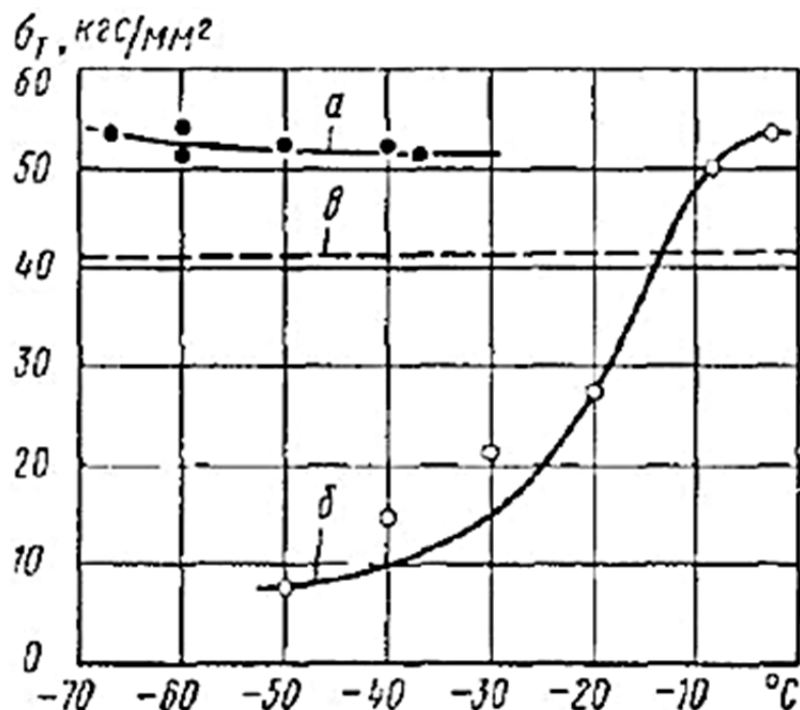


Рис. 3.25. Залежність міцності від температури зразків з внутрішнім непроваром, виконаних секційним зварюванням: *а* — електродами УОНИ—13/55, просушеними перед зварюванням; *б* — електродами зі зволоженим покриттям; *в* — межа текучості металу шва при кімнатній температурі

Описане явище відбувається, коли зварні з'єднання, що мають гострі тріщиноподібні дефекти, працюють в умовах статичного навантаження при позитивних і природно низьких температурах. Що стосується інших дефектів, таких як пори і шлакові включення, то їхній вплив на міцність стає істотним тільки

при значному послабленні робочого перетину або при значному зменшенні пластичності зварних з'єднань.

Вплив дефектів на втомлювальну міцність зварних з'єднань. При значних змінних напруженнях міцність зварних з'єднань визначається їхнім опором втомлювальним руйнуванням. Останні, як правило, характеризуються межею витривалості, яка залежить від концентрації напружень, що створюються формою з'єднання або дефектом зварювання, від величини і знака залишкових напружень, а також від властивостей застосовуваних матеріалів. Технологічні дефекти (підрізи, непровари, несплавлення, тріщини) створюють значну концентрацію напружень і знижують довговічність з'єднань. За певних умов дефекти типу пор і шлакових включень, які не є небезпечними при статичному навантаженні, можуть викликати передчасні втомлювальні руйнування.

Нижче наведені дані про вплив непроварів, підрізів і пор на втомлювальну міцність зварних з'єднань з урахуванням згаданих факторів.

Вплив непроварів. Непровари створюють різку концентрацію напружень і викликають істотне зниження витривалості стикових з'єднань. Так, наприклад, становлячи всього 10 % товщини перетину, непровар може понизити втомлювальну міцність з'єднання наполовину, а при глибоких непроварах, які займають 40—50 % товщини шва, межі витривалості для сталі знижуються, наприклад, з 15 до 6 кгс/мм² (рис. 3.26). Довговічність зростає зі зменшенням глибини непровару і збільшенням радіуса його вершини.

Додатковий вплив можуть здійснювати залишкові напруження. Один і той же дефект по-різному змінює втомлювальну міцність з'єднання залежно від того, у якому полі залишкових напружень він перебуває. Розташовуючись у полі стискаючих залишкових напружень, непровар у меншому ступені знижує втомлювальну міцність у порівнянні з тим випадком, коли він перебуває у полі залишкових розтягуючих напружень.

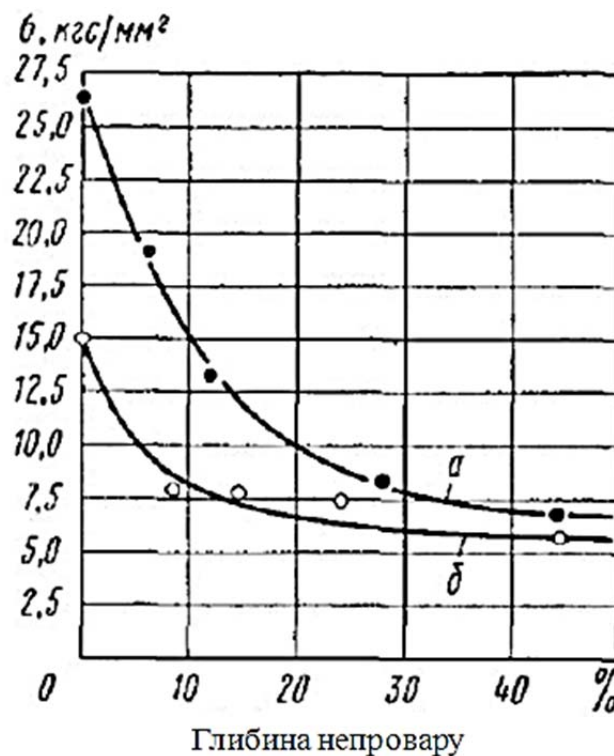


Рис. 3.26. Вплив глибини несправності на межу витривалості стикових з'єднань: *а* — несправність у швах з Х-подібним розділенням на сталі Ст3, $\delta = 18$ мм, випробування на розтяг при $r = 0,2$; *б* — несправність у кореня стикового шва зразків зі сталі Ст3, випробування на вигин при симетричному циклі

Збіг місця залягання несправності з ділянкою поля високих залишкових напружень розтягу призводить до подальшого зниження втомлювальної міцності. Межі витривалості стикового з'єднання сталей знижуються до 5 кгс/мм^2 при пульсуючих напруженнях і до $2,5 \text{ кгс/мм}^2$ — при знакозмінних. У цьому випадку вплив розмірів дефекту несуттєвий. Малий несправність стає настільки ж небезпечним, як і великий (рис. 3.27).

За інших рівних умов опір дефектних з'єднань втомлювальним руйнуванням визначається властивостями металу шва і, зокрема, вмістом у ньому залишкового водню. У цьому випадку переваги заслуговують електроди з основним покриттям або інші зварювальні матеріали, що забезпечують низький вміст водню у металі шва.



Рис. 3.27. Залежність межі витривалості стикового з'єднання від послаблення поперечного перетину шва

Вплив підрізів. Втомлювальна міцність швів з підрізами залежить від глибини підрізу, рівня залишкової напруженості і виду з'єднання. У випадку стикових з'єднань вплив концентрації напружень і залишкових напружень можуть бути порівняльним.

На рис. 3.28 наведено результати випробування зразків з підрізами різної глибини, які розташовані у зонах високої і порівняно низької залишкової напруженості. Під впливом зміни глибини підрізу з 1—1,5 мм до 2—3,5 мм межа витривалості знижується додатково на 15 %. Падіння межі витривалості такого ж порядку спостерігається і у результаті зміни залишкових напружень розтягу з 5 до 20 кгс/мм². Сумарний вплив цих факторів може призвести до зниження межі витривалості з'єднання вдвічі.

Вплив пор. Для прояву впливу пор істотне значення має вигляд з'єднання. У довгих поздовжніх швах залишкові напруження розтягу досягають, як правило, граничних значень і пора може бути єдиним концентратором напружень. Таке сполучення може виявитися більш небезпечним, ніж при знаходженні пори у коротких поперечних швах, оскільки залишкові напруження у них невеликі. У цьому випадку пори стають осередками втомлювальних руйнувань найчастіше у сполучних кутових і стикових швах, а також у поперечних стиках на ділянках високих залишкових напружень розтягу. У той же час пористість практично не впли-

ває на витривалість нахлисних з'єднань, форма яких і без того створює високу концентрацію напружень. Розміри пор відіграють меншу роль у зміні довговічності зварного з'єднання, ніж місце знаходження пори. Внутрішні пори більш небезпечні, ніж ті, що виходять на поверхню.

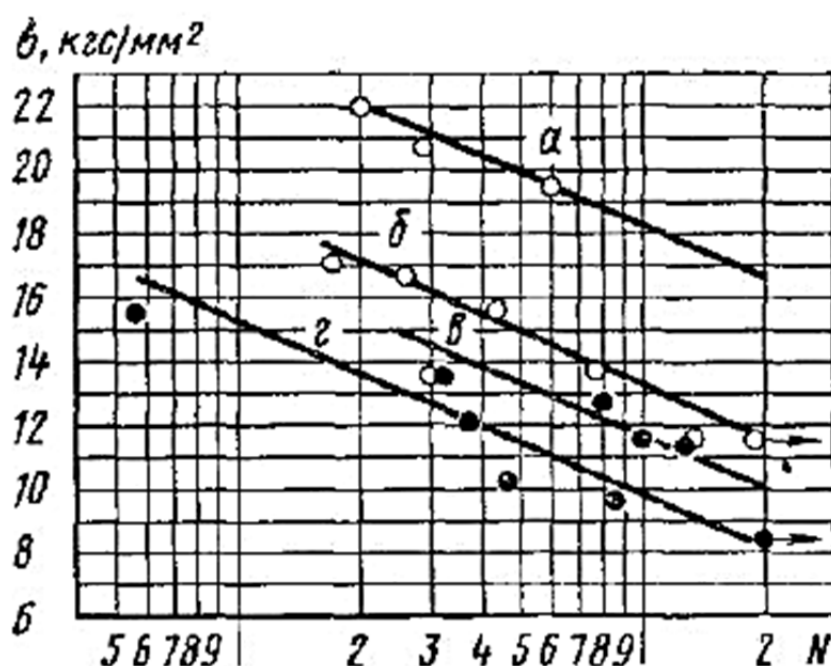


Рис. 3.28. Вплив підрізів на межу витривалості стикових з'єднань зі сталі 09Г2С, зварених дротом Св—О8ГА під флюсом АН—348А: а — шов без дефектів; б — шов з підрізом глибиною 1—1,5 мм, залишкові напруження розтягу менші 1000 кгс/см²; в — зразки з підрізами глибиною 2—3,5 мм, залишкові напруження менші 1000 кгс/см²; г — зразки з підрізами глибиною 2—3,5 мм, залишкові напруження 1500—2000 кгс/см²; ○ — зразки товщиною 20 мм; ● — зразки товщиною 30 мм

Межа витривалості швів з порами на ділянках високих залишкових напружень розтягу становить 11 кгс/мм² при пульсуючому циклі і 5 кгс/мм² — при симетричному циклі (сталі низькоуглецеві та низьколеговані).

Контрольні запитання

1. Охарактеризуйте типові дефекти у зварних з'єднаннях.
2. Що таке кристалізаційні тріщини у металі шва? Які вони бувають?
3. Від яких факторів залежить стійкість металу шва проти утворення кристалізаційних тріщин?
4. Як впливає хімічний склад металу шва на його стійкість проти утворення кристалізаційних тріщин?
5. Як впливає форми зварювальної ванни на стійкість металу шва проти утворення кристалізаційних тріщин?
6. Як утворюються гарячі тріщини у біляшовній зоні у процесі зварювання?
7. Як утворюються холодні тріщини у зварних з'єднаннях?
8. Які фактори впливають на утворення холодних тріщин у зварних з'єднаннях?
9. Охарактеризуйте методи випробування стійкості зварних з'єднань проти утворення холодних тріщин.
10. Що таке пори у зварних швах? Як вони утворюються?
11. Назвіть та охарактеризуйте види неметалевих включень у зварних швах.
12. Що таке шлакові канали і як вони утворюються?
13. Що називається флокенами?
14. Назвіть причини утворення зони несплавлення при зварюванні.
15. Охарактеризуйте вплив дефектів на статичну міцність зварних з'єднань.
16. Охарактеризуйте вплив дефектів на втомлювальну міцність зварних з'єднань.

4. МЕТОДИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ (НК) ЯКОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ

4.1. Характерні ознаки методів НК

Неруйнівні методи контролю і випробування металів включають беззразкові випробування і безпосередньо дефектоскопію.

Прийнято, що під терміном неруйнівні фізичні методи контролю розуміють види контролю, які мають дві характерні ознаки:

- вони не повинні призводити до руйнування (ушкодженню) контрольованого об'єкта;
- вони засновані на взаємодії фізичних полів або речовин з дефектами.

Відповідно до ГОСТ 18353—79 в основу класифікації методів НК покладений фізичний процес з моменту взаємодії фізичного поля або речовини з контрольованим об'єктом до одержання первинної інформації.

Як вже згадувалось раніше, неруйнівний контроль поділяється на наступні види:

- візуально-вимірювальний (ВВК);
- акустичний;
- магнітний;
- оптичний;
- капілярний;
- течієшукуванням;
- радіаційний;
- радіохвильовий;
- тепловий;
- електричний;
- електромагнітний вихрових струмів (вихрострумовий).

Жоден з методів НК не є універсальним, тому при технічному діагностуванні дуже важливий не тільки правильний вибір методу контролю, але і комбінування ряду методів, сполучення неруйнівних і руйнівних випробувань, а також проведення мікроскопічного дослідження тощо.

ВВК є найважливішим методом при первинній оцінці технічного стану потенційно небезпечного устаткування. На основі результатів ВВК призначаються обсяги і методи контролю.

Акустичні методи контролю дуже широко застосовуються у зварювальному виробництві, тому їхньому вивченню присвячена наступна глава навчального посібника.

Методи НК класифікують за трьома ознаками:

- характер взаємодії полів або речовин з контрольованим об'єктом;
- первинний інформативний параметр, під яким розуміють одну з основних характеристик фізичного поля або проникаючої речовини, що реєструється після взаємодії останніх з контрольованим об'єктом;
- первинна інформація, що являє собою сукупність характеристик фізичного поля або проникаючої речовини, яка реєструється після взаємодії поля (речовини) з об'єктом.

Найважливішими характеристиками неруйнівних методів контролю є їхня чутливість і роздільна здатність, простота і доступність технологічного процесу контролю, надійність апаратури.

Чутливість методу визначається найменшими розмірами дефектів, що виявляються. Вона залежить від фізичних особливостей методу НК, технічних характеристик застосовуваної апаратури, чистоти обробки поверхні, умов контролю і багатьох інших факторів.

Роздільна здатність методу визначається найменшою відстанню між двома сусідніми мінімальними дефектами, що виявляються, для яких можлива їхня роздільна реєстрація.

Чутливість до виявлення дефектів для кожного методу визначають по-різному, вона коливається в широкому діапазоні. Загальна характеристика чутливості деяких методів наведена в табл. 4.1.

Таблиця 4.1. Загальна характеристика чутливості методів дефектоскопічного контролю

Метод неруйнівного контролю	Мінімальні розміри дефектів, що виявляються, мм		
	Ширина розкриття	Глибина розкриття	Довжина
Поверхневі дефекти			
Візуально-оптичний	0,005—0,01	—	0,1
Кольоровий	0,001—0,002	0,01—0,03	0,1—0,3
Люмінесцентний	0,001—0,002	0,01—0,03	0,1—0,3
Магнітно-порошковий	0,001	0,01—0,05	0,3
Вихрострумний	0,005—0,01	0,15—0,2	0,6—2
Внутрішні дефекти			
Ультразвуковий імпульсний ехо-метод	0,001—0,03	0,1—0,3	—
Рентгенографічний	—	1,1—3 % від товщини	—
Гамма-графічний	—	4—6 % від товщини	—

Примітка. Нижня межа мінімальних розмірів дефектів відноситься до контролю деталей і зразків у лабораторних умовах

Чутливість поділяється на наступні види:

- *гранична чутливість* — характеризує найменші (граничні) розміри еталонної моделі дефекту, яка виявляється впевнено при заданому налаштуванні апаратури;

- *реальна чутливість* — характеризує найменші розміри реального дефекту, виявленого у контрольованому об'єкті і визначеного при порівнянні результатів НК та розмірів дефекту після розрізання досліджуваної ділянки;
- *умовна чутливість* — характеризує найменші розміри умовної моделі дефекту, що впевнено виявляється, виконаної в еталонному зразку.

Для кількісної оцінки результатів потрібне чітке уявлення про раціональні межі чутливості кожного методу. Головними критеріями при контролі повинні бути: виявлення дефектів даним методом, вартість і продуктивність контролю.

Крім того, виріб повинен мати *дефектоскопічну технологічність*, під якою розуміють сукупність властивостей об'єктів на різних етапах проектування, виготовлення і монтажу, необхідних для забезпечення можливості обґрунтованого дефектоскопічного контролю деталей і вузлів при виробництві, випробуванні, монтажі, експлуатації та ремонті.

Ці властивості повинні забезпечувати можливість контролю деталей, що перевіряються, по їхньому конструктивному виконанню і властивостям матеріалів, доступність контрольованих зон об'єкта при виготовленні, монтажі, ремонтах і експлуатації.

4.2. Візуально-вимірювальний контроль (ВВК)

Технічне діагностування об'єктів підвищеної небезпеки необхідно починати завжди з візуально-вимірювального контролю. Як вже було відзначено, тільки після візуального огляду об'єкта можна оцінити загальний стан устаткування, обрати вузли і деталі, які по зовнішньому вигляду породжують деякі сумніви з можливості їхньої подальшої експлуатації, визначити дефектоскопічну технологічність і запропонувати методи НК.

Око людини є основним приладом при контролі для виявлення різних поверхневих дефектів у зварних з'єднаннях і в ос-

новному металі, виявлення відхилень форми і розмірів, залишкових деформацій, корозійних ушкоджень тощо.

Візуальний контроль із застосуванням оптичних приладів називають *візуально-оптичним*. Його застосовують для виявлення різних поверхневих дефектів у важкодоступних місцях.

При контролі використовують оптичні прилади, що створюють повне зображення контрольованої ділянки. Однак візуально-оптичний метод контролю має невисоку чутливість, тому цей метод застосовується винятково для виявлення великих поверхневих дефектів, слідів підтікань, залишкових деформацій, ушкодження конструкцій, аналізу дефектів, які виявлені при контролі будь-яким методом НК.

У зв'язку із застосуванням оптичних приладів значно скорочується поле зору і глибина різкості, знижуються продуктивність і надійність контролю. В основному застосовують оптичні прилади зі збільшенням в 10—30 разів. Візуальний контроль застосовується як доповнення до капілярних методів контролю.

Для контролю внутрішніх поверхонь відносно порожніх деталей, наприклад, деталей енергоустаткування, корпусів різних машин і механізмів тощо, застосовують перископічні дефектоскопи типу ПД—60, ПДК—60.

Прилад ПД—60 призначений для огляду внутрішніх поверхонь труб діаметром більше 35 мм, глибиною до 900 мм зі збільшенням в 4 рази. Перископічний дефектоскоп ПДК—60 колінчастий, має два кільця, які дозволяють змінювати хід променів на кут в 90°. Його застосовують тоді, коли через складність конструкції неможливий контроль іншими приладами.

Сімейство приладів РВП (РВП—497, РВП—469, РВП—479) дозволяє контролювати труби і інші об'єкти діаметром до 870 мм і довжиною до 16,5 м зі збільшенням до 15 разів.

Останнім часом усе ширше застосовують нове покоління приладів — ендоскопів. Це прилади з гнучкими телескопічними оптичними джгутами. Джгути являють собою пачку гнучких

скляних волокон з високими показниками заломлення і коефіцієнтом світлопропускання. Розроблено досить багато моделей і модифікацій ендоскопів. Також джгути у теперішній час виготовляють не тільки зі скла, але і з нових матеріалів.

Серед розмаїтості методів НК далі розглянемо лише деякі з них, які знайшли найбільше застосування при контролі якості зварних з'єднань.

4.3. Радіаційний метод

Область застосування радіаційного методу останнім часом трохи знижується, але, однак, він незамінний при контролі великих литих деталей, товстостінних заготовок і зварних з'єднань. Одним з головних переваг методу є наявність реального документа контролю — рентгенівського знімка, де чітко показана наявність дефекту або його відсутність.

Залежно від виду прийнятого детектора розрізняють три основних методи радіаційного контролю:

- *радіографічний* — інтенсивність випромінювання, що пройшло через об'єкт (радіаційне зображення просвіченого об'єкта), реєструється на радіографічну плівку, ксеро-радіографічну плівку або фотопапір.

Радіографічний знімок об'єкта називають *радіограмою*.

Радіографічний спосіб контролю є найпоширенішим методом радіографічної дефектоскопії через його більш високу чутливість у порівнянні з іншими методами, простоти та наявності документальності контролю;

- *радіоскопічний* — радіаційне зображення просвіченого об'єкта перетворюється у світлотіньове, яке передається на екран відеоконтрольного пристрою.

У якості детектору використовується флуоресцентний монокристалічний екран або радіаційно-оптичні перетворювачі, зображення з яких через оптичну систему передаються на телеві-

зійну трубку. Продуктивність радіоскопічного методу в 3—10 разів вища радіографічного, однак чутливість приблизно в 2 рази нижча;

- *радіометричний* — проводять виміри інтенсивності іонізуючого випромінювання, що пройшло через контрольований об'єкт.

У якості детектору випромінювання найчастіше використовують сцинтиляційні лічильники і іонізаційні камери. Інтенсивність випромінювання вимірюють послідовно у різних точках за об'єктом, просвічуючи його вузьким колімірованим пучком випромінювання. Вихідний сигнал детектора після перетворення реєструється на діаграмній стрічці.

Радіометричний метод контролю у порівнянні з радіографічним більш економічний, продуктивний і не менш чутливий до дефектів. Однак область його застосування обмежена, оскільки ним можна просвічувати вироби лише однієї товщини.

У основу застосування радіаційних методів контролю покладена властивість проникаючих випромінювань (рентгенівського і гамма-випромінювань) проходити крізь непрозорі для видимого світла тіла. Сутність радіаційної дефектоскопії полягає у вимірі інтенсивності випромінювання після проходження його через виріб (рис. 4.1).

Гамма-випромінювання випускається при мимовільному розпаді нестійких ядер радіонуклідів. У результаті ядерних перетворень радіоактивні ядра стають стабільними, їх загальна кількість у джерелі убиває. Кількість таких перетворень за одиницю часу називають *активністю радіоізотопного джерела*. Активність джерела зменшується з часом за експонентним законом.

Гамма-випромінювання характерне для деяких важких елементів, ядра атомів яких мають надлишок нейтронів, що приводить атоми у нестійкий стан (уран, радій і ряд інших елементів). Перехід їх у стійкий стан супроводжується випромінюванням нейтронів, альфа- та бета-частинок, а також і гамма-випроміню-

ванням. У ядрах більш легких елементів (кобальт, цезій, іридій та ін.) нестійкий стан створюють штучно шляхом опромінення їх у ядерних реакторах.

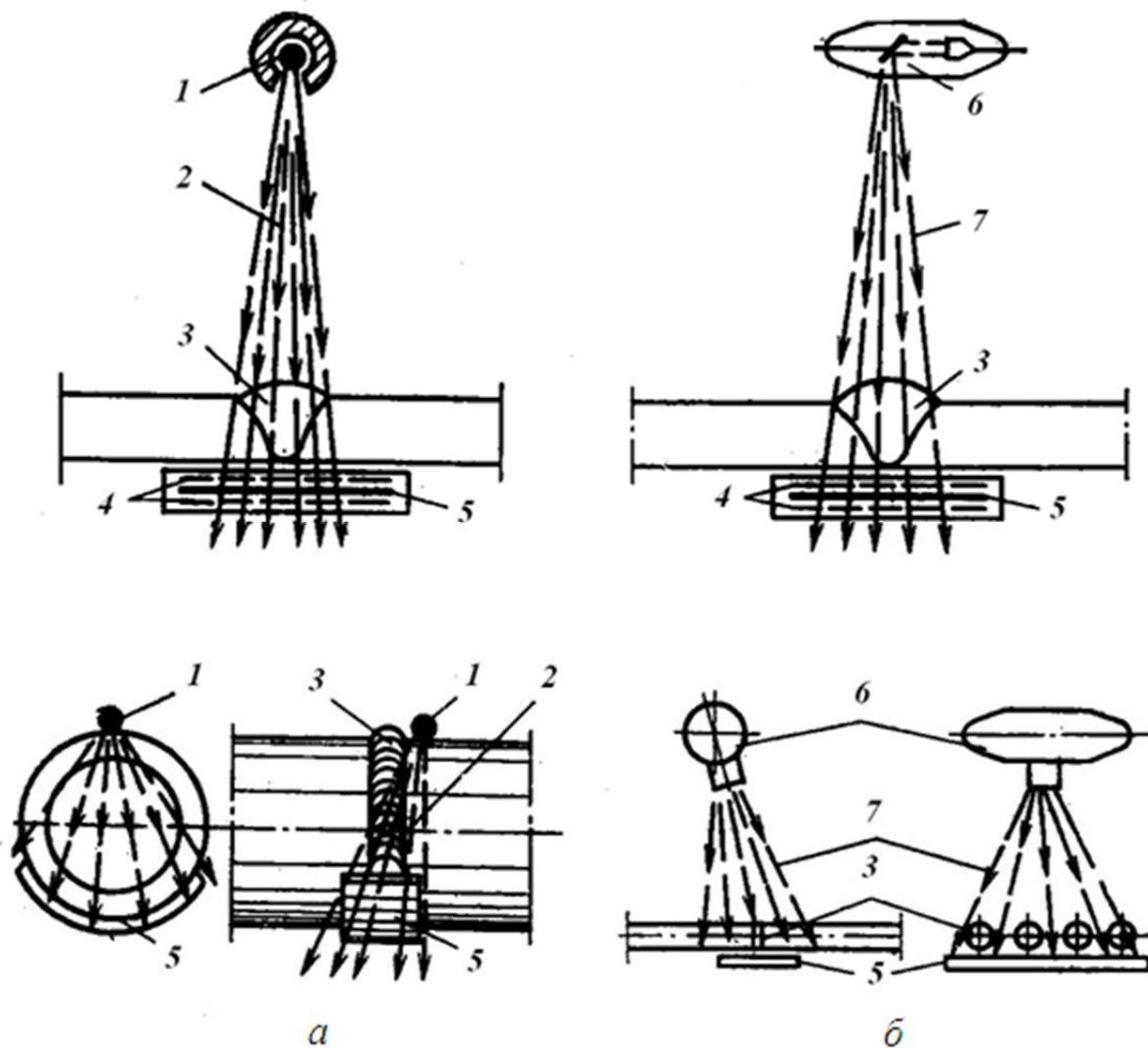


Рис. 4.1. Схема контролю металу методами радіаційної дефектоскопії: *а* — просвічування гамма-променями; *б* — просвічування рентгенівськими променями; 1 — ампула з ізотопом; 2 — гамма-промені; 3 — зварний шов; 4 — посилюючий екран; 5 — рентгенівська плівка; 6 — рентгенівська трубка; 7 — рентгенівські промені

Рентгенівське випромінювання виникає при проходженні потоку електронів крізь речовину і гальмуванні цього потоку на вольфрамовому або молібденовому аноді. Місце гальмування

електронів на аноді, що є джерелом випромінювання, називають *фокусом випромінювання*.

Діаметр активної частини джерела при просвічуванні аналогічний фокусу рентгенівської трубки. З фокуса рентгенівської трубки і з активної частини джерела рентгенівські та гамма-промені поширюються в усі сторони прямолінійно. Основними радіаційними характеристиками джерел є спектральний склад (енергія квантів, випромінюваних джерелом, та їхній процентний вміст у загальному потоці випромінювання) і активність джерела.

Проникаюча здатність променів зі збільшенням частоти електромагнітного коливання зростає, вона характеризується твердістю випромінювання.

Залежно від енергії гамма-квантів джерела випромінювання поділяються на три групи: джерела з твердим випромінюванням і енергією близько 1 МеВ, джерела з випромінюванням середньої твердості і енергією 0,3—0,7 МеВ (цезій—137, іридій—192) та джерела з м'яким випромінюванням і енергією нижче 0,3 МеВ (тулій—170).

Гамма-випромінювання. Для просвічування за допомогою проникаючих речовин служать гамма-дефектоскопи. Вони є автономними і не вимагають електроживлення від зовнішніх джерел, що забезпечує можливість їхнього застосування як у монтажних умовах, так і при ремонтах під час контролю елементів конструкцій у важкодоступних місцях. Вони мають захисні радіаційні головки з джерелом випромінювання, органи керування, систему сигналізації про положення джерела і транспортного пристрою. Органи керування здійснюють переміщення ампули з радіоактивним ізотопом у положення просвічування і повернення її в положення зберігання.

При просвічуванні за допомогою дистанційного керування відкривають затвор радіаційної головки і застосовують утворений при цьому спрямований пучок випромінювання або виводять

джерело за межі головки, що забезпечує просвічування панорамним методом.

Рентгенівське випромінювання. Джерелом його служить вакуумна камера бетатрона або трубка рентгенівського апарата. Зі збільшенням анодної напруги випромінювання стає більш жорстким. Збільшення або зменшення анодного струму призводить до збільшення або зменшення інтенсивності випромінювання відповідно. Максимальна енергія рентгенівського випромінювання чисельно дорівнює напрузі на рентгенівській трубці.

Для просвічування рентгенівськими променями застосовують апарати, які за режимом роботи поділяються на дві групи: апарати, що працюють у режимі імпульсного випромінювання, і апарати, що працюють у режимі безперервного випромінювання.

Джерела гамма- або рентгенівського випромінювання обирають залежно від товщини контролюваного матеріалу з урахуванням умов і доступу до зони контролю.

Радіографія. Спосіб контролю полягає у фіксації на рентгенівській плівці зображення контролюваної зони з темними плямами у місцях розташування дефектів. У радіографії використовують властивість рентгенівських плівок чорніти під впливом випромінювання після відповідної фотообробки. Дільниці знімків з більшим потемнінням характеризують більшу інтенсивність випромінювання за об'єктом і свідчать про порушення суцільності контролюваної зони, тобто про наявність певного дефекту.

Здатність плівки темніти після опромінення при проявленні характеризує її фоточутливість. Зернистість плівки залежить від нерівномірності розподілу в емульсії атомів срібла, що формують рентгенівське зображення.

Якщо потрібне виявлення дуже дрібних дефектів, то застосовують плівку менш чутливу, але більш дрібнозернисту, а якщо вирішальним фактором є величина експозиції, то застосовують більш чутливу плівку. Для одержання щільних знімків без збільшення часу експозиції застосовують посилюючі екрани.

Область застосування будь-якого джерела обмежена величиною мінімального дефекту, що виявляється.

В основному гамма-апарати застосовують при контролі масивних виливків, зварних швів трубопроводів, посудин, барабанів котлів для виявлення великих дефектів.

Бетатрони застосовують в основному для просвічування товстостінних виробів. Особливістю знімків є досить чітке зображення.

Радіографічний метод контролю, відповідно до ГОСТ 7512—82, передбачає застосування гамма- і гальмівного випромінювання з реєстрацією на рентгенівській плівці. Цим методом виявляють у зварних з'єднаннях внутрішні дефекти: тріщини, пори, непровари, неметалеві включення тощо, а також недоступні для зовнішнього огляду зовнішні дефекти, такі як утяжини, перевищення проплаву та ін.

Радіографічний контроль не забезпечує виявлення дефектів, якщо їхня довжина у напрямку випромінювання менша подвоєної чутливості контролю у метрах або якщо зображення дефектів збігаються на знімку з іншими зображеннями, а також: непроварів і тріщин з розкриттям менше 0,1 мм для зварних з'єднань з товщиною до 40 мм, непроварів і тріщин з розкриттям менше 0,25 % для зварних з'єднань з товщиною більше 40 мм, непроварів і тріщин, площа розкриття яких не збігається з напрямком випромінювання, та ін.

Для надійного виявлення тріщин з шириною розкриття до 0,1 мм необхідно, щоб промені збігалися з площиною порушення суцільності або становили з нею кут не більше 12° .

Характер і розмір дефектів, як правило, визначають по еталонних знімках, які отримані експериментальним шляхом при контролі деталей з аналогічними характерними дефектами.

Глибину залягання дефектів визначають по спеціальних еталонах, шляхом порівняння потемніння на знімку з потемнінням зображення відповідної канавки пластинчастого еталона.

4.4. Магнітні методи контролю

Магнітними методами контролюють деталі з феромагнітних матеріалів. При цьому виявляють поверхневі і підповерхневі дефекти типу тріщин з розкриттям до 1 мкм, подрізи, непровари у зварних з'єднаннях і металургійні дефекти типу волосовин та ін.

Магнітні методи дефектоскопії засновані на наступному принципі: магнітний потік, проходячи в однорідному металі деталі без різких змін її перетину, не змінюється на межі переходу “деталь—повітря” (рис. 4.2, *а*). При наявності у контрольованому виробі несучільності, у зоні дефекту утворюється дільниця з різкозмінною магнітною проникністю, внаслідок чого відбувається перерозподіл магнітного потоку. Частина потоку при цьому виходить на поверхню, утворюючи поле дефекту і створюючи у місці дефекту на поверхні деталі локальні магнітні смуги.

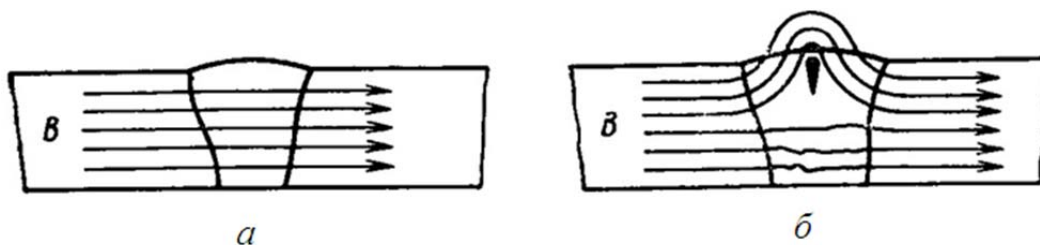


Рис. 4.2. Розподіл магнітного потоку B по перетину якісного (*а*) і дефектного (*б*) зварних швів

При порушенні суцільності, у районі дефектної дільниці частина магнітного потоку перерозподіляється, а у бездефектній зоні первісний магнітний потік залишається незмінним. До нього додається частина перерозподіленого потоку, що направляється за трьома шляхами: крізь повітряні шляхи над дефектом, безпосередньо крізь дефект і по металу під дефектом (рис. 4.2, *б*).

Чим менша диференціальна магнітна проникність матеріалу у робочій точці кривої намагніченості і більший магнітний опір додатковому потоку під дефектом, тим менша частина цього до-

даткового потоку пройде крізь метал у бездефектній частині деталі під дефектом і, отже, тим більша частина його буде проходити крізь повітряні шляхи над дефектом.

Те ж саме відбувається і з нормальною магнітною проникністю. Чим менша магнітна проникність матеріалу виробу, тим більший його магнітний опір і тим більша частина вийде на поверхню виробу над дефектом. Для отримання оптимального поля дефекту контрольований виріб повинен мати досить високу індукцію.

У магнітопорошковій дефектоскопії для виявлення дефектів застосовують тонкий феромагнітний порошок, частинки якого притягаються полем дефекту, утворюючи видимий оком валик порошку. Інтенсивність осідання порошку залежить від величини поля дефекту, що визначається магнітними характеристиками матеріалу виробу і напруженістю поля, що намагнічує.

Деталі, як правило, намагнічують за допомогою спеціальних приладів — дефектоскопів. Дефектоскопи, які застосовують при магнітопорошковій дефектоскопії (МПД), поділяються на універсальні і спеціалізовані. Як ті, так і інші можуть бути стаціонарними, пересувними або переносними.

Відповідно до ГОСТ 21105—87 залежно від магнітних властивостей матеріалів, розмірів і форми контрольованого виробу, а також устаткування, що використовується для намагнічування, застосовують два способи контролю: прикладеного магнітного поля та залишкової намагніченості.

При першому способі намагнічування починається раніше або одночасно з моментом нанесення порошку або магнітної суспензії. Контроль способом залишкової намагніченості полягає у попередньому намагнічуванні виробу і наступному нанесенні на нього порошку або суспензії. Осідання порошку відбувається у зоні дефекту при відсутності зовнішнього поля, що намагнічує.

Крім того, існують три способи намагнічування: поздовжній, циркуляційний і комбінований.

На чутливість контролю і, отже, виявлення дефектів значно впливають вищевказані способи намагнічування. Вид струму намагнічування і спосіб нанесення порошку також впливають на виявлення підповерхневих дефектів.

На результат МПД значною мірою впливає стан контрольованої поверхні. Чим грубіша поверхня, тим гірша чутливість. Залежно від виду контрольованого виробу умовний рівень чутливості поділяють на групи від *A* до *D*, відповідно ширина дефекту, що виявляється, становить від 2,5 до 100 мкм.

4.5. Капілярні методи

Одним з найпоширеніших методів контролю якості металу і зварних з'єднань є капілярна дефектоскопія (КД).

КД призначена для визначення місць розташування поверхневих дефектів з відкритою порожниною, їхнього напрямку, довжини, характеру розвитку.

Методи КД дозволяють виявляти дефекти з розкриттям до одного мікрона і з довжиною, порівняною з середнім розміром зерна металу. КД заснована на капілярному проникненні індикаторних пенетрантів у порожнини поверхневих дефектів і реєстрації індикаторного сліду від дефекту тим або іншим способом. *Пенетрант* — спеціальна світлокольороконтрастна речовина.

Методи КД поділяються на наступні:

- яскравий (ахроматичний) метод проникаючих розчинів, матеріали, що застосовуються, наступні — гас, проявник, крейда;
- кольоровий (хроматичний) метод проникаючих розчинів, матеріали — пенетрант, що утворюється після прояву (червоний слід);
- люмінесцентний метод, для виявлення дефектів застосовують спеціальні ультрафіолетові установки і лампи;

- люмінесцентно-кольоровий метод, прилади і матеріали — спільне застосування матеріалів і устаткування для кольорової і люмінесцентної дефектоскопії;
- капілярно-електростатичний метод, використовують електростатичну установку і пенетрант (іоногенна рідина);
- капілярно-електроіндукційний метод, застосовують електроіндукційну установку і електропровідні рідини або органічні розчинники;
- капілярно-магнітопорошковий метод, використовують прилад МПД і пенетрант (феромагнітний порошок);
- капілярно-радіаційний метод поглинання, застосовують джерело радіаційного випромінювання і пенетрант (оптично щільні рідини);
- капілярно-радіаційний метод контролю, прилади і матеріали — джерело радіаційного випромінювання і радіоактивний пенетрант.

Капілярна дефектоскопія заснована на проникненні індикаторних пенетрантів у порожнини дефектів, сорбції і дифузії, яскравому і кольоровому контрастах дефектоскопічних матеріалів.

Розміри дефектів, що виявляються методами КД, настільки малі, що виявлення їх неозброєним оком практично неможливо. Дефект помітний тільки при наявності контрасту між дефектом і фоном. Тому для виявлення дефектів необхідно штучно підвищити контрастність дефектної і неушкодженої ділянок контрольованої поверхні.

Заповнення порожнин дефектів спеціальними світлокольороконтрастними індикаторними речовинами — пенетрантами — основне завдання КД. Мікроскопічний перетин і довжина дефектів уподібнює їх до капілярних посудин, які здатні всмоктувати рідини, що змочують останні, під дією капілярних сил.

Явища, обумовлені втягуванням рідин, що змочують, у капіляри або виштовхуванням рідин, що не змочуються, з капілярів, називаються *капілярними явищами*.

На межі зіткнення твердих тіл з рідиною спостерігаються явища змочування, що проявляються у викривленні вільної поверхні рідини біля стінки дефекту (посудини).

Викривлена поверхня рідини на межі з твердим тілом називається *меніском*, а лінія, по якій він перетинається з твердим тілом, називається *периметром змочування*. При дефектоскопії краще змочування забезпечують рідини з малим поверхневим натягом, що і враховується при виборі рідин для КД.

На змочування істотний вплив оказує шорсткість контрольованої поверхні: чим вища шорсткість, тем краще змочування. Біля стінок дефектів шорсткість вища, ніж на бездефектній поверхні виробу, отже, при КД у чистих порожнинах дефектів у рідині буде більш високе змочування по відношенню до виробу. Під дією поверхневого натягу поверхня рідини скорочується.

При проникненні рідини у дефект викривлення її поверхні створює додатковий тиск на рідину у порівнянні з тиском під плоскою поверхнею. Явище капілярності використовується у методах КД для того, щоб впровадити у дрібні поверхневі дефекти різні індикаторні пенетранти.

Сорбційні явища. Для відшукування дефекту необхідно велику кількість індикаторного пенетранта, який перебуває у його мікропорожнинах, витягти на поверхню, що піддається контролю.

Витягування і локалізація пенетранта досягається внаслідок сорбційних властивостей проявників пенетранта.

При використанні у якості проявника сухих порошків або суспензій на поверхні кожної частки проявника адсорбуються молекули індикаторного пенетранта. При фізичній адсорбції молекули індикаторного пенетранта зберігають свою первісну будова, а при хімічній — вони утворюють на поверхні часток хімічну сполуку з речовиною проявника пенетранта. Схематичне зображення процесу КД представлено на рис. 4.3.

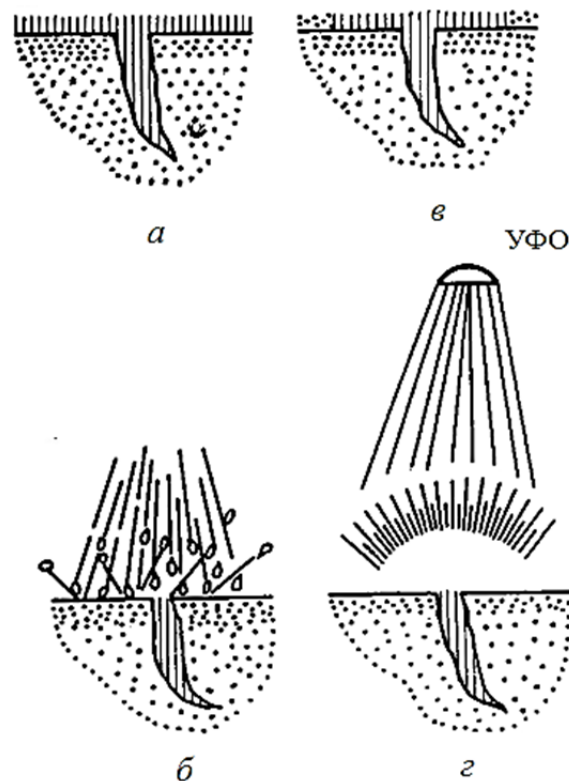


Рис. 4.3. Схематичне зображення процесу капілярної дефектоскопії: *а* — нанесення і проникнення пенетранта в несутцільності; *б* — видалення надлишків пенетранта; *в* — нанесення рідини, що проявляє, і проявлення несутцільностей при кольоровій дефектоскопії; *г* — проявлення несутцільностей ультрафіолетовим опроміненням (УФО) при люмінесцентній дефектоскопії

Чутливість методів КД умовно визначається найменшими значеннями ширини розкриття, глибини і довжини дефекту, що надійно виявляється по його індикаторному сліду, і залежить від властивостей застосовуваних дефектоскопічних матеріалів, якості і стану поверхні.

Відповідно до ГОСТ 18442—80, залежно від мінімальних розмірів дефектів, що виявляються, методу контролю, використовуваних дефектоскопічних матеріалів і технології контролю встановлюються наступні умовні класи чутливості: I—IV і технологічний.

Для кожного класу встановлені мінімальні розміри дефектів, що виявляються, у мкм: I — менше 1; II — від 1 до 10; III — від 10 до 100; IV — від 100 до 500; технологічний — не нормується. Визначальним параметром при виборі класу чутливості методу є ширина розкриття дефекту. Глибина зародкових тріщин деформаційного походження, як правило, оцінюється в 10^{-3} мм.

Розмір пор дифузійного походження такого ж порядку. При злитті мікродефектів формується макродефект, що і виявляється методом КД. Наведені вище мінімальні розміри дефектів і визначають межу необхідної чутливості методів КД.

4.6. Вихрострумові методи

Вихрострумові методи засновані на аналізі взаємодії зовнішнього електромагнітного поля з електромагнітним полем вихрових струмів, що наводяться збудливою котушкою в електропровідному об'єкті контролю.

Відповідно до закону індукції, будь-яке відносне переміщення магнітного поля і дрової котушки наводить у останньої імпульс електрорушійної сили.

Якщо дві котушки помістити поруч і по одній з них пропустити електричний струм, а до іншої підключити швидкодіючий вольтметр, то він покаже наявність електрорушійної сили (ЕРС) як при зміні сили струму у збудливій котушці, так і при зміні положення котушок, форми та розмірів кожної з них. На величину ЕРС впливають взаємозв'язок між котушками, сила струму і кількість витків.

Вихрові струми у металі поширюються у поверхневих шарах у напрямку від джерел поля. Внаслідок екрануючої дії вихрових струмів і втрат на тепло електромагнітне поле у металі швидко згасає.

Глибина проникнення поля залежить від частоти електромагнітних коливань, електропровідності, магнітної проникності,

коерцитивної сили, форми поля, створюваного джерелом, і розмірів контрольованого об'єкта. Низькочастотні електромагнітні поля проникають у метал глибше, ніж високочастотні.

Поле вихрових струмів взаємодіє з полем збудливої котушки, утворюючи результуюче поле, що несе у собі інформацію про електромагнітні характеристики, відстань до поверхні, порушення однорідності, зміні форми і розмірів контрольованого виробу.

На величину вихрових струмів значно впливають геометричні параметри об'єкта: форма, розміри, взаємне розташування вимірювального вихрострумowego перетворювача (ВСП) і виробу, товщина деталі, покриття, шару після хіміко-термічної обробки та інші фактори.

Зміну величини вихрових струмів і, отже, наявність дефектів визначають за змінами струму у збудливій котушці, складових комплексного опору цієї котушки або ЕРС перетворювача.

У якості ВСП використовують, як правило, індуктивні котушки, одну або декілька. У котушках ВСП створюється електромагнітне поле, що збуджує вихрові струми в об'єкті, і далі, реєструючи напругу на затискачах котушки або їх опір, отримують інформацію про властивості об'єкта. Ця інформація — багатопараметрова, що і визначає переваги та недоліки при реалізації вихрострумowego методу (ВСМ). Часто при контролі одного з параметрів вплив інших на сигнал перетворювача заважає.

Великою перевагою ВСМ, особливо при проведенні технічного діагностування об'єктів підвищеної небезпеки, є те, що контроль можна проводити без контакту перетворювача і об'єкта. Їхня взаємодія відбувається, як правило, на відстані, яка є достатньою для вільного руху перетворювача відносно об'єкта, від мкм до декількох мм. ВСМ можна застосовувати без зачищення поверхневого шару, що дуже важливо при роботі в польових умовах.

Однієї з особливостей ВСМ є те, що на сигнали перетворювача практично не впливають вологість, тиск і забруднення сере-

довища, радіоактивне випромінювання, наявність на поверхні об'єкта контролю непровідних речовин.

Простота конструкції перетворювача і достатній захист дозволяють застосовувати ВСМ при контролі металу як в агресивних середовищах, так і у широкому інтервалі температур та тисків, оскільки перетворювачі стійкі проти механічних впливів.

При дефектоскопії ВСМ виявляють дефекти типу несучільностей, що виходять на поверхню або залягають на невеликій глибині, а також тріщини, розшарування, закати, великі неметалеві включення тощо. При оптимальних умовах контролю можна виявити дефекти глибиною 0,1—0,2 мм та довжиною 1—2 мм.

За допомогою ВСМ вирішуються завдання контролю розмірів деталей. Ними вимірюють діаметри труб, дроту, прутків, товщини металевих листів і стінок труб, товщину покриттів на електропровідних основах, глибину зони хіміко-термічної обробки. Вимірювані величини можуть змінюватися у межах від мкм до десятків мм.

Характер мікроструктури металів і сплавів у значній мірі впливає на їхні електромагнітні характеристики. Саме ця залежність дозволяє контролювати не тільки однорідність хімічного складу, але і структуру металів та сплавів, а також визначати механічні напруження. Крім того, за допомогою вихрових струмів виконують контроль якості термічної і хіміко-термічної обробки, стану поверхні деталей після механічної обробки, наявності залишкових напружень, різних фаз тощо.

4.7. Безразкові методи випробувань

Для оцінки реального стану металу об'єктів підвищеної небезпеки необхідно мати інформацію не тільки про присутність або відсутність дефектів, що виявляються методами неруйнівного контролю, але і знати його фізико-механічні характеристики, склад, характер мікроструктури, спосіб виготовлення, умови

експлуатації тощо. Основні найважливіші характеристики металу, як правило, визначають за допомогою руйнівних методів дослідження, однак дуже часто при проведенні технічного діагностування необхідно мати інформацію про динаміку зміни механічних характеристик у процесі тривалої експлуатації об'єкта. Вирізати метал для дослідження безпосередньо з об'єкта найчастіше не є можливим, тому ряд вчених звернули увагу на створення беззразкових методів і засобів оперативної оцінки механічних властивостей матеріалів.

Серед існуючих методів контролю механічних властивостей матеріалів методи, засновані на вимірі твердості, є порівняно простими, доступними, але разом з тим і перспективними, та містять у собі ще багато нерозкритих можливостей.

Головна їх перевага полягає у можливості прискореної оцінки деяких механічних характеристик металу різних виробів, деталей, конструкцій, не виводячи їх з робочого стану і не вирізаючи зразків для випробувань.

У деяких випадках беззразкові методи є поки єдиними для кількісної оцінки механічних властивостей малих обсягів або локальних зон досліджуваного металу.

Великий внесок у розвиток беззразкових методів оцінки механічних властивостей, у теоретичні і експериментальні обґрунтування взаємозв'язку характеристик твердості з показниками міцності і пластичності матеріалів, що перебувають у різному структурному та напружено-деформованому стані, внесли вчені і фахівці кафедри технології металів Національного дослідницького університету "МЕІ" під керівництвом професора М. П. Марковця. В. М. Матюніним розроблені наукові основи і вирішена актуальна науково-технічна проблема беззразкової оперативної оцінки міцнісного стану металу у елементах конструкцій на стадії їхнього виготовлення та експлуатації з метою виявлення найнебезпечніших зон, визначення залишкового ресурсу і запобігання аварійних ситуацій.

У роботі встановлений взаємозв'язок напружень і деформацій при розтягу зразка з напруженнями і деформаціями при вдавлюванні сферичного індентора в пластичній області деформування зміцнюючих матеріалів. Виявлено розподіл інтенсивності напружень і інтенсивності деформацій у зоні контакту індентора. Розроблено методику оцінки пластичної деформації при розтягу за результатами вдавлювання індентора з урахуванням зміцнення матеріалу. Також розроблено методи інденторних випробувань з реєстрацією діаграм вдавлювання та дряпання. Встановлено особливості та визначені характерні параметри діаграм вдавлювання та дряпання.

Для практичного використання розроблені методи (включаючи автоматизовані) беззразкової експрес-оцінки комплексу механічних властивостей конструкційних матеріалів за параметрами твердості і діаграмами інденторних випробувань: межі текучості, тимчасового опору, дійсного опору розриву, граничної рівномірної деформації, відносних подовження і звуження, ступеня наклепу.

Великий науковий і практичний інтерес мають отримані залежності критичного коефіцієнта інтенсивності напружень і ударної в'язкості від відношень опору відриву та дійсного опору розриву до межі текучості з урахуванням величини зерна металу.

При технічному діагностуванні для вуглецевих сталей застосовують прості кореляційні залежності між твердістю і механічними характеристиками типу:

$$\sigma_B = 0,36HB, \quad (4.1)$$

$$\sigma_{0,2} = \frac{0,41HB - 167}{1,37}. \quad (4.2)$$

Подібні залежності встановлені і для легованих сталей та застосовуються для кріпильних деталей, паропроводів і їх зварних з'єднань, лиття тощо.

Твердість, як правило, вимірюють малогабаритними переносними приладами. Непогані результати дають прилади, розроб-

лені за останні роки серій УЗИТ і ТЕМП. Вони дешеві і прості в експлуатації. Похибки визначення механічних характеристик беззразковими методами не перевищують 20—25 МПа.

Для визначення марки сталі застосовують методи спектрального аналізу.

В основі спектрального аналізу лежить дослідження випромінювання парів металу. Переведення випробовуваного металу у пароподібний стан досягається дією дугового або іскрового розряду між металом і електродом, виготовленим з вугілля, чистого заліза або міді. Для випаровування металу і збудження спектру застосовуються іскрові та дугові генератори, які входять у комплект стилоскопічних установок.

Збуджені атоми, що утворюють розрядну хмару, видають випромінювання, довжина хвилі якого визначається природою елемента. Це випромінювання розкладається з утворенням лінійчатого спектра за допомогою оптичної системи спектрального апарата, який являє собою систему лінз і призм.

Наявність у спектрі характерних ліній певних хімічних елементів вказує на присутність даних елементів в аналізованому металі. Визначення елементів зводиться до відшукування і оцінки інтенсивності спектральних ліній, що відповідають даному елементу. Фотографування спектрів виконують на спектрографі. Інтенсивність ліній визначають фотометрируванням порівняно з еталоном.

При визначенні наявності хімічних елементів безпосередньо на об'єкті застосовують переносні прилади — стилоскопи. При їхньому використанні спектр розглядають безпосередньо в окуляр і інтенсивність ліній визначають візуально, порівнюючи їх з деякими лініями постійної інтенсивності, наприклад, заліза, та з еталонними шкалами. Даний метод застосовують для якісного або напівкількісного аналізу легованих сталей.

Стилоскопіювання широко використовується при монтажі і ремонті технічних пристроїв небезпечних виробничих об'єктів,

при їх технічному діагностуванні, завдяки можливості проведення аналізу навіть у важкодоступних місцях.

Серед великої розмаїтості розроблених і перспективних методів НК були розглянуті лише ті, які знайшли широке застосування при контролі якості зварних з'єднань і технічному діагностуванні об'єктів підвищеної небезпеки.

4.8. Економічні аспекти неруйнівного контролю

Необхідність проведення неруйнівного контролю зварних з'єднань регламентована нормативними документами і виправдана економічним ефектом, який створюється у результаті підвищення якості та надійності роботи технічних пристроїв, що експлуатуються у складних напружених умовах, найчастіше при високих (низьких) температурах і тисках та нерідко у присутності агресивних середовищ.

Ці положення якісно ілюструються залежностями, наведеними на рис. 4.4.

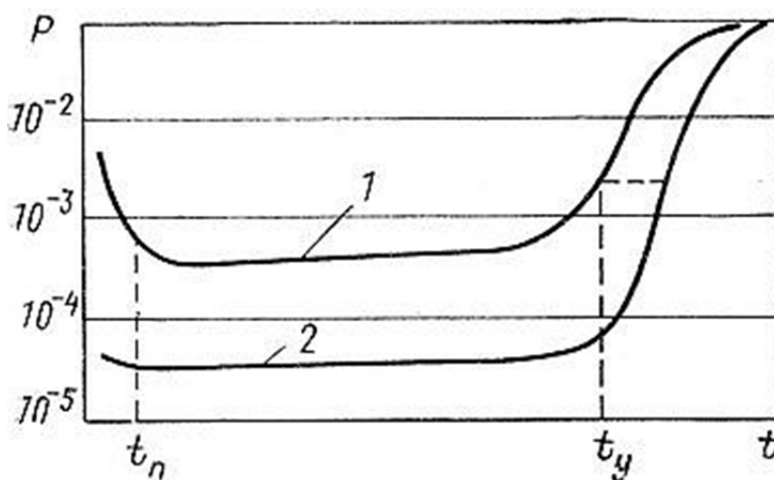


Рис. 4.4. Імовірність відмови P об'єктів у процесі експлуатації: 1 — без застосування НК; 2 — із застосуванням НК; t_y — встановлений термін служби; t_n — час обкатування

Залежності відбивають зміни ймовірності виходу з ладу працюючого устаткування на різних стадіях життєвого циклу. Підвищена кількість відмов для кривої 1 у початковий період можна пояснити обкатуванням устаткування, коли руйнуються (ушкоджуються) елементи із заводськими дефектами. Після періоду відбраковування починається нормальна експлуатація устаткування (тут відмови рідкі) аж до вироблення ресурсу. У цей період ймовірність відмов підвищується через ряд експлуатаційних факторів (втома, повзучість, корозійно-термічна втома тощо), обумовлених старінням матеріалу і деградацією його властивостей.

Крива 2 відбиває, по суті, економічні аспекти застосування НК. При цьому знижується ймовірність відмов у початковий період експлуатації. Застосування НК у робочий період дозволяє виявити дефекти (експлуатаційні), знизити ймовірність відмов і продовжити термін служби устаткування.

Аналізу ефективності застосування НК у технічному і економічному аспектах присвячені дослідження багатьох вчених. Досить плідним є системний підхід, що забезпечує всебічний аналіз усіх факторів, які впливають на якість металоконструкцій при мінімальних витратах. В остаточному підсумку застосування НК можна оцінити у вартісному еквіваленті, різні форми якого використовують різні дослідники. А. К. Гурвич застосування НК оцінює параметром ефективності:

$$Q_i = \frac{\Delta G_i}{\Omega_{\Sigma}}, \quad (4.3)$$

де ΔG_i — технічна ефективність; Ω_{Σ} — сумарні витрати.

А. З. Райхман характеризує НК функцією втрат:

$$W = r_F F \rho + r_{\beta} \beta (1 - \rho) + C, \quad (4.4)$$

де r_F , r_{β} — платня за пропуск дефектів і їхнє перебракування відповідно; $F\rho$, β — імовірність пропуску і перебракування; ρ — рівень дефектності; C — вартість НК.

В. Н. Волченко при аналізі норм допустимих дефектів зв'язує їх з необхідністю оптимізувати витрати. Тобто норми повинні бути такими, щоб сума витрат на НК і запобігання появи дефектів у процесі виробництва та витрат на експлуатацію і проведення контролю й ліквідацію наслідків аварій була мінімальною. Це положення показане на рис. 4.5.

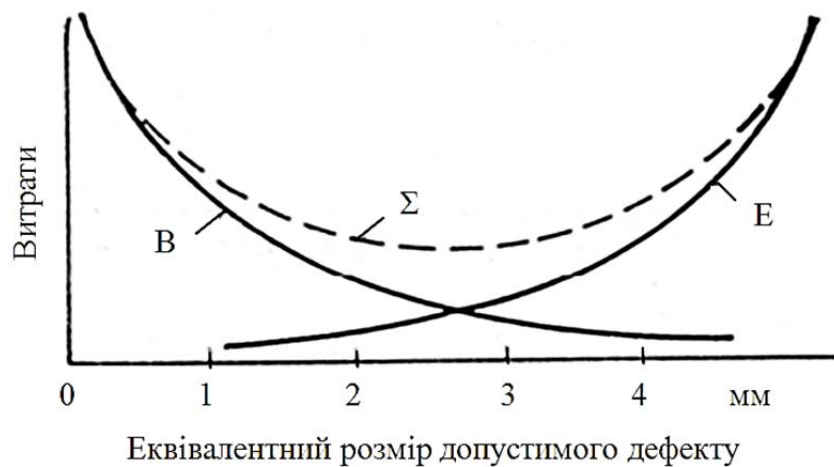


Рис. 4.5. Залежність витрат від розміру допустимих дефектів: В — витрати у виробництві; Е — витрати під час експлуатації; Σ — сумарні витрати

Аналогічний підхід розглянутий у роботах американських фахівців. Дійсно, зменшення розміру допустимого дефекту потребує збільшення чутливості НК, що збільшить кількість забракованої продукції, обсяг ремонтних робіт і різко підвищить вартість виробництва. При збільшенні розмірів дефектів, що залишаються у виробках і пропускаються у експлуатацію, підвищується імовірність виходу виробу з ладу із значними економічними втратами.

Конкретні значення параметрів контролю, норм допустимих дефектів, обсягів витрат при використанні НК або його відсутності у виробництві і експлуатації залежать від багатьох факторів, які в кожному випадку визначають положення мінімуму на кривій (рис. 4.5).

У ряді випадків, коли є можливість відшкодовувати втрати від бракованих маловідповідальних виробів шляхом їхньої заміни, функція витрат або втрат монотонно зменшується зі збільшенням допустимого розміру дефекту і не має мінімуму, що свідчить про можливість зниження вимог до норм оцінки якості цих виробів.

Контрольні запитання

1. Назвіть характерні ознаки НК.
2. Назвіть основні методи НК для оцінки якості зварних з'єднань.
3. За якими ознаках класифікуються методи НК?
4. Що таке чутливість методу НК?
5. У яких випадках застосовують ВВК?
6. Які основні переваги радіаційних методів контролю?
7. Охарактеризуйте види радіаційного контролю залежно від виду прийнятого детектора.
8. Що являє собою рентгенівське випромінювання, гамма-випромінювання?
9. Що таке радіографія?
10. У чому полягає сутність магнітних методів контролю?
11. Що являють собою сорбційні явища?
12. На які методи поділяється капілярна дефектоскопія?
13. Що таке вихрострумова дефектоскопія?
14. Які характеристики основного металу і зварних з'єднань визначаються беззразковими методами контролю?
15. У чому полягає ефективність застосування методів НК?

5. АКУСТИЧНІ МЕТОДИ КОНТРОЛЮ

5.1. Теоретичні основи акустичних і ультразвукових методів контролю

Будь-яке матеріальне середовище, у якому б стані воно не перебувало, завдяки взаємодії між частками має пружні властивості.

Коливання однієї з часток будуть передаватися іншим, тобто в середовищі буде поширюватися хвильовий рух, який називається *акустичними коливаннями*.

Частки середовища здійснюють коливання біля точки рівноваги, а хвиля поширюється з деякою постійною швидкістю.

У теорії і практиці акустичних коливань важливе місце займають гармонійні хвилі, у яких усі зміни стану відбуваються за синусоїдальним законом.

Реальні хвилі не є гармонійними коливаннями, однак їх представляють у вигляді сукупності гармонійних хвиль, які називаються *групою хвиль* або *хвильовим пакетом*. У необмеженому однорідному ізотропному середовищі поширення пружних хвиль має просторовий характер. Залежно від форми фронту хвилі можуть бути плоскими, сферичними і циліндричними.

Пружні коливання і акустичні хвилі, особливо ультразвукового діапазону, знайшли широке застосування у техніці. Потужні ультразвукові коливання застосовують для зварювання, локального руйнування крихких матеріалів, диспергування, коагуляції та ін.

Інша область застосування акустичних коливань і хвиль — контроль і виміри. Сюди відносять локацію, медичну діагностику, контроль рівня рідини, швидкості потоку тощо, а також використання акустичних коливань для неруйнівного контролю. Для контролю застосовують коливання частотою від 50 Гц до 50 МГц.

Залежно від пружних властивостей середовища в ньому можуть виникати пружні хвилі різних видів, які відрізняються швидкістю поширення, напрямком коливання часток і інших ознак. Їх і називають *модами*.

Розрізняють поздовжні хвилі (розширення—стиснення), зсувні, поверхневі, нормальні та інші. У рідинах і газах існує тільки один тип хвиль — хвилі розширення—стиснення. У твердих тілах, окрім поздовжніх хвиль, існують поперечні хвилі (зсуву), оскільки тверде тіло характеризується не тільки пружністю обсягу, але і форми. Швидкість поздовжньої хвилі приблизно у два рази більша швидкості поперечної. Їх комбінації створюють інші типи хвиль.

На вільній поверхні твердого тіла можуть поширюватися поверхневі хвилі або хвилі Релея. За характером траєкторій часток поверхнева хвиля як би складається з коливань поздовжніх і зсувних хвиль. Амплітуда коливань часток у міру віддалення від вільної поверхні убуває по експоненті, тому хвиля локалізована у тонкому поверхневому шарі товщиною в одну—півтори довжини хвилі.

У тонких плоских тілах (листах, пластинах, дроті) збуджуються нормальні хвилі або хвилі Лемба. У металах збуджуються усі типи хвиль.

Для ультразвукових коливань характерні ті ж явища заломлення, відбиття, дифракції, інтерференції, реверберації, що і для будь-яких хвильових явищ.

Метод ультразвукового контролю заснований на дослідженні процесу поширення пружних коливань з частотою 0,5—10 МГц у контрольованому виробі.

За допомогою ультразвукового контролю можна виявити внутрішні мікроскопічні дефекти лиття, зварювання, кування, структурні перетворення у металах, визначити глибину їхнього залягання, виміряти їхні геометричні розміри.

Для ультразвукової дефектоскопії велике значення має питомий акустичний опір середовища, що виражається добутком щільності середовища на швидкість поширення у ній пружних хвиль даного типу.

Питомий акустичний опір газів, рідин і металів відносять як 1:3000:100000. Такі відношення дозволяють використовувати їх для ультразвукової дефектоскопії. Чим більше відрізняється акустичний опір дефектів від загальної маси металу, тим простіше їх виявити, оскільки у цьому випадку більша частина ультразвукової енергії буде відбиватися від дефектів.

Ультразвукова дефектоскопія (УЗК) заснована на властивості ультразвукових коливань поширюватися в однорідному плоскому тілі і на його плоских або криволінійних поверхнях у вигляді променів та відбиватися від меж тіла або порушень суцільності, які мають інші акустичні властивості.

При неруйнівному контролі акустичні хвилі збуджуються і приймаються шляхом перетворення електричних коливань у пружні і навпаки. З цією метою використовують спеціальні пристрої — електроакустичні перетворювачі (ЕАП) або просто перетворювачі.

Якщо перетворювач використовують для випромінювання хвиль, то його називають *випромінювачем*, якщо для прийому — *приймачем*.

Якщо той самий перетворювач виконує обидві функції, то його називають *поєднаним*.

Якщо випромінювач і приймач розділені, то схему контролю називають *роздільною*.

Якщо роздільні випромінювач і приймач об'єднані в одному блоці, то перетворювач називають *роздільно-поєднаним*.

Ультразвукові коливання отримують за рахунок п'єзоефекту, що був відкритий братами Кюрі у 1880 р.

Він полягає у наступному: при стисненні або розтягуванні спеціальної пластинки на її гранях з'являється електричний заряд.

П'єзоефект зворотний, оскільки під впливом електричного поля пластинки деформуються.

П'єзопластини, як правило, виготовляють з монокристалу кварцу або з кристалічних сполук, таких як титанат барію, цирконат—титанат свинцю (ГОСТ 13927—74) та ін.

Амплітуда коливань пластини залежить від напруги на електродах і співвідношення частоти змінної напруги і власної частоти коливань пластини.

Максимальна амплітуда коливань п'єзоелементу спостерігається при резонансі, коли власна частота коливань пластини збігається з частотою вимушених коливань від прикладеної зовнішньої напруги.

Власна частота пластини залежить від її товщини і швидкості пружних хвиль:

$$f = \frac{c}{2b}, \quad (5.1)$$

де f — власна частота пластини; c — швидкість пружних хвиль; b — товщина пластини.

При прикладанні п'єзопластини до поверхні контрольованої деталі у її матеріалі збуджуються пружні хвилі.

Якщо подавати на п'єзоелемент змінну напруга з частотою, відмінною від власної, то можна отримати змушені коливання п'єзоелементу з будь-якою частотою. Однак випромінювана енергія буде менша, ніж на резонансній частоті.

Поширення ультразвукових коливань відбувається за законами геометричної оптики і ґрунтується на уявленні про ультразвук як про сукупність ультразвукових променів — ліній, уздовж яких поширюється звукова енергія. Якщо матеріал однорідний і ізотропний, то п'єзоелемент створює хвильове поле, яке поблизу має циліндричну форму (ближня зона або зона дифракції Френеля), а на деякій відстані — форму усіченого конуса (далека зона або зона дифракції Фраунгофера).

Довжина ближньої зони (зони Френеля) прямо пропорційна квадрату діаметра випромінювача і обернено пропорційна довжині хвилі. Чим більший діаметр випромінювача і частота пружних хвиль, тим вища спрямованість пучка променів. При діаметрі випромінювача, більшому ніж довжина хвилі, енергія концентрується переважно уздовж нормалі до випромінюючої поверхні.

У міру віддалення від випромінювача амплітуда коливань падає, і інтенсивність хвиль убуває. Це викликане геометричною розбіжністю променів і наявністю втрат у середовищі, що призводить до поступового згасання коливань при їхньому поширенні. Згасання відбувається за експонентним законом. Коефіцієнти згасання різні для різних матеріалів і складаються з коефіцієнтів поглинання ($\delta_{\text{погл}}$) та розсіювання ($\delta_{\text{роз}}$):

$$\delta = \delta_{\text{погл}} + \delta_{\text{роз}}. \quad (5.2)$$

При поширенні ультразвукових хвиль у пружному середовищі можлива *реверберація* — поступове згасання коливань внаслідок повторних багаторазових відбиттів. Реверберація буває об'ємною (через відбиття коливань від граней контрольованого об'єкта) і структурною (через багаторазові відбиття межами зерен). При поширенні пружних хвиль у твердому тілі спостерігаються процеси дифракції і інтерференції.

Дифракція — явище огинання хвилями малих перешкод, розміри яких порівнянні з довжиною звукової хвилі або менші її. Відбиття хвилі відбувається у тому випадку, якщо розміри перешкод більші довжини хвилі. За характером відбиття ультразвукових хвиль від несуцільностей визначають розмір і розташування дефектів.

Інтерференція — результат складання двох або декількох когерентних коливань, що діють на ту саму точку середовища. Інтерференція може призвести до утворення стоячих хвиль, які характеризуються тим, що уздовж осі поля спостерігається чер-

гування нерухливих точок і точок, які коливаються з максимальною амплітудою.

Інтерференція і дифракція взаємно пов'язані і існують одночасно, що ускладнює вимірювання у режимі безперервного випромінювання. Тому більш кращим є імпульсний метод, при якому короткі імпульси протікають один за одним через проміжки часу, достатні для того, щоб падаюча і відбита хвиля не зустрілися.

Відбиття і заломлення ультразвукових хвиль. Закони відбиття і заломлення ультразвукових хвиль аналогічні законам геометричної оптики. Зустрічаючи на своєму шляху середовище з іншими акустичними властивостями, частина енергії ультразвукових хвиль відбивається, а частина, що залишилася, входить у нове середовище. При цьому проникаюча і відбита хвиля будуть того ж виду, що і падаюча.

При перпендикулярному падінні ультразвукового променя на межу розділення відбитий промінь буде також перпендикулярний до цієї межі (рис. 5.1). При нерівній поверхні розділення з виступами і западинами більше 0,1 мм спостерігається дифузійне відбиття.

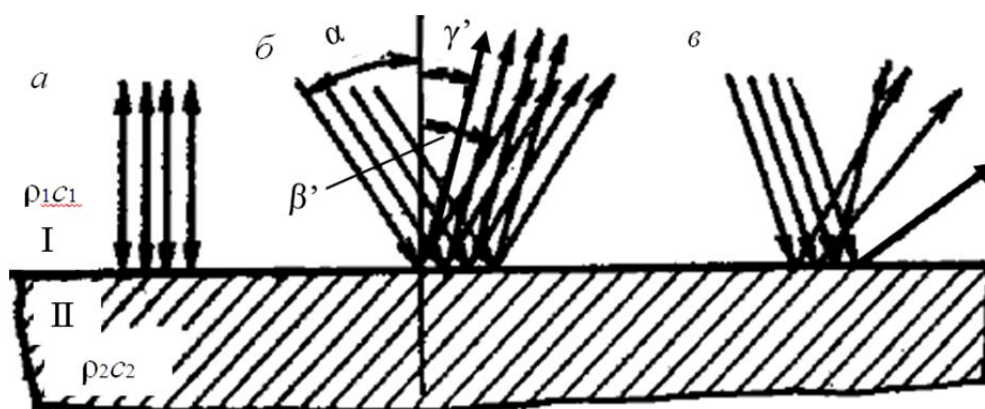


Рис. 5.1. Відбиття ультразвукових хвиль на плоскій межі двох середовищ при перпендикулярному (а) і похилому (б, в) падінні променя (б — дзеркальне відбиття, в — дифузійне відбиття)

При падінні ультразвукового променя на межу розділення середовищ під кутом, відмінним від прямого, поряд з відбиттям спостерігається заломлення, причому відношення синусів кутів падіння, відбиття і заломлення дорівнює відношенню швидкостей поширення коливань відповідного виду у першому та другому середовищах.

Якщо $\rho_1 c_1 < \rho_2 c_2$, то при переході поздовжніх пружних хвиль з одного твердого середовища у інше, окрім двох відбитих променів, будуть спостерігатися і два заломлених (рис. 5.2).

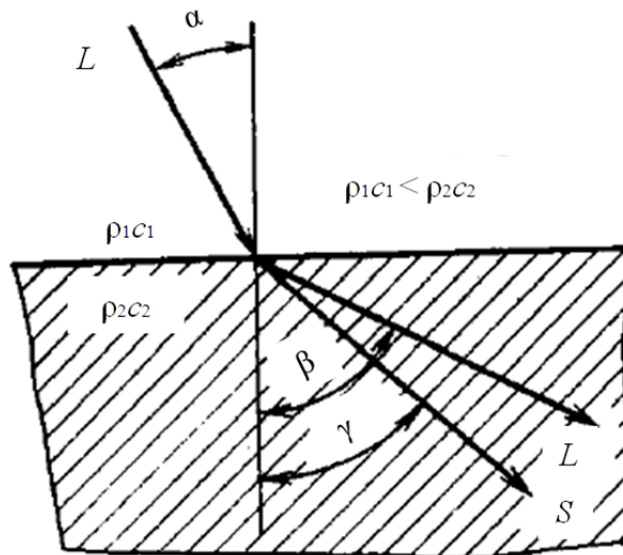


Рис. 5.2. Заломлення ультразвукових хвиль на плоскій межі двох твердих середовищ

Кути падіння, відбиття і заломлення пов'язані наступним співвідношенням або законом Снелліуса:

$$\frac{\sin \alpha}{c_{L1}} = \frac{\sin \gamma}{c_{S1}} = \frac{\sin \beta}{c_{L2}} = \frac{\sin \gamma}{c_{S2}}, \quad (5.3)$$

де c_{L1} , c_{S1} , c_{L2} , c_{S2} — швидкості поширення поздовжніх і зсувних хвиль у першому та другому середовищах відповідно.

При збільшенні кута падіння α поздовжньої хвилі L кути β і γ також зростають та при деякому значенні $\alpha = \alpha_{\text{кр1}}$ поздовжні хвилі поширюються по поверхні, не проникаючи вглиб іншого

середовища. За цих умов виникає головна хвиля (перший критичний кут). При подальшому збільшенні кута падіння до значення $\alpha_{кр2}$ (другий критичний кут) по поверхні будуть поширюватися заломлені зсувні хвилі (рис. 5.3).

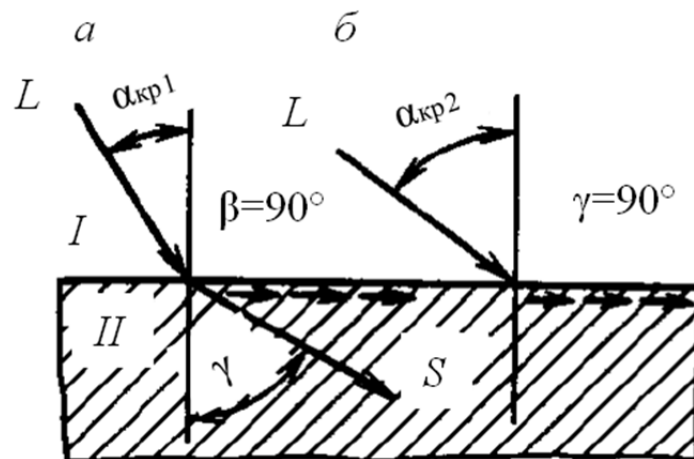


Рис. 5.3. Поширення поздовжньої (а) і зсувної (б) заломлених хвиль на межі розділення середовищ при критичних кутах

Для пружних хвиль справедливий закон оборотності. Якщо промінь від першого середовища у інше падає під кутом α , то промінь, який падає з іншого середовища на межу з першим під кутом β , увійде в перше середовище під кутом α .

До переваг ультразвукового контролю відносяться:

- висока чутливість контролю, що дозволяє виявити дрібні дефекти;
- більша роздільна здатність, що дозволяє виявляти дефекти у великих виробках;
- практично миттєва індикація дефектів, що забезпечує автоматизацію контролю;
- можливість контролю при однобічному доступі до виробу;
- простота і висока продуктивність методу;
- можливість контролю виробів з різних матеріалів (металу, сплавів, пластмас, композитів тощо);
- безпека роботи оператора.

До недоліків ультразвукового контролю варто віднести:

- необхідність розробки спеціальних методик контролю для окремих типів деталей;
- вимоги високої чистоти поверхні контрольованих виробів;
- наявність “мертвих зон”, що знижують ефективність контролю.

Усі ці властивості ультразвукових хвиль широко використовуються при розробці і впровадженні акустичних методів контролю та приладів, а також при конструюванні призматичних перетворювачів.

Акустичні методи неруйнівного контролю засновані на аналізі параметрів пружних коливань, які збуджуються у контрольованому об'єкті (ГОСТ 23829—85).

Методи акустичного контролю поділяють на дві великі групи (рис. 5.4): активні, які використовують випромінювання і прийом акустичних коливань, та пасивні, засновані тільки на прийомі акустичних хвиль.



Рис. 5.4. Класифікація акустичних методів контролю

5.2. Активні акустичні методи НК

Методи, у яких застосовують хвилі, що протікають, поділяють на підгрупи. У практиці використовують методи проходження і методи відбиття хвиль. Комбіновані методи застосовують як відбиття, так і проходження.

Методи проходження потребують наявності при контролі двох перетворювачів: випромінюючого і прийомного, розташованих по різні сторони контрольованого об'єкта.

5.2.1. Методи проходження і відбиття хвиль, комбіновані методи

До методів проходження відносяться наступні:

- *тіньовий* або *амплітудно-тіньовий*, заснований на реєстрації зменшення амплітуди протікаючої хвилі через наявність дефекту. Застосовують імпульсне і безперервне випромінювання (рис. 5.5, а);

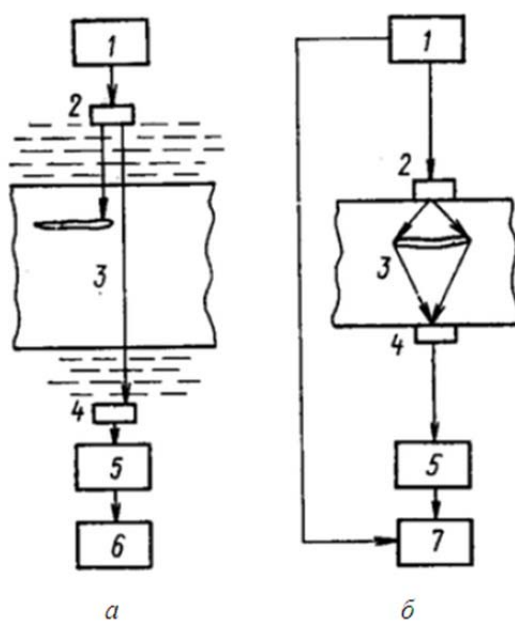


Рис. 5.5. Методи проходження: а — тіньовий; б — тимчасовий тіньовий; 1 — генератор; 2 — випромінювач; 3 — об'єкт контролю; 4 — приймач; 5 — підсилювач; 6 — вимірювач амплітуди; 7 — вимірювач часу пробігу

- *тимчасовий тіньовий*, заснований на вимірі запізнювання імпульсів, викликаного огинанням дефектів (рис. 5.5, б).

Методи відбиття використовують як один, так і два перетворювачі, найчастіше застосовують імпульсне випромінювання.

До цієї підгрупи відносяться наступні методи:

- *ехо-метод*, заснований на реєстрації ехо-сигналів від дефектів (рис. 5.6, а). На екрані електронно-променевої трубки, як правило, спостерігають зондувальний (посланий) імпульс I, донний імпульс III, відбитий від дна контрольованого виробу, і сигнал від дефекту II. Час проходження імпульсів II і III пропорційний глибині залягання дефекту і товщині виробу;

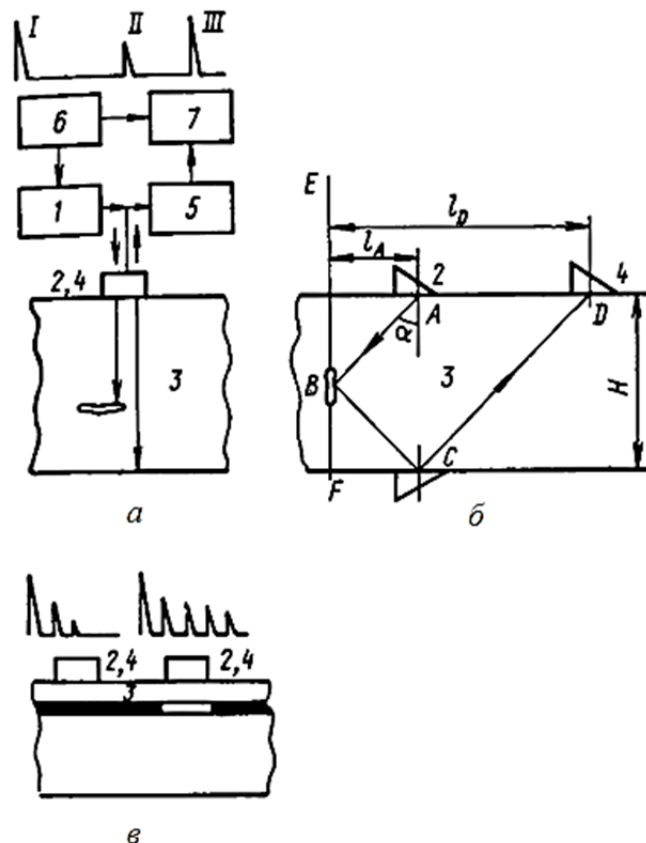


Рис. 5.6. Методи відбиття: а — ехо; б — ехо-дзеркальний; в — ревербераційний; 1 — генератор; 2 — випромінювач; 3 — об'єкт контролю; 4 — приймач; 5 — підсилювач; 6 — синхронізатор; 7 — генератор розгортки

- *ехо-дзеркальний*, аналізують сигнали, які підлягли дзеркальному відбиттю від дна контрольованої деталі і дефекту (рис. 5.6, б). Варіант цього методу, який використовується для виявлення вертикальних дефектів (площина EF), називають *тандем-методом*;
- *ревербераційний*, аналізують час об'ємної реверберації — процесу поступового згасання звуку у деякому обсязі контрольованої деталі (рис. 5.6, в).

У комбінованих методах застосовують як відбиття, так і проходження акустичних хвиль. До цих методів відносять:

- *дзеркально-тіньовий*, заснований на вимірі амплітуди донного сигналу. За технікою виконання — це метод відбиття, а по своїй сутності він близький до тіньового методу, оскільки у процесі контролю вимірюють послаблення сигналу, який двічі пройшов виріб у зоні дефекту (рис. 5.7, а);

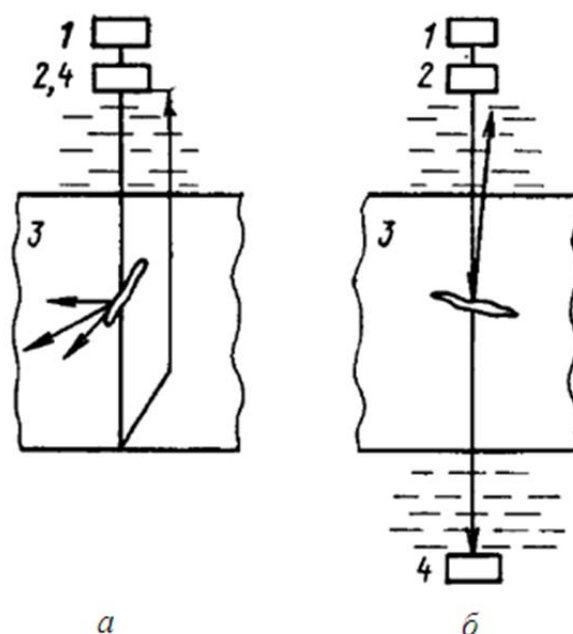


Рис. 5.7. Комбіновані методи: а — дзеркально-тіньовий; б — ехо-тіньовий; 1 — генератор; 2 — випромінювач; 3 — об'єкт контролю; 4 — приймач

- *ехо-тіньовий*, застосовують і аналізують протікаючі і відбиті хвилі (рис. 5.7, б).

Імпедансний метод істотно відрізняється від раніше розглянутих. Він заснований на аналізі зміни механічного або вхідного акустичного імпедансу ділянки контрольованої поверхні, з яким взаємодіє перетворювач, і чим більший імпеданс, тим важче розгойдати контрольовану ділянку (рис. 5.8).

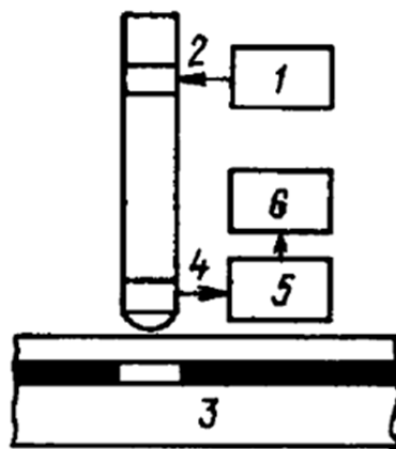


Рис. 5.8. Імпедансний метод: 1 — генератор; 2 — випромінювач; 3 — об'єкт контролю; 4 — приймач; 5 — підсилювач; 6 — індикатор

При низькочастотному імпедансному методі перетворювачем є коливний стрижень, притиснутий до поверхні деталі.

При наявності підповерхневих дефектів у вигляді розшарувань зменшується механічний імпеданс та у ділянці над дефектом легко збуджуються вигинальні коливання. Внаслідок чого змінюється режим коливань стрижня, у тому числі зменшуються механічні напруження на прийомному елементі, що і є ознакою дефекту.

При високочастотному методі перетворювач випромінює поздовжню хвилю. Умови цього збудження залежать від акустичного імпедансу поверхні, а акустичний імпеданс у свою чергу залежить від наявності або відсутності несуцільності.

У теперішній час розроблено цілий клас малогабаритних ультразвукових приладів (дефектоскопів та товщиномірів). Це дефектоскопи УД2—70, А121М, А1220 та ін., товщиноміри — А1207С, А1208, ТУЗ—1, ТДМ—1 тощо.

5.2.2. Спектрально-акустичний метод

Наприкінці минулого століття для тонких прецизійних вимірів акустичних характеристик різних типів хвиль була розроблена спеціалізована система “АСТРОН”.

Ця система призначена для прецизійного виміру часу поширення (затримок) і відношення розмахів ультразвукових імпульсів, що поширюються в основному металі і зварних з'єднаннях досліджуваного об'єкта.

Основна область застосування — дослідження структурних особливостей матеріалів технічних об'єктів, оцінка їхніх фізико-механічних характеристик, напружено-деформованого стану з метою прийняття рішення про можливість безпечної експлуатації об'єктів.

Технічні характеристики системи:

- частотний діапазон 2,5—10 МГц;
- діапазон вимірюваних тимчасових інтервалів між першими і другим відбитими імпульсами від 2 до 200 мкс;
- межі абсолютної похибки системи, що допускаються, при вимірюванні тимчасових інтервалів становлять ± 1 нс у всьому діапазоні;
- діапазон вимірювання відношень розмахів імпульсів — від 1 до 10;
- межі відносної похибки системи, що допускаються, при вимірюванні відношень розмахів імпульсів становлять ± 3 % у всьому діапазоні.

До складу системи входять:

- вимірювальний модуль;

- процесорний модуль, у якості якого використовується портативний комп'ютер (вимірювальний і процесорний модулі виконані в єдиному конструктиві);
- комплект датчиків (датчик поздовжніх хвиль — 3 шт., датчик поперечних хвиль — 2 шт., датчик поверхневих хвиль — 3 шт., трикомпонентний датчик — 1 шт., термо-датчик — 1 шт.);
- програмне забезпечення (на російській мові);
- діагностичний модуль.

Програмне забезпечення системи дозволяє виконувати цілий ряд досліджень, необхідних для оцінки напруженого стану і ступеня пошкодження як основного металу, так і зварних з'єднань (рис. 5.9).

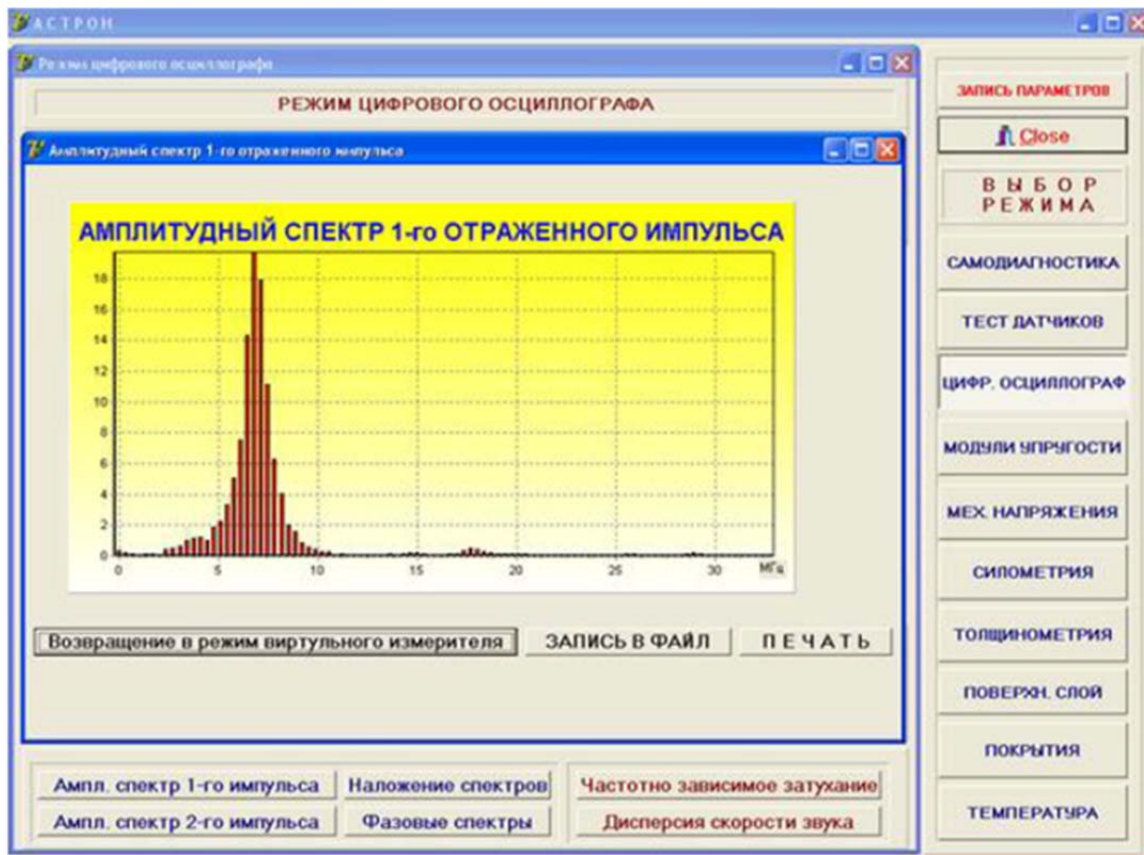


Рис. 5.9. Режими функціонування системи “АСТРОН”

В основу роботи апаратної частини системи покладений спосіб детальної реєстрації усієї серії відбитих акустичних імпульсів для її наступної обробки засобами програмної частини системи.

Для передавання первинної акустичної інформації в обробляючу частину системи здійснюється послідовне перетворення осцилограми відбитих імпульсів з певним кроком дискретизації з моменту зондування матеріалу і до приходу n -го відбитого імпульсу.

5.2.3. Дослідження пошкодженого зварного з'єднання із застосуванням спектрально-акустичного методу

У процесі тривалої експлуатації в основному металі і у зварних з'єднаннях паропроводів теплових електростанцій відбуваються складні фізико-хімічні процеси, які і призводять за певних умов до зародження та розвитку дефектів. У зварних з'єднаннях найбільш імовірна концентрація напружень внаслідок різкої зміни форми у районі стику. Для них характерний підвищений рівень робочих і компенсаційних напружень вигину через розташування поблизу ділянок підвищеної жорсткості, якими є фасонні елементи, корпуси тощо.

Визначення стадії передруйнування зварних з'єднань (оцінка граничного стану) є дуже актуальним завданням.

Неруйнівні фізичні методи досліджень при прогнозуванні працездатності і оцінці граничного стану металоконструкцій орієнтовані, головним чином, на виявлення вже існуючих осередків руйнування. Вони не дають можливості виявляти стадії зародження мікроушкоджень і оцінювати характер зміни мікроструктури.

У той же час оцінити мікроструктуру, визначити фізико-механічні характеристики можна лише із застосуванням руйнівних методів дослідження. Серед безлічі неруйнівних фізичних методів контролю стану зварних з'єднань одним з найбільш перспективних є спектрально-акустичний метод.

Акустичні методи випробувань мають ряд переваг, які полягають в унікальних властивостях ультразвукових хвиль виявляти

безліч розсіяних мікроушкоджень, розміри кожного з яких менші порога чутливості багатьох інших методів випробувань.

У металі зварних з'єднань накопичення мікроушкоджень, утворення мікро- і макротріщин відбувається, переважно, у поверхневих шарах виробів і застосування акустичних методів може призвести до виявлення таких зон. Одним з найважливіших переваг акустичних методів є можливість досліджувати поверхневі мікроструктурні недосконалості у матеріалах із застосуванням поверхневих акустичних хвиль Релея.

У якості прикладу розглянемо результати дослідження впливу параметрів мікроструктури ушкодженого зварного з'єднання на акустичні характеристики металу спектрально-акустичним методом.

Об'єктом дослідження є зруйноване зварне з'єднання головного паропроводу блоку закордонної конденсаційної електростанції (КЕС).

Типорозмір 325×43 мм, тиск пари — 14 МПа, температура — 545 °С, матеріал — сталь 12Х1МФ, час експлуатації — 178040 год. (рис. 5.10).

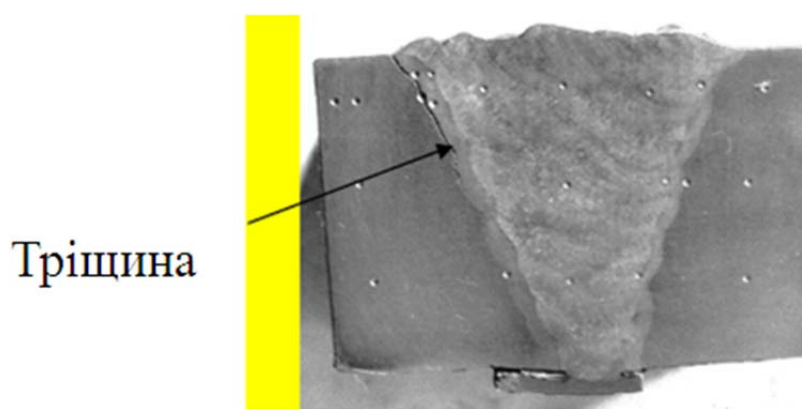


Рис. 5.10. Зовнішній вигляд фрагмента ушкодженого паропроводу

Зовнішній огляд і виміри. Кільцева тріщина розташована з боку труби у зоні термічного впливу. Довжина тріщини — 1/3 пе-

риметра зварного шва, максимальне розкриття — 2 мм. Діаметр труби з боку тріщини досягає 327,5 мм, товщина стінки — 42,5 мм. Діаметр труби з протилежної сторони (згин) 327 мм, товщина стінки — 41,5 мм.

Металографічне дослідження проведене на мікроскопах МІМ—8М и МІМ—10 при збільшенні $\times 100$, $\times 500$. Зразок для дослідження вирізаний на кінці розкриття тріщини. Тріщина розташована у зоні термічного впливу на відстані 2—3 мм від лінії сплавлення вздовж зони дрібного зерна.

Фронт поширення тріщини від зовнішньої поверхні до внутрішньої. Тріщина йде по межах зерен, що чітко видно на кінці розкриття тріщини (рис. 5.11, *а, б*), кінці магістральної тріщини окислені, спостерігаються множинні супутні мікронадриви.

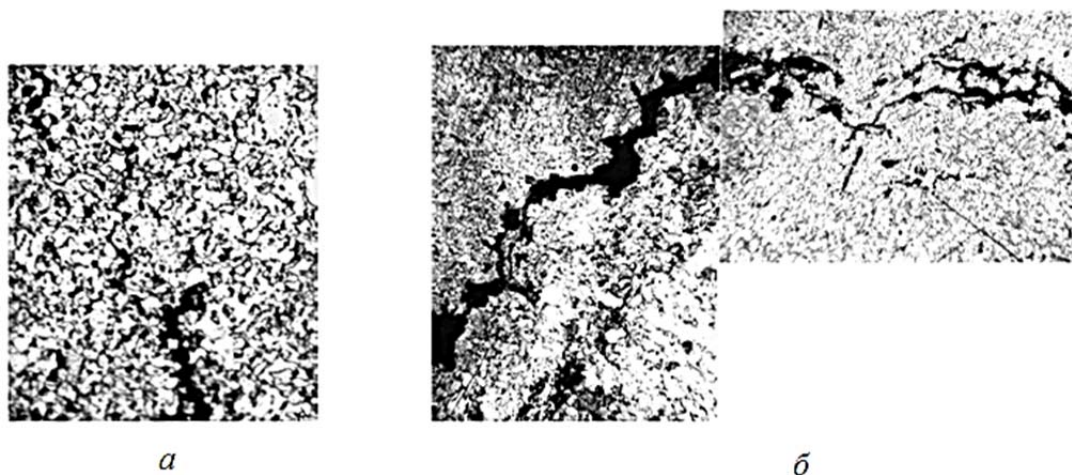


Рис. 5.11. Мікроструктура у зоні тріщини, $\times 100$: *а* — кінець тріщини; *б* — характер поширення тріщини

На протилежній стороні досліджуваного темплета, тобто з боку згину, на відстані 2—3 мм від лінії сплавлення у зоні термо-впливу, як видно, міжзернове розтріскування (рис. 5.12, *а*) на глибину 1,5—2 мм.

Мікроструктура основного металу з боку труби феритно-карбідна. Карбіди у вигляді скупчення розташовані переважно по

межах зерен. На ділянках бейніту, що розпався, підвищена травимість фериту і безліч точкових карбідів (рис. 5.12, в).

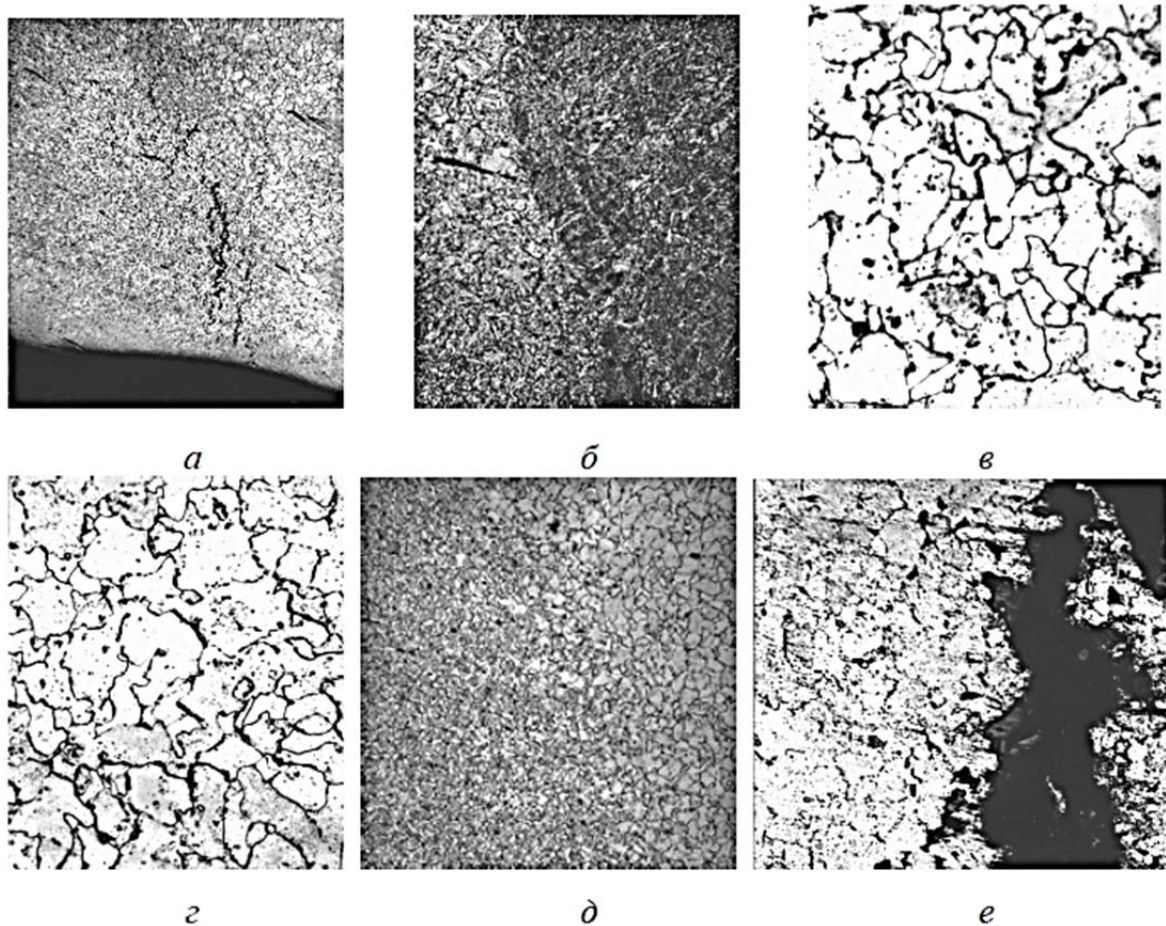


Рис. 5.12. Мікроструктура металу у біляшовній зоні: *а* — $\times 100$, розтріскування у зоні термовпливу; *б* — $\times 100$, мікроструктура металу шва і зони перегріву; *в* — $\times 500$, мікроструктура труби; *г* — $\times 500$, мікроструктура згину; *д* — $\times 100$, мікроструктура зони дрібного зерна; *е* — $\times 500$, мікроструктура уздовж фронту тріщини

Мікроструктура основного металу з боку згину феритно-карбідна. Карбіди розташовані переважно по межах зерен (рис. 5.12, *г*).

Мікроструктура металу шва феритно-бейнітна, ширина бейнітних оторочок 20—25 мікронів (рис. 5.12, *б*). Мікроструктура зони перегріву — бейніт.

Мікроструктура ділянки неповної перекристалізації феритно-карбідна (рис. 5.12, *д*), уздовж фронту поширення тріщини у цій зоні велика кількість мікропор, розташованих по межах зерен (рис. 5.12, *е*).

На внутрішній поверхні труби виявлені корозійно-втомлювальні тріщини (рис. 5.13, *а*, *б*).

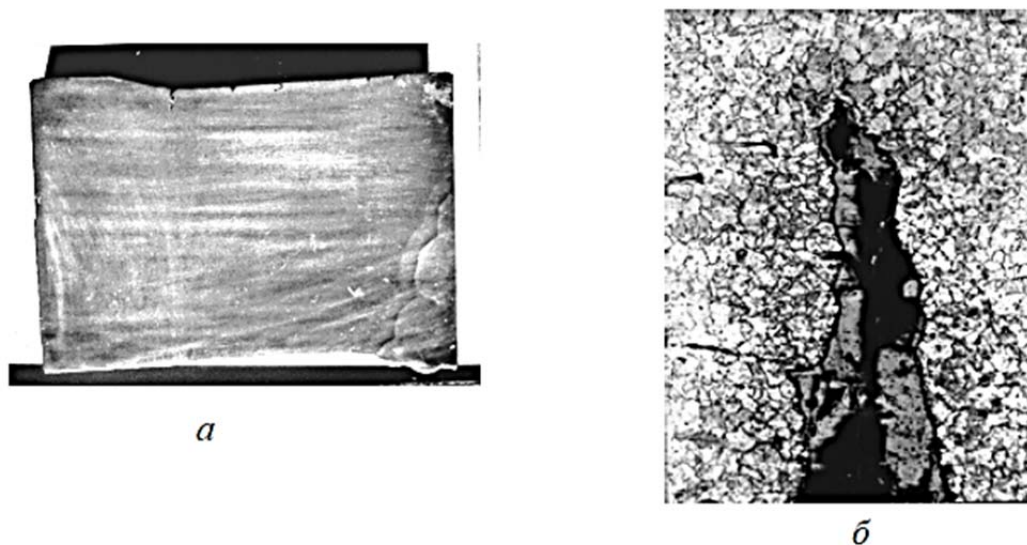


Рис. 5.13. Мікроструктура у зоні розточування: *а* — втомлювальні тріщини на внутрішній поверхні у районі розточування під підкладне кільце; *б* — $\times 500$, кінець втомлювальної тріщини

Крім того, дане зварне з'єднання було досліджено методами електронної мікроскопії з оцінкою параметрів мікроструктури і внутрішніх далекодіючих полів напружень.

Електронною мікроскопією виявлені ділянки матеріалу, що містять мікротріщини. Такі ділянки були виявлені у зоні термічного впливу зварювання. Схематичне зображення ділянки матеріалу, що містить мікротріщини, наведене на рис. 5.14, *б*, а ділянки, що містить дефектний ферит, — на рис. 5.14, *а*.

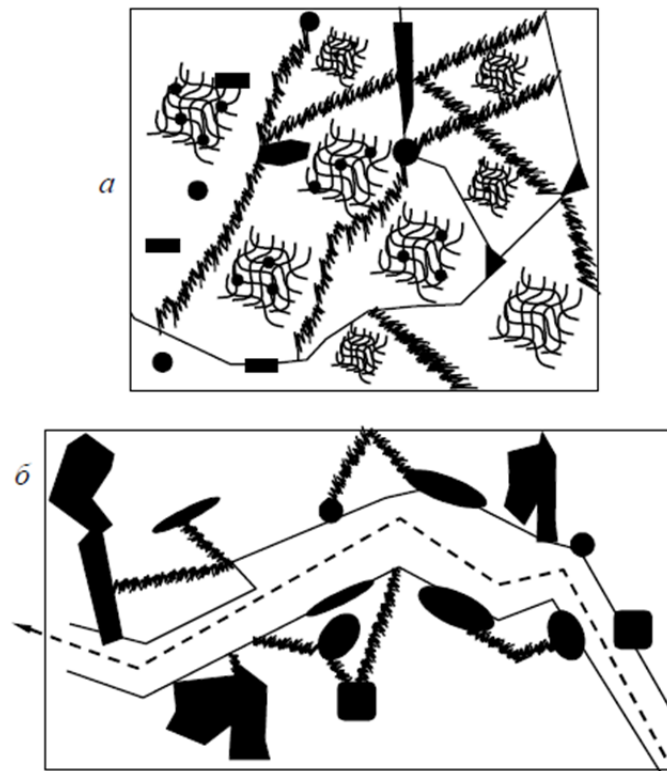


Рис. 5.14. Схематичне зображення дільниць матеріалу, що містять дефектний ферит (а) і мікротріщини (б), присутні у досліджуваній сталі 12Х1МФ

Мікротріщини утворюються або у місцях скупчення великих карбідів, або там, де карбіди розташовані ланцюжком, і тоді тріщини знаходяться між карбідами (рис. 5.15). Напруження у таких місцях не релаксовані, на що вказує наявність тонких екстинкційних контурів, які відходять від кінців тріщин.

Місцями зародження мікротріщин можуть бути і окремо віддалені пружно-напружені великі карбіди. Дислокації у карбіді відсутні, зате присутні бездислокаційні екстинкційні контури. Подібні напруження можуть призвести до розтріскування часток (рис. 5.16, а).

Мікротріщина, що утворюється, призводить до розтріскування матеріалу поблизу її (рис. 5.16, б).

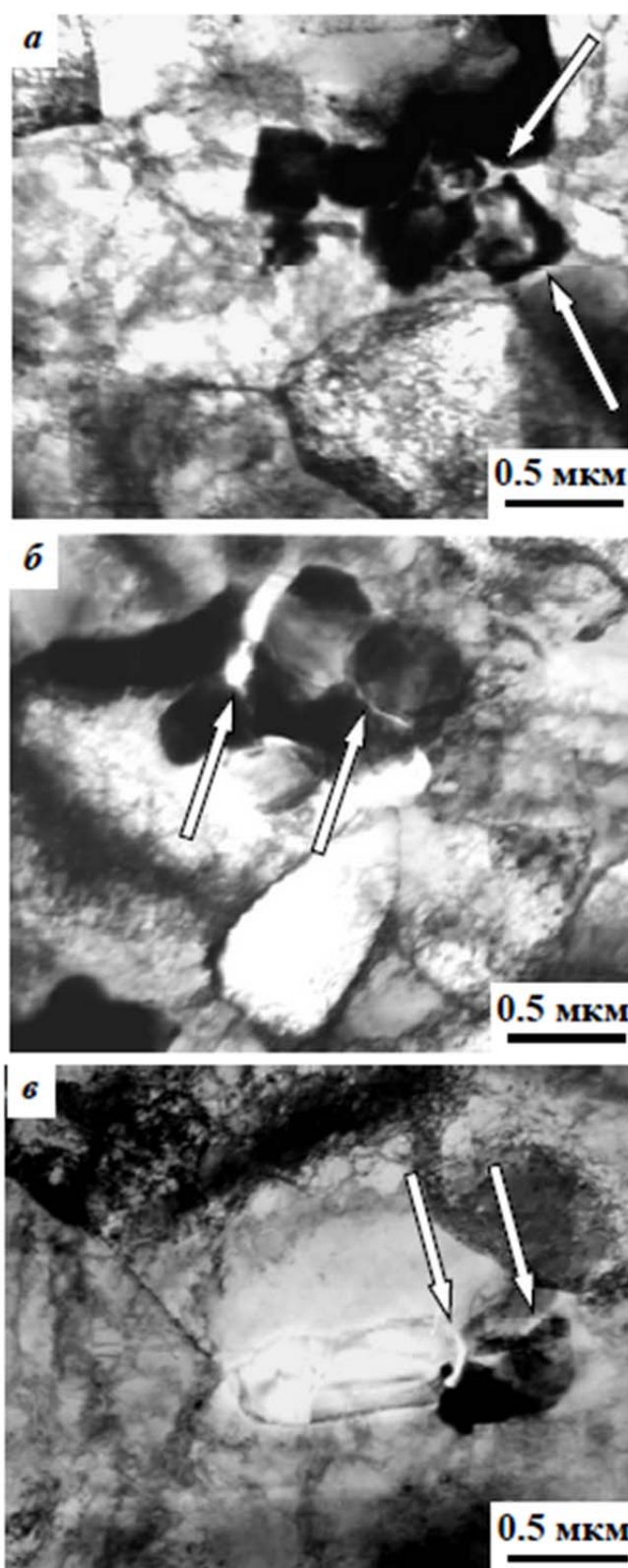


Рис. 5.15. Електронно-мікроскопічне зображення тонкої структури сталі 12Х1МФ (ділянки матеріалу, що містять мікротріщини відзначені стрілками)

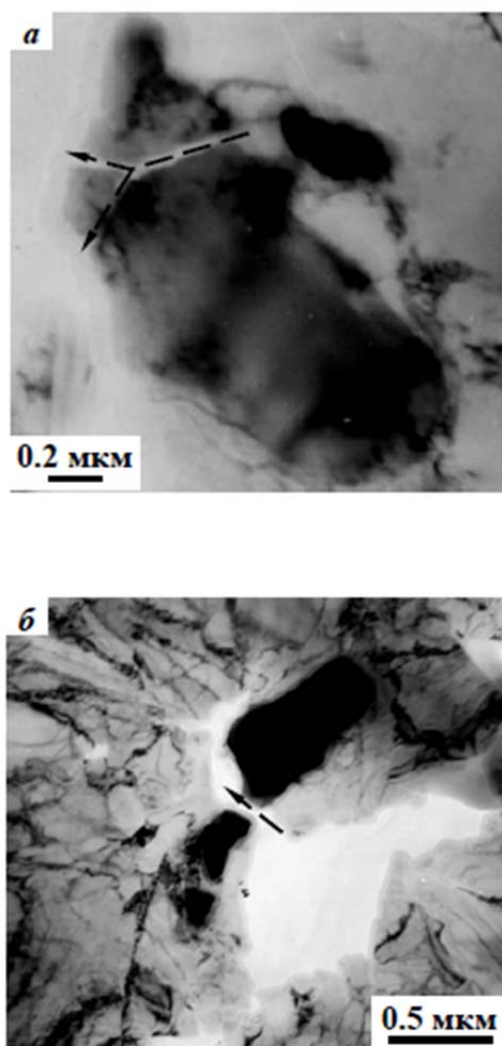


Рис. 5.16. Електронно-мікроскопічне зображення тонкої структури сталі 12Х1МФ (розтріскування часток карбіду $M_{23}C_6$ відзначені пунктирними стрілками)

Вивчення характеру мікроструктури та вимір полів внутрішніх напружень також проводили у тих же ділянках, де виконували вимір часу затримки поверхневих акустичних хвиль спектрально-акустичним методом, із застосуванням багатофункціональної установки “АСТРОН”.

У якості датчика використовували оригінальний малобазовий релеївський перетворювач для оцінки швидкості поширення імпульсів релеївських хвиль, що здійснює кореляцію зі ступенем ушкодження поверхневого шару металу.

Зіставимо результати, отримані методом електронної мікроскопії, розглянуті вище, з результатами акустичного методу із використанням хвиль Релея, що використовується на практиці як неруйнівний метод контролю. Підкреслимо, що дослідження обома методами були виконані на тому самому зразку зруйнованого зварного з'єднання паропроводу зі сталі 12Х1МФ.

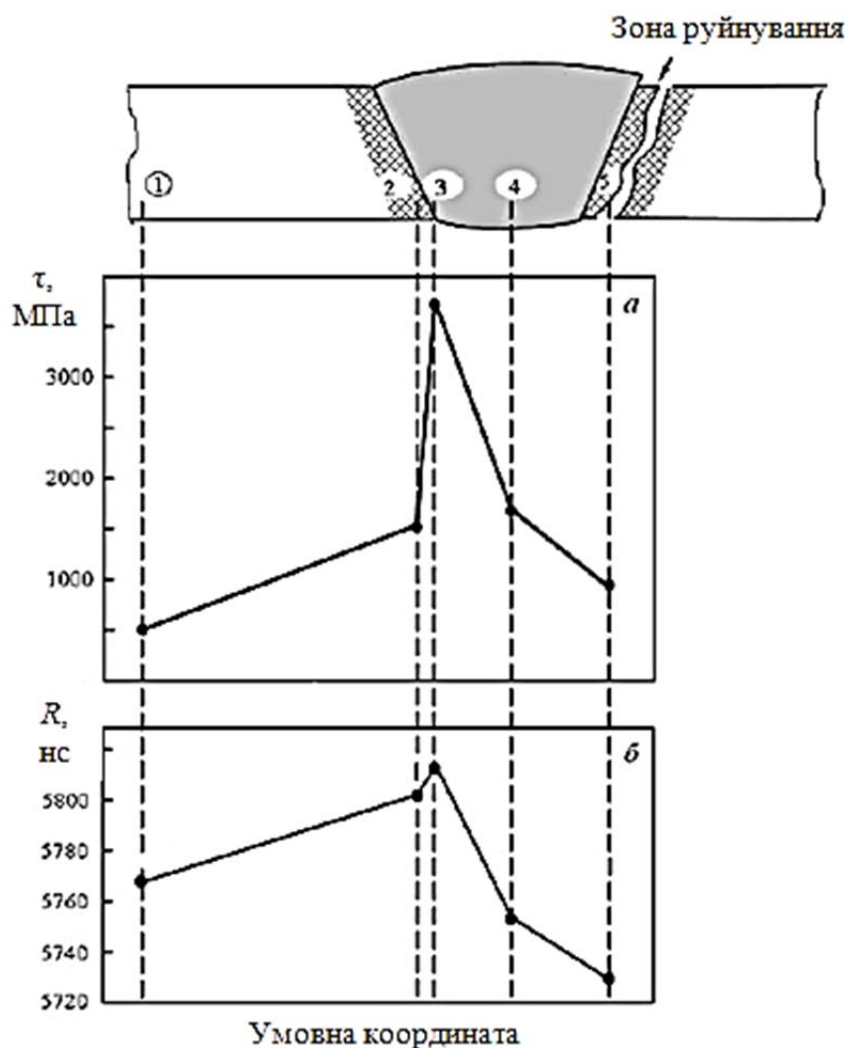


Рис. 5.17. Зміна середньої амплітуди локальних напружень (а) і затримки імпульсів релєївських хвиль (б) при переміщенні зразка від основного металу до зони руйнування

Методом електронної мікроскопії була вивчена структура при переміщенні зразка від основного металу до зони руйнування. Було встановлено, що найбільш серйозні зміни відбуваються

у зоні термічного впливу і впродовж лінії сплавлення. Саме там з'являються мікротріщини і різко зростають внутрішні напруження (рис. 5.17, *а*). Таким чином, вищевказані ділянки зразка є зоною концентрації напружень і саме тут повинне відбутися руйнування зразка.

Акустичний метод дозволив отримати, зокрема, дані часу затримок імпульсів хвиль Релея при такому ж переміщенні цього зразка (рис. 5.17, *б*). Видно, що найбільша затримка імпульсів релеївських хвиль також відбувається на ділянці зразка між точками 2 і 3. Це означає, що дані обох методів добре погоджуються. Підтвердження цьому показане на рис. 5.18.

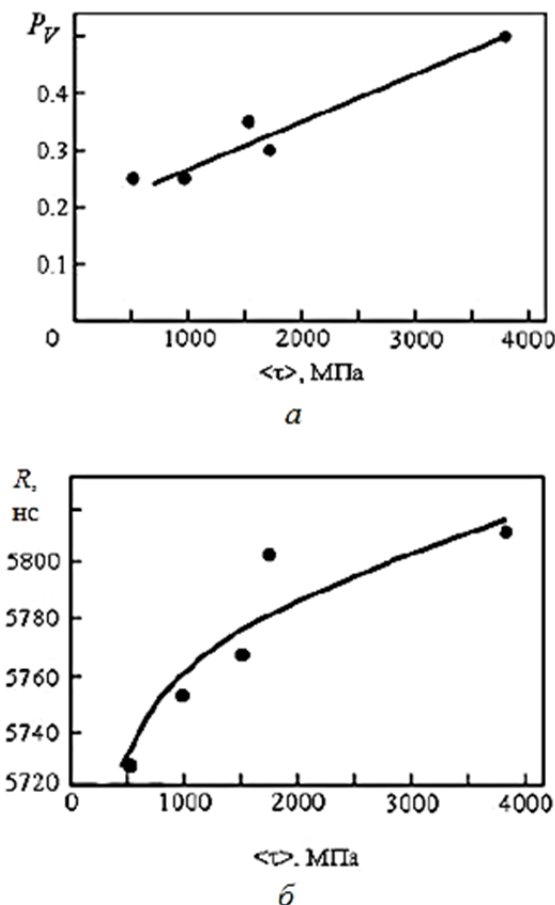


Рис. 5.18. Зв'язок середніх внутрішніх напружень $\langle \tau \rangle$ з об'ємною часткою структури P_V , яка містить дефектну α -фазу і мікротріщини (*а*), і затримкою імпульсів релеївських хвиль R (*б*)

Як видно з рис. 5.18, *а*, ріст середніх внутрішніх напружень призводить до збільшення об'ємної частки небезпечної для руйнування структури матеріалу (дільниць дефектної α -фази і мікротріщин). З іншого боку, ріст внутрішніх напружень призводить до затримки імпульсів релеївських хвиль (рис. 5.18, *б*).

Таким чином, спектрально-акустичний метод добре підтверджується результатами досліджень, і величина затримки імпульсів Релея є дуже чутливою характеристикою виявлення структурних дефектів у поверхневих шарах металу.

5.3. Пасивні акустичні методи НК

До пасивних методів відносяться акустико-емісійний, вібраційно-діагностичний і шумо-діагностичний.

5.3.1. Акустико-емісійний метод

Явище акустичної емісії полягає у випромінюванні пружних хвиль матеріалом у результаті внутрішньої динамічної локальної перебудови його структури (рис. 5.19). Рух дислокацій, зародження і розвиток мікротріщин, ріст макротріщин, поліморфні перетворення та ін. супроводжуються акустичною емісією. Перетворювачі, встановлені на поверхні контрольованого виробу, приймають пружні коливання і дозволяють встановити джерело емісії, а при наявності декількох перетворювачів та при обробці отриманих від них сигналів можна визначити розташування джерела дефекту.

Останнім часом метод акустичної емісії (АЕ) є одним з найбільш перспективних з погляду оцінки реального стану технічних пристроїв, оцінки працездатності основного металу і зварних з'єднань та визначення ресурсу.

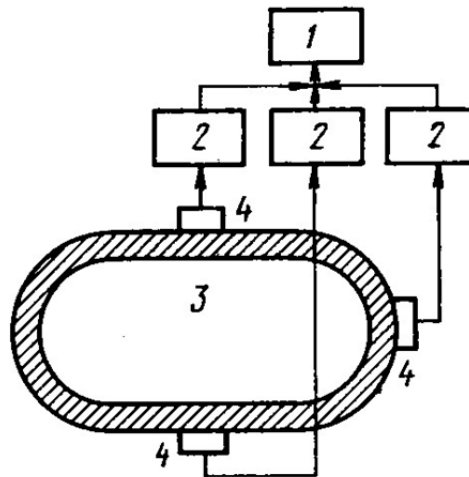


Рис. 5.19. Метод акустичної емісії: 1 — блок обробки результатів; 2 — підсилювач; 3 — об'єкт контролю; 4 — приймач

Крім того цей метод має досить істотні переваги перед іншими при аналізі стану матеріалів зварних конструкцій. До таких переваг відносять, насамперед, можливість стовідсоткового контролю всього обсягу матеріалу конструкції, діагностування конструкцій без зупинки виробництва, виключення громіздких гідровипробувань з заміною їх пневмовипробуваннями. Великого значення набуває можливість використання діагностичної апаратури на основі акустичної емісії для керування процесом виробництва в доаварійній і аварійній ситуаціях, що дозволяє вчасно вживати заходів з попередження аварій, забезпечуючи експлуатацію конструкцій за фактичним станом.

Технологія забезпечення безпечної експлуатації конструкцій на основі акустичної емісії. Проблема забезпечення безпеки експлуатації конструкцій у даний час успішно вирішується вченими і фахівцями у різних країнах. Основними напрямками цих робіт можна вважати наступні:

- теоретичні і експериментальні дослідження руйнування матеріалів конструкцій та супутніх йому явищ — носіїв інформації про процеси, що протікають у матеріалах при руйнуванні;

- теорія і технологія контролю, що розпізнають критичні етапи руйнування матеріалів на основі розрахунку або дискримінації характерних ситуацій процесу руйнування;
- програмне забезпечення та апаратура, що реалізують технологію контролю і включають робочі програми організації руху, обробки та стиснення вступної інформації, алгоритми розпізнавання процесів, що протікають у матеріалі при його руйнуванні, на основі математичної статистики, теорії ймовірності, теорії прогнозування і прийняття рішень;
- сертифікація створюваних методик і контрольного устаткування, навчання персоналу, що виконує роботи з контролю стану матеріалів конструкцій;
- розробка і випуск стандартів, методик, інструкцій та інших нормативних й методичних матеріалів, необхідних для технології та апаратури на промислових об'єктах.

На рис. 5.20 представлена схема технології забезпечення безпеки експлуатації конструкцій на основі вектора стану матеріалу (VSM), зазначеного у якості основного блоку даної схеми.

До складу технології входить не тільки вимірювальна апаратура з необхідним програмним забезпеченням, але і блоки метрології методу та апаратури, блок нормативної документації, необхідної для роботи контрольного устаткування на виробництві, блок підготовки персоналу і блок сервісного обслуговування та консультацій із застосування.

Роботи з кожним з представлених п'яти напрямків повинні бути пов'язані один з одним. Це досить очевидно, оскільки необхідно пропонувати теорію і алгоритми прогнозу руйнування, які можуть бути реалізовані сучасною вимірювальною і обчислювальною технікою. Знаючи це, необхідно погоджувати взаємні можливості теорії і апаратури для того, щоб теоретики не вимагали неможливого від апаратури і обчислювальної математики, а

конструктори апаратури не вимагали того ж від теоретиків. Таким чином, потрібна гнучка система роботи у зазначених напрямках.

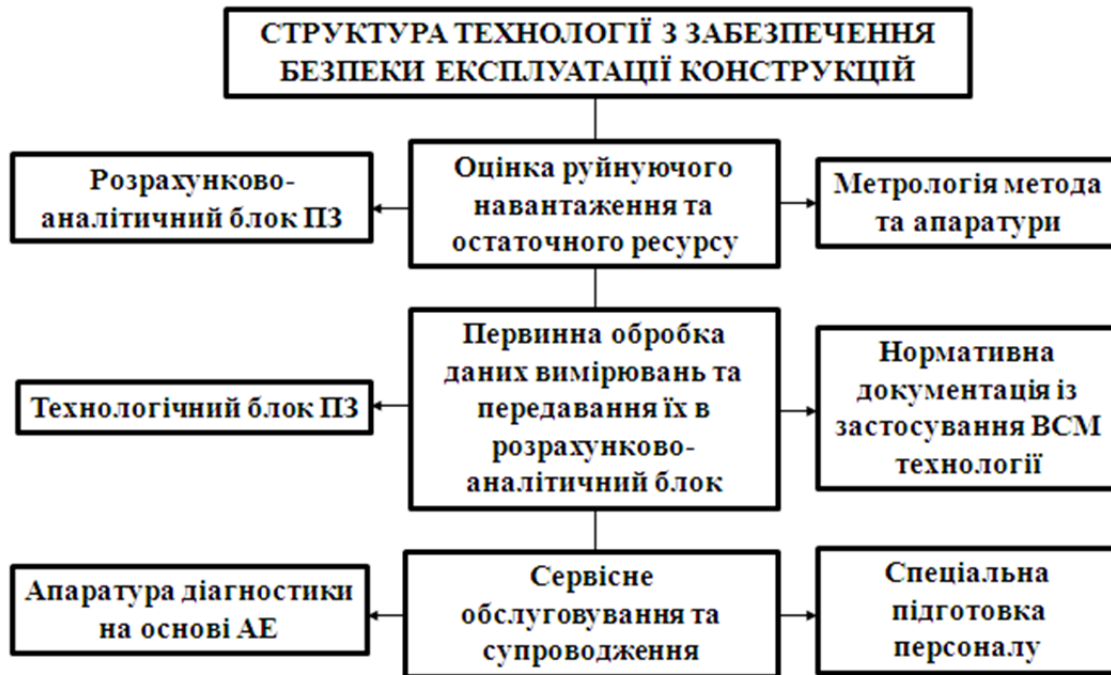


Рис. 5.20. Блок-схема технології контролю на основі ВСМ

Зупинимося більш докладно на проблемах АЕ діагностики.

Проблеми і підходи до забезпечення ефективності АЕ діагностики. Одним з основних питань АЕ діагностики є питання аналізу пружних хвиль, що виникають при деформуванні матеріалів конструкцій. Це завдання вирішувалося багатьма фахівцями протягом тривалого періоду часу.

Насамперед слід зазначити Yih-Hsing Pao та Ralph R. Gajewski, які запропонували так звану узагальнену променеву теорію розрахунку поширення пружної хвилі у твердих тілах. Відповідно до цієї теорії, пружні хвилі, що поширюються за різними траєкторіями внаслідок багаторазових відбиттів і заломлень, представляються у вигляді інтегралів по променях, кожний з яких може бути точно обчислений методом Кан'ярда, розробленим ще у 1939 р. Автори аналізують основні рівняння і застосовують їх для рішення конкретних

завдань. Рішення цих завдань не вдалося одержати у замкнутій аналітичній формі, тому воно представлено у вигляді чисельного алгоритму, що описує поширення обраного променя при дії точкового джерела.

Як відзначають Yih-Hsing Pao та Ralph R. Gajewski, запропонована теорія раніше застосовувалася для геофізичних завдань і пристосована ними для металевих пластин. Зокрема, вони відзначали, що акустичні сигнали, які виникають у процесі росту дефектів у твердих тілах, незначно відрізняються від сейсмічних хвиль або хвиль, що поширюються під водою у результаті вибуху. Простежуючи траєкторії відбитих і заломлених променів, теорія узагальненого променя дає можливість аналізу сигналів, які виникли у пластині від дії точкового джерела випромінювання.

У якості істотного недоліку слід відзначити складність теорії і громіздкість алгоритму рішення. При виконанні розрахунків необхідно обирати необхідний шлях поширення хвилі і в результаті підсумовування окремих складових руху хвилі з урахуванням відбиттів і перевідбиттів від стінок пластини отримати остаточне рішення.

Цікаві роботи з вивчення поширення акустичних хвиль стосовно до методології АЕ були зроблені групою фахівців Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенко НАН України на чолі з професором А. Е. Андрейківим. Аналітичні дослідження і випробування, виконані А. Е. Андрейківим та Н. В. Лисаком, стосувалися утворення тріщини. Автори, зокрема, показали, що у цей момент випромінювання АЕ коливань здійснюється направлено.

Поява сучасної потужної обчислювальної техніки дозволило по-новому розглянути проблему аналізу процесів, що виникають при випромінюванні джерела у будь-якій локальній області пластини. Виявилось можливим прив'язати точкове джерело випромінювання пружних коливань не тільки до процесів руйнування, коли рухаються і зосереджуються у певній мікрзоні скупчення дислокацій, але і до процесів поширення тріщини, прив'язавши

точкове джерело випромінювання до вершини тріщини, що рухається. Момент же утворення мікротріщини може бути зафіксований на підставі розробок, представлених у роботах А. Е. Андрейківа. У цьому випадку рішення можна отримати аналітично для усього об'єму пластини без обмежень.

Отримані результати дозволили досить простим способом проаналізувати хвильові процеси, що протікають на поверхні пластин при дії точкового збудника, розташованого на різній глибині по товщині пластини. Результати розрахунку дали можливість простежити амплітудно-частотні спектри, зареєстровані контролюючим устаткуванням після проходження акустичного сигналу крізь приймач, що має певний проникний спектр. Інакше кажучи, завдяки розрахункам, зробленим на підставі даної теорії, з'явилася можливість зворотного переходу до вихідного сигналу, а відповідно, і можливість енергетичної оцінки зміни, що відбувається у структурі матеріалу в місцях виникнення цього сигналу.

У теперішній час існує велика кількість компаній, які випускають АЕ-системи.

Розглянемо одну з них — систему, розроблену в ІЕЗ ім. Патона.

На рис. 5.21 представлені спектри АЕ сигналів, отримані аналітичним шляхом у трубі великого діаметра з товщиною стінки 10 мм.

Видно, що залежно від спектральної характеристики перетворювача на поверхні пластини у прилад надходять сигнали (правий графік), які істотно відрізняються від тих, що були генеровані джерелом випромінювання (лівий графік).

На рисунку показані додаткові джерела інформації (температура, деформації, внутрішній тиск у трубі), необхідні для прогнозування руйнівного навантаження і залишкового ресурсу труби на основі ВСМ технології.

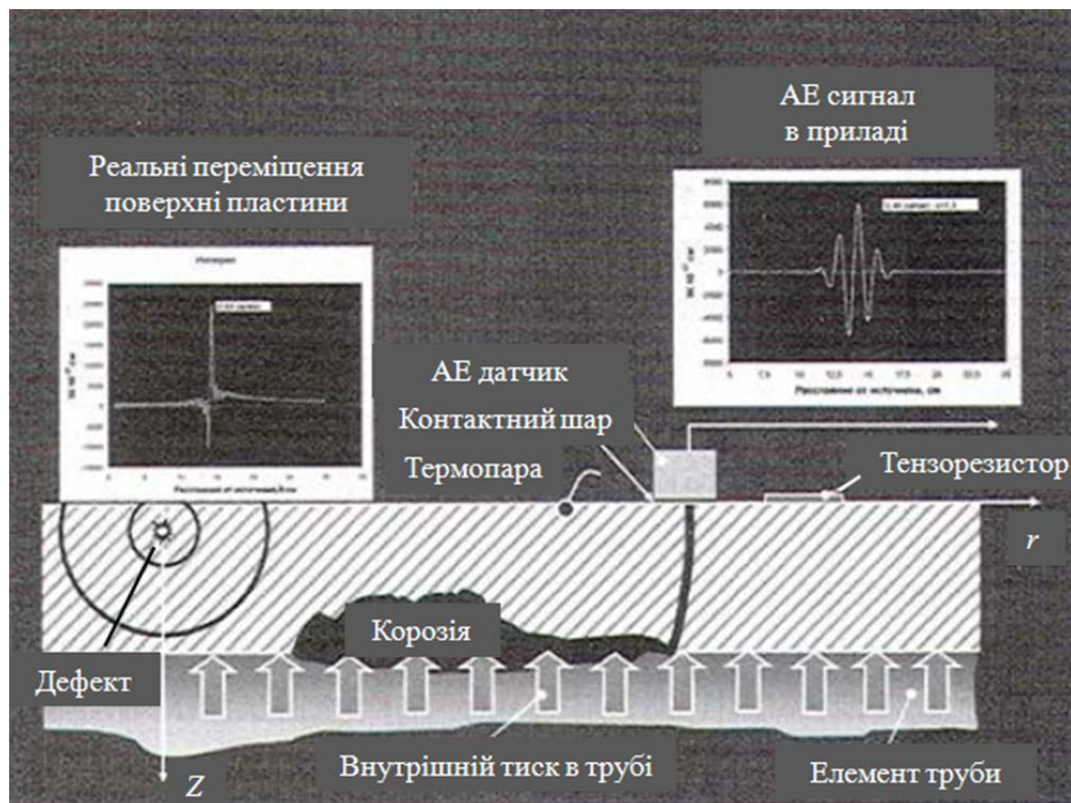


Рис. 5.21. Поширення пружної хвилі у трубі великого діаметра від джерела на глибині 0,2 см від поверхні

Це дослідження виконували з використанням АЕ діагностичної системи ЕМА—ЗУ, яка прогнозує руйнівне навантаження і залишковий ресурс матеріалу (рис. 5.22).

На рисунку показаний основний 32-канальний блок (16 акустичних каналів і 16 низькочастотних для виміру додаткових параметрів аналізу), ноутбук і персональний комп'ютер з різною потужністю обробки усієї вступної інформації, АЕ датчики і проміжні підсилювачі. Кабельне господарство розміщується у спеціальних котушках. Відмінною рисою і перевагою даної АЕ системи є віддалення вимірювальних АЕ датчиків від проміжних підсилювачів на відстань до 100 м.



Рис. 5.22. Система АЕ діагностики ЕМА—ЗУ

Для промисловості розроблений і реалізований стаціонарний варіант системи технічної діагностики ЕМА—ЗС (рис. 5.23).

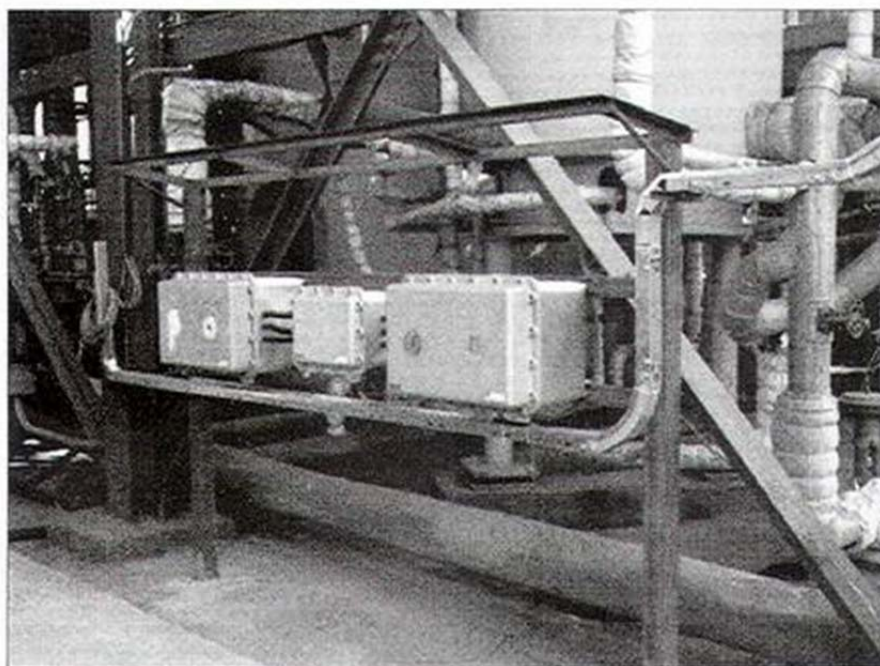


Рис. 5.23. Стаціонарний варіант системи безперервного моніторингу ЕМА—ЗС

Аналогічно, як і ЕМА—ЗУ, дана стаціонарна система прогнозує руйнівне навантаження і залишковий ресурс.

З метою реалізації розробленої на основі проведених досліджень технології оцінки стану матеріалів конструкцій та прогнозування їхнього залишкового ресурсу розроблені необхідні нормативні документи, останні з яких регламентують застосування технології до трубопроводів і устаткування хімічних і нафтохімічних виробництв.

Відзначимо, що, починаючи з середини 1990-х років, все більша увага приділяється безперервному моніторингу відповідальних об'єктів, руйнування яких може призвести до серйозних екологічних втрат.

При цьому моніторинг, що рекомендується, припускає прогнозування надійності устаткування з визначенням залишкового ресурсу його роботи у поточний період експлуатації (короткостроковий прогноз) і ймовірність безвідмовної роботи протягом заданого періоду його наступної експлуатації (довгостроковий прогноз).

Побудова таких систем являє собою складне науково-технічне і інженерне завдання, що вимагає поєднання останніх досягнень в області технічної діагностики, вимірювальної техніки, комп'ютерних технологій та науки про міцність матеріалів з вимогами до технології оцінки стану конструкцій і його прогнозування на заданий розрахунковий проміжок часу.

Необхідно відзначити, що, використовуючи результати проведених досліджень, вже створена система безперервного моніторингу матеріалів конструкцій на основі АЕ.

Перша частина цієї системи ЕМА—ЗС (стаціонарна система безперервного моніторингу) виготовлена на замовлення Одеського припортового заводу і введена в штатну експлуатацію у березні 2003 р. для безперервного контролю сховищ рідкого аміаку об'ємом 34 тис. м³ (діаметр сховища 52 м, висота 21 м). Зараз на заводі постійно функціонують 6 таких систем. Контроль стану

матеріалу з трудомісткої і кропіткої процедури поступово перетворюється в автоматизований процес, коли з єдиного центра натисканням кнопки можна у будь-який момент часу дізнатися, у якому стані перебуває та або інша конструкція.

Необхідно відзначити, що застосування АЕ при контролі конструкцій може бути також ефективним, якщо використовувати тільки одну складову методу — визначати тільки координати АЕ активності матеріалу у процесі його навантаження. Це дозволить скоротити обсяги контролю за рахунок зосередження додаткової контрольної апаратури лише в тих місцях, які зазначені АЕ вимірами. Звісно, будуть показані і ділянки, де дефектів немає, але все одно використання АЕ апаратури у такому режимі доцільне у зв'язку зі скороченням обсягу контрольних робіт.

Тому необхідно підкреслити, що метод АЕ може застосовуватися у двох режимах:

- у режимі цілеспрямованого вказування місць активних дефектів. Ця процедура істотно зменшує обсяг роботи дефектоскопістів, вказуючи місця необхідного контролю. При цьому частина об'єкта, що залишилася, розглядається як бездефектна;
- у режимі діагностування стану матеріалу конструкції. У цьому випадку поєднуються дві функції обладнання — цілеспрямоване вказування місць, у яких дефекти починають себе проявляти, і аналіз активності дефектів у цих місцях, визначення ступеня їхньої небезпеки, прогнозування руйнівного навантаження і залишкового ресурсу матеріалу. При цьому використовується як АЕ інформація, так і інша інформація, отримана при контролі і необхідна для прийняття рішення.

Як видно, завдання оцінки стану конструкцій і прогнозування цього стану на необхідний період часу є багатоплановим. Найкращим способом його вирішення є багатопараметричний підхід, втіленням якого є діагностична апаратура сімейства ЕМА,

що працює з ВСМ. Методика і апаратура, засновані на багатопараметричній оцінці стану конструкцій, повинні включати контроль і аналіз акустичної активності матеріалів, що супроводжує і характеризує різні етапи їх деформування аж до руйнування.

5.3.2. Вібраційний і шумо-діагностичний методи

При використанні вібраційно-діагностичного методу аналізують параметри вібрацій контрольованої деталі за допомогою приймачів контактного типу.

При шумо-діагностичному методі вивчають спектр шумів працюючого механізму у цілому на слух або за допомогою мікрофонних та інших приймачів — аналізаторів спектра.

Вищезгадані методи діагностики широко не використовуються при контролі якості зварних з'єднань, тому вони докладно не розглянуті у даному навчальному посібнику.

Контрольні запитання

1. Які коливання називають акустичними?
2. На яких принципах заснована ультразвукова дефектоскопія?
3. За рахунок якого ефекту одержують ультразвук?
4. Що таке ЕАП, які вони бувають?
5. Що таке реверберація, дифракція, інтерференція?
6. Як класифікуються акустичні методи контролю?
7. Які методи контролю відносяться до активних акустичних?
8. Які методи контролю відносяться до пасивних акустичних?
9. Охарактеризуйте принцип контролю ехо-тіньовим методом.
10. Що таке спектрально-акустичний метод контролю?
11. Які методи відносять до методів відбиття, їхня сутність?
12. Які види дефектів можна виявити спектрально-акустичним методом?
13. Опишіть сутність акустико-емісійного контролю.
14. Охарактеризуйте та назвіть основні переваги методу АЕ.

6. РАДІОГРАФІЧНИЙ МЕТОД КОНТРОЛЮ

6.1. Джерела іонізуючого випромінювання

Залежно від використовуваного випромінювання розрізняють кілька різновидів радіографії:

- *рентгенографія* — застосовується переважно у цехових і рідше у польових умовах, коли до контролю пред'являються найвищі вимоги за чутливістю (товщина виробів δ до 50 мм залежно від апаратури);
- *гаммаграфія* — для контролю виробів, розташованих у важкодоступних місцях, у польових і монтажних умовах (δ виробів до 60—70 мм);
- *бетатронна радіографія* — для контролю зварних конструкцій великої товщини, переважно у цехових умовах (δ виробів до 400—500 мм).
- *нейтронна радіографія* — для контролю зварних конструкцій з важких металів, водневовмісних матеріалів і радіоактивних виробів.

6.1.1. Рентгенівські апарати

Рентгенівська установка складається з:

- рентгенівського випромінювача;
- джерела високої напруги;
- пульта керування.

Високовольтний генератор перетворює напругу мережі у напругу живлення рентгенівської трубки.

Він містить у собі:

- перетворювачі змінного струму у постійний (діоди кенотронів);
- конденсатори для фільтрації та подвоєння напруги;
- трансформатори розжарення рентгенівської трубки;

- трансформатори розжарення кенотронів;
- вимикачі і захисні пристрої.

Пульт керування містить групу приладів, які використовуються для виміру і регулювання часу, струму, напруги та частоти.

Рентгенівські випромінювачі складаються з рентгенівської трубки і захисного кожуха, що заповнений ізолюючим середовищем (трансформаторне мастило, повітря або газ під тиском).

Енергія рентгенівського випромінювання залежить від анодної напруги U і порядкового номера матеріалу анода Z :

$$E = 1,14 \cdot 10^{-7} ZU. \quad (6.1)$$

Довжина хвилі випромінювання:

$$\lambda = \frac{12,4}{U}. \quad (6.2)$$

Для характеристики оптичних властивостей рентгенівських трубок вводять наступні поняття:

- дійсна фокусна пляма;
- ефективна фокусна пляма (рис. 6.1).

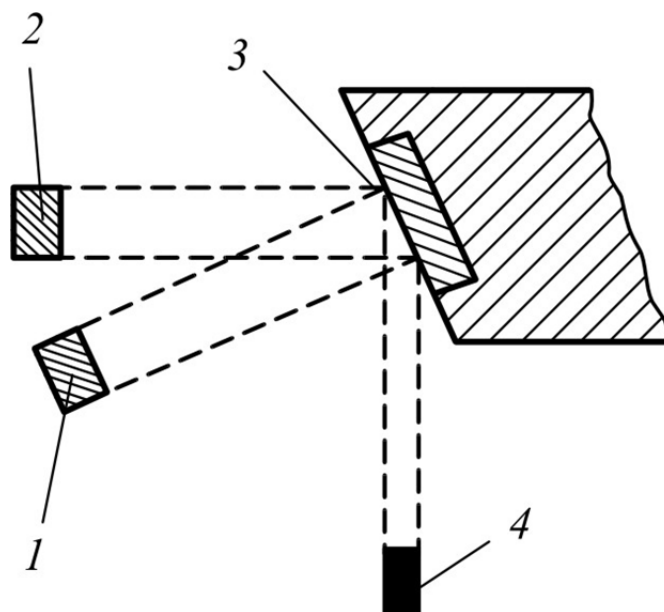


Рис. 6.1. Схема формування оптичного фокуса рентгенівської трубки: 1 — дійсна фокусна пляма; 2 — перетин електронного променя; 3 — анод; 4 — оптичний фокус

Дійсна фокусна пляма — це ділянка поверхні мішені, на якій переважно гальмується пучок електронів.

Ефективна фокусна пляма (оптичний фокус) — це проекція дійсної фокусної плями у напрямку осі робочого пучка випромінювання на площину, перпендикулярну до цієї осі.

Розрізняють трубки з круглим і лінійним оптичним фокусом.

Круглий фокус отримують за допомогою нитки розжарення у вигляді плоскої архімедової спіралі, лінійний (з відношенням сторін $\leq 1,25$) — за допомогою нитки розжарення у формі циліндричної спіралі.

Для поліпшення чіткості зображення на рентгенограмах бажано мати фокусну пляму найменших розмірів. Але зменшення розмірів дійсної фокусної плями при даній ефективності системи охолодження анода знижує потужність рентгенівської трубки.

Широко застосовують трубки з лінійним фокусом (коли дійсна фокусна пляма прямокутна, а оптичний фокус — квадратний).

Рентгенівські трубки бувають різними за конструкціями і способами одержання та формування пучка випромінювання:

- двоелектродні з напругою до 420 кВ;
- секційні;
- с винесеним анодом;
- с обертовим анодом;
- імпульсні (з холодним катодом).

Секційні рентгенівські трубки є високовольтними (більше 420 кВ).

При більш високих напругах спостерігаються наступні явища:

- автоелектронна емісія;
- електричні пробої;
- розсіювання і відбиття електронів.

Ці трубки складаються з катода, проміжних електродів, порожнього анода.

Кількість проміжних електродів і напруги на них підбирають таким чином, щоб виключити можливість виникнення автоелектронної емісії. Порожній анод повністю вловлює відбиті електрони. Велика відстань між анодом і катодом запобігає електричним пробоям. Анод секційної трубки має фокусуючу котушку, що дозволяє регулювати розміри фокусної плями.

Рентгенівські трубки з винесеним анодом (рис. 6.2) застосовують для просвічування об'єктів з вільною порожниною всередині. Застосування трубок з винесеним анодом забезпечує одержання панорамного пучка випромінювання. Малі розміри фокусної плями (діаметр $\approx 0,3$ мм) дозволяють збільшити чіткість знімка.

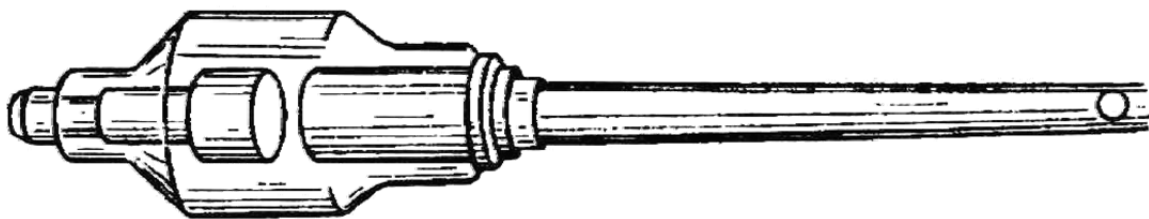


Рис. 6.2. Рентгенівська трубка з винесеним анодом

Анод трубки являє собою мідну порожню трубку, що далеко виступає за межі скляної колби. Вольфрамова мішень перебуває всередині цієї труби, наприкінці її консольної частини.

Ззовні на трубу надягають тонкостінну латунну оболонку, у проміжку між трубою і оболонкою циркулює охолоджувальна вода. Через велику відстань між катодом і анодом у рентгенівських трубках подібної конструкції електричне фокусування електронного пучка буває недостатнім, тому застосовують додаткове магнітне фокусування. Для цього на трубу анода надягають спеціальну фокусуючу котушку. При проходженні струму крізь котушку створюється магнітне поле, що звужує пучок електронів. Ступінь фокусування пучка регулюється зміною струму котушки.

Залежно від конструкції випромінюючої частини винесеного анода можуть бути отримані випромінювання різної форми:

- кільцевої (рис. 6.3, *а*);
- спрямованої (рис. 6.3, *б*);
- торцевої (рис. 6.3, *в*), анод має “прострільну” мішень — тонку мідну стінку.

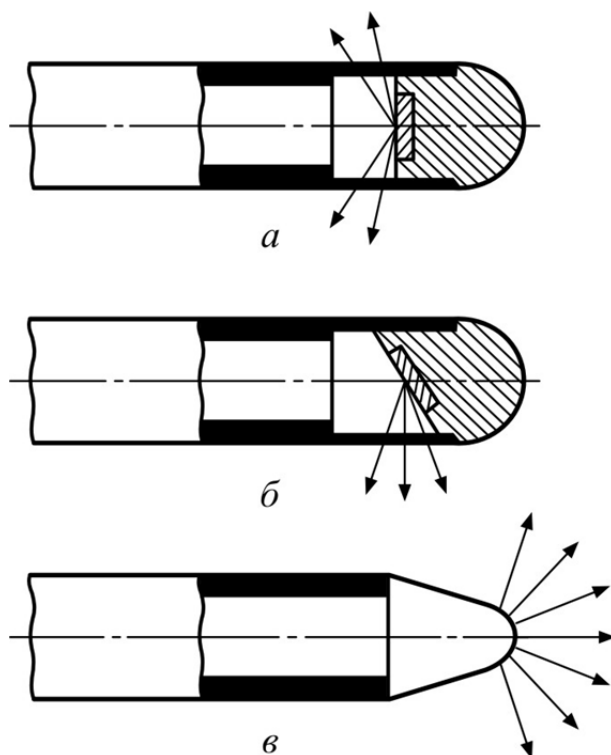


Рис. 6.3. Випромінююча частина порожнього анода: *а* — випромінювання кільцевої форми; *б* — випромінювання спрямованої форми; *в* — випромінювання торцевої форми

Рентгенівські трубки з обертовим анодом (рис. 6.4) застосовуються для просвічування об'єктів, що рухаються, у тому випадку, коли потрібно отримати мінімальний оптичний фокус при великій потужності.

Ці трубки мають обертову вольфрамову мішень у формі усіченого конуса, на бічну поверхню якого спрямований потік електронів, що випускаються катодом.

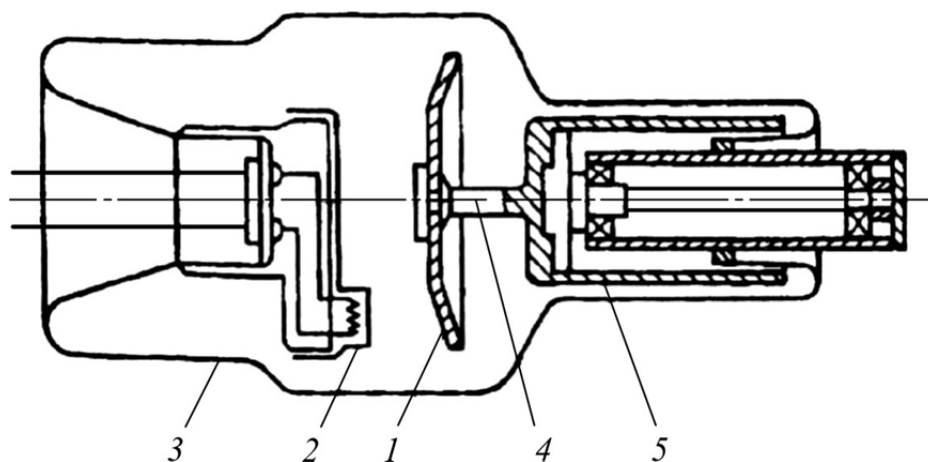


Рис. 6.4. Рентгенівська трубка з обертовим анодом: 1 — анод; 2 — катод; 3 — балон; 4 — стрижень анода; 5 — ротор

Це дозволяє підвищити потужність трубки у порівнянні з трубками з нерухомим анодом у десятки разів. Ефективний час експозиції становить 5 с, подальше збільшення знижує потужність.

Такі трубки можуть бути двофокусними, мати дві спіралі (велику і малу) та два різних фокуси — лінійних.

Імпульсні рентгенівські трубки (з “холодним” катодом). Вільні електрони в них одержують у результаті автоелектронної емісії при створенні у катода трубки електричного поля напруженістю більше 10^8 В/м.

Імпульсні рентгенівські трубки бувають дво- і триелектродні. У двоелектродних трубках анод у вигляді конуса (загострена W-голка) розташований по осі вакуумної колби. Катод — диск із загостреними кромками, розташований концентрично відносно анода.

Джерело анодної напруги — високовольтний імпульсний трансформатор з амплітудою напруги 200—350 кВ (на аноді). При подачі на електроди імпульсу напруги у трубці виникає автоелектронна емісія. У результаті між анодом і катодом відбувається електричний розряд, що носить характер пробою у вакуумі. Анод трубки при бомбардуванні його електронами дає ім-

пульс рентгенівського випромінювання тривалістю 10^{-9} — 10^{-6} с. Ресурс роботи імпульсних трубок менший, ніж у трубок розжарення.

На практиці радіаційної дефектоскопії широко застосовуються апарати двох класів:

- с постійним навантаженням;
- імпульсні (рис. 6.5).



Рис. 6.5. Класифікація рентгенівських апаратів для радіаційної дефектоскопії

Апарати-моноблоки застосовуються переважно там, де потрібно віддалити випромінювач від пульта керування на велику відстань (до 30 м і більше) та одержати велику маневреність випромінювача.

У цих апаратах рентгенівська трубка і високовольтний трансформатор змонтовані в єдиний блок, залитий мастилом або заповнений газом.

В апаратах-моноблоках, як правило, застосовують найбільш просту схему — напівхвильову без випрямляча. У цих апаратах на трубку подається струм безпосередньо від трансформатора високої напруги. Рентгенівська трубка пропускає струм тільки в одному напрямку протягом першого напівперіоду, а потім під час другого — вона замикає струм, працюючи, таким чином, як випрямляч. Застосування подібної схеми скорочує термін служби трубки, але простота пристрою апарата компенсує цей недолік.

Портативні апарати призначені для роботи у польових і монтажних умовах та застосовуються для трубопроводів (фронтальне або панорамне засвічування). У портативних апаратах-моноблоках використовують рентгенівські трубки з нерухомим анодом (двоелектродні до 420 кВ).

У високовольтних *апаратах стаціонарного виконання* використовують секційні рентгенівські трубки.

Апарати кабельного типу складаються з самостійного генераторного пристрою, випромінювача і пульта керування. Це нерухомі апарати для роботи у цехових і лабораторних умовах (рентгенівські трубки двоелектродні, з винесеним анодом та з обертовим анодом).

Імпульсні рентгенівські апарати конструктивно виконуються у двох блоках: рентгенівський та пульт керування. Вони застосовуються для контролю магістральних трубопроводів, суднобудівних конструкцій, важкодоступних авіаконструкцій, великогабаритних резервуарів. Основні недоліки цих рентгенівських апаратів — малий термін служби трубки і більш низька чутливість у порівнянні із звичайними апаратами. Їх переваги — мала маса, портативність, низьковольтові джерела живлення (12 В).

6.1.2. Гамма-апарати

Гамма-дефектоскопи призначені для виявлення прихованих дефектів зварних з'єднань. Для γ -дефектоскопії застосовуються штучно виготовлені ізотопи: Tm 170 (тулій), Ir 192 (іридій), Cs 137 (цезій), Co 60 (кобальт), Se 75 (селен).

Активну частину джерел поміщують в одну або дві ампули (з корозійної сталі та алюмінієвого сплаву), кожна з яких герметично заварена (рис. 6.6).

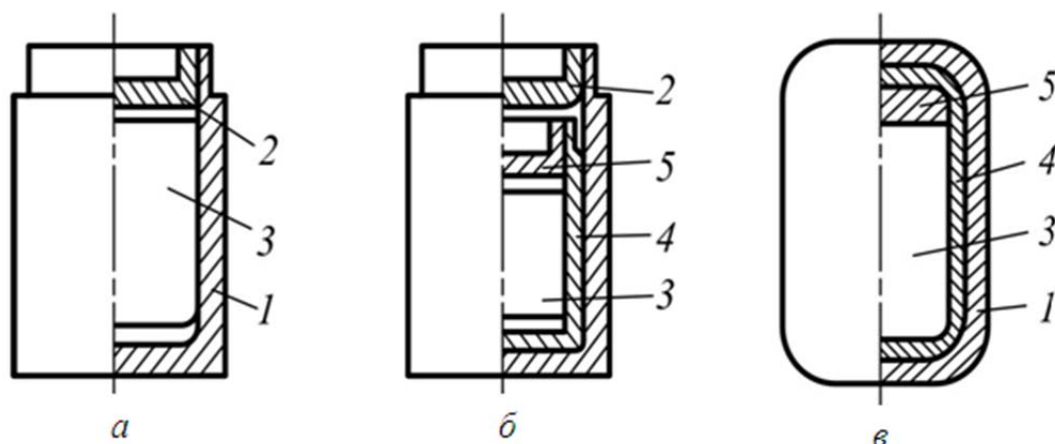


Рис. 6.6. Конструкція радіоактивних дефектоскопічних джерел: 1 — зовнішня ампула; 2, 5 — кришки; 3 — активна частина; 4 — активна ампула

Подвійне ампулювання проводять для джерел випромінювання з більшим радіаційним виходом і для джерел, активна частина яких виконана з рідких або сипучих матеріалів. В ампулах утримується певна кількість радіоактивного ізотопу (радіонукліда). Внутрішні розміри ампули визначають розміри активної частини джерела. Проекція активної частини джерела у напрямку просвічування на площину перпендикулярна цьому напрямку фокусним потоком джерела випромінювання.

Штучні радіонукліди отримують у ядерних реакторах при опроміненні речовин у нейтральних потоках або при обробці продуктів розпаду, що утворюються у реакторі.

Розміри активної частини джерела випромінювання залежать від активності радіонуклідів і їхнього процентного вмісту у радіоактивній хімічній сполуці, що використовується у джерелі.

Радіоізотопні дефектоскопи у найпростішому вигляді являють собою:

- радіаційну головку з радіоактивним ізотопом;
- привод джерела;
- ампулопровід;
- пульт керування.

Усі види дефектоскопів, що випускаються, можна розділити на два класи:

- загальнопромислового призначення (універсальні шлангові дефектоскопи);
- спеціального призначення для фронтального і панорамного засвічування (затворні).

Універсальні шлангові дефектоскопи (рис. 6.7). У них джерело випромінювання може подаватися у зону контролю з радіаційної головки по гнучкому ампулопроводу, де формується панорамний пучок випромінювання за допомогою змінних колімуючих головок.

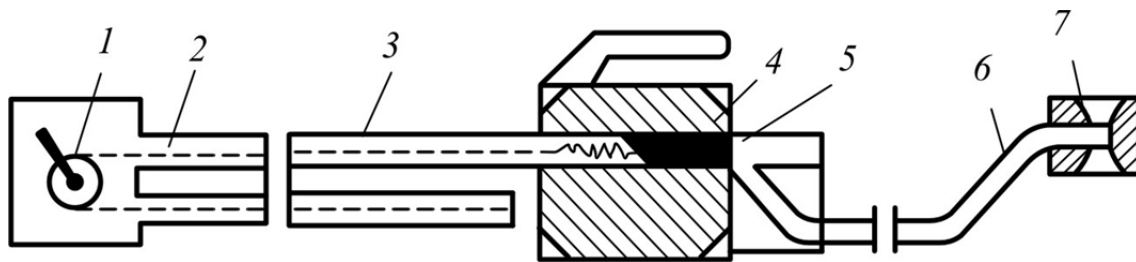


Рис. 6.7. Кінетична схема шлангового дефектоскопа типу “Гамма-рид”: 1 — приводне колесо; 2 — подаючий трос; 3 — сполучний шланг; 4 — радіаційна головка; 5 — тримач джерела випромінювання; 6 — ампулопровід; 7 — колімуюча головка

Переваги дефектоскопа цього виду — універсальність, можливість подачі малогабаритного джерела на відстань 5—12 м.

Застосовується для радіографічного контролю у нестандартних умовах — для контролю виробів у важкодоступних ділянках, посудинах високого тиску тощо.

Подача джерела з радіаційної головки у колімуючу головку проводиться по гнучкому або жорсткому ампулопроводу за допомогою гнучкого зубчастого троса, який перебуває у зачепленні з зубчастим приводним колесом.

Гамма-дефектоскопи для фронтального просвічування (рис. 6.8). Призначені для роботи у польових, монтажних умовах або у цеху, коли застосування універсальних шлангових дефектоскопів неможливо через обмежені розміри радіаційно-захисних зон.

Дефектоскопи з фронтальним (спрямованим) опроміненням широко застосовуються для контролю зварних з'єднань на будівництві нафтогазопроводів, у суднобудівній промисловості при контролі виробів великої товщини (однотипної конструкції).

Гамма-апарати для панорамного просвічування (рис. 6.8). Застосовуються для контролю магістральних нафтогазопроводів, посудин високого тиску у формі кулі або циліндра та інших виробів у вигляді порожніх тіл обертання.

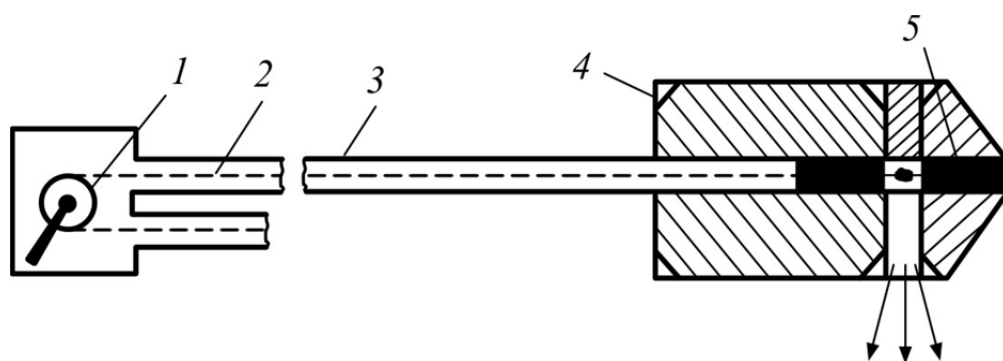


Рис. 6.8. Кінетична схема шлангового дефектоскопа для фронтального і панорамного просвічування типу “Магістраль”: 1 — привод керування; 2 — подаючий трос; 3 — сполучний шланг; 4 — радіаційна головка; 5 — тримач джерела випромінювання

Для подачі джерела випромінювання (переміщення тримача випромінювання у радіаційній головці) може бути використаний ручний і електромагнітний привод.

Привод забезпечує переміщення головки всередині трубопроводу на відстань до 1,5 км.

6.1.3. Джерела високоенергетичного фотонного випромінювання

Завдяки високій енергії випромінювання ці джерела доцільно використовувати при контролі виробів товщиною 70 мм і більше (гальмове випромінювання).

Лінійні прискорювачі (рис. 6.9, а). Виконані у вигляді вакуумної циліндричної прискорювальної камери з фокусуючим електромагнітом на поверхні циліндра.

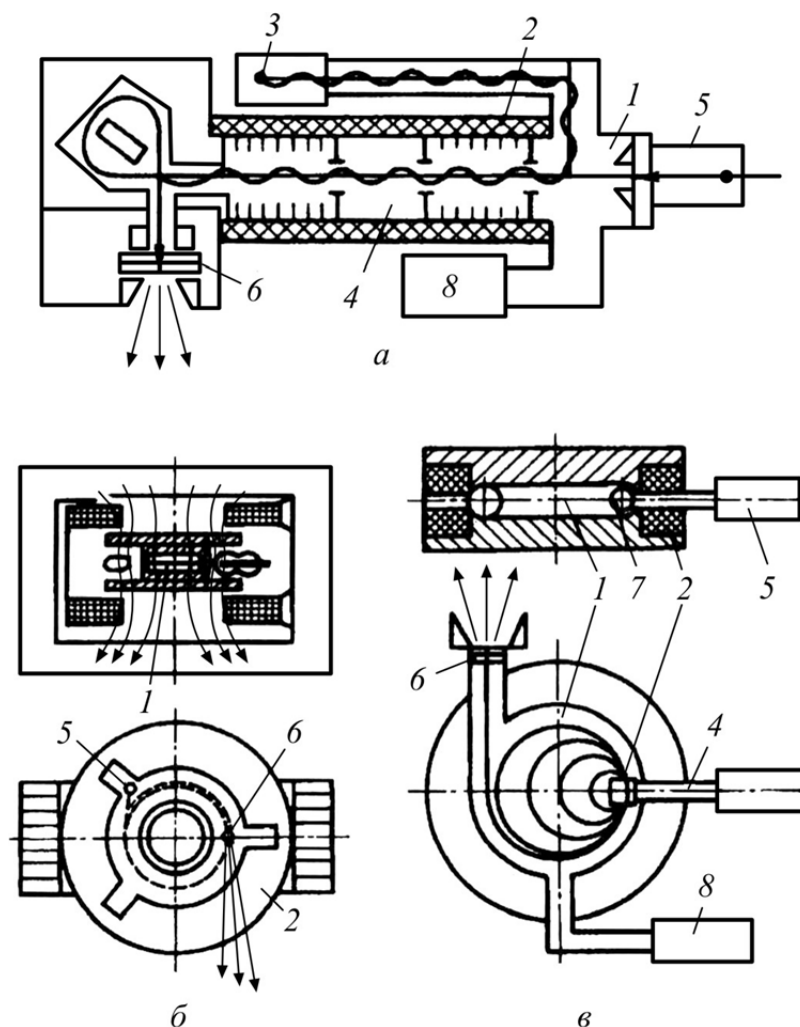


Рис. 6.9. Устаткування високоенергетичного фотонного випромінювання: а — лінійний прискорювач; б — мікротрон; в — бетатрон; 1 — камера; 2 — електромагніт; 3 — генератор; 4 — хвилевід; 5 — електромагнітна гармата; 6 — мішень; 7 — резонатор; 8 — вакуумний насос

Високочастотний генератор забезпечує отримання у хвилеводі електромагнітної хвилі, що протікає, електричне поле якої спрямоване по осі циліндра.

Електрони, що генеруються пучком, прискорюються електричним полем хвилі, яка протікає. Потім прискорені електрони попадають на мішень, у якій виникає гальмове випромінювання.

Переваги лінійних прискорювачів:

- велика інтенсивність гальмового випромінювання;
- малий фокус.

Їх застосовують при контролі зварних швів товщиною 400—500 мм.

Прискорювачі являють собою компактні установки, що складаються з випромінювача, блоку електроживлення, блоку теплообмінника, блоку керування.

Мікротрони (рис. 6.9, б). Виконані у вигляді вакуумної прискорювальної циліндричної камери з фокусуючим електромагнітом.

Генератор інjektує електрони, які по хвилеводу направляються у центр прискорювального проміжку резонатора.

Електрон, що потрапив у камеру, під дією магнітного поля починає рухатися по круговій орбіті, отримуючи щораз прискорення при потраплянні у зону прискорювального електричного поля, створюваного генератором.

Наприкінці циклу прискорення електрон попадає на мішень, у якій виникає гальмове випромінювання. Фокус плями 2—3 мм.

Бетатрон (рис. 6.9, в). Виконаний у вигляді прискорювальної троїдальної камери, розташованої між полями електромагніту. Електронна гармата генерує електрони в троїдальну камеру, де вони прискорюються у вихровому електричному полі, що створюється змінним магнітним полем.

Наприкінці циклу прискорення вони попадають на мішень, у якій виникає гальмове випромінювання з наскрізним спектром.

Фокус пучка випромінювання у бетатронів меншого розміру, ніж у лінійних прискорювачів і мікротронів.

Вони мають меншу інтенсивність і меншу вагу та невеликі габаритні розміри, застосовують їх при контролі зварних швів товщиною δ до 500 мм.

6.2. Детектори промислової радіографії

6.2.1. Радіографічні плівки

Основою радіографічної плівки (рис. 6.10) є гнучка прозора підложка (товщиною 100—200 мкм), виготовлена з негорючої пластмаси — ацетатцелюлози. На підложку з двох сторін наносять чутливу до випромінювання емульсію, що являє собою шар желатину товщиною 10—30 мкм, у якому рівномірно розподілені мікрочастинки бромистого срібла (3 мкм).

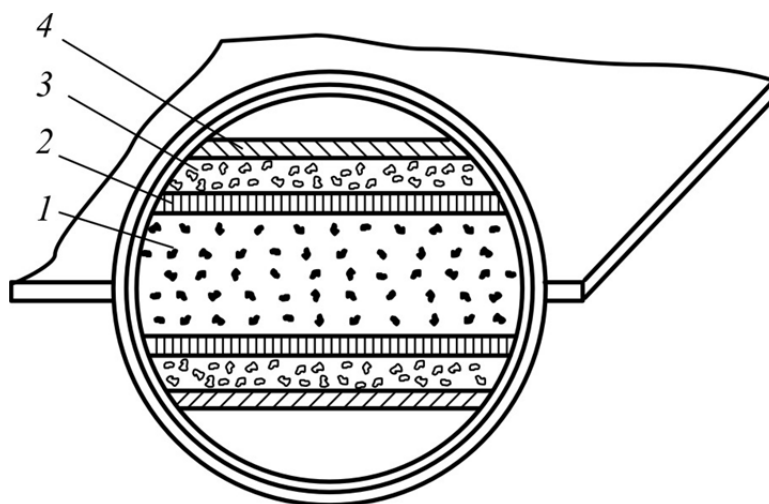


Рис. 6.10. Схема будови радіографічної плівки: 1 — основа; 2 — підшар; 3 — шар чутливої емульсії; 4 — захисний шар

Для збільшення міцності з'єднання між емульсією і підложкою застосовують шар спеціального клею, названий *підшаром*. Ззовні на емульсію наносять захисний шар з задубленого жела-

тину товщиною до 1 мкм, який охороняє емульсію від механічних ушкоджень.

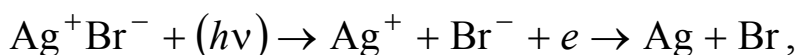
Емульсія радіографічної плівки реагує на проходження крізь об'єкт випромінювання, змінюючи параметри свого сріблястого шару і тим самим забезпечуючи реєстрацію протікаючого потоку випромінювання.

Крім того, плівки мають інтегруючу здатність реєструвати надзвичайно низькі потоки випромінювання за тривалий час просвічування у широкому діапазоні енергій.

Фотографічна емульсія містить у якості речовини, чутливої до випромінювання, галоїдну сіль срібла (як правило, бромисте срібло з невеликою домішкою йодистого), розподілену рівномірно у вигляді зерен у тонкому шарі желатину.

Емульсію наносять на обидві сторони підложки (целюлози, скла, паперу тощо). При опроміненні плівки проникаючим випромінюванням у кристалах бромистого срібла відбуваються зміни, які призводять до того, що кристал стає вільним до проявлення, тобто до відновлення до металевого срібла під дією проявника.

Іонізуюче випромінювання у кристалах бромистого срібла викликає фотохімічні перетворення:



тобто під впливом кванта випромінювання ($h\nu$) негативний іон броду Br^- втрачає свій валентний електрон і стає нейтральним атомом Br.

Цей атом переміщується до поверхні кристала, де зв'язується з желатином, а електрон, що звільнився, взаємодіючи з вільним позитивним іоном Ag^+ , перетворює його у нейтральний атом срібла Ag. Коли у результаті дії випромінювання у кристалі бромистого срібла накопичується певна кількість атомів відновленого металевого срібла, то у ньому утворюється так званий центр відкритого зображення.

Для перетворення прихованого зображення у видиме радіографічну плівку обробляють у розчині проявника. У проявнику від-

бувається хімічна реакція відновлення бромистого срібла у металеве. Причому процес відновлення йде вибірково — найбільш ефективно він протікає у кристалах, що мають центри прихованого зображення. Ці центри можна розглядати як частки-каталізатори, що сприяють відновленню іонів срібла у повному обсязі отриманих кристалів. Зерна відновленого металевого срібла надають плівці темне фарбування, тобто визначають її прозорість.

У загальному випадку виявлене зображення являє собою рисунок з почорнілих і прозорих місць на плівці, які відповідають відповідно ділянкам емульсії, підданим і не підданим дії випромінювання. Ступінь почорніння будь-якої ділянки зображення залежить від кількості зерен металевого срібла на ній і визначається інтенсивністю випромінювання I та часом t його впливу на емульсію.

Добуток $I \times t$ називається *експозицією*. Щоб зафіксувати отримане зображення, тобто зробити його нечутливим до світла, виявлену плівку обробляють у розчині закріплювача. Закріплювач розчиняє кристали бромистого срібла, які не прореагували з проявником.

Радіографічні плівки є основним засобом реєстрації проходження іонізуючого випромінювання. За властивостями і призначенням рентгенівські плівки, що випускаються, поділяються на дві групи (табл. 6.1):

- *безекранні* — для використання без флуоресцентних екранів або з металевими посилюючими екранами;
- *екранні* — із застосуванням флуоресцентних посилюючих екранів.

Основними характеристиками плівки є:

- спектральна чутливість Q ;
- контрастність γ_d ;
- роздільна здатність.

Спектральна чутливість Q являє собою здатність отримувати різні щільності почорніння при проявленні після опромінен-

ня іонізуючими випромінюваннями різної енергії з однаковою експозиційною дозою.

Табл. 6.1. Характеристики радіографічних плівок

Тип плівки	Чутливість Q, P^{-1}	Коефіцієнт контрастності γ_d	Роздільна здатність, mm^{-1}	
РТ—1	50—60	3,5	68—130	безекранні
РТ—3	20—30	3,9	80—110	
РТ—4	9—12	3,5	110—140	
РТ—5	3—5	3,5	140—180	
РТ—2	350	3	73—78	екранні
РМ—1	300	3	73—78	
РМ—2	400	2,8	78	
РМ—3	300	2,7	78	

На практиці спектральна чутливість Q характеризується величиною, зворотною відношенню дози X , необхідної для отримання однакової щільності почорніння D :

$$Q = \frac{1}{X}. \quad (6.3)$$

Оптимальна спектральна чутливість плівки досягається при напрузі на рентгенівській трубці в інтервалі 50—110 кВ.

Щільність почорніння плівки D є логарифм відношення яскравості падаючого світла L_0 до яскравості світла, що пройшло через плівку L_{π} :

$$D = \lg \frac{L_0}{L_{\pi}}. \quad (6.4)$$

При просвічуванні виробів рентгенівським або γ -випромінюваннями найбільш оптимальні значення щільності почорніння лежать у межах $D = 1,8—2,2$, тобто кращу радіографічну чутливість можна отримувати саме за цих значень щільності почорніння.

Контрастність γ_d — відношення збільшення щільності почорніння до збільшення відносного часу експозиції:

$$\gamma_d = \frac{dD}{d(\lg X)}. \quad (6.5)$$

При оптимальних значеннях щільності почорніння ($D = 1,5—2,2$) контрастність екранних плівок лежить у інтервалі $\gamma_d = 2,5—3$, а безекранних плівок — $2,5—4,5$.

Роздільна здатність визначає властивості плівки роздільно реєструвати близько розташовані дефектні ділянки.

Кількісно ця характеристика оцінюється кількістю штрихових ліній однакової товщини, помітних на ділянці довжиною 1 мм.

6.2.2. Ксерорадіографічні пластини

Ксерорадіографічні пластини застосовуються у методі переносу зображення.

Ксерорадіографічні пластини — це напівпровідникові пластини, які реагують на проходження крізь об'єкт рентгенівського або γ -випромінювання у вигляді зміни параметрів електричного поля.

Електричне поле створюється таким чином, щоб величина залишкового заряду, що утворює приховане електростатичне зображення внутрішньої макроструктури контрольованого об'єкта, була пропорційна зміні інтенсивності випромінювання.

Ксерорадіографічна пластина є проміжним перетворювачем радіаційної інформації у електростатичному зображенні, що потім переноситься на папір і закріплюється за допомогою барвників — пігментів.

Конструктивно ксерорадіографічні пластини виконані у вигляді полірованої провідної підложки (алюміній, латунь або скло, папір з провідним покриттям), на яку тонким шаром нанесені напівпровідникові матеріали (аморфний селен, сірка, антрацен та ін.). Чутливий шар наносять у вакуумі.

Питомий опір напівпровідникових шарів становить $10^{12}—10^{15}$ Ом·см до опромінювання та $10^7—10^{13}$ Ом·см — при опромінюванні.

Роздільна здатність ксерографічної пластини теоретично необмежена, оскільки електростатичне поле не має зернистості. Однак практично вона залежить від величини пилинок речовини, що проявляє, і способу проявлення.

При сухому способі проявлення роздільна здатність на ксерорадіограмі може досягати 60 ліній на 1 мм; при використанні рідинних проявників — 120 ліній на 1 мм. Однак на практиці вона не перевищує 8—12 ліній на 1 мм в залежності від типів пластин, що випускаються, і процесів перенесення зображення.

Ксерорадіографічні пластини використовують з металевим і флуоресцентним екранами, які наносять між чутливим шаром і підложкою.

6.2.3. Металеві активуючі екрани-перетворювачі

При застосуванні нейтронної радіографії на теплових або проміжних нейтронах з використанням методу переносу зображення застосовують екрани-перетворювачі. Вони реагують на проходження крізь об'єкт потік нейтронів у вигляді утворення наведеної активності, пропорційної потоку нейтронів, яка має порівняно великий період напіврозпаду.

Ці екрани забезпечують посилення інформації і застосовуються перетворювачами нейтронної інформації у приховане активаційне зображення, що надалі переноситься на радіографічні плівки.

Перевага подібних екранів — їхня нечутливість до супутнього γ -випромінювання, джерелом якого може бути сам контрольований виріб.

Екранні матеріали: індій — In 115 ($\tau^{1/2} = 54$ хв.), золото — Au 197 ($\tau^{1/2} = 2,7$ доби), родій — Rh 103 ($\tau^{1/2} = 4—5$ хв.), диспрозій — Dy 164 ($\tau^{1/2} = 140$ хв.).

Індій забезпечує отримання радіограм за 5—10 хв. при інтенсивності реактивного потоку теплових нейтронів $10^5 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, а диспрозій — при інтенсивності $6 \cdot 10^3 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Золото менш

зручне внаслідок великого періоду напіврозпаду, але воно забезпечує кращі результати з роздільної здатності. Родій застосовують при інтенсивності $5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ та використанні високочутливих плівок.

6.2.4. Посилюючі металеві і флуоресцентні екрани

Їх застосовують для скорочення часу просвічування.

Посилююча дія екранів характеризується *коефіцієнтом підсилення* — відношенням часу просвічування без екрана до часу просвічування з екраном.

Посилююча дія металевих екранів заснована на звільненні у них вторинних електронів під дією іонізуючого випромінювання.

Звільнені електрони діють на емульсію плівки і викликають додаткову фотохімічну реакцію, що підсилює дію первинного випромінювання.

Металеві екрани рекомендується застосовувати з безекранними плівками РТ—1, РТ—3, РТ—4 і РТ—5. Ці екрани виконані у вигляді свинцевої фольги з $\delta = 0,05—0,5 \text{ мм}$, нанесеної на гнучку пластмасову підложку.

Посилююча дія флуоресцентних екранів обумовлена додатковим впливом на плівку світіння, що виникає у люмінофорі під дією рентгенівського або γ -випромінювання.

У якості люмінофорів використовують:

- сірчистий цинк SnS;
- сірчистий кадмій CdS;
- вольфрамокислий кальцій та ін.

Ці екрани виконані у вигляді пластмасових або картонних підложок, на які нанесений шар люмінофора. Їх застосовують з екранними плівками РТ—2, РМ—1, РМ—2, РМ—3.

При використанні флуоресцентних екранів роздільна здатність погіршується внаслідок крупнозернистості самих екранів. Це призводить до зниження виявлення вузьких непроварів, трі-

щин, дрібних дефектів. Для відповідальних зварних конструкцій ці екрани не застосовують.

Застосування екранів (металевих і флуоресцентних) дозволяє знизити час експозиції у 2—5 разів. Металеві екрани знижують час експозиції у 2—3 рази і підвищують чутливість, тому їх більш широко застосовують.

У теперішній час використовують флуорометалеві посилюючі екрани, виконані у вигляді свинцевої підложки з нанесеним на неї шаром люмінофора. Ці екрани мають більший коефіцієнт підсилення, ніж металеві, і забезпечують кращу чутливість, ніж флуоресцентні.

6.3. Матеріали для радіографічного контролю

6.3.1. Еталони чутливості

Для визначення відносної чутливості радіографічного контролю використовують спеціальні еталони.

Еталони являють собою спеціальну пластину з ідеальними дефектами, контури яких різко окреслені.

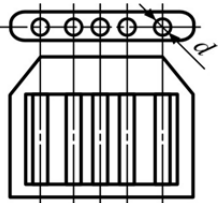
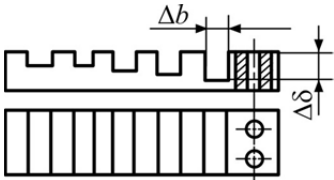
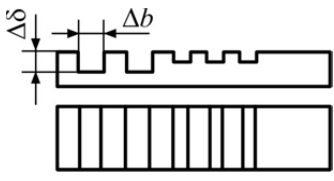
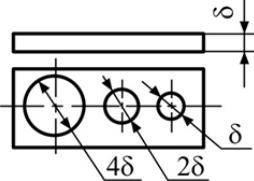
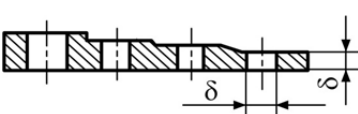
На межі дефектів еталона відбувається різка зміна сумарної товщини просвічуваного матеріалу, у той час як у реальному металі — поступова зміна товщини на межі дефекту—бездефектної зони.

Крім того, реальні дефекти часто розосереджені і мають неправильні обриси. Внаслідок цього пори або шлакові включення, діаметри яких дорівнюють відповідно висоті прорізу або діаметру дроту еталона, можуть бути не виявлені, незважаючи на те, що зображення штучних дефектів чітко видні.

Застосовувані еталони чутливості представлені в табл. 6.2.

Канавкові і дровові еталони мають чотири типи розмірів кожний. На канавковому еталоні є шість канавок, глибина поруч розташованих канавок різниться в 1,39 рази.

Таблиця 6.2. Еталони чутливості

Тип еталона	Ескіз	Чутливість, %, для $\delta = 10\text{—}50\text{ мм}$	Стандарти
Дротовий*		1	Європейських країн, Великобританії, Японії, РФ
Канавковий з канавками постійної ширини і змінної глибини**		0,5	Європейських країн
Канавковий з канавками змінних ширини і глибини		1	РФ
Пластинчастий з отворами		1,5—2	США, ASME Code, РФ
Східчастий з отворами		2—2,5	Міжнародного інституту зварювання (МІЗ)

Примітка. *Геометричний ряд значень d з підставою 1,25. **Арифметичний ряд значень $\Delta\delta$.

Дротовий еталон являє собою пластиковий чохол з установленими у ньому семи дротами різного діаметра (розташовані поруч, різняться в 1,25 рази).

Матеріал еталона повинен бути аналогічний матеріалу контролюваного виробу.

Еталони маркують буквами і цифрами: букви позначають матеріал еталона; цифри — номер еталона (Cu2, Al3, Ti4, Fe1).

Обидва еталони чутливості рівнозначні, і вибір їх визначається умовами роботи та зручністю використання.

6.3.2. Касети, маркувальні знаки, тримачі

Перед проведенням радіографічного контролю плівку разом з посилюючими екранами поміщають у спеціальну світлозахисну касету. Застосовують гнучкі і тверді касети.

Гнучка касета являє собою подвійний конверт з чорного світлонепроникного паперу або дермантина.

У менший конверт укладають плівку з посилюючими екранами, а потім заряджений конверт вставляють у інший, більших розмірів, забезпечуючи тим самим світлонепроникність касети.

У касетах передбачені кишені для встановлення маркувальних знаків і еталонів чутливості.

Тверді касети виконані з алюмінієвих сплавів і пластмас. Їх можна застосовувати тільки при контролі виробів простої форми, коли не потрібно згинати плівку.

У гнучких касетах є повна гарантія щільного притиснення плівки до посилюючого екрана.

Залежно від типу виробу і інтенсивності іонізуючого випромінювання застосовують різні схеми зарядки радіографічних касет (табл. 6.3).

Зарядка касет двома плівками застосовується при контролі особливо відповідальних виробів і виробів змінної товщини (у цьому випадку повинно бути дві плівки різної чутливості).

З метою позначення виробу на дільницях контролю застосовують маркувальні свинцеві знаки, які розміщують у касетах. Після просвічування їхнє зображення відбивається на знімку.

Гнучкі касети встановлюють на феромагнітні матеріали за допомогою магнітних тримачів типу МД—1.

На немагнітні матеріали касети кріпляться за допомогою гумових поясів і ременів.

Таблиця 6.3. Схеми зарядки радіографічних касет

Спосіб зарядки	Наявність плівок у касеті	
	одна	дві
Без екранів		
З посилюючими металевими екранами		
З посилюючими флуоресціюючими екранами		
З посилюючими металевими і флуоресціюючими екранами		
Позначення. — радіографічна плівка; — посилюючий металевий екран; — посилюючий флуоресціюючий екран		

6.4. Технологія контролю

Для випробувань зварних з'єднань найбільш широко застосовують методи радіографічного контролю, при виконанні яких у якості детектору іонізуючих випромінювань використовують рентгенівські плівки.

При радіографії зварних з'єднань дотримуються наступної послідовності:

- обирають джерело випромінювання;
- обирають радіографічну плівку;
- визначають оптимальні режими просвічування;
- підготовляють контрольований об'єкт;
- просвічують об'єкт;
- здійснюють фотообробку знімків;
- здійснюють розшифрування знімків;
- оформляють звіт результатів контролю.

Розглянемо ці операції більш детально.

1. Вибір джерела випромінювання залежить від:

- заданої чутливості контролю;
- щільності і товщини контрольованого матеріалу;
- продуктивності контролю;
- конфігурації контрольованої деталі;
- доступності її для контролю тощо.

Вибір обумовлено технічною доцільністю і економічною ефективністю.

2. Вибір плівки визначається:

- товщиною і щільністю матеріалу просвічуваного об'єкта;
- необхідною чутливістю і продуктивністю контролю.

Рекомендується використовувати:

- РТ—1 — для великих товщин;
- РТ—2 — для деталей різної товщини;
- РТ—3, РТ—4 — для алюмінієвих сплавів і чорних металів невеликої товщини;
- РТ—5 — для виявлення незначних дефектів.

Орієнтовний вибір радіографічної плівки доцільно проводити за номограмами (рис. 6.11).

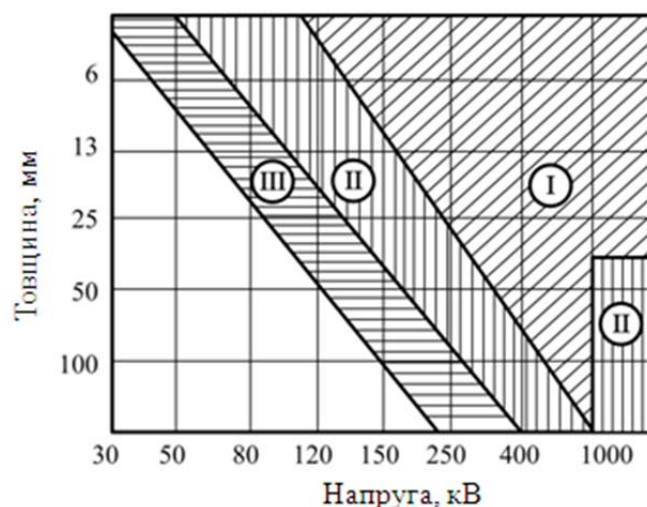


Рис. 6.11. Номограма для вибору плівки: I — РТ—5, РТ—4; II — РТ—1, РТ—3; III — РТ—2

3. Визначення оптимальних режимів просвічування залежить від схеми просвічування, фокусної відстані та експозиції.

Схеми контролю зварних з'єднань (ГОСТ 7412—82) представлені на рис. 6.12. При виборі схеми просвічування необхідно пам'ятати, що непровари і тріщини можуть бути виявлені у тому випадку, якщо площини їхнього розкриття близькі до напрямку просвічування ($0—10^\circ$), а розкриття їх не менше 0,05 мм.

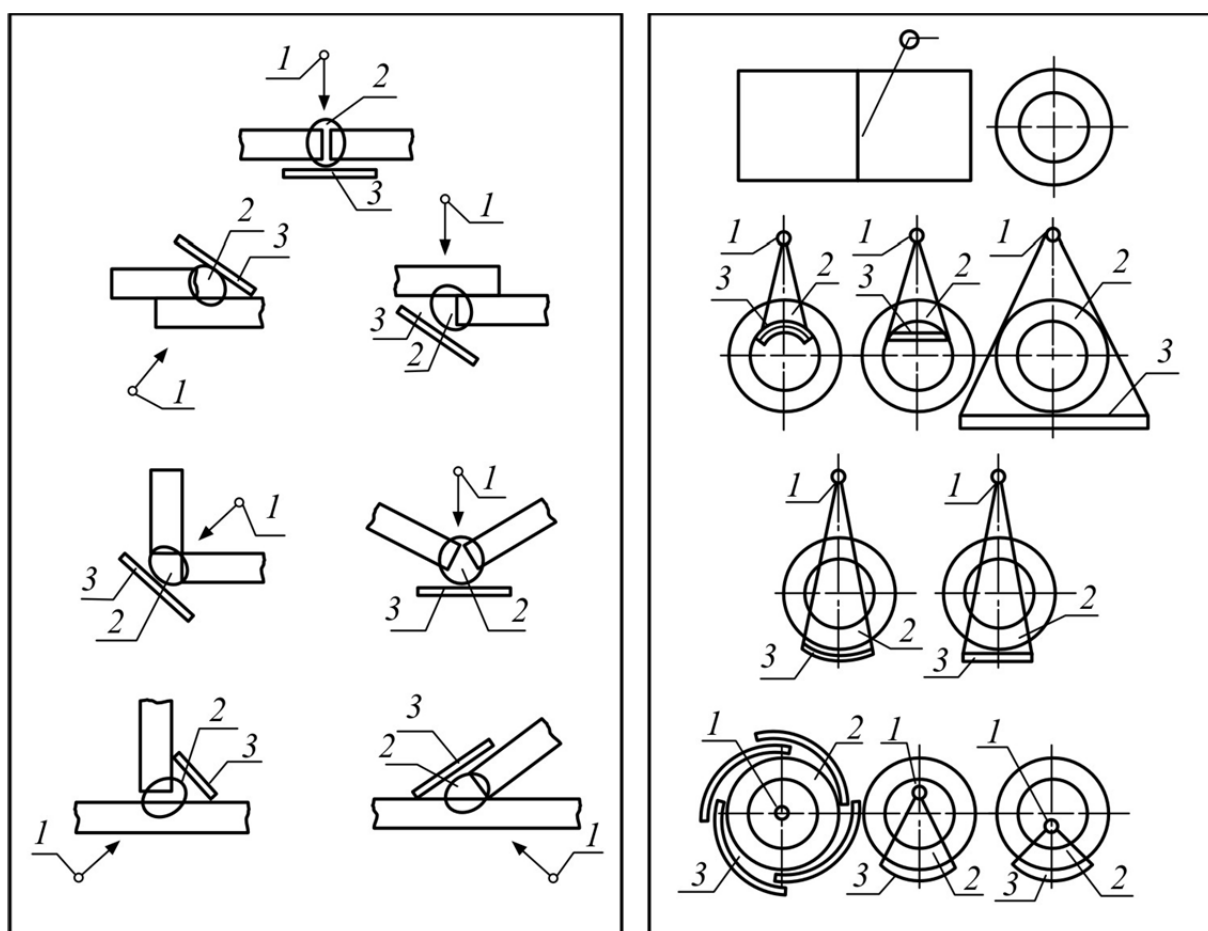


Рис. 6.12. Схема просвічування зварних з'єднань: 1 — джерело випромінювання; 2 — зварне з'єднання; 3 — плівка

Після вибору схеми просвічування підсилюють довжину фокусної відстані і час експозиції. Фокусну відстань розраховують залежно від схеми просвічування, товщини металу і розмі-

рів контрольованої ділянки зварного з'єднання відповідно до рекомендацій ГОСТ 7512—82.

На практиці при рентгенографії фокусну відстань при вільному доступі до контрольованого об'єкта встановлюють у межах 500—1000 мм. Час експозиції (витримка) при використанні рентгенівського випромінювання прямо пропорційний квадрату фокусної відстані і зворотно пропорційний чутливості рентгенівської плівки та залежить від енергії і потужності іонізуючого випромінювання, товщини і щільності просвічуваного металу, коефіцієнту підсилення екранів та ін.

Розрахунковим шляхом витримку визначити досить складно, тому на практиці користуються таблицями, побудованими на підставі експериментальних даних, спеціальними лінійками, графіками, експонетрами та номограмами.

Номограми будуються для певної фокусної відстані. Експозиція, підібрана по номограмі, уточнюється за допомогою пробних знімків. При просвічуванні необхідно дотримуватися заходів безпеки проти радіоактивного випромінювання.

4. Підготовка контрольованого об'єкта до просвічування:

- виріб повинен бути ретельно оглянутий і очищений від шлаків, бруду тощо;
- зовнішні дефекти необхідно видалити, оскільки їхнє зображення на знімку може затемнити зображення внутрішніх дефектів.

Зварне з'єднання поділяється на ділянки контролю, які маркуються для того, щоб після просвічування можна було точно вказати розташування виявлених внутрішніх дефектів. Касети і плівки маркують у тому ж порядку, що і відповідні ділянки контролю.

5. Просвічування об'єкта. Після виконання перерахованих операцій і забезпечення безпечних умов роботи приступають до просвічування виробу.

Джерело випромінювання встановлюють таким чином, щоб під час просвічування воно не могло вібрувати або зрушитися з місця, інакше зображення на плівці виявиться розмитим. Після закінчення часу просвічування касети з плівкою знімають і експоновану плівку піддають фотообробці.

6. Фотообробка знімків складається з наступних операцій:

- проявлення;
- проміжне промивання;
- фіксування;
- промивання;
- сушіння плівки.

7. Розшифрування знімків. Завдання розшифровувача полягає у виявленні дефектів і встановленні їх видів та розмірів.

При вимірі розмірів зображення дефектів до 1,5 мм застосовують вимірювальні лупи; понад 1,5 мм — прозору лінійку.

При розшифруванні дефектів необхідно відрізнити дефекти, які викликані поганою якістю плівки або неправильним поведінням з нею у процесі фотообробки, від дефектів контрольованого матеріалу.

Оцінка якості виробу проводиться по одному знімку, якщо він відповідає наступним вимогам:

- на рентгенограмі повинне бути чітко видно зображення зварного з'єднання з посиленням шва по всій довжині знімка;
- на знімку не повинно бути плям, подряпин, відбитків пальців, підтікань від поганого промивання плівки і неправильного поводження з нею;
- на знімку повинні бути чітко видні зображення еталонів.

У протилежному випадку просвічування проводять повторно.

8. Оформлення результатів контролю. Результати контролю записують, використовуючи скорочені позначення дефектів: Т — тріщина, Н — непровар, П — пори, Ш — шлакові включення,

В — вольфрамові включення, ПД — підріз, СМ — зсув кромок,
Р — різна товщина стінок, ОБ — ослаблення кореня шва.

Контрольні запитання

1. Які існують види радіографії і де вони застосовуються?
2. Охарактеризуйте рентгенівські апарати.
3. Що таке дійсна та ефективна фокусна плями?
4. На які види поділяються рентгенівські трубки за конструкціями і способами одержання та формування пучка випромінювання?
5. Охарактеризуйте гамма-апарати.
6. Що таке універсальні шлангові дефектоскопи?
7. Для чого використовуються гамма-апарати для панорамного просвічування?
8. Охарактеризуйте лінійні прискорювачі.
9. Що таке бетатрон? Для чого він використовується?
10. Охарактеризуйте радіографічні плівки. На які групи вони поділяються за властивостями та призначенням?
11. Що таке щільність почорніння плівки?
12. Для чого застосовуються ксерорадіографічні пластини?
13. Охарактеризуйте посилюючі екрани.
14. Що таке еталони чутливості? Які вони бувають?
15. Охарактеризуйте технологію контролю при радіографії.

7. МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ГЕРМЕТИЧНОСТІ АБО КОНТРОЛЬ ТЕЧІЄШУКАННЯМ

Основними експлуатаційними вимогами до виробів замкнутого типу (посудини, трубопроводи та ін.) є непроникність або герметичність їхніх стінок і зварних з'єднань.

Герметичність — це властивість виробу обмежувати проникнення рідини або газу крізь елементи конструкцій і їхнього з'єднання. Ступінь герметичності вимірюють величиною течії (витоку) в одиницю часу (тобто вимірюється обсяг речовини, що витікає або натікає за одиницю часу при певному перепаді тиску). Випробування виробів на герметичність виконують із застосуванням пробних речовин (рідин або газів), які легко проникають крізь наскрізні дефекти і добре помітні візуально або за допомогою приладів (течієшукачів), або інших засобів реєстрації.

Контроль течієшуканням дозволяє виявити у зварних з'єднаннях і основному металі виробів наскрізні дефекти типу тріщин, непроварів, газових пор, свищів, пропалів та ін.).

За своїм походженням ці дефекти можуть бути первинними і вторинними. До вторинних відносяться холодні і втомлювальні тріщини, наскрізні пори і свищі, утворені під дією агресивного середовища, вібраційного навантаження тощо.

Величину наскрізного дефекту через неможливість виміру його лінійних розмірів умовно оцінюють потоком пробної речовини, що протікає крізь дефект за одиницю часу.

Характер руху рідини або газу крізь течії залежить від розмірів течії, складу середовища, перепаду тиску.

Вибір методу течієшукання визначається:

- рівнем вимог до ступеню герметичності випробуваних об'єктів;
- напрямком і величиною робочого газового навантаження на оболонку;

- пробними речовинами, доступними до застосування.

Напрямок і величина навантаження при випробуваннях по можливості повинні збігатися з робочим тиском у зв'язку з можливими деформаціями матеріалу оболонки і появою течії.

Відповідно до ГОСТ 18353—79 методи контролю течієшуванням поділяються на три види:

- капілярні;
- компресійні;
- вакуумні.

Всі ці методи, у свою чергу, залежно від виду і способів індикації пробної речовини, апаратури і технологічних особливостей застосування мають наступні різновиди (рис. 7.1).

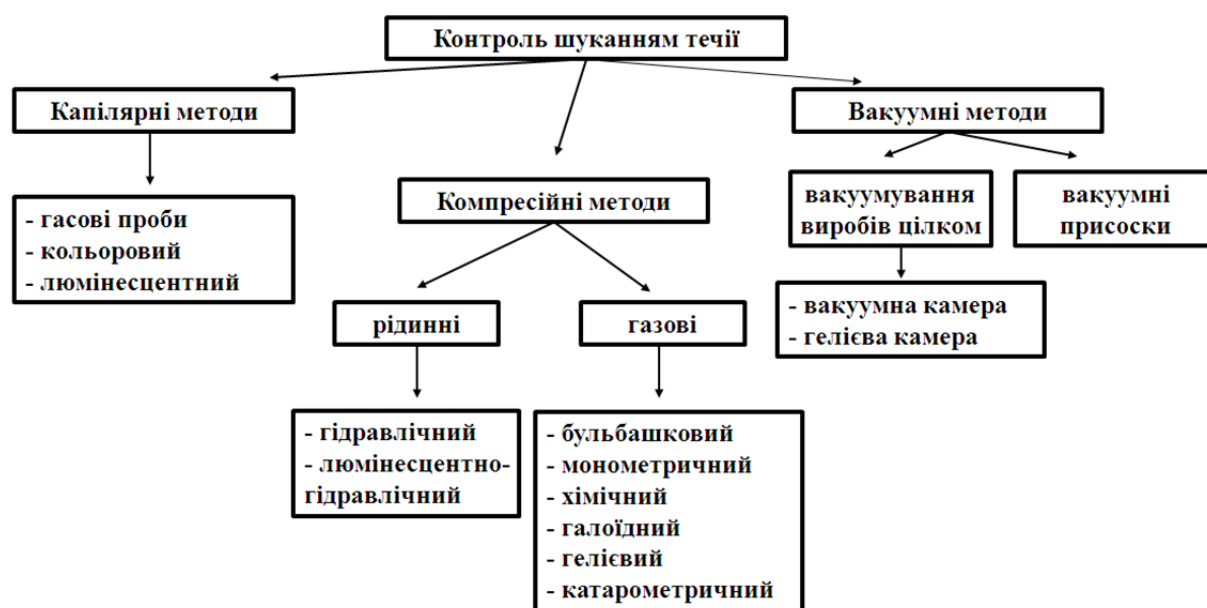


Рис. 7.1. Різновиди методів контролю течієшуванням

7.1. Капілярні методи

Капілярні методи контролю засновані на явищі капілярного проникнення рідини, що має високу змочувальну здатність, у наскрізні дефекти. За даним методом контролю на одну поверх-

ню виробу, попередньо очищену від забруднень, густо наносять проникаючу рідину, а на іншу — адсорбуюче покриття.

Наприклад, за методом газових проб використовують у якості проникаючої рідини гас, а адсорбуючого покриття — крейдову обмазку (350—450 г/л). На поверхню огляду наносять крейдову обмазку, а з іншої сторони змочують гасом і витримують за розрахунковим часом (15—60 хв.).

Дефекти виявляються на пофарбованій крейдовій стороні у вигляді іржавих смуг і плям. Газовими пробами можна виявляти дефекти діаметром $(15—20) \cdot 10^{-5}$ мм. Цей метод застосовується при контролі зварних з'єднань наливних ємностей, нафтових резервуарів, цистерн і інших виробів, у яких є можливим доступ до зварних швів з обох боків.

При кольоровому методі до складу пробної рідини додають речовини-пенетранти — фарби, а при люмінесцентному методі — люмінофори.

7.2. Компресійні методи

Компресійні методи контролю засновані на створенні у випробуваному виробі (замкнутій системі) надлишкового тиску пробної речовини і реєстрації на зовнішній поверхні виробу місця течії пробної речовини.

7.2.1. Рідинні методи

Гідравлічний метод течієшукування застосовується у якості обов'язкового при контролі різних замкнутих систем (посудини тиску, парові котли, нафтохімапаратура та ін.), що працюють під тиском.

Контрольований виріб заповнюють робочою рідиною або водою, герметизують, а потім за допомогою гідравлічного насоса створюють у ньому надлишковий тиск і витримують під цим тиском деякий час, після чого роблять візуальний огляд зовнішньої

поверхні виробу. Ознакою дефекту є поява крапель рідини або запотівання зовнішньої поверхні.

Цей метод дозволяє виявляти дефекти течії діаметром $\approx 10^{-3}$ мм. Гідравлічним випробуванням повинні передувати радіаційний або ультразвуковий контроль, якщо вони передбачені технічними умовами.

Люмінесцентно-гідравлічний метод відрізняється тим, що до складу пробної речовини додають люмінофор, і огляд зовнішньої поверхні проводять в ультрафіолетовому світлі.

Як правило, випробування на герметичність сполучають з гідравлічними випробуваннями виробу на міцність і проводять їх під тиском, що у 1,1—1,5 разів перевищує робочий.

При контролі в умовах серійного виробництва, наприклад, спірально- і поздовжньо-шовних труб для газонафтопроводів, застосовують спеціальні дослідні стенди.

Гідравлічні методи іноді застосовують і для відкритих посудин, наприклад, відстійників. У цих випадках контроль посудин здійснюють наливом у них рідини, обстукуванням і оглядом зовнішньої поверхні швів.

7.2.2. Газові методи

Ці методи є більш чутливими, ніж рідинні, оскільки пробна речовина (газ) значно легше проходить крізь дрібні наскрізні дефекти.

Газові методи контролю застосовують тільки для замкнутих об'ємів.

Бульбашковий метод полягає у зануренні виробу у водяну ванну. За допомогою повітря створюється надлишковий тиск (рис. 7.2). Реєстрація місць течії відбувається за бульбашками, що з'являються.

Якщо розмір виробу великий і у ванну помістити його не можливо, то зовнішню поверхню виробу покривають піноутво-

рюючою речовиною (мільним розчином) та місце течії визначають за мільними бульбашками.

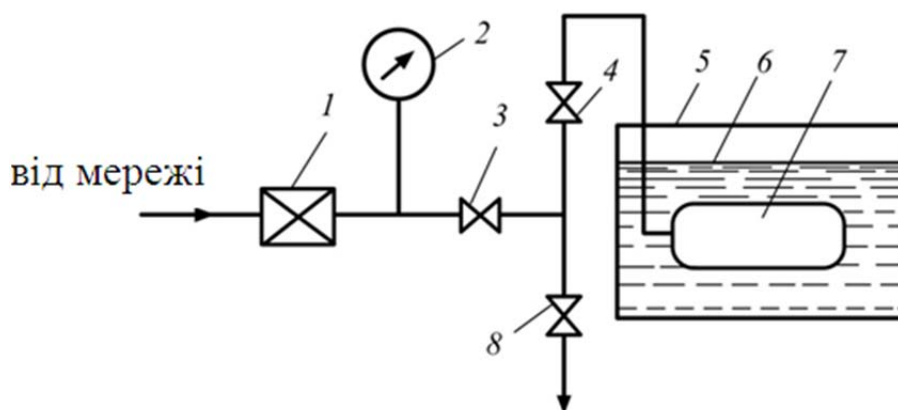


Рис. 7.2. Схема бульбашкового методу: 1 — редукторний клапан; 2 — манометр; 3 — клапан; 4 — запобіжний клапан; 5 — бак; 6 — рідина; 7 — контрольований виріб; 8 — вентиль скидання тиску

Бульбашковий метод дозволяє виявити течії діаметром до 10^{-3} мм.

Манометричний метод полягає у реєстрації зміни тиску всередині посудини, що відбувається у випадку його негерметичності, за допомогою манометрів за певний період (10—100 год.). Дослідний тиск, як правило, становить 1,1—1,2 від робочого.

Випробування під високим тиском повітря досить небезпечні, тому проводять їх рідко та з суворим дотриманням вимог безпеки. Ці випробування проводять для контролю загальної герметичності посудин. Його можна застосовувати для періодичної перевірки експлуатаційного устаткування, що працює під тиском, без яких-небудь додаткових операцій (рис. 7.3, 7.4).

Хімічний метод заснований на використанні для індикації течії хімічних реакцій пробної речовини з індикаторним шаром, нанесеним на зовнішню поверхню випробуваного шва.

На зовнішню поверхню наносять марлю або папір, змочений у 5 % розчині азотнокислої ртуті або розчині фенолфталату. Посудину продувають повітрям, до складу якого вводять 1—

10 % аміаку. Аміак проникає крізь нещільності, діє на папір або марлю та залишає на них чорні або фіолетово-малинові плями, фіксуючи тим самим дефекти. Також можна використовувати у якості пробної речовини CO_2 .

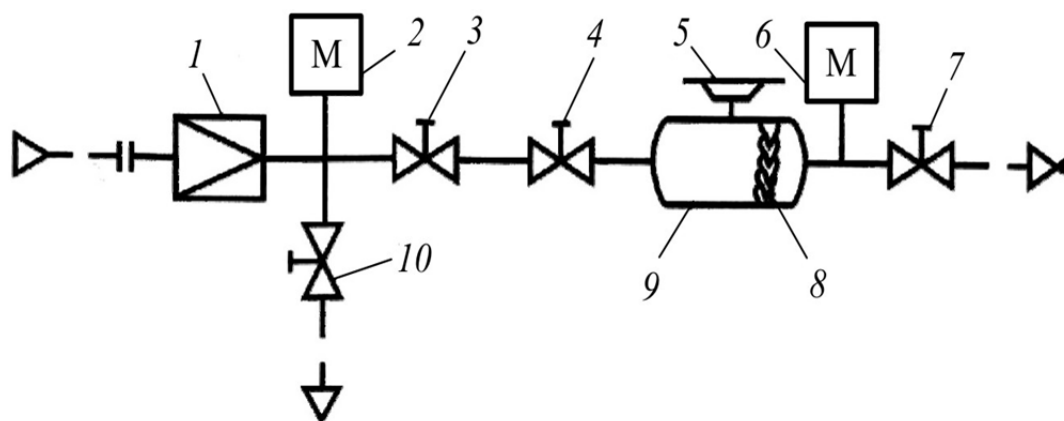


Рис. 7.3. Схема контролю зварних з'єднань методом падіння тиску: 1 — редукторний клапан; 2 — манометр регулювання редукторного клапана; 3 — вентиль заповнення; 4 — запобіжний клапан; 5 — клапан повітряний автоматичний; 6 — контрольний манометр; 7 — вентиль скидання тиску; 8 — зварний шов; 9 — виріб; 10 — клапан

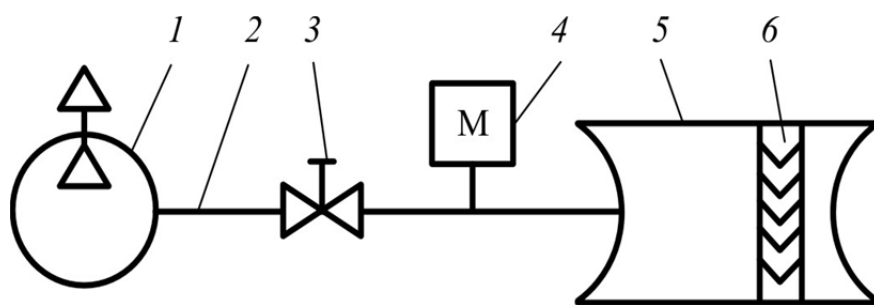


Рис. 7.4. Схема контролю способом диференціального манометричного перетворення: 1 — вакуумний насос; 2 — магістральний трубопровід; 3 — вентиль; 4 — диференціальний манометричний перетворювач; 5 — контрольований виріб; 6 — зварний шов

Індикаторна маса складається з безводної соди, фенолфталеїну, агар-агару, дистиллятора.

Місця течії фіксуються у вигляді безбарвних плям на малиновому тлі маси.

Іноді потрібно виявити течії значно менші тих, які можуть виявлятися методами, зазначеними вище. Такі дефекти визначаються галоїдним і гелієвим методами.

Галоїдний метод. У якості пробного газу використовують фреон—12 (хімічна сполука на основі галоїдного елементу фтору), що має високу проникаючу здатність.

Для індикації використовуються спеціальні прилади — галоїдні (галоїдно-електричні) течієшукачі (рис. 7.5).

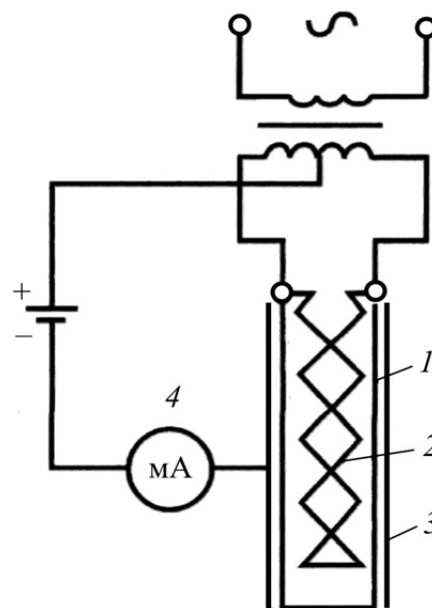


Рис. 7.5. Схема датчика галоїдного течієшукача: 1 — анод; 2 — платиновий підігрівач; 3 — колектор іонів; 4 — амперметр

Найчастіше використовується спосіб щупа (рис. 7.6). У закритій посудині створюється надлишковий тиск атмосфери фреон—12. Щупом галоїдного течієшукача здійснюється “обнюхування” зовнішньої поверхні виробу уздовж всієї довжини шва. Швидкість переміщення щупа уздовж шва 10—25 мм/с.

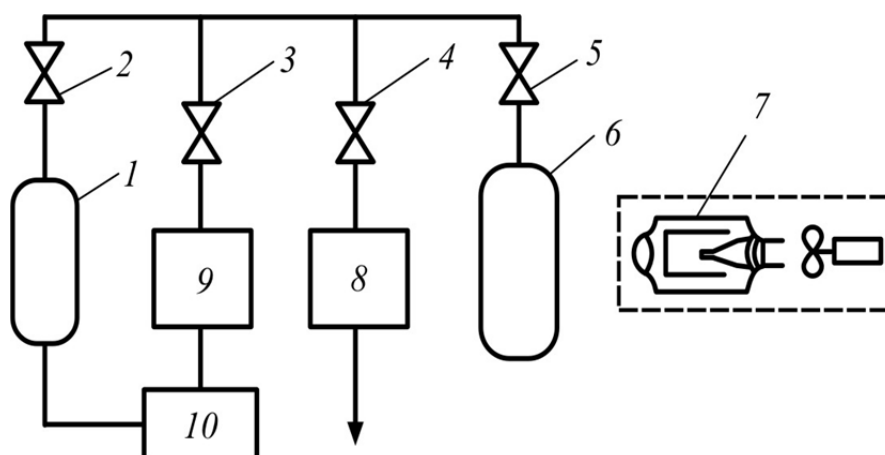


Рис. 7.6. Схема контролю способом галогенного щупа: 1 — балон з фреоном; 2—5 — вентилі; 6 — контрольований виріб; 7 — щуп; 8 — механічний насос; 9 — компресор; 10 — конденсатор

Щуп містить чутливі елементи у вигляді платинового діода, анода і колектора, які розпечені до 800—900 °С та розділені повітряним або вакуумним проміжком.

При потраплянні у цей проміжок молекул фреону електричний струм крізь діод різко зростає, що фіксується приладом.

Гелієві методи течішукання. Пробною речовиною є гелій, що має малу молекулярну вагу і, отже, добру здатність проникати крізь дрібні нещільності. Індикація газу здійснюється мас-спектрометром.

Гелій, що пройшов крізь наскрізні несуцільності у випробуваному виробі, попадає у камеру мас-спектрометра, у якій створений високий вакуум.

Камера перебуває у магнітному полі і складається з катоду, іонізатора, діафрагми та колектора, поміщених у латунний корпус (рис. 7.7).

Молекули газу, що попадають у мас-спектрометр, під дією потоку електронів, що імітуються розпеченим катодом, іонізуються і перетворюються у позитивні іони з зарядом e . Іони прискорюються електричним полем, попадають у камеру мас-спектрометра і під дією електромагнітного поля набувають кругову траєкторію руху.

Залежно від маси іони рухаються по різних радіусах. Діафрагми, розташовані на шляху руху іонів, виділяють тільки іони гелію, які попадають у колектор. При цьому відбувається збільшення іонного струму, що фіксується міліамперметром.

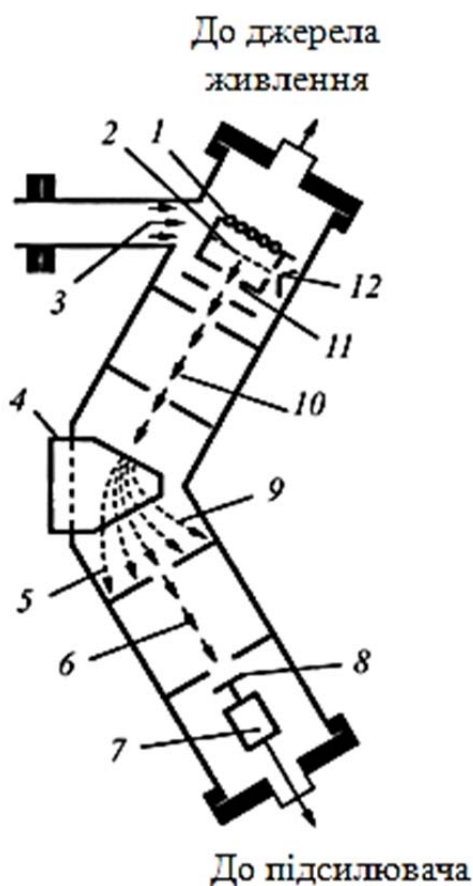


Рис. 7.7. Схема гелієвого течієшукача: 1 — нагріта сітка відбивача; 2 — електронний пучок; 3 — молекули гелію; 4 — постійний магніт; 5 — важкі іони; 6 — іони гелію; 7 — електрометрична лампа; 8 — мішень; 9 — легкі іони; 10 — пучок іонів; 11 — щілина; 12 — вольфрамова нитка

Мас-спектрометр дозволяє фіксувати незначну кількість атомів гелію, що пройшли крізь нещільності виробу.

У промисловості випускається кілька типів мас-спектрометричних гелієвих течієшукачів. Вони в основному складаються з вакуумної відкачуючої системи, мас-спектрометричного аналізатора (мас-спектрометра), електронного блоку.

Поширення одержали інфрачервоні газові течієшукачі. У них метод індикації газів заснований на різній здатності газів поглинати інфрачервоне випромінювання, що свідчить про наявність певних компонентів у газовій суміші.

Катарометричний метод течієшукування (газоаналітичний). Цей метод фіксує витік у атмосферу пробних газів (водню, гелію) зі зміною теплопровідності індикаторного середовища.

Він зібраний за схемою моста Уатсона, у два плечі якого включені два чутливих елементи, розташованих у датчику течієшукача. Один з них контролює витік, а інший є елементом порівняння і оточений газовим середовищем незмінного складу.

При високих надлишкових тисках у виробі при витіканні газів з дефектів виникають ультразвукові коливання, які можуть реєструватися приладами. Даний метод застосовується для визначення течії в магістральних трубопроводах.

7.3. Вакуумні методи

Засновані на реєстрації падіння вакууму у замкнутому об'ємі контрольованого виробу або фіксації молекул пробного газу, що з'являються у цьому об'ємі.

Залежно від конструкції виробу і його конфігурації застосовують кілька принципових схем контролю (рис. 7.8).

Гелієві камери — випробуваний виріб поміщують у заповнену гелієм камеру, вакуумують до необхідного достатнього тиску і фіксують приладами появу іонів гелію всередині виробу, якщо він не герметичний.

Вакуумні камери — випробуваний виріб наповнюють гелієм і поміщують у вакуумну камеру. Появу іонів гелію фіксують гелієвими течієшукачем.

Поява у камері іонів гелію свідчить про наявність течії, що фіксується за допомогою гелієвих течієшукачів.

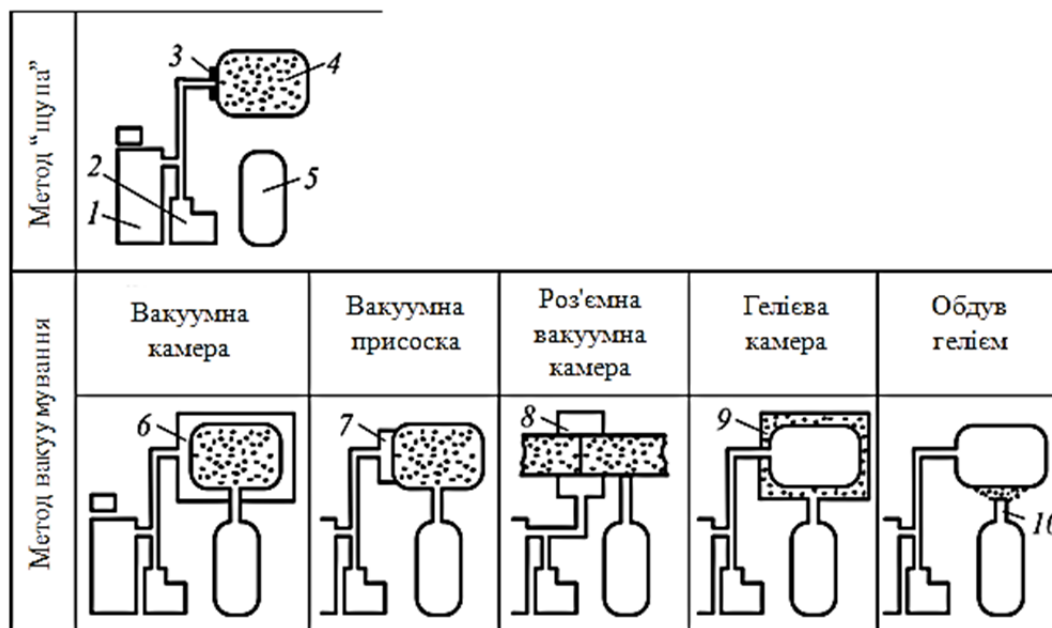


Рис. 7.8. Принципові схеми вакуумного контролю: 1 — течієшукач; 2 — допоміжна система, що відкачує; 3 — щуп; 4 — контрольований виріб; 5 — балон з газом; 6—8 — вакуумні камери, присоски; 9 — гелієва камера; 10 — пістолет-обдувач

Вакуумні присоски (рис. 7.9) — на зовнішню поверхню виробу накладають вакуумну камеру, у порожнині якої створюється вакуум. Виріб заповнюється гелієм під надлишковим тиском.

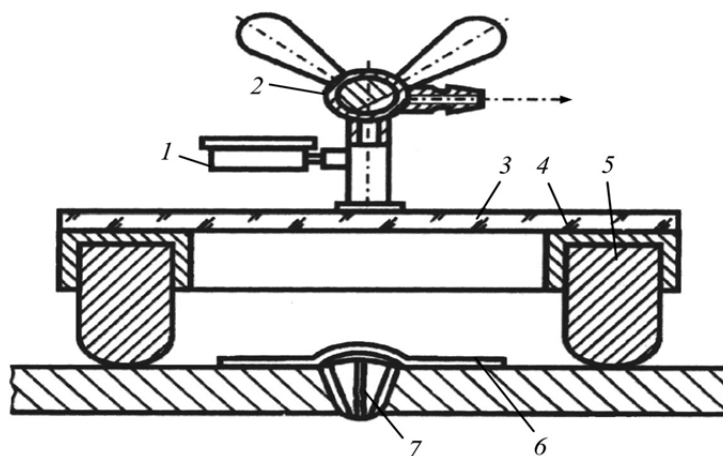


Рис. 7.9. Прямокутна вакуум-камера: 1 — вакуумметр; 2 — триходовий кран; 3 — оргскло; 4 — металева рамка; 5 — гума; 6 — плівка піноутворюючої речовини; 7 — дефект

Оцінюючи доцільність застосування того або іншого методу течієшування, необхідно враховувати необхідність задоволення вимог, що відповідають класу герметичності, які встановлюється розробником (табл. 7.1).

Таблиця 7.1. Класи герметичності виробу

Клас герметичності	Діапазон натікань за повітрям, що виявляються см ³ /Па·с	Метод течієшування	Пробна речовина	Індикатор
I	$\leq 2 \cdot 10^{-2}$	Гелієва камера, вакуумна присоска	Гелій	Мас-спектрометр
II	$< 2 \cdot 10^{-1}$	Гелієвий щуп, люмінесцентно-гідравлічний	Гелій, вода + пенетрант	Мас-спектрометр, течія і світіння на індикаторній стрічці або масі
III	2—4	Гідравлічний з люмінесцентним та індикаторним покриттям	Вода + пенетрант	Течія і світіння на індикаторній стрічці або масі
IV	$4—2 \cdot 10^3$	Галоїдний щуп, кольоровий і люмінесцентний, капілярні	Фенол-повітряна суміш, пенетрант	Світіння плям
V	$> 2 \cdot 10^3$	Гасова проба, бульбашковий, обпресування повітрям	Гас, повітря, азот	Плями на крейдовому тлі, бульбашки

Контрольні запитання

1. Охарактеризуйте основні експлуатаційні вимоги, які пред'являються до виробів замкнутого типу.
2. Що називається герметичністю виробу?
3. На які види поділяються методи контролю течієшуванням?

4. Охарактеризуйте капілярні методи течієшування.
5. Що відноситься до компресійних методів течієшування?
6. Охарактеризуйте газові методи течієшування.
7. Що таке галоїдний метод течієшування?
8. Охарактеризуйте гелієві методи течієшування.
9. Охарактеризуйте вакуумні методи течієшування.
10. Охарактеризуйте класи герметичності виробу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Марковец М. П. Исследование связи ударной вязкости стали с характеристиками растяжения / М. П. Марковец, В. М. Матюнин // Докл. АН СССР. Тех. физика. — 1970. — Т. 191. — № 1. — С. 79—81.
2. Марковец М. П. Построение диаграмм твердости при вдавливании шара / М. П. Марковец, В. М. Матюнин, В. И. Дегтярев // Металл в современных энергоустановках. — М. : Энергия, 1972. — С. 75—76.
3. Гурвич А. К. Ультразвуковая дефектоскопия сварных швов / А. К. Гурвич, И. Н. Ермолов. — Киев : Техника, 1972. — 460 с.
4. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / под ред. акад. Б. Е. Патона. — М. : Машиностроение, 1974. — 768 с.
5. Pao Y. H. Acoustic emission and transient waves in an elastic plate / Y. H. Pao, R. R. Gajewski, A. N. Geranoglu // Acoustic Soc. of America. — 1979. — Vol. 65. — № 1. — P. 96—105.
6. Андрейкив А. Е. Метод АЭ в исследовании процессов разрушения / А. Е. Андрейкив, Н. В. Лысак. — Киев : Наук. думка, 1989. — 176 с.
7. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / В. В. Клюев, Ф. Р. Соснин, В. Н. Филинов [и др.]. — М. : Машиностроение, 1995. — 488 с.
8. Современная зарубежные приборы и установки неразрушающего контроля // Экспресс-информация : Приборы, средства автоматизации и системы управления. — 1997. — Вып. 6. — 46 с.
9. Визуальный и измерительный контроль / В. В. Клюев, Ф. Р. Соснин, В. Ф. Мужичкий [и др.]. — М. : РОНКТД, 1998. — 245 с.

10. Щербинский В. Г. Ультразвуковой контроль сварных соединений / В. Г. Щербинский, Н. П. Алешин. — М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. — 496 с.
11. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / под ред. Б. Е. Патона. — Киев : Индпром, 2001. — 815 с.
12. Сварка. Резка. Контроль: справочник в 2 т. / под общ. ред. Н. П. Алешина, Г. Г. Чернышова. — М. : Машиностроение, 2004. — 1108 с.
13. McMaster R. C. The Present and future of eddy current testing / R. C. McMaster // Materials Evaluation. — 2005. — Vol. 43. — № 12. — P. 1512—1521.
14. Щербинский В. Г. Технология ультразвукового контроля сварных соединений / В. Г. Щербинский. — М. : Тиссо, 2005. — 326 с.
15. Алешин Н. П. Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений: уч. пособ. / Н. П. Алешин. — М. : Машиностроение, 2006. — 368 с.
16. Мальцев П. П. Наноматериалы. Нанотехнологии. Наносистемная техника. Мировые достижения за 2005 год / П. П. Мальцев. — М. : Техносфера, 2006. — 150 с.
17. Ультразвуковой контроль: дефектоскопы, нормативные документы, стандарты по УЗК / Сост. В. А. Троицкий. — Киев : Феникс, 2006. — 224 с.
18. Смирнов А. Н. Неразрушающие и разрушающие испытания сварных соединений: уч. пособ. / А. Н. Смирнов. — Кемерово : ГУ КузГТУ, 2009. — 187 с.
19. Панасенко Н. Н. Контроль качества сварных конструкций: уч. пособ. / Н. Н. Панасенко, Д. И. Меркулов. — Астрахань : Астраханский государственный университет, 2012. — 199 с.
20. Ольшанская Т. В. Контроль качества сварных соединений: уч. пособ. / Т. В. Ольшанская. — Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. — 157 с.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ



Камель Георгій Іванович
д.т.н., професор,
Запорізький авіаційний коледж ім. О. Г. Івченко



Гасило Юрій Анатолійович
к.т.н., доцент кафедри технології та устаткування зварювання
Дніпровського державного технічного університету



Івченко Павло Семенович
к.т.н., доцент кафедри технології та устаткування зварювання
Дніпровського державного технічного університету



Романюк Роман Ярославович
к.т.н., доцент кафедри охорони праці та безпеки
життєдіяльності Дніпровського державного
технічного університету

Навчальне видання

*КАМЕЛЬ Георгій Іванович
ГАСИЛО Юрій Анатолійович
ІВЧЕНКО Павло Семенович
РОМАНЮК Роман Ярославович*

КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ ЗВАРЮВАННЯ

Том 1. Неруйнівні методи контролю

(для студентів вищих навчальних закладів)

Навчальний посібник

Підписано до друку 22.10.2018 р. Формат 60×84/16.
Папір друк. Друк — різнограф. Ум.-друк. арк. 13,95.
Тираж — 300. Зам. № 69/18.

Видавець і виготовлювач
Дніпровський державний технічний університет
51918, м. Кам'янське, вул. Дніпробудівська, 2

Свідectво про внесення суб'єкта видавничої справи
до державного реєстру видавництва серія ДК № 5399
від 26.07.2017 р.