

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УЖГОРОДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФІЗИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

СУСЛІКОВ Л. М., СТУДЕНЯК І.П.

НЕРУЙНІВНІ МЕТОДИ КОНТРОЛЮ

Навчальний посібник
для студентів фізико-технічних спеціальностей

УЖГОРОД – 2016

УДК 669.017(075)

Сусліков Л.М., Студеняк І.П. Неруйнівні методи контролю: Навчальний посібник. – Ужгород: Видавництво УжНУ, 2016. - 192 с.

У навчальному посібнику висвітлено загальні питання неруйнівного контролю: поняття якості та його контролю, поняття про дефекти в твердих матеріалах та їх види, класифікація і характеристика методів та засобів контролю, їх стандартизація та метрологічне забезпечення, організація служби контролю. Розглянуто основні методи неруйнівного контролю: візуально-оптичний, капілярний, магнітний, електричний, вихрострумний, радіохвильовий, оптичний, тепловий, акустичний, радіаційний. Висвітлено фізичні принципи дії кожного методу, особливості застосування, переваги та недоліки. Наведено рекомендації щодо вибору методу неруйнівного контролю для розв'язання конкретної задачі.

Навчальний посібник призначений для студентів фізико–технічних спеціальностей. Може бути корисним аспірантам фізичних та фізико–технічних факультетів.

Рецензенти:

Пуґа П.П. – старший науковий співробітник Інституту електронної фізики НАН України, доктор фізико-математичних наук, професор

Небола І.І. – доктор фізико-математичних наук, професор кафедри прикладної фізики УжНУ

Рекомендовано редакційно–видавничою Радою Ужгородського національного університету (протокол № 3 від 25 вересня 2016 р.)

© Ужгородський національний університет, 2017

© Сусліков Л.М., Студеняк І.П., 2017

ЗМІСТ

ВСТУП	3
РОЗДІЛ 1. ПОНЯТТЯ ПРО НЕРУЙНІВНІ МЕТОДИ КОНТРОЛЮ.....	4
1.1. Класифікація і характеристика методів контролю якості матеріалів та виробів.....	4
1.2. Основні види неруйнівних методів контролю (НМК).....	5
1.3. Ефективність неруйнівних методів контролю (НМК).....	9
1.4. Критерії оцінки якості виробів.....	12
1.5. Поняття про статистичну обробку результатів неруйнівного контролю.....	13
1.6. Надійність системи контролю якості виробів.....	17
1.7. Порівняння руйнівних і неруйнівних методів контролю..	19
РОЗДІЛ 2. ПОНЯТТЯ ПРО ДЕФЕКТИ І ДЕФЕКТНУ ПРОДУКЦІЮ.....	22
2.1. Класифікація дефектів.....	22
2.2. Дефекти металевих заготовок.....	26
2.3. Дефекти в неметалевих деталях.....	34
РОЗДІЛ 3. ВІЗУАЛЬНО-ОПТИЧНИЙ КОНТРОЛЬ (ВОК).....	36
3.1. Візуальний контроль.....	36
3.2. Візуально-оптичний контроль.....	38
3.3. Методи оптичного контролю.....	40
3.4. Лазерні методи контролю.....	48
3.5. Фізичні основи голографічних методів контролю.....	48
3.6. Класифікація і загальні вимоги до оптичних приладів для ВОК.....	50
РОЗДІЛ 4. КОНТРОЛЬ ПРОНИКАЮЧИМИ РЕЧОВИНАМИ.....	53
4.1. Методи контролю проникаючими речовинами.....	53
4.2. Капілярний метод неруйнівного контролю (КНК).....	55
4.3. Фізичні явища, що лежать в основі капілярного контролю....	67
РОЗДІЛ 5. МАГНІТНІ МЕТОДИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ (МНК).....	74
5.1. Загальна характеристика магнітного контролю.....	74
5.2. Теоретичні основи магнітного контролю.....	75
5.3. Методи магнітного контролю.....	77
5.3.1. Порошковий метод.....	79
5.3.2. Магнітографічний метод.....	84
5.3.3. Феррозондовий метод.....	86
5.3.4. Метод ефекту Холла.....	89

5.3.5. Індукційний метод.....	92
5.3.6. Метод магнітної пам'яті металу.....	92
5.4. Способи намагнічування контрольованих виробів.....	94
5.5. Розмагнічування виробів.....	102
5.6. Прилади й установки для МНК.....	103
РОЗДІЛ 6. СТРУМОВИХРОВИЙ КОНТРОЛЬ (СВК).....	106
6.1. Поняття про струмовихровий контроль.....	106
6.2. Загальна характеристика вихрострумового контролю.....	108
6.3. Перетворювачі для СВК.....	111
6.4. Прилади для СВК.....	113
РОЗДІЛ 7. ЕЛЕКТРИЧНИЙ КОНТРОЛЬ.....	117
7.1. Загальна характеристика електричного контролю.....	117
РОЗДІЛ 8. РАДІОХВИЛЬОВИЙ КОНТРОЛЬ.....	120
8.1. Загальна характеристика радіохвильового контролю.....	120
РОЗДІЛ 9. РАДІАЦІЙНИЙ КОНТРОЛЬ (РК).....	123
9.1. Радіаційний контроль та його види.....	123
9.2. Класифікація радіаційних неруйнівних методів контролю..	125
9.3. Джерела і властивості іонізуючого випромінювання.....	126
9.4. Чутливість радіаційного контролю.....	137
9.5. Способи реєстрації радіаційних зображень.....	139
9.6. Заходи безпеки при радіаційному контролі.....	157
РОЗДІЛ 10. АКУСТИЧНИЙ КОНТРОЛЬ.....	161
10.1. Теоретичні основи методу.....	161
10.2. Методи акустичного контролю.....	165
РОЗДІЛ 11. ТЕПЛОВИЙ КОНТРОЛЬ.....	182
11.1. Загальна характеристика теплового контролю.....	182
СЛОВНИК ТЕРМІНІВ І ВИЗНАЧЕНЬ.....	186
ЛІТЕРАТУРА.....	190

ВСТУП

Поліпшення якості промислової продукції, підвищення надійності і довговічності устаткування та виробів можливо за умови вдосконалення виробництва та впровадження системи управління якістю.

У стандарті ІСО - 8402 «Управління якістю та забезпечення якості. Словник» якість визначається як «сукупність характеристик об'єкта, що відносяться до його здатності задовольняти обумовлені чи передбачувані потреби». При цьому під «об'єктом» в цьому визначенні розуміється все, що може бути індивідуально описане і розглянуте. У практичній діяльності термін «об'єкт» зазвичай заміняють терміном «продукція».

Система контролю якості продукції є однією з найістотніших частин системи управління якістю. На кожному етапі розвитку суспільного виробництва існували специфічні вимоги до якості продукції. На ранніх стадіях становлення промисловості основними вимогами до якості були точність і міцність. Масштаби виробництва дозволяли проводити перевірку кожного і відбракування дефектних виробів.

У міру розвитку промислового виробництва продукція ставала все більш складною, число її характеристик постійно зростало. Постало питання перевірки не окремих властивостей виробів, а його функціональної здатності в цілому. Почала складатися система контролю якості продукції, суть якої полягала у виявленні дефектної продукції і вилученні її з виробничого процесу. Контроль якості продукції полягає в перевірці відповідності показників її якості встановленим вимогам.

До недавнього часу на металургійних підприємствах, що випускають труби, на контролі було зайнято до 18-20% робітників, при цьому руйнуванню піддавалися до 10-12% труб від партії. На машинобудівних заводах кількість зруйнованих деталей часом досягає 15-20% від партії, оскільки після кожної основної технологічної операції з деталей виконуються зразки для механічних і металографічних випробувань.

Важливими критеріями високої якості деталей машин, механізмів, приладів є фізичні, геометричні та функціональні показники, а також технологічні ознаки якості, наприклад, відсутність неприпустимих дефектів; відповідність фізико-механічних властивостей і структури основного матеріалу і покриття; відповідність геометричних розмірів і чистоти обробки поверхні необхідним нормативам і т.п.

Широке застосування неруйнівних методів контролю, які не потребують вирізки зразків або руйнування готових виробів, дозволяє уникнути великих втрат часу і матеріальних витрат, забезпечити часткову або повну автоматизацію операцій контролю при одночасному значному підвищенні якості і надійності виробів. В даний час жоден технологічний процес отримання відповідальної продукції не впроваджується в промисловість без відповідної системи неруйнівного контролю.

РОЗДІЛ 1. ПОНЯТТЯ ПРО НЕРУЙНІВНІ МЕТОДИ КОНТРОЛЮ

1.1. Класифікація і характеристика методів контролю якості матеріалів та виробів

Всі види технічного контролю небезпечних виробничих об'єктів поділяються на 3 групи: руйнівний контроль, пошкоджуючий контроль і неруйнівний контроль.

Руйнівний контроль - це сукупність таких видів контролю, які вимагають відбору проб або вирізки зразків безпосередньо з матеріалу об'єкта. При цьому об'єкт залишається неприцездатним до відновлення місць відбору проб (зразків).

До руйнуючих видів контролю відносяться:

- лабораторний хімічний аналіз матеріалу об'єкта (вимагає насверловки певного обсягу стружки);
- металографія (дослідження структури металу об'єкта; вимагає вирізки шліфів);
- лабораторні механічні випробування матеріалу об'єкта на розтягіння, стиснення, вигин, ударну в'язкість (вимагає вирізки спеціальних зразків - темплетів).

Пошкоджуючий контроль - це сукупність таких видів контролю, які проводяться безпосередньо на об'єкті, при цьому об'єкт зберігає працездатність, але в місцях контролю лишаються непереборні (неустрашимые) сліди, які не перешкоджають експлуатації.

До пошкоджуючих видів контролю, зокрема, відносяться:

- вимірювання твердості (твердометрія) втискуванням спеціальних інденторів (бабітові кульки, алмазні наконечники; на поверхні об'єкта залишається вм'ятина);
- стилоскопіювання (оцінка марки сталі за складом оптичного спектру вольтової дуги, створюваної між електродом спеціального приладу - стилоскопу і поверхнею об'єкта, на якій залишається припік).

Неруйнівні методи контролю (НМК), або дефектоскопія, - це узагальнююча назва методів контролю матеріалів (виробів), що використовуються для виявлення порушення суцільності або однорідності макроструктури, відхилень хімічного складу та інших цілей, що не вимагають руйнування зразків матеріалу та / або виробу в цілому.

Розрізняють поняття «неруйнівний контроль» і «неруйнівний фізичний контроль».

Неруйнівний фізичний контроль - це сукупність таких видів неруйнівного контролю, які вимагають застосування спеціальних речовин, складних приладів і досить наукомістких технологій.

З усіх видів неруйнівного контролю, використовуваних на небезпечних виробничих об'єктах, лише один не відноситься до категорії фізичних - це **візуальний і вимірювальний контроль (ВВК)**. Таким чином, поєднання цих понять можна виразити формулою:

Неруйнівний контроль = Неруйнівний фізичний контроль + ВВК.

Основні вимоги, що висуваються до неруйнівних методів контролю, або дефектоскопії:

- можливість здійснення контролю на всіх стадіях виготовлення, при експлуатації і при ремонті виробів;
- можливість контролю якості продукції за більшістю заданих параметрів;
- узгодженість часу, що витрачається на контроль, з часом роботи іншого технологічного обладнання;
- висока достовірність результатів контролю;
- можливість механізації і автоматизації контролю технологічних процесів, а також управління ними з використанням сигналів, що видються засобами контролю;
- висока надійність дефектоскопічної апаратури і можливість використання її в різних умовах;
- простота методик контролю, технічна доступність засобів контролю в умовах виробництва, ремонту і експлуатації.

Основними областями застосування НМК є:

1. дефектоскопія особливо відповідальних деталей і пристроїв (атомні реактори, літальні апарати, підводні та надводні плаваючі засоби, космічні кораблі і т.п.);
2. дефектоскопія деталей і пристроїв тривалої експлуатації (портові споруди, мости, крани, атомні електростанції, котли, штучні супутники Землі);
3. безперервна дефектоскопія особливо відповідальних агрегатів і пристроїв (котли атомних, тепло- і електростанцій), контроль підземних виробок;
4. проведення досліджень структури матеріалів і дефектів у виробках з метою вдосконалення технології.

1.2. Основні види неруйнівних методів контролю (НМК)

Класифікація неруйнівних методів контролю здійснюється за різними ознаками.

За ступенем проникнення в матеріал всі види неруйнівного фізичного контролю умовно поділяють на дві категорії: **поверхневі та об'ємні**.

Поверхневі види (методи) неруйнівного контролю - це такі, які дозволяють виявляти тільки дефекти, що мають вихід на доступну для контролю поверхню матеріалу об'єкта.

Об'ємні види (методи) неруйнівного контролю - це такі, які дають можливість виявляти переважно внутрішні дефекти матеріалу, а поверхневі дефекти виявляються, тільки якщо вони достатньо великі.

Залежно від принципу роботи все НМК діляться на акустичні (ультразвукові); капілярні; магнітні (або магнітопорошкові); оптичні (візуально оптичні); радіаційні; радіохвильові; теплові; контроль течопошуком; електричні; електромагнітні, або струмових рові (методи вихрових струмів).

Акустичні методи засновані на реєстрації коливань, які збуджуються або виникають у контрольованому об'єкті. Їх застосовують для виявлення поверхневих і внутрішніх дефектів (порушень суцільності, неоднорідності структури, міжкристалітної корозії, дефектів склеювання, пайки, зварювання тощо) в деталях і виробих, виготовлених з різних матеріалів. Вони дозволяють контролювати геометричні параметри при односторонньому допуску до виробу, а також фізико-механічні властивості металів і металовиробів без їх руйнування. У даний час розроблені й успішно застосовуються тіньовий, резонансний, ехоімпульсний, емісійний, велосиметричний, імпедансний і метод вільних коливань. Ці методи називають також **ультразвуковими**.

Капілярні методи засновані на капілярному проникненні крапель індикаторних рідин в порожнини поверхневих дефектів. При контролі цими методами на очищену поверхню деталі наносять проникаючу рідину, яка заповнює порожнини поверхневих дефектів. Потім рідину видаляють, а решту, що залишилася в порожнинах дефектів, виявляють за допомогою проявника, який утворює індикаторний малюнок. Капілярні методи використовуються в польових, цехових і лабораторних умовах, в широкому діапазоні додатніх і від'ємних температур. Вони дозволяють виявляти термічні та шліфовочні тріщини, волосовини, закати тощо. Капілярні методи можуть бути застосовані для виявлення дефектів в деталях з металів і неметалів простої і складної форми.

Магнітні методи контролю засновані на реєстрації магнітних полів розсіювання, що виникають над дефектами, або на визначенні магнітних властивостей контрольованих виробів.

Ці методи дозволяють виявити дефекти типу несучільності матеріалу (тріщини, волосовини, закати), а також визначити механічні характеристики феромагнітних сталей і чавунів щодо зміни їх магнітних характеристик.

Візуально - оптичні методи контролю засновані на взаємодії світлового випромінювання з контрольованим об'єктом (КО). За характером взаємодії розрізняють методи пройденного, відбитого, розсіяного і індукованого випромінювань (під останнім мається на увазі оптичне випромінювання об'єкта під дією зовнішнього впливу, наприклад люмінесценцію).

Інформативними параметрами цих методів є амплітуда, фаза, ступінь поляризації, частота або частотний спектр, час проходження світла через об'єкт, геометрія заломлення або відбиття випромінювання. Оптичні методи широко застосовують через велике розмаїття способів отримання первинної інформації про наявність зовнішніх дефектів незалежно від матеріалу контрольованого виробу.

Радіаційні методи контролю засновані на реєстрації та аналізі проникаючого іонізуючого випромінювання. Використовується рентгенівське, гамма-випромінювання, потоки нейтріно і т.д. Проходячи через товщу виробу, проникаючі випромінювання по-різному послаблюються в дефектному і бездефектному перерізах і несуть інформацію про внутрішню будову речовини і наявність дефектів всередині виробу. Ці методи використовуються для контролю зварних та паяних швів, відливок, прокату тощо.

Радіохвильові методи засновані на реєстрації параметрів електромагнітних хвиль радіодіапазону, взаємодіючих з КО. Зазвичай використовуються хвилі надвисокочастотного (НВЧ) діапазону довжиною 1-100 мм для контролю виробів з матеріалів, де радіохвилі загасають не надто сильно: діелектрики (пластмаса, кераміка, скловолокно), магнітодіелектрики (ферити), напівпровідники, тонкостінні металеві об'єкти. Так само, як оптичні та акустичні, розрізняють методи пройденого, відбитого, розсіяного випромінювання і резонансний метод.

Теплові методи засновані на реєстрації змін теплових або температурних полів КО. Вони застосовні до будь-яких матеріалів.

Розрізняють **пасивний** (на об'єкти не впливають зовнішнім джерелом тепла) і **активний** (об'єкт нагрівають або охолоджують) методи. Вимірюваним інформативним параметром є температура або тепловий потік.

При **пасивному методі** вимірюють температурне поле працюючого об'єкта. Дефект визначається появою місць підвищеної (пониженої) температури. Таким методом визначають місця витoku теплоти в будівлях; тріщини в двигунах і т.д.

При контролі **активним методом** об'єкт нагрівають контактним або безконтактним методом і вимірюють температуру з тієї чи іншої сторони об'єкта. Це дозволяє виявляти несутцільності (тріщини, пористість, сторонні включення) в об'єктах, зміни в структурі фізико-механічних властивостей матеріалу за зміною теплопровідності, теплоємності, коефіцієнту теплопередачі. Вимірювання температури або теплових потоків виконують контактним або безконтактним способом. Найбільш ефективний засіб безконтактного спостереження - скануючий тепловізор. Його використовують для визначення дефектів пайки багат шарових виробів з металів і неметалів, клейових з'єднань тощо.

Методи контролю течопошуком засновані на реєстрації індикаторних рідин і газів, які проникають в наскрізні дефекти КО. Їх застосовують для контролю герметичності працюючих під тиском зварних посудин, балонів, трубопроводів, паливної та гідроапаратури, масляних систем силових установок і т.п.

До методів течопошуку відносять гідравлічне опресовування, аміачно-індикаторний метод, контроль за допомогою гелієвого і галоїдного течошукачів тощо. Проводять течопошук і за допомогою радіоактивних речовин, що значно підвищує чутливість методу.

Електричні методи засновані на реєстрації параметрів електричного поля, що взаємодіє з КО (власне електричний метод), або поля, що виникає в КО в результаті зовнішнього впливу (термоелектричний або трибоелектричний методи).

Первинними інформативними параметрами є електрична ємність або потенціал.

Ємнісний метод використовується для контролю діелектричних або напівпровідникових матеріалів. За зміною провідності, зокрема її реактивної частини, контролюють хімічний склад пластмас, напівпровідників, наявність в них несутільностей; вологість сипучих матеріалів та інші властивості.

Для контролю провідників застосовують метод **електричного потенціалу**. Товщину провідного шару, наявність несутільностей поблизу поверхонь провідника контролюють, вимірюючи падіння потенціалу на деякій ділянці. Електричний струм огинає поверхневий дефект, за збільшенням падіння потенціалу на ділянці з дефектом визначають глибину несутільності з похибкою в декілька відсотків.

Термоелектричний метод застосовують для контролю хімічного складу матеріалу. Наприклад, нагрітий до постійної температури мідний електрод притискають до поверхні виробу і за виникаючою різницею потенціалів визначають марку сталі, титану, алюмінію або іншого матеріалу.

Різновидом електричного методу є метод електронної емісії, тобто вимірювання емісії іонів з поверхні виробу під впливом внутрішніх напружень. Цей метод використовується для визначення розтріскувань в емалевих покриттях, для сортування деталей, вимірювання товщини плівкових покриттів і визначення ступеня загартування виробу.

Електромагнітний метод (метод вихрових струмів) заснований на реєстрації змін взаємодії електромагнітного поля котушки з електромагнітним полем вихрових струмів, що наводяться цією котушкою в КО. Його застосовують для виявлення поверхневих дефектів в магнітних і немагнітних деталях і напівфабрикатах. Метод дозволяє виявляти порушення суцільності (в основному тріщини) на різних за конфігурацією деталях.

В першу чергу завжди проводиться візуальний вимірювальний контроль (ВВК). Це обумовлюється тим, що за наявності очевидних непереможних неприпустимих пошкоджень об'єкта інші більш трудомісткі і дорогі процедури не мають сенсу.

В тому випадку, якщо за результатами всіх попередніх процедур об'єкт не бракується, в ряді випадків призначають дослідження його матеріалу руйнівними методами (хімічний аналіз, металографія, механічні випробування). Якщо програмою діагностування це передбачено і результати випробувань руйнівними методами позитивні, то подальшому неруйнівному контролю повинні бути обов'язково піддані не тільки нормативно регламентовані зони і елементи, але і відновлені місця відбору проб (зразків). Тому неруйнівний фізичний контроль завжди проводять в останню чергу.

В процедуру неруйнівного контролю, як правило, включені як мінімум 2 методи: один поверхневий і один об'ємний.

Поверхневі методи більш прості у виконанні, тому їх використовують перш ніж об'ємні, а об'ємні виконують за відсутності показань на неприпустимі дефекти за результатами поверхневих.

Тільки у разі відсутності протипоказань за результатами всіх процедур діагностування складається позитивний висновок, який містить в собі окремі висновки по кожному виду (методу) контролю.

Процедури контролю на небезпечних виробничих об'єктах можуть виконувати фахівці, навчені і атестовані відповідно до вимог «Правил атестації персоналу в галузі неруйнівного контролю», причому надавати висновки можуть особи з кваліфікацією не нижче II рівня за цим методом для даного виду об'єктів. Лабораторії, що виконують діагностування, повинні бути атестовані у відповідності з вимогами «Правил атестації лабораторій неруйнівного контролю».

1.3. Ефективність неруйнівних методів контролю (НМК)

Ефективність НМК визначається великим числом факторів, головними з яких є виявляємість дефектів, продуктивність, оперативність, безпека і вартість.

Візуальні та капілярні методи контролю виробів з ферромагнітних матеріалів дозволяють виявляти дефекти тільки на поверхні виробу.

Магнітними і струмовихровими методами можна виявити як поверхневі, так і підповерхневі дефекти.

Радіаційними та акустичними методами можна виявити поверхневі, підповерхневі і внутрішні дефекти. У табл. 1.1 наведені приблизні оцінки різних методів контролю за виявляємістю дефектів у виробках з різних матеріалів різного призначення.

З точки зору безпеки для обслуговуючого персоналу виділяються **радіаційні методи**. Певної токсичністю володіють методи капілярні і течепошуку при використанні певних типів пробних речовин і ультрафіолетових освітлювачів. Решта методів НК не роблять помітного впливу на здоров'я обслуговуючого персоналу.

З точки зору автоматизації контролю найбільш сприятливі методи вихрового струму, магнітні методи з феррозондовими, індукційними і подібними типами перетворювачів, радіаційний і деякі види теплових методів.

Головні переваги цих методів полягають у відсутності прямого контакту перетворювача з виробом і в наданні інформації про дефекти у вигляді показів приладів.

Ультразвуковий метод з цієї точки зору вимагає контакту перетворювача з виробом, наприклад, через шар води. Труднощі автоматизації інших методів контролю полягають в необхідності візуальної обробки інформації про дефекти.

За вартістю виконання контролю до найбільш дорогих відносяться методи радіографічні і течепошуку. Це пов'язано з тривалістю операцій

контролю, а також з необхідністю капітальних витрат на приміщення та обладнання. Якщо порівняти, наприклад, витрати на проведення радіаційного та ультразвукового контролю зварних з'єднань товщиною 10-20 мм, то для ультразвукового контролю вони будуть в 3-5 разів менше, ніж для радіаційного. Ця перевага зростає зі збільшенням товщини зварних з'єднань.

Таблиця 1.1. Оцінка виявляємості дефектів різними видами НМК

Об'єкт контролю	Вид НМК							
	Радіаційний	Акустичний	Струмовихровий	Магнітний	Капілярний	Тепловий	Оптичний	Радіохвильовий
	1	2	3	4	5	6	7	8
Неферромагнітні матеріали								
Проволока діаметром, мм								
0,01-1	0	5	5	0	0	3	4	0
1-14	4	5	5	0	0	0	4	0
Прутки								
3-40	5	5	5	0	0	0	4	0
30-100	5	5	5	0	0	0	4	0
156-1000	5	5	5	0	0	0	4	0
Листи, плити товщиною, мм								
0,1-1	4	5	5	0	4	3	4	3
0,1-3,9	5	5	5	0	4	0	4	0
4-10 і більше	5	5	5	0	4	0	4	0
Сортовий прокат	5	5	4	0	4	0	4	0
Отливки	5	4	0	0	5	3	4	0

Продовження табл.1.1

Об'єкт контролю	Вид НМК							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Ферромагнітні матеріали								
Проволока	4	5	5	5	0	3	4	0
Прутки								
3-4	5	5	5	5	0	0	4	0
30-10	5	5	5	5	0	0	4	0
Труби зварні діаметром, мм								
30-40	4	5	5	5	4	0	4	0
50-150	3	5	5	5	4	0	4	0
150-1000	4	5	5	5	4	0	4	0
Листи, плити товщиною, мм								
0.1-1	3	5	5	5	4	3	4	3
0.1-3.9	3	5	5	5	4	0	4	0
4-10 і більше	3	5	4	4	4	0	4	0
Сортовий прокат	3	5	3	3	4	0	4	0
Отливки	3	4	3	3	4	0	4	0
Діелектрики								
Гума	5	4	0	0	4	0	4	5
Кераміка, металокераміка	5	4	0	0	4	3	4	5
Бетон, залізобетон	3	5	0	0	4	0	4	5
Монокристали	3	4	0	0	0	5	4	5
Багатошарові матеріали	4	5	0	0	0	3	0	5
Стекло	3	4	0	0	0	3	5	3
Стеклопластики	3	4	0	0	5	5	5	5
З'єднання								
Зварні	3	5	3	3	4	3	0	0
Клейові	3	5	0	0	4	4	4	5
Паяні	3	5	3	0	3	3	0	0
Різьбові	0	0	3	5	4	0	0	0
Деталі до виробів								
Багатошарові конструкції	3	4	3	0	0	3	0	4
Радіоелектронні схеми і деталі	3	0	0	0	0	5	3	4
Електровакуумні прилади	4	0	0	0	0	3	3	3

Примітка. Оцінка НМК: 5 - відмінно, 4 - добре, 3 - задовільно, 0 - незадовільно.

У табл. 1.2 наведені короткі відомості про можливості, переваги і недоліки основних НМК суцільності металів.

Таблиця 1.2. Переваги та недоліки основних методів НМК

Вимоги до об'єкту контролю	Переваги	Недоліки
Ферромагнітні метали, чистота обробки поверхні RZ2,5	Простота и наглядність контролю. Можливість застосування метода для виробів будь-якої форми	Забруднення поверхні Необхідність розмагнічування виробів після контролю. Можливість утворення прижогів на поверхні.
Чистота обробки поверхні RZ2,5	Безконтактне збудження вихрових струмів. Можливість автоматизації при великих швидкостях контролю із записом результатів. Можливість контролю внутрішніх поверхонь Можливість контролю через неметалеві покриття	Труднощі виділення корисного сигналу на фоні перешкод, обумовлених його залежністю від багатьох параметрів контрольованого виробу. Відсутність наглядності результатів контролю
Чистота обробки поверхні RZ20	Простота и наглядність контролю. Можливість контролю виробу різної форми	Необхідність видалення з поверхні захисних покриттів, змазки, окаліни та інших забруднень
Вироби, які можуть бути поміщені у вакуумну камеру або воду; замкнуті и розамкнуті корпусні конструкції	Великий арсенал способів контролю різних класів виробів	Необхідність осушення виробу нагрівом до 150-400 °С або застосування різних індикаторних складів

При цьому в таблиці наведені не принципіві можливості методів, а лише ті з них, які можуть бути реалізовані за допомогою серійної апаратури і мають технічну документацію. У стовпці 4 для ультразвукового контролю наведені вимірювані параметри дефектів. У стовпці 5 для поверхневих

методів наведені вимоги до чистоти контрольованої поверхні, при яких можуть бути виявлені дефекти, зазначені в стовпці 4 для відповідного методу. При більш грубих поверхнях чутливість методів знижується.

Часто необхідно контролювати виріб двома або більше методами: зазвичай поєднують методи, здатні виявляти внутрішні і поверхневі дефекти (акустичний і магнітний контроль; магнітопорошковий метод контролю, акустичний і струмовихровий контроль і т.д.) або плоскі і об'ємні дефекти (наприклад, ультразвуковий контроль і радіографія).

Комплексна система контролю декількома методами може будуватися на основі 100% -го контролю всього обсягу продукції кожним методом або на основі вибіркового контролю тим чи іншим (або всіма) методом контролю. Іноді додатковий контроль здійснюється тільки на тих ділянках, де основний метод не забезпечує заданих вимог, або призначається для підвищення інформативності.

Наведемо кілька прикладів застосування комплексних систем НМК в суднобудуванні. В особливо відповідальних випадках для підвищення надійності виявлення дефектів різних типів проводять контроль зварних з'єднань методами радіаційного просвічування і акустичним. Контроль виливків, як правило, виконують методом радіаційного просвічування, а акустичний метод використовують для визначення місця розташування виявлених дефектів. Контроль гребних гвинтів передбачає поєднання акустичних методів з поверхневими методами, такими як капілярний, магнітний та струмовихровий.

Контроль поковок, якщо заготовки не мають припуску на «мертву» зону ультразвукового шукача, також використовує поєднання акустичного і поверхневих методів дефектоскопії.

Для контролю внутрішніх поверхонь використовуються струмовихрові методи і перископічний огляд (візуально-оптичний метод контролю) або перископічний огляд і акустичний контроль.

1.4. Критерії оцінки якості виробів

Для вироблення критеріїв, які можуть служити для бракування виробу після контролю, проводяться роботи з вивчення впливу дефектів на експлуатаційну надійність виробів, а також дослідження кореляції розмірів дефектів з тими параметрами, які можуть бути оцінені при НМК.

Бракувальні норми зазвичай виражаються в значеннях мінімальних розмірів неприпустимих дефектів і приводяться в технічних умовах на продукцію. Іноді ці норми мають також обмеження по кількості дефектів, їх взаємному розташуванню, формі, орієнтації.

Якщо існує кореляція між реальними розмірами дефектів та їх параметрами, що оцінюються при неруйнівному контролі, і в нормативній документації вказані розміри неприпустимих дефектів, то дефектоскопіст може безпомилково вибрати засоби і методи контролю. Якщо ж кореляція між реальними розмірами дефектів і вимірюваними НМК параметрами

слабка, то бракувальні норми повинні бути виражені у значеннях параметрів, вимірюваних даним методом.

Наприклад, при ультразвуковому методі контролю про розмір дефекту судять за амплітудою відбитого сигналу і оцінюють не реальний, а «еквівалентний» розмір дефекту, тобто розмір моделі дефекту простої форми, що дає сигнал, рівний за амплітудою сигналу від реального дефекту, або оцінюють «умовний» розмір, який дуже наближено характеризує проекцію дефекту на поверхню, з боку якої проводиться контроль. Ці параметри корелюють з реальними розмірами дефектів тільки в простих випадках (акустичний контроль труб, листів), а при контролі лиття, зварних швів, поковок кореляція настільки слабка (внаслідок різної орієнтації та форми дефектів), що оцінити реальні розміри дефектів неможливо. У цьому випадку бракувальні норми задаються значеннями еквівалентних і умовних розмірів неприпустимих дефектів. При цьому встановлення бракувальних норм вимагає серйозних попередніх досліджень.

Який би параметр дефекту не був покладений в основу бракувальних норм, оцінка дефекту в будь-якому випадку пов'язана з певними похибками, які необхідно враховувати при розробці критеріїв придатності виробів. Очевидно, що бракувальні норми, що відрізняються одна від одної менше, ніж на похибку оцінки дефекту, забезпечують фактично однакову якість виробів. Однак за роки впровадження НМК в галузях промисловості накопичилася велика кількість різних технічних умов на продукцію, складених без єдиної системи; вимоги цих умов, часто близькі за змістом, призводять до необхідності застосування різних засобів контролю, в кінцевому рахунку не виправдано збільшуючи витрати.

Для уніфікації засобів контролю, стандартизації рівнів нормативних вимог, а також полегшення розуміння між дефектоскопістам і фахівцями інших профілей розроблена система класів чутливості і груп якості за галузями промисловості. Ця система дозволяє встановлювати норми бракування виходячи зі ступеня відповідальності виробів з урахуванням сформованої практики розробки бракувальних норм для конкретних видів продукції. Класу або групі з меншим номером відповідають більш високі вимоги. Різниця рівнів чутливості двох сусідніх класів перевищує не менше ніж у два рази похибку оцінки дефектів, що забезпечує однозначність результатів контролю. Рівень чутливості першого класу або групи забезпечує по можливості найжорсткіший контроль виробів.

1.5. Поняття про статистичну обробку результатів неруйнівного контролю

Для проведення неруйнівного контролю необхідно, по-перше, вибрати апаратуру, що відповідає поставленому завданню, тобто таку апаратуру, яка з достатньою мірою достовірності дозволить виявити найбільш небезпечні і характерні дефекти в контрольованому виробі. По-друге, необхідно задатися необхідною ступеню достовірності виявлення дефектів, небезпечних для

експлуатації контролюваного виробу. По-третє, контролюючу апаратуру необхідно налаштувати, підібравши чутливість і роздільну здатність таким чином, щоб задовольнити другій вимозі.

Визначення середніх розмірів дефектів і дисперсії розмірів.

Розглянемо процес обробки результатів вимірювань на прикладі контролю суцільності матеріалів, деталей і виробів.

Припустимо, що виконується контроль наявності раковин, непроплавів, газових бульбашок і сторонніх включень в металевому злитку.

Насамперед необхідно визначити середній розмір дефекту \bar{x} . Для цього вимірюється максимальний розмір дефектів x_i не менше ніж у 20 різних дефектів ($n \geq 20$). Середній розмір дефекту дорівнює:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1.1)$$

Ця величина в математичній статистиці називається **математичним очікуванням**.

Потім знаходяться відхилення розмірів дефектів Δx від середнього значення:

$$\Delta x_1 = \bar{x} - x_1; \Delta x_2 = \bar{x} - x_2; \dots; \Delta x_n = \bar{x} - x_n,$$

і обчислюється дисперсія

$$\sigma^2 = \frac{\Delta x_1^2 + \Delta x_2^2 + \dots + \Delta x_n^2}{n(n-1)} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i^2}{n(n-1)}. \quad (1.2)$$

Величина σ називається середньоквадратичним відхиленням:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i^2}{n(n-1)}} \approx \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta x_i^2} \quad (1.3)$$

Наближена рівність отримується, коли число вимірювань n велике, так що $n \gg 1$ і $n(n-1) \approx n^2$.

Розподіл дефектів за розмірами. Розглянемо вісь X , на якій вкажемо розміри X_i виявлених дефектів і їх середню величину \bar{X} (рис.1.1).

Виділимо на осі X довільно інтервал dx і визначимо кількість дефектів dn , що потрапляють в цей інтервал. Чим більший інтервал dx , тим більше буде в ньому дефектів dn . У той же час величина dn буде тим більшою, чим більша загальна кількість дефектів n , так що $dn \sim n dx$.

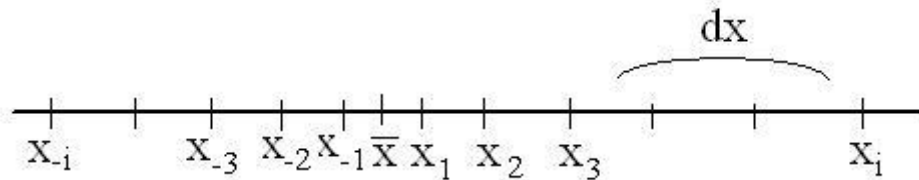


Рис. 1.1. Розподіл дефектів за розмірами

Величина dn залежить також від координати (місця вибору) інтервалу dx , тому що дефекти по осі X розподілені не рівномірно, а по деякому закону $dn \sim f(x) dx$. В результаті отримуємо, що кількість дефектів dn , що містяться в інтервалі розмірів dx , дорівнює:

$$dn = n f(x) dx . \quad (1.4)$$

З виразу (1.4) випливає, що

$$\frac{dn}{n} = f(x)dx$$

З теорії ймовірності відомо, що вираз (1.4) описує ймовірність події $dP(x)$, при якій в інтервалі dx буде виявлено dn дефектів. Отже,

$$\frac{dn}{n} = dP(x) \text{ і } dP(x) = f(x)dx . \quad (1.5)$$

З останньої рівності видно фізичний зміст функції $f(x)$. Це густина ймовірності знаходження дефектів з розміром x в інтервалі dx :

$$f(x) = \frac{dP(x)}{dx}$$

Обчислення ймовірності виявлення дефекту заданого розміру x_0 .

Виходячи з фізичних уявлень про можливий розподіл дефектів за розмірами (про розподіл дефектів на осі X - рис. 1.1), визначимо властивості, якими повинна володіти функція розподілу.

1. Найбільша кількість дефектів повинна мати розміри X_1 , близькі до середньої величини \bar{X} , причому при значенні \bar{X} функція розподілу повинна мати максимальне значення:

$$f(\bar{X}) = f_{\max} .$$

2. Природно припустити, що з однаковою імовірністю можна виявити дефекти з розмірами X_1 більшими і меншими середньої величини \bar{X} . Отже, функція розподілу повинна бути парною відносно значення в точці \bar{X} :

$$f(\bar{X} - X) = f(\bar{X} + X) .$$

3. Кількість дефектів тим менша, чим більше розміри дефектів X_1 відрізняються від середнього значення \bar{X} . Дефекти нескінченно великих розмірів відсутні, так що $\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = 0$.

Однією з функцій, що задовольняє всім цим властивостям, є функція Гауса:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x - \bar{x})^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1.6)$$

Графіки функції Гауса (1.6) наведені на рис. 1.2. З графіків видно, що максимум функції Гауса досягається при значенні \bar{X} . Цей максимум тим більший і тим гостріший, чим менша дисперсія σ^2 (середньоквадратичне відхилення σ). Із зростанням дисперсії максимум зменшується, графік функції Гауса розширюється. У нашому випадку збільшення говорить про зростання розкиду значень X_i . Відповідно до формули (1.5) ймовірність того, що дефект з розміром x потрапить в інтервал dx , дорівнює:

$$dP(x) = f(x) dx.$$

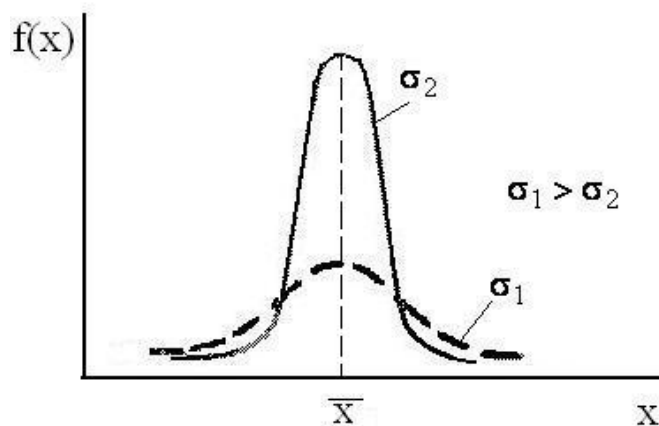


Рис. 1.2. Функція Гауса для різних значень σ

Тоді ймовірність виявлення дефекту з розміром $x > x_0$ дорівнює:

$$P(x > x_0) = \int_{x_0}^{\infty} f(x) dx. \quad (1.7)$$

На рис. 1.3 показаний графік функції (1.6), на якому заштрихована частина чисельно дорівнює значенню інтеграла (1.7). З графіка випливає, що інтеграл (1.7) можна представити у вигляді різниці двох інтегралів:

$$P(x > x_0) = \int_{\bar{x}}^{\infty} f(x) dx - \int_{\bar{x}}^{x_0} f(x) dx$$

Підставивши в цей вираз функцію Гауса (1.6), отримаємо

$$P(x > x_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \left(\int_{\bar{x}}^{\infty} \exp\left(-\frac{(x - \bar{x})^2}{2\sigma^2}\right) dx - \int_{\bar{x}}^{x_0} \exp\left(-\frac{(x - \bar{x})^2}{2\sigma^2}\right) dx \right) \quad (1.8)$$

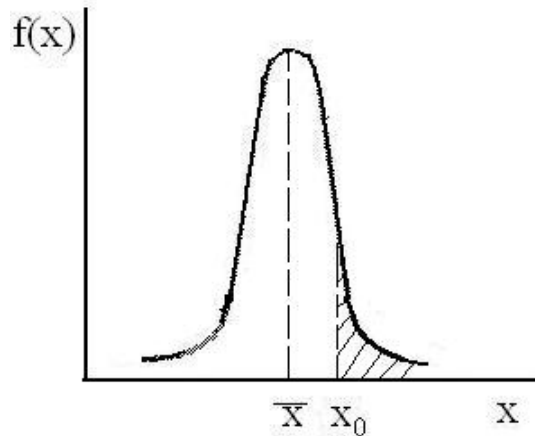


Рис. 1.3. До чисельного визначення інтеграла (1.7)

Введемо нову змінну $t = \frac{x - \bar{x}}{\sigma}$.. Тоді $dx = \sigma dt$, при $x = \bar{x}$ величина $t = 0$, при $x = x_0$ $t = \frac{x_0 - \bar{x}}{\sigma}$. При цих умовах інтеграл (1.8) прийме вигляд

$$P(x > x_0) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt - \frac{1}{2\pi} \frac{x_0 - \bar{x}}{\sigma} \int_0^{\frac{x_0 - \bar{x}}{\sigma}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \quad (1.9)$$

Інтеграл $\int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt = \sqrt{\frac{\pi}{2}}$. Тоді вираз (1.9) можна представити у вигляді

$$P(x > x_0) = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{x_0 - \bar{x}}{\sigma} \int_0^{\frac{x_0 - \bar{x}}{\sigma}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt\right)$$

або

$$P(x > x_0) = \frac{1}{2} \left(1 - \Phi\left(\frac{x_0 - \bar{x}}{\sigma}\right)\right)$$

Тут $\Phi(z) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^z \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$ - інтеграл похибок, який табульований.

Для знаходження інтеграла похибок достатньо знайти математичне очікування x , обчислити дисперсію σ^2 (або σ), задати максимально допустимі розміри дефекту x_0 . Після цього можна визначити z і за таблицями знайти значення інтеграла похибок $\Phi(z)$.

Далі визначається ймовірність знаходження дефектів з розмірами, що перевищують x_0 :

$$P(x > x_0) = \frac{1}{2}(1 - \Phi(z)), \quad z = \frac{x_0 - \bar{x}}{\sigma}$$

В дефектоскопії зазвичай передбачається, що $P(x > x_0) = 0,99$. Це означає, що прилади повинні бути налаштовані так, щоб зі 100 дефектів з розмірами $x > x_0$ були виявлені 99 дефектів; пропущеним може бути тільки один дефект.

1.6. Надійність системи контролю якості виробів

Система контролю - це сукупність засобів контролю та виконавців, що взаємодіють з об'єктом контролю за правилами, встановленими відповідною документацією (ГОСТ 16504 - 81). Функцією такої системи є виявлення і правильна оцінка кожного дефекту, вимірюваний параметр якого X дорівнює або перевищує значення X_0 , встановлене нормативно-технічною документацією. В результаті контролю у виробках, визнаних придатними, не повинно бути неприпустимих дефектів (з параметрами $X \geq X_0$), але при цьому повинні бути забраковані тільки ті вироби, в яких є неприпустимі дефекти.

Невиконання системою контролю своєї функції правильної оцінки придатності виробу називається **відмовою системи**.

До відмов системи можна віднести неправильне віднесення до придатних виробів, що містять неприпустимі дефекти. Це так звана **недобраковка**. Іншою відмовою системи є **перебраковка**, тобто помилкове бракування виробу. Імовірність недобраковки позначають F , а перебраковки - β . Ці ймовірності часто використовують для оцінки працездатності системи контролю, її надійності, достовірності, ефективності. Показники надійності характеризують здатність продукції до збереження працездатності при дотриманні певних умов експлуатації та технічного обслуговування. Одним з кількісних показників надійності є імовірність безвідмовної роботи, яка для системи контролю виражається формулою

$$G = 1 - (F + \beta). \quad (1.10)$$

Наслідки недобраковки і перебраковки різні, тому різні і критерії вирішення завдань оптимізації системи контролю. Найбільш часто критерієм оптимальної системи вважається мінімум середнього ризику, оцінюваний функцією R :

$$R = c_1\beta + c_2F,$$

де c_1 і c_2 - вартість перебраковки і недобраковки, р.

Для критерію «ідеального спостерігача» вартості c_1 і c_2 вважаються рівними, тоді оптимальна система контролю забезпечує і мінімум середнього

ризик, і максимум імовірнісного показника надійності G , обчисленого за формулою (1.10).

В якості параметра функції R зазвичай вибирають рівень бракування X_0 . Розрахунок і експеримент показують, що функція $R(X_0)$ за інших рівних умов має чіткий мінімум, який використовують для встановлення бракувального рівня, який рівною мірою влаштовує постачальника (він зацікавлений в мінімумі перебраковки), і замовника (він зацікавлений в мінімумі недобраковки).

При контролі особливо відповідальних виробів, наслідки виходу з ладу яких несумірні ні з якими витратами на перебраковку, обирають інший критерій вирішення завдання оптимізації системи контролю. Наприклад, в суднобудуванні для відповідальних виробів прийнятий критерій досягнення заданого рівня надійності, оцінюваний показником $G_0 = 1 - F$ (ймовірність відсутності недобраковки).

Одним із шляхів підвищення надійності НМК є зменшення похибок оцінки параметра X . Іншим шляхом є тимчасове (на момент контролю) зниження границь допуску, тобто фіксація більш дрібних дефектів з подальшим додатковим аналізом браку. При акустичному і струмовихровому методах контролю це виражається в підвищенні пошукової чутливості, але при контролі виробів на рівні $X \leq X_0$ зростає перебраковка. Для її зменшення повторно перевіряють забраковану партію або додатково оцінюють зафіксовані дефекти. Таким чином вдається домогтися досить високого рівня показника надійності $G_0 = 0,997$ при незначному (до 5%) збільшенні додаткових витрат, пов'язаних з підвищенням надійності системи контролю.

1.7. Порівняння руйнівних і неруйнівних методів контролю

Нижче наводиться перелік переваг і недоліків неруйнівних і руйнівних методів контролю.

Переваги руйнівних методів контролю

1. Випробування зазвичай імітують одну або кілька робочих умов. Отже, вони безпосередньо спрямовані на вимірювання експлуатаційної надійності.

2. Випробування звичайно являють собою кількісні вимірювання руйнівних навантажень або терміну служби до руйнування при даному навантаженні і умовах. Таким чином, вони дозволяють отримати числові дані, корисні для конструювання або для розробки стандартів або специфікацій.

3. Зв'язок між більшістю вимірювань руйнуючим контролем і вимірюваними властивостями матеріалів (особливо під навантаженням, що імітує робочі умови) зазвичай прямий. Отже виключаються суперечки за результатами випробування та їх значенню для експлуатаційної надійності матеріалу або деталі.

Недоліки руйнівних методів контролю

1. Випробування не проводять на об'єктах, фактично використовуваних в експлуатаційних умовах. Отже, відповідність між випробовуваними об'єктами і об'єктами, що використовуються в експлуатації, (особливо в інших умовах), має бути доведено іншим способом.

2. Випробування можуть проводитися тільки на частині виробів з партії. Вони, можливо, будуть мати невелику цінність, коли властивості змінюються від деталі до деталі.

3. Часто випробування неможливо проводити на цілій деталі. Випробування в цьому випадку обмежуються зразком, вирізаним з деталі або спеціального матеріалу, що володіють властивостями матеріалу деталі, який буде застосовуватися в робочих умовах.

4. Одиначне випробування з руйнуванням може визначити тільки одне або декілька властивостей, які можуть впливати на надійність виробу в робочих умовах.

5. Руйнівні методи контролю важко застосовувати до деталі в умовах експлуатації. Зазвичай для цього робота припиняється і дана деталь видаляється з робочих умов.

6. Кумулятивні зміни протягом періоду часу не можна виміряти на одній окремій деталі. Якщо кілька деталей з однієї і тієї ж партії випробовується послідовно протягом якогось часу, то потрібно довести, що деталі були однаковими. Якщо деталі застосовуються в робочих умовах і видаляються після різних періодів часу, необхідно довести, що кожна була піддана впливу аналогічних робочих умов, перш ніж можуть бути отримані обґрунтовані результати.

7. Коли деталі виготовлені з дорогого матеріалу, вартість заміни деталей, що вийшли з ладу, може бути дуже висока. При цьому неможливо виконати відповідну кількість і різновиди руйнівних методів випробувань.

8. Багато руйнівних методів випробувань вимагають механічної або іншої попередньої обробки зразка. Часто потрібні великогабаритні машини, які дають дуже точні результати. У підсумку вартість випробувань може бути дуже високою, а число зразків для випробувань обмеженим. Крім того, ці випробування вельми трудомісткі і можуть проводитися тільки працівниками високої кваліфікації.

9. Руйнівні випробування вимагають великої витрати людиногодин. Виробництво деталей коштує надзвичайно дорого, якщо відповідні тривалі випробування застосовуються як основний метод контролю якості продукції.

Переваги неруйнівних методів контролю

1. Випробування проводяться безпосередньо на виробках, які будуть застосовуватися в робочих умовах.

2. Випробування можна проводити на будь-якій деталі, призначеній для роботи в реальних умовах, якщо це економічно обґрунтовано. Ці випробування можна проводити навіть тоді, коли в партії є велика різниця між деталями.

3. Випробування можна проводити на цілій деталі або на всіх її небезпечних ділянках. Більшість небезпечних з точки зору експлуатаційної надійності ділянок деталі можуть бути досліджені одночасно або послідовно, залежно від зручності та доцільності.

4. Можуть бути проведені випробування багатьма НМК, кожен з яких чутливий до різних властивостей або частин матеріалу або деталі. Таким чином, є можливість виміряти стільки різних властивостей, пов'язаних з робочими умовами, скільки необхідно.

5. Неруйнівні методи контролю часто можна застосовувати до деталі в робочих умовах, без припинення роботи, крім звичайного ремонту або періодів простою. Вони не порушують і не змінюють характеристик робочих деталей.

6. Неруйнівні методи контролю дозволяють застосувати повторний контроль даних деталей протягом будь-якого періоду часу. Таким чином, ступінь пошкоджень в процесі експлуатації, якщо її можна виявити, та її зв'язок з руйнуванням в процесі експлуатації можуть бути точно встановлені.

7. При неруйнівних методах випробувань деталі, виготовлені з дорогого матеріалу, не виходять з ладу при контролі. Можливі повторні випробування під час виробництва або експлуатації, коли вони економічно і практично виправдані.

8. При неруйнівних методах випробувань потрібна невелика (або зовсім не потрібна) попередня обробка зразків. Деякі пристрої для випробувань є портативними, мають високу швидкодію, в ряді випадках контроль може бути повністю автоматизованим. Вартість НМК нижче, ніж відповідна вартість руйнівних методів контролю.

9. Більшість неруйнівних методів випробування короткочасні і вимагають меншої затрати людиногодин, ніж типові руйнівні методи випробувань. Ці методи можна використовувати для контролю всіх деталей при меншій вартості або вартості, що порівняна з вартістю руйнівних методів випробувань лише невеликого відсотка деталей в цілій партії.

Недоліки неруйнівних методів контролю

1. Випробування зазвичай включають в себе непрямі вимірювання властивостей, які не мають безпосереднього значення при експлуатації. Зв'язок між цими вимірюваннями та експлуатаційною надійністю повинен бути доведений іншими способами.

2. Випробування зазвичай якісні і рідко - кількісні. Зазвичай вони не дають можливості вимірювання руйнівних навантажень і терміну служби до руйнування навіть побічно. Вони можуть, однак, виявити дефект або простежити процес руйнування.

3. Зазвичай потрібні дослідження на спеціальних зразках і дослідження робочих умов для інтерпретації результатів випробування. Там, де відповідний зв'язок не був доведений, і у випадках, коли можливості методики обмежені, спостерігачі можуть не погодитися в оцінці результатів випробувань.

РОЗДІЛ 2. ПОНЯТТЯ ПРО ДЕФЕКТИ І ДЕФЕКТНУ ПРОДУКЦІЮ

2.1. Класифікація дефектів

Дефектом називають кожну окрему невідповідність продукції вимогам, встановленим нормативною документацією (ГОСТ, ОСТ, ТУ тощо).

До невідповідностей відносяться:

1. порушення суцільності матеріалів і деталей,
2. неоднорідність складу матеріалу: наявність включень, зміна хімічного складу, наявність інших фаз матеріалу, відмінних від основної фази, та ін.

Дефектами є також будь-які відхилення параметрів матеріалів, деталей та виробів від заданих, таких, як розміри, якість обробки поверхні, волого- і теплостійкість і ряд інших фізичних величин.

Відхилення вважається допустимим, якщо дійсне числове значення параметра виробу не виходить за межі, встановлені нормативною документацією. Вихід дійсного значення параметра за встановлені межі означає, що розглянута продукція має дефект.

У нормативній документації повинні бути чітко вказані граничні відхилення параметрів деталі від номінальних значень, при яких виріб буде виконувати свої функції без зниження надійності.

Дефектами можуть бути не тільки неприпустимі порушення суцільності металу, а й вихід розміру деталі за межі допуску, невідповідність ступеня шорсткості поверхні виробу технічним умовам, наявність подряпин і відколів (сколів) на захисному покритті, високий вміст шкідливих домішок в металі тощо.

Дефекти, які виявляються при контролі виробів, поділяють на **явні** (ті, що виявляються очима) та **приховані** (внутрішні, підповерхневі, нерозрізнені оком), а також на **виправні та невиправні**.

Дефект, усунення якого технічно можливо і економічно доцільно, називають **виправним**. Дефект, усунення якого пов'язане з великими трудовими і матеріальними витратами, називають **невиправним**. Виправність та невивправність дефекту визначають стосовно до досліджуваних конкретних умов виробництва і ремонту з урахуванням витрат і технічних факторів.

Приклади виправних дефектів: вихід дійсного розміру діаметра вала за найбільший граничний розмір; пошкодження захисного покриття; шорсткість поверхні нижче класу, передбаченого технічними умовами; локальні непровари тощо.

Приклади невивправних дефектів: вихід дійсного розміру діаметра вала за найменший граничний розмір; невідповідність хімічного складу металу заданому; гарячі і холодні тріщини, пережог, розшарування, рванини тощо.

Виріб, що має хоча б один дефект, відноситься до **некондиційної продукції** і не може бути використаний за призначенням.

Залежно від можливого впливу дефекту на службові властивості деталі дефекти можуть бути:

- **критичними** – дефекти, при наявності яких використання продукції за призначенням неможливо або виключається з міркувань безпеки і надійності;

- **значними** – дефекти, які суттєво впливають на використання продукції та / або на її довговічність, але які не є критичними;

- **малозначними** – дефекти, які суттєво не впливають на працездатність продукції.

Критичні та значні відхилення вважаються дефектами, тому для їх виявлення контроль повинен бути суцільним і в окремих випадках - неодноразовим. Малозначні відхилення не вважаються дефектами, але для деяких видів продукції сукупності відхилень, кожне з яких є малозначним, можуть бути еквівалентні значному або критичному відхиленню і повинні бути віднесені до відповідної категорії.

За походженням дефекти виробів поділяють на:




1. **виробничо-технологічні** – металургійні, які виникають при литві та прокатці, технологічні, що виникають при виготовленні, зварюванні, різанні, пайці, клепанні, склеюванні, механічній, термічній або хімічній обробці тощо;






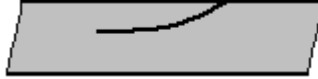
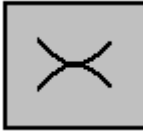
2. **експлуатаційні** – які виникають після деякого напрацювання виробу в результаті втоми матеріалу, корозії металу, зношування частин, що знаходяться в терті, а також внаслідок неправильної експлуатації і технічного обслуговування і

3. **конструктивні** дефекти, які є наслідком недосконалості конструкції через помилки конструктора.

Види найбільш характерних дефектів твердих матеріалів наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1. Види дефектів у матеріалах і зварних швах

Вид дефекту	Ескіз перетину матеріалу	Причина виникнення
Тріщина		Перевищення допустимих механічних або термічних напружень
Усадочна раковина в литві		Порушення термічних режимів лиття
Шлакові включення в зварних швах		Невірний вибір марки електрода

Непровар зварного шва		Перевищення швидкості зварювання, слабкий зварювальний струм або невірна обробка крайок під зварювання
Дефекти форми зварних швів		Порушення технології зварювання
Газові пори в зварних швах		Зварювання електродами непрожареними
Підріз зварного шва		Зсув або нахил електрода при зварюванні
Розшарування в прокаті		Розкатка усадочної раковини в заготовці-відливці
Закат в прокаті («ластівчин хвіст»)		Розкатка грубої зовнішньої нерівності у заготовці-відливці
Заков в поковці («кувальний хрест»)		Зминання усадочної раковини в заготовці-відливці при її проковуванні

З метою вибору оптимальних методів і параметрів контролю проводиться класифікація дефектів за різними ознаками: за розмірами дефектів, за їх кількістю і формою, за місцем розташування дефектів в контрольованому об'єкті і т.д.

Розміри дефектів **a** можуть змінюватися від часток міліметрів до як завгодно великої величини. Практично розміри дефектів лежать в межах $0,01 \text{ мм} \leq a \leq 1 \text{ см}$.

В ультразвукової дефектоскопії, наприклад, величина **a** впливає на вибір робочої частоти.

При кількісній класифікації дефектів розрізняють три випадки (рис. 2.1): **а** - **одиначні** дефекти, **б** - **групові** (множинні) дефекти, **в** - **суцільні** дефекти (зазвичай у вигляді газових міхурів і шлакових включень в металах).

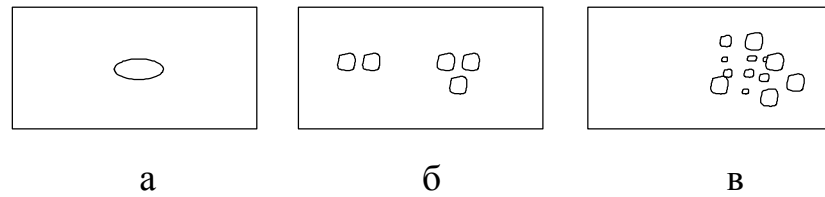


Рис. 2.1. Кількісна класифікація дефектів:
а - одиночні; б - групові; в - суцільні

При класифікації дефектів за формою розрізняють три основних випадки (рис. 2.2): а - дефекти правильної форми, овальні, близькі до циліндричної або сферичної форми, без гострих країв; б - дефекти чечевицеподібної форми, з гострими краями; в - дефекти довільної, невизначеної форми, з гострими краями - тріщини, розриви, сторонні вclusions.

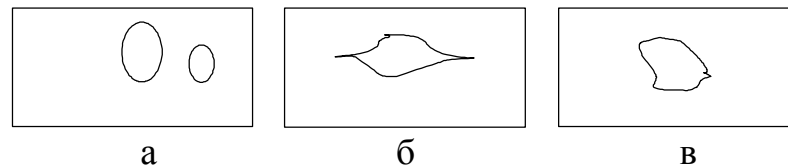


Рис. 2.2. Класифікація дефектів за формою: а - правильна форма;
б - чечевицеподібна форма з гострими краями; в - довільна, невизначена форма з гострими краями

Форма дефекту визначає його небезпеку з точки зору руйнування конструкції. Дефекти правильної форми, без гострих країв, найменш небезпечні, оскільки навколо них не відбувається концентрації напружень. Дефекти з гострими краями, як на рис. 2.2, б і в, є концентраторами напружень. Ці дефекти збільшуються в процесі експлуатації виробу по лініях концентрації механічних напруг, що, в свою чергу, призводить до руйнування виробу.

При класифікації дефектів за положенням розрізняють чотири випадки (рис. 2.3): а - **поверхневі дефекти**, розташовані на поверхні матеріалу, напівфабрикату або виробу, - це тріщини, вм'ятини, сторонні вclusions; б - **підповерхневі дефекти** - це дефекти, розташовані під поверхнею контрольованого виробу, але поблизу самої поверхні; в - **об'ємні дефекти** - це дефекти, розташовані всередині виробу. Наявність фосфоридних і нітридних включень і прошарків може призвести до утворення дефектів четвертого виду - **наскрізних**.

За формою поперечного перерізу наскрізні дефекти бувають круглі (пори, свищі, шлакові вclusions) і щілиновидні (тріщини, непровари, дефекти структури, несцільності в місцях розташування оксидних та інших включень і прошарків).

За величиною ефективного діаметра (для дефектів округлого перетину) або ширини розкриття (для щілин, тріщин) наскрізні дефекти підрозділяються на звичайні ($> 0,5$ мм), макрокапілярні ($0,5 \dots 2 \cdot 10^{-4}$ мм) і мікрокапілярні ($< 2 \cdot 10^{-4}$ мм).

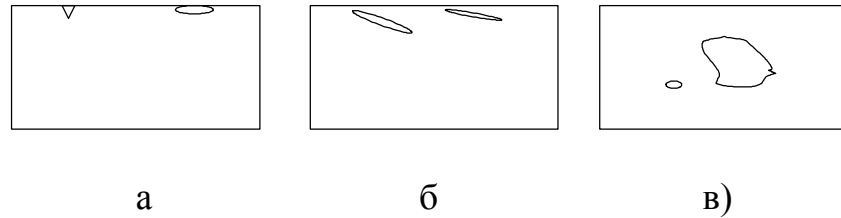


Рис. 2.3. Класифікація дефектів за положенням в контрольованому об'єкті:
а - поверхневі; б - підповерхневі; в - об'ємні

За характером внутрішньої поверхні наскрізні дефекти підрозділяються на гладкі і шорсткі. Відносно гладкою є внутрішня поверхня шлакових каналів. Внутрішня поверхня тріщин, непроварів і вторинних порових каналів, як правило, шорстка.

Положення дефекту впливає як на вибір методу контролю, так і на його параметри. Наприклад, при ультразвуковому контролі положення дефекту впливає на вибір типу хвиль: поверхневі дефекти найкраще визначаються релеєвськими хвилями, підповерхневі - головними хвилями, а об'ємні - об'ємними (поздовжніми) хвилями.

Небезпека впливу дефектів на працездатність залежить від їх виду, типу та кількості. Класифікація можливих дефектів у виробі дозволяє правильно вибрати метод і засоби контролю.

2.2. Дефекти металевих заготовок

Дефекти в металах утворюються головним чином при плавленні, при обробці металу тиском (кування (ковка), штампування і прокат) і при шліфуванні.

Дефекти плавки і лиття. Одним з основних дефектів плавки є невідповідність металу заданому хімічному складу, яка обумовлюється помилками при розрахунку шихти, неправильним веденням плавлення або вигорянням окремих компонентів сплаву (рис. 2.4).

Через неправильне живлення виливки в процесі кристалізації утворюються усадочні раковини і рихлоти (рис. 2.5).

Усадочні (усадкові) раковини - це порівняно великі відкриті або закриті порожнини довільної форми з грубою шорсткою, іноді окисленою, поверхнею, що знаходяться в тілі виливка. Усадкові раковини розташовані зазвичай в потовщених місцях виливки, де метал твердне в останню чергу.

Рихлоти - місцеве скупчення дрібних усадочних раковин при крупнозернистій структурі металу. Ці дефекти впевнено виявляються акустичними і радіаційними методами контролю.

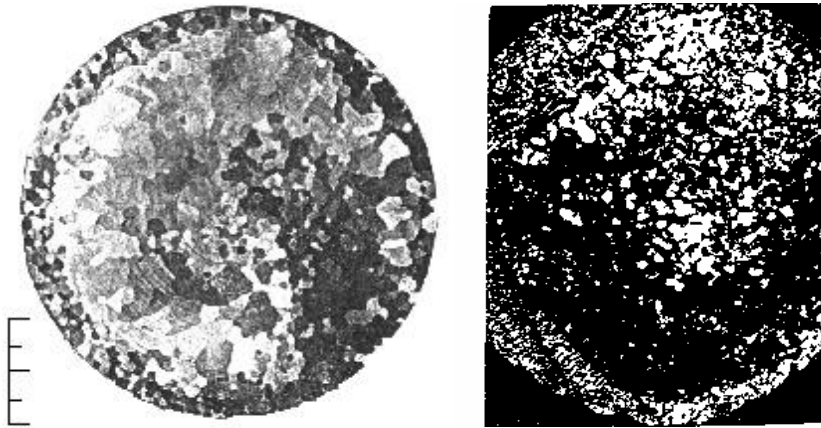


Рис. 2.4. Структурні неоднорідності в злитках

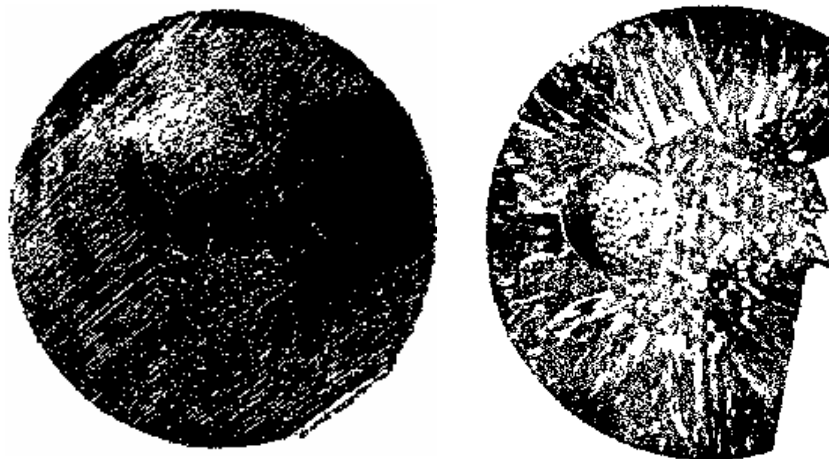


Рис. 2.5. Усадочні раковини в злитках

Деякі сорти металів, наприклад, киплячу сталь, варять так, щоб розчинені в металі гази виділялися не повністю. Це зменшує розміри усадочної раковини, але може призвести до утворення газової пористості (рис. 2.6).

Пористість - місцеве скупчення газових міхурів або усадочних раковин.

Якщо пори і газові бульбашки в зливку мають неокислену поверхню, то вона заварюється в процесі обробки тиском. У високоякісній відливці

міхури і пори неприпустимі, для їх виявлення використовуються методи радіаційного контролю.

Специфічним дефектом литого металу є **ліквація** - неоднорідність хімічного складу по скелету дендрита та обсягом зерна.

Ліквація по густині (щільності) металу проявляється в збагаченні нижньої частини злитка або відливки компонентами з більшою густиною в результаті поганого перемішування рідкого металу.

Зональна ліквація проявляється в збагаченні легкоплавкими складовими центральної частині злитка.

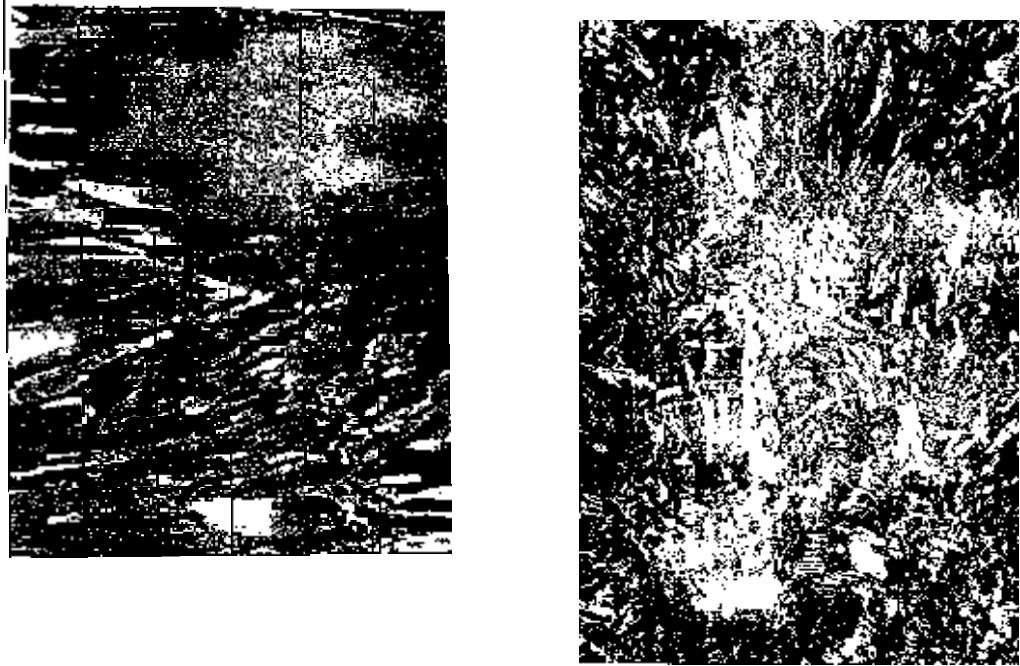


Рис. 2.6. Газові пори в злитках

Загальними дефектами для злитка і виливки є неметалічні включення. Це можуть бути піщані або шлакові раковини, включення частинок оксидів, сульфідів, силікатів, нітридів, що утворюються всередині металу внаслідок взаємодії компонентів при розплавленні і заливці сплаву, як правило, розташовані у вигляді ланцюжка або сітки. При перевищенні певних розмірів перераховані дефекти неприпустимі. При обробці тиском вони лише деформуються (розплющуються, розкочуються, але не усуваються).

Неметалеві включення виявляються радіаційними та акустичними методами, а в разі виходу включень на поверхню - методами поверхневої дефектоскопії.

Зовнішні дефекти у вигляді пленів, неслитті і неспаїв виявляються поверхневими методами дефектоскопії, внутрішні - акустичним контролем. При обробці злитка тиском ці дефекти не усуваються, а видаляються (усуваються) зачисткою поверхні або вирубкою.

Найбільш небезпечним дефектом виливків є гарячі і холодні тріщини. Характерними ознаками гарячих тріщин є їх нерівні (рвані) краї і значна ширина (рис. 2.7).



Рис. 2.7. Тріщини у виливках

Внутрішні тріщини виявляються радіаційним та акустичним контролем. Тріщини виправляються вирубкою і підваркою металу з обов'язковим подальшим контролем на відсутність тріщин у місцях ремонту.

Наявність графітних включень утрудняє дефектоскопію всіх типів чавуну (крім білого, який застосовують порівняно рідко). При радіаційному методі контролю скупчення графітних включень можуть бути помилково класифіковані як дефекти. Акустичний контроль в цьому випадку проводиться при понижених частотах і також утруднений наявністю хибних сигналів від графітних включень. Для контролю та форми графітних включень вимірюють швидкість і затухання ультразвуку. Чим менший середній розмір графітних включень і більше їх форма, тим вище швидкість ультразвуку і менше його загасання.

Алюмінієвим виливкам властиві ті ж дефекти, що і сталевим. Важко виявляємими дефектами є оксидні плени, оскільки по щільності і акустичними властивостями вони близькі до алюмінію. У той же час алюміній має малу анізотропією, тому мале розсіювання ультразвуку та в три рази менше поглинання рентгенівського випромінювання. На рентгенограмі плени видно як світлі смуги, тому що вони сильніше поглинають рентгенівське випромінювання, ніж алюміній.

Дефекти обробки тиском. Існують різні способи обробки металів тиском: вільна ковка (ударний вплив), пресування (статичний вплив), штампування (ковка або пресування в штамп-форму), висадка (продавлювання через отвір), волочіння (протяжка металу через отвір для отримання прутка або дроту), прокатка та ін. При цьому виникають такі специфічні види дефектів.

Через значні напруження при деформації утворюються тріщини і розриви. При обробці тиском матеріал неодноразово піддають нагріванню і

охолодженню, внутрішні напруги, що створюються при цьому, сприяють утворенню внутрішніх розривів і тріщин.

Розтягуючі напруження можуть привести до появи розривів у зонах, ослаблених дефектами злитків, а іноді й до руйнування в зонах, не уражених дефектами. Розриви, виникаючі в початковій стадії прокатки, волочіння, при подальшій деформації можуть утворити розшарування (рис. 2.8).

При холодному об'ємному штампуванні через малу пластичність вихідних матеріалів на поверхні деталей виникають сколювальні тріщини, які поширюються під кутом 45° до напрямку діючого зусилля.

В результаті попадання дрібних частинок виникають ризики на поверхні прокату у вигляді відкритих подряпин глибиною 0,2-0,5 мм.

При надлишку металу у валках виникають закати у вигляді заусин глибиною більше 1 мм, закатаних в протилежних напрямках. На крайках (кромках) аркушів, профілів утворюються рванини - розриви або підриви металу різноманітних обрисів з рваними краями.

Волосовини є результатом деформації малих неметалічних включень і газових бульбашок. Ці дефекти мають вигляд тонких прямих ліній розмірами від часток міліметрів до декількох сантиметрів. Волосовини зустрічаються у всіх видах конструкційних сталей.

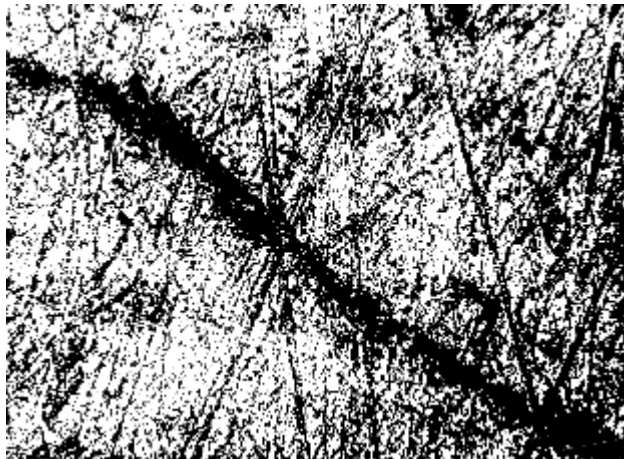


Рис. 2.8. Дефект прутка: розшарування. (збільшення в 100 разів)

Флокени з'являються найбільш часто в середньо вуглецевих і середньо легованих сталях при підвищеному вмісті в них водню, зазвичай в центральній зоні кованих або катаних заготовок великих перетинів, мають вигляд тонких звивистих тріщин, що представляються в зламі плями з поверхнею характерного сріблястого кольору округлої форми. Поковки, відштамповані з металу, ураженого флокенами, іноді розтріскуються з відділенням шматка металу. З'єднання металу з воднем - гідрид викликає підвищену крихкість металу.

Дефекти термообробки. Перегрів або пережог виникають при термічній обробці через недотримання температурного режиму, часу витримки, швидкості нагрівання та охолодження деталі. Перегрів призводить

до утворення грубозернистої структури оксидних і сульфідних виділень на межі зерен. Пережог викликає утворення великого зерна і оплавлення границь зерен, що сприяє надалі руйнуванню металу.

При нагріванні сталевих виробів в середовищі, що містить надлишок парів води, водню, вуглекислого газу спостерігається зневуглецевування. Відбувається вигорання вуглецю в приповерхневих шарах, що знижує міцність сталі; виникають тріщини глибиною 1-2,0 мм. Ці тріщини - наслідок розтягуючих напружень, викликаних тим, що в зневуглеценованому шарі при загартуванні утворюється низько вуглецевий мартенсит з меншим об'ємом, ніж у серцевині.

При нагріванні сталевих виробів в середовищі з надмірною вмістом оксиду вуглецю спостерігається навуглецевування - насичення поверхневих шарів вуглецем, що підвищує крихкість і схильність до тріщин. До утворення тріщин призводить також насичення поверхневого шару воднем під впливом лугів, кислот та спеціальних розчинів при травленні та електрохімічній обробки.

Для виявлення дефектів термообробки найчастіше застосовують вихрострумний, магнітний і рідше ультразвуковий методи контролю.

Найбільш частий дефект механічної обробки - недотримання геометричних розмірів деталі і вимог якості поверхні. Такий дефект зазвичай визначають механічними вимірювальними засобами і оптичними методами контролю. Дефекти типу несучільностей при механічній обробці виникають порівняно рідко; наприклад, при обробці різанням в металі, що має великі поверхневі напруги, можуть виникнути тріщини.

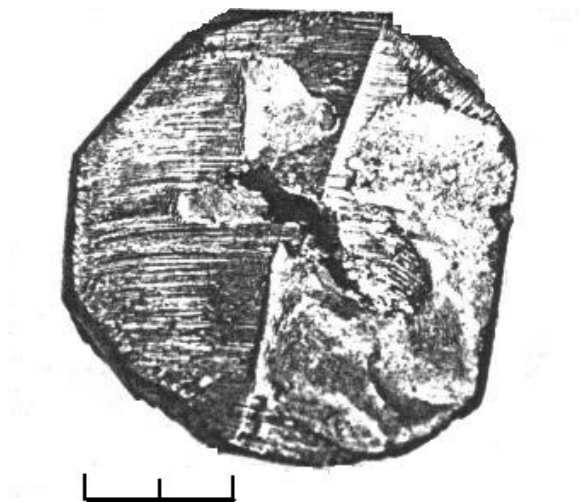


Рис. 2.9. Тріщини в кованих заготовках

При шліфуванні відбувається різкий нагрів поверхні, в результаті може з'явитися сітка дрібних тріщин і прижоги (локальні перегартовані ділянки). Поверхневі тріщини виявляють капілярним, магнітним і струмовихровим контролем, прижоги - магнітним і термоелектричним методами.

Дефекти з'єднання матеріалів. Нероз'ємні з'єднання деталей виконують зварюванням, паянням, склеюванням, клепкою. Розрізняють **зварювання плавленням і зварювання тиском.**

Для **зварювання плавленням** (ГОСТ 2601-84) характерні дефекти литого металу - усадочна раковина, включення, а також специфічні дефекти зварювання - пори, шлакові включення, непровари, несплавлення і тріщини.

Пори у вигляді порожнини округлої форми, що містить газ, утворюються зазвичай при порушеннях технології режиму зварювання (збільшена швидкість зварювання, завищена довжина дуги, використання вологого флюсу, забрудненість основного металу по зварюваним поверхням маслом, іржею і т.п.). При зварюванні в середовищі вуглекислого газу, а в деяких випадках і під флюсом, на великих струмах утворюються великі пори, так звані свищі; розміри внутрішніх пор коливаються від 0,1 до 2-3 мм в діаметрі, а іноді й більше. Пори, що виходять на поверхню, можуть мати і великі розміри. Так звані червоподібні пори мають довжину до декількох сантиметрів.

Шлакові включення в металі зварного шва - це невеликі об'єми, заповнені неметалічними речовинами (шлаками, оксидами). При використанні якісних електродів розплавлений метал довше перебуває в рідкому стані, неметалеві включення встигають спливати на його поверхню, і в тілі шва дефекти у вигляді шлакових включень відсутні. При всіх видах зварювання можуть виникати оксидні плівки. Причини їх утворення такі ж, як і шлакових включень: забрудненість поверхонь зварюваних елементів, низька якість електродного покриття або флюсу, низька кваліфікація зварника і т.д.

Інші характерні дефекти зварювання - це непровари, тріщини, злипання.

Непровар - це дефект у вигляді місцевого несплавлення в зварному з'єднанні через неповне розплавлення кромки або поверхонь раніше виконаних валиків шва. Непровари, як правило, виникають через порушення режиму зварювання або технології підготовки поверхонь.

Тріщини - часткові місцеві руйнування зварного з'єднання у вигляді розриву - виникають через підвищені механічні напруження (як внаслідок надмірного нагромадження швів для посилення конструкції, так і внаслідок наявності в зварному з'єднанні інших дефектів, які є концентраторами напружень).

Зварні з'єднання перевіряють ультразвуковими і рентгенівськими методами контролю.

Основним дефектом пайки є **непропай**. Він зазвичай виникає через недостатньо ретельну зачистку поверхонь спаювання або через порушення температурного режиму.

Дефекти клейового з'єднання - **непроклеї**, що виникають в результаті неякісної очистки поверхонь, що склеюються або порушення режиму склеювання.

Дефекти клепаного з'єднання - тріщини в заклепках і деталях, що з'єднуються - виявляються ультразвуковими методами.

Паяні, клейові, клепані вироби контролюють ультразвуковими методами; герметичні зварні, паяні і клейові з'єднання перевіряють методом течопошуку.

Експлуатаційні дефекти. До цього виду дефектів відносять механічні пошкодження, зношування, корозію. Найбільш поширеними дефектами цього типу є **втомні тріщини** (рис. 2.10). Основна причина втомних руйнувань деталей - дія високих змінних напруг. Тріщини втоми виникають, як правило, при конструктивній недоробці деталей і вузлів: по жолобникам (галтелям), в місцях з різкими переходами перетинів і наявністю підрізів, біля основи різьби і зубів шестерен, у кутах шпонкових канавок, у отворів для змащення або в місцях інших конструктивних або технологічних концентраторах напружень. Тріщини втоми з'являються також у місцях дефектів металургійного або технологічного походження або слідів грубої механічної обробки поверхні (глибоких рисок, слідів різців тощо).

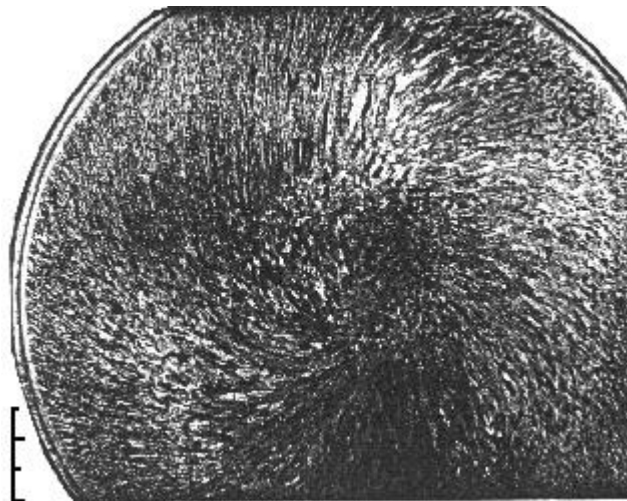


Рис. 2.10. Втомні тріщини

Тріщини втоми розрізняються за зовнішнім виглядом. Поперечні або кільцеві тріщини розвиваються на циліндричних деталях по колу в перетині, перпендикулярному до осі деталі. Часто зустрічаються також тріщини, розташовані під кутом до осі деталі. У зоні втомного руйнування відсутні будь-які ознаки пластичної деформації навіть у самих пластичних матеріалів. Ширина розкриття втомних тріщин біля виходу їх на поверхню в початковій стадії руйнування не перевищує декількох мікрон.

Корозійні ураження зустрічаються на різних деталях. Ступінь корозійного ураження залежить від наявності агресивних середовищ, якості захисних покриттів, несприятливого поєднання матеріалів у вузлі та ін. В експлуатації корозією часто уражені внутрішні порожнини, важкодоступні для контролю.

При різких змінах температур, а також недостатній змазці третьових деталей можлива поява термічних тріщин. Ці тріщини часто спостерігаються на поверхні азотованих, цементованих або поверхнево загартованих деталей, що працюють при високих питомих тисках.

Тріщини і надриви в поверхневому шарі виникають в результаті одноразово прикладених напружень (розтягнення, вигин, крутіння), коли навантаження перевищує міцність деталі, наприклад, при монтажі або демонтажі деталей з крихкими поверхнями або при перевантаженні деталі (робота в нерозрахованому режимі).

Механічні пошкодження поверхні - забоїни, вм'ятини, надири, риски, місцевий наклеп - можуть виникати з різних причин.

Для дефектоскопії використовуються візуально-оптичні, капілярні, магнітні методи. Для виявлення внутрішніх тріщин будь-якого походження використовують ультразвукові методи контролю.

2.3. Дефекти в неметалевих деталях

Дефекти скла - порушення фізичної однорідності і суцільності скла - можуть бути структурними, технологічними, експлуатаційними. Це можуть бути розриви, субмікротріщини і мікротріщини, технологічні бульбашки розмірами від 0,8 до 3 мм, газові включення до 0,8 мм, сторонні включення, нерівності поверхні. В процесі експлуатації можливі фізико-механічні ушкодження, корозія, помутніння, точкові каверни, мікротріщини, подряпини, відколи.

Дефекти кераміки виникають внаслідок порушення технології виготовлення виробів з керамічної маси. Розрізняють дефекти, пов'язані із спотворенням розмірів і форми виробу (жолоблення, деформації); зі зміною структури матеріалу (тріщини, прищі, посічки і свищі); дефекти поверхні (бульбашки, мушки, виплавки, вскипи, наколи, металевий блиск).

Тріщини виникають через недостатню обробку керамічної маси, неоднакову густину різних місць напівфабрикату, різку зміну температури під час найбільшої усадки або в процесі охолодження, неправильне укладання виробів і т.п.

Дефекти кераміки, отриманої методом спікання та гарячого пресування, - пористість, корозійне розтріскування, поверхневі і приповерхневі тріщини. Можливе порушення зв'язків між кристалітами, сторонні включення, аномалії в розмірах кристалів, оксидні фази, наявність зон аномальних механічних деформацій і напружень у зв'язках між кристалітами, зон, вільних від твердих фаз (пор), а також зон граничних механічних напружень, які переходять в розрив зв'язків композиційної структури (тріщини); аномалії в розмірах зазначених зон і нерівномірність розподілу структурних елементів.

Істотним дефектом в структурі кераміки є існування великих аномальних зон з мінімальною енергією зв'язку.

Виникнення **дефектів в полімерних композиційних матеріалах** багато в чому визначається в'язкістю зв'язуючого, ступенем просочення армуючого матеріалу, температурою технологічного обладнання, температурою вхідного армуючого матеріалу, швидкістю протягування арматури, її напругою, тиском обтиску армуючого матеріалу, сушінням армуючого матеріалу, липкістю, вмістом летких і розчинних речовин, густиною напівфабрикату, скупченням зв'язуючого армуючого наповнювача і способом його укладання (укладки).

Характерними дефектами для методів **відкритого формування** є пористість, розшарування, ділянки неповного затвердіння, зміна товщини, низьке значення фізико-механічних властивостей, нерівномірний розподіл зв'язуючого наповнювача, складки.

Для **закритого формування** характерними дефектами є тріщини, розшарування, локальна пористість, нерівномірний розподіл зв'язуючого наповнювача і ділянки його локальної орієнтації, порушення орієнтації наповнювача, внутрішні залишкові напруги, обриви ниток і волокон.

Дефектами напівпровідникових матеріалів є зміна параметрів зонної структури та основних параметрів домішкових центрів, порушення кристалічної структури, зміна чистоти матеріалу, наявність електрично активних і неактивних домішок, неоднорідність розподілу домішок по об'єму матеріалу і пристрою, механічні напруги, зміна параметрів перехідних областей в р-п гомо - і гетеропереходах.

До дефектів виробів з будь-яких матеріалів відносяться відхилення розмірів і геометричних форм основних і вільних поверхонь (не прямолінійність, непаралельність, несоосність, не перпендикулярність, ексцентричність, шорсткість), зміна товщини покриття, вологість.

РОЗДІЛ 3. ВІЗУАЛЬНО-ОПТИЧНИЙ КОНТРОЛЬ (ВОК)

3.1. Візуальний контроль

Око людини історично було основним контрольним приладом в дефектоскопії. Оком контролюють вихідні матеріали, напівфабрикати, готову продукцію, виявляють відхилення форми і розмірів, вади поверхні та інші дефекти в процесі виробництва і експлуатації: залишкову деформацію, пористість поверхні, великі тріщини, підрізи, риски, надири, сліди клепання, раковини тощо.

Візуальний вид контролю відрізняється від інших видів неруйнівного контролю границями спектральної області електромагнітного випромінювання, що використовується для отримання інформації про об'єкт контролю. Видиме випромінювання, тобто світло, - це випромінювання, яке може безпосередньо викликати зорове відчуття.

Візуальний контроль - це єдиний вид неруйнівного контролю, який може бути виконаний без будь-якого обладнання з використанням найпростіших вимірювальних засобів.

У той же час візуальний контроль є таким же сучасним видом контролю, як радіаційний та ультразвуковий.

Основою візуального контролю є закони оптики.

1. Закон прямолінійного поширення світла. В однорідному середовищі світло поширюється прямолінійно. Це впливає з того, що непрозорі предмети при освітленні їх джерелами світла дають тіні з різко окресленими границями. Закон прямолінійного поширення світла є наближеним, тому що при проходженні світла через дуже малі отвори спостерігаються відхилення від прямолінійності. Чим менший отвір, тим більше відхилення.

2. Закон незалежності світлових променів. Незалежність світлових променів полягає в тому, що вони при перетині не збурюють один одного, так як перетин променів не заважає кожному з них поширюватися незалежно один від одного. Слід зауважити, що незалежність зберігається в тому випадку, коли інтенсивність світла порівняно невелика. При інтенсивності світла, отриманих лазером, незалежність не спостерігається.

3. Закон відбивання. При проходженні світла через границю двох прозорих речовин падаючий промінь розділяється на два: відбитий і заломлений. Напрямки цих променів визначаються законами відбивання і заломлення (рис. 3.1).

Закон відбивання свідчить, що відбитий промінь лежить в одній площині з падаючим променем і нормаллю, відновленою в точці падіння. Кут падіння дорівнює куту відбивання.

4. Закон заломлення. Відповідно до даного закону, заломлений промінь лежить в одній площині з нормаллю, відновленою в точці падіння. Відношення синуса кута падіння до синуса кута заломлення є величина постійна для даних речовин.

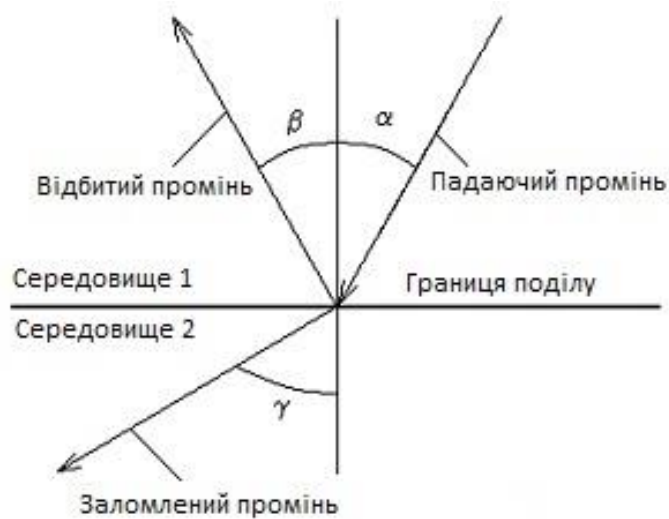


Рис. 3.1. Закони відбивання та заломлення світла

Обидва ці закони виражаються формулою

$$\frac{\sin\alpha}{C_1} = \frac{\sin\beta}{C_1} = \frac{\sin\gamma}{C_2} \quad (3.1)$$

де C_1 , C_2 - швидкості світла, відповідно, в першому і другому середовищах.

Оскільки у перших двох частинах рівності (1) знаменники однакові (падаюче і відбите світло поширюється в одному і тому ж середовищі), то однакові і чисельники, значить, кути падіння α і відбивання β рівні.

З рівності першої та третьої частин випливає

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = \frac{C_1(\text{const})}{C_2(\text{const})} = \text{const} \quad (3.2)$$

Закони відбивання і заломлення світла були виведені в XVII в. голландським фізиком Віллебрордом Снеллем.

В однорідному середовищі світло поширюється прямолінійно, а в неоднорідному середовищі світлові промені викривляються і тоді світло поширюється по такому шляху, для проходження якого йому потрібний мінімальний час, тобто оптична довжина якого мінімальна, - це принцип Ферма, який лежить в основі законів відбивання і заломлення.

Проте можливості очей обмежені, наприклад, при огляді об'єктів, що швидко переміщуються, або віддалених об'єктів, що знаходяться в умовах малої освітленості. Навіть при огляді предметів, що знаходяться в спокої на відстані найкращого зору в умовах нормальної освітленості, людина може відчувати труднощі через обмежену роздільну здатність і контрастну чутливість зору.

3.2. Візуально-оптичний контроль

Для розширення можливостей ока використовують оптичні прилади. Вони збільшують кутовий розмір об'єкта, при цьому гострота зору і роздільна здатність ока збільшуються приблизно в стільки ж разів, у скільки збільшує оптичний прилад. Це дозволяє побачити дрібні дефекти, невидимі неозброєним поглядом, або їх деталі. Однак при цьому істотно скорочується поле зору і глибина різкості, тому зазвичай використовуються оптичні прилади зі збільшенням не більше 20-30^X.

Слід зазначити, якщо оператор-діагност оглядає об'єкт без будь-яких спеціальних збільшувальних засобів, то це - **візуальний огляд**, який згідно із стандартом не відноситься до категорії фізичних видів неруйнівного контролю. Але як тільки оператор взяв в руки хоча б просту збільшувальну лупу, це вже **оптичний вид неруйнівного фізичного контролю**.

Оптичні прилади ендоскопи дозволяють оглядати деталі і поверхні елементів конструкції, приховані близько розташованими деталями і недоступні прямому спостереженню.

Візуальний контроль з використанням оптичних приладів називають **візуально-оптичним (або оптичним)**.

Візуально-оптичний контроль і візуальний огляд - найбільш доступний і простий метод виявлення поверхневих дефектів деталей.

Основні **переваги** цього методу - простота контролю, нескладне обладнання, порівняно мала трудомісткість.

До **недоліків** слід віднести низьку вірогідність і чутливість, тому такий метод контролю застосовують у наступних випадках:

для пошуку поверхневих дефектів (тріщин, пор, відкритих раковин і т.п.) при візуально-оптичному контролі деталей, доступних для безпосереднього огляду, а також більш дрібних тріщин при кольоровому, капілярному, люмінесцентному, магнітопорошковому і рентгенографічному контролі;

для виявлення великих тріщин, місць руйнування конструкцій, течі, забруднень, сторонніх предметів усередині закритих конструкцій;

для аналізу характеру і визначення типу поверхневих дефектів, виявлених при контролі яким-небудь іншим методом дефектоскопії (акустичним, струмовихровим, і т.д.).

Слід пам'ятати, що дефекти навіть відносно великих розмірів, невидимі неозброєним оком через малий контраст з фоном, при використанні оптичних приладів, як правило, не виявляються.

Сучасні методи оптичного контролю засновані на взаємодії світлового випромінювання з поверхнею контрольованого об'єкта. При цьому розглядаються такі спектральні характеристики, як коефіцієнт спектрального випромінювання і поглинання, спектральний коефіцієнт пропускання, відбивання і показник заломлення.

Спектральний коефіцієнт поглинання $\alpha(\lambda)$ є відношенням потоку випромінювання, поглиненого всередині оптично прозорого середовища, до падаючого потоку випромінювання.

Спектральний коефіцієнт пропускання $\tau(\lambda)$ є відношенням потоку випромінювання, що пройшло через середовище, до потоку енергії, до падаючого потоку випромінювання

Спектральний коефіцієнт відбивання $\rho(\lambda)$ визначають для складових світлового потоку з паралельними і перпендикулярно коливаннями по відношенню до площини падіння. При нормальному падінні світлового потоку при переході із одного матеріалу з показником заломлення n_1 в інший з показником заломлення n_2 спектральний коефіцієнт відбивання визначається як

$$\rho(\lambda) = \left[\frac{(n_2 - n_1)}{(n_2 + n_1)} \right]^2 \quad (3.3)$$

Спектральний коефіцієнт відбиття, спектральний коефіцієнт пропускання і спектральний коефіцієнт поглинання пов'язані співвідношенням

$$\rho(\lambda) + \alpha(\lambda) + \tau(\lambda) = 1 \quad (3.4)$$

Показник заломлення є відношенням швидкості поширення монохроматичного електромагнітного випромінювання у вакуумі до швидкості поширення його в будь-якому середовищі, яка залежить від довжини хвилі:

$$n(\lambda) = \frac{c}{v(\lambda)} \quad (3.5)$$

При переході з середовища 1 з показником заломлення n_1 в середовище 2 з показником заломлення n_2 справедливий закон Снелліуса:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2. \quad (3.6)$$

Показник заломлення для повітря $n = 1,0003$.

Рефрактометрія, інтерферометрія, лазерні та голографічні методи контролю також називаються **оптичними методами контролю**.

3.3. Методи оптичного контролю

Оптичний вид контролю регламентується стандартом ГОСТ 23479-79 «Контроль неруйнівний. Методи оптичного виду. Загальні вимоги». Цей стандарт класифікує чутливість оптичного контролю за двома основними параметрами: кратність збільшення оптичних засобів і освітленість контрольованої поверхні. На небезпечних виробничих об'єктах застосовується кратність збільшення оптичних засобів не нижче $4\times$ і освітленість контрольованої поверхні не менше 500 лк.

Оптичний вид контролю включає в себе 3 методи:

1. Зовнішній метод.
2. Перископічний метод.
3. Ендоскопічний метод.

Зовнішній метод дозволяє обстежити тільки легко доступні зовнішні поверхні об'єкту і широкі порожнини, в які оператор може проникнути з простими засобами оптичного контролю (оптичної системою). Використовуючи його, можна оглядати внутрішні поверхні вузьких, тим більше вигнутих порожнин.

Оптична система - це сукупність оптичних деталей (лінз, призм, дзеркал і т.п.), призначена для певного формування пучків світлових променів.

До простих оптичних систем відносяться дзеркала, лінзи, окуляри, лупи. Більш складні системи зовнішнього оптичного контролю - телескопи, мікроскопи.

Одним з найбільш простих способів зовнішнього оптичного контролю важкодоступних поверхонь або поверхонь, нахилених менш, ніж 30° до зорової осі ока, є їх огляд за допомогою дзеркал. Застосовують плоскі дзеркала і сферичні.

Плоским дзеркалом називають оптичну деталь з плоскою поверхнею, що відбиває, призначену для зміни напрямку осі оптичної системи. Комбінація з таких дзеркал може забезпечити поворот зображення. Відбивна здатність дзеркала досягає 95%.

Сферичним дзеркалом називають оптичну деталь, сферична поверхня якої є відбивною.

Лінза - оптична деталь, обмежена заломлюючими поверхнями, з яких хоча б одна є поверхнею обертання. За оптичними властивостям лінзи ділять на дві основні групи:

- 1) позитивні, тобто збірні;
- 2) негативні, тобто такі, що розсіюють.

Лінзи відрізняються одна від одної відстанню центрів утворюючих їх сферичних поверхонь, радіусами і показниками заломлення речовини, з якої вони зроблені. Величина оптичної сили лінзи визначається фокусною відстанню, яка залежить від кривизни заломлюючих поверхонь, показника заломлення і товщини лінзи. Наприклад, двоякоопукла лінза з великою

кривизною поверхонь має меншу фокусну відстань і велику оптичну силу, так як оптична сила лінзи обернено пропорційна її задній фокусній відстані.

За одиницю вимірювання оптичної сили лінзи приймають оптичну силу такої лінзи, фокусна відстань якої дорівнює 1 м; така одиниця називається **діоптрією**. У промисловості діоптрія позначається «дптр».

Наприклад, у позитивних лінз з фокусною відстанню +0,4 м оптична сила становить 2,5 дптр. У негативних лінз з фокусною відстанню - 0,4 м оптична сила -2,5 дптр, а для - 4,0 м вона дорівнює -0,25 дптр.

Лінзи - це засоби корекції зору. Їх можна розділити на дві групи:

- 1) одноелементні (окулярні і контактні лінзи, однолінзові лупи, діафрагми різних видів);
- 2) багатоелементні (багатолінзові лупи, телескопічні та проєкційні системи).

Для контролю близько розташованих деталей (що знаходяться на відстані не більше 250 мм від очей контролера) використовують лупи та мікроскопи різного типу.

Лу́па - це оптична система, що складається з однієї або декількох лінз, яка призначена для спостереження предметів, розташованих на обмеженій відстані.

Промисловість випускає лупи загального призначення різних типів і конструкцій: складні, кишенькові, вимірювальні, годинникові, лупи з ручкою та ін. Збільшення стандартних луп від 2,5× до 25×. Вимірювальні лупи випускаються зі збільшенням 10 ×.

При контролі поверхонь великих розмірів спочатку слід використати лупу з невеликим збільшенням, виявляючи підозрілі місця, а потім досліджувати їх лупою з великим збільшенням, оскільки вона має менше лінійне поле зору. Лупу потрібно тримати так, щоб її площина була паралельна поверхні контрольованого об'єкта і якомога ближче до ока, оскільки при цьому око сприймає найбільшу кількість відбитого від поверхні виробу світла.

Мікроскопи призначені для спостереження близько розташованих предметів. Робочі мікроскопи, використовувані в цехах, мають збільшення порядку 40×, поле зору близько 5 мм. Їх застосовують при контролі поверхонь з гальванічними покриттями, пофарбованих і полірованих поверхонь.

Мікроскопи вимірювальні використовуються в машинобудуванні для точних вимірювань лінійних розмірів контрольованого об'єкта. Точність вимірювання лінійних розмірів становить від 0,01 до 0,001 мм; кутових - від 10 до 1'; межа вимірювання лінійних розмірів - 50-200 мм.

Мікроскопи металографічні використовуються для дослідження мікроструктури металів та інших непрозорих об'єктів. Працюють у відбитому світлі. Збільшення від 10× до 350×, при фотографуванні від 45 × до 2 000 ×.

Лупи та мікроскопи дозволяють виявляти тріщини різного походження, поверхневі корозійні пошкодження, забоїни, відкриті раковини, пори, надири, риси і дефекти лакофарбових і гальванічних покриттів. При аналізі

характеру дефектів ці прилади дозволяють відрізнити втомні тріщини від гарячих, тріщини - від рисок, задирок, сколів окисної плівки і т.д.

Лупи і мікроскопи, що використовуються при капілярному і магнітопорошковому контролі, дозволяють виявляти більш дрібні, ніж без застосування оптичних засобів, тріщини, непровари, волосовини, розшарування і інші дефекти.

Зазвичай огляд деталей проводять за допомогою луп з фокусною відстанню від 125 до 12,5 мм і збільшенням від 2 до 20х. Мікроскопи істотно знижують поле зору і використовуються зі збільшенням від 8 до 40-50х. Збільшення мікроскопів, що використовуються при огляді деталей, несуттєво перевищує збільшення луп. Але навіть при однаковому збільшенні ефективність застосування мікроскопа вище лупи через хорошу якість зображення і більшу робочу відстань. Так, при збільшенні 20х робоча відстань лупи 10 мм, а мікроскопа МБС-2 - 64 мм при будь-якому збільшенні.

При оптичному контролі далеко розташованих об'єктів широко використовуються **телескопічні системи (прилади)**, які перетворюють паралельний пучок випромінювання, що надходить у їх вхідну зіницю, в паралельний, більш вузький пучок випромінювання, що виходить через вихідну зіницю системи. Це – телескопічні лупи, зорові труби, біноклі. Такі прилади застосовують для контролю деталей складної форми (з глибокими виїмками, отворами, пазами), а також деталей і силових елементів конструкцій, що знаходяться в межах прямої видимості, але розташованих на відстані, що перевищує відстань найкращого зору. Зазвичай використовується збільшення від 1 до 20-30х. Якщо необхідно велике поле зору, використовуються прилади, що дають зменшене зображення (від 0,5 до 1х).

Фокуси таких систем знаходяться в нескінченності, а оптична сила дорівнює нулю. Такі системи називаються **афокальними**.

Біноклі та телескопічні лупи застосовують для огляду віддалених деталей механізмів і машин в польових і цехових умовах. Біноклі найбільш ефективні при огляді об'єктів, що знаходяться в зоні прямої видимості на відстані більше 3-5 м. Біноклі мають пристрій для зміни фокусування, яке дозволяє отримувати чітке зображення об'єктів, що знаходяться на різних відстанях від контролера. Біноклями можна користуватися при температурі від -40 до + 45⁰С.

Деякі біноклі застосовують для огляду деталей з відносно близької відстані (1-1,5 м). У цьому випадку між об'єктивом і окуляром бінокля вставляють проміжні подовжувальні кільця шириною 5-10 мм.

Складна телескопічна система, крім двох складових основних оптичних частин - позитивних об'єктива і окуляра (труба Кеплера) і позитивного об'єктива і негативного окуляра (труба Галілея), може мати інші оптичні деталі, наприклад, захисні скла, сітки, призми, світлофільтри тощо. Конструктивно ці деталі можуть бути віднесені як до об'єктивної, так і до окулярної частини.

Перископічний метод дозволяє обстежити вузькі довгі прямолінійні порожнини.

Перископи - це оглядові прилади, побудовані на базі світловодної труби і лінзової оптики з механічним пристроєм (рис.3.2).

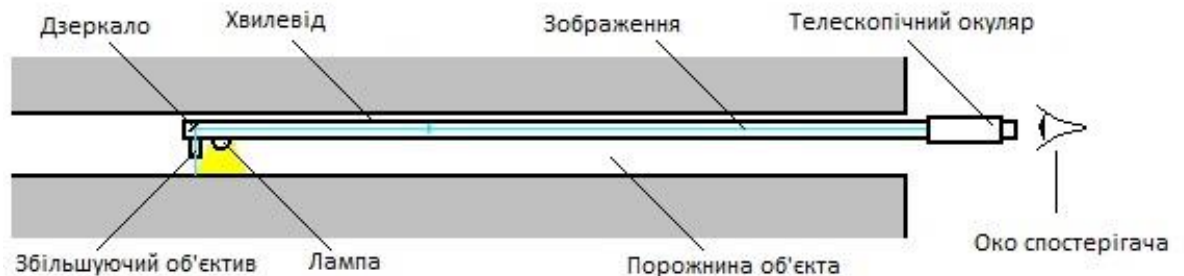


Рис. 3.2. Перископічний метод оптичного контролю прямолінійної порожнини

Цим методом, наприклад, в енергетиці контролюють поверхню осьових каналів роторів парових турбін. Довжина світловодної труби може досягати 6 м.

Ендоскопічний метод дозволяє обстежити вузькі довгі викривлені порожнини.

Ендоскопи - це оглядові прилади, початково побудовані на базі волоконної та лінзової оптики з механічним пристроєм, але в наш час завдяки інтенсивному розвитку відеоелектроніки вони створюються на основі мікровідеокамер, портативних комп'ютерів, а засобом (пристроєм), що передає зображення, є звичайний електричний кабель, довжина якого може досягати 40 м. При цьому орієнтація елемента, що приймає зображення, відносно осі кінця світловоду (кабелю) дистанційно управляється в оптоволоконних ендоскопах за допомогою троса Боудена (подібно ручному гальму велосипеда), а в сучасних приладах - стрілками на клавіатурі комп'ютера (рис. 3.3).

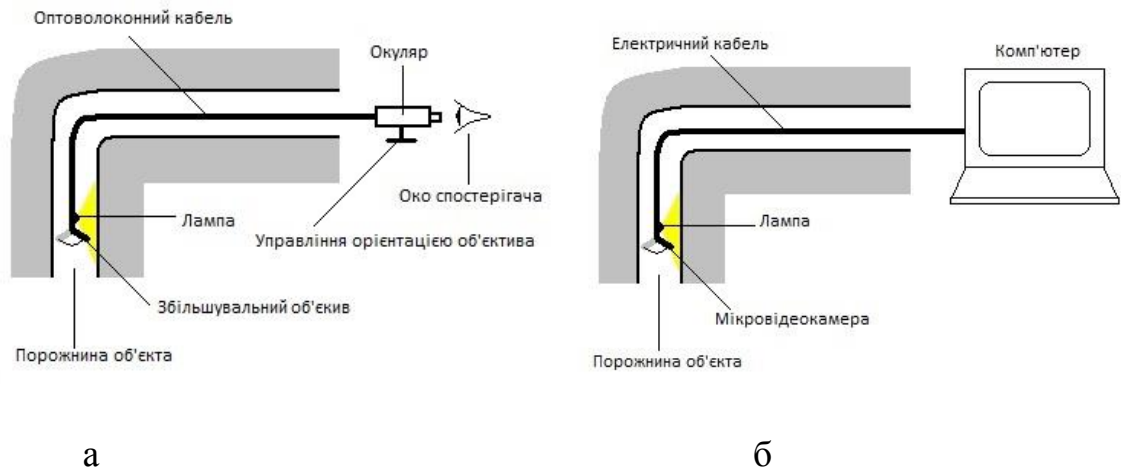


Рис. 3.3. Ендоскопічний метод оптичного контролю викривленої порожнини:
 а - за допомогою оптоволоконного ендоскопа; б - за допомогою комп'ютерного ендоскопа

Ендоскопи застосовуються:

- в машинобудівних цехах для контролю циліндричних отворів, отворів що перетинаються, внутрішньої різьби та на інших недоступних ділянках;

- в авіаційно-космічній промисловості для візуального контролю вузлів двигунів, систем живлення гарячим, повітрям, систем управління і гальмування;

- в автомобільній промисловості для контролю виливків і головок, недоступних місць масляних систем, механічних та електричних конструкцій, при діагностуванні двигунів тощо;

- на електростанціях та атомних об'єктах для контролю лопаток турбін, генераторів, двигунів, насосів, при візуальному контролі бойлерних труб на точкову корозію та інші дефекти, при контролі внутрішніх поверхонь атомних реакторів без розборки;

- у хімічній та нафтохімічній промисловості при візуальному контролі випарних конструкцій, ректифікаційних блоків, камер хімічних реакцій, циліндрів, барабанів та інших типів обладнання.

У випадках, коли шкідливе випромінювання, температура або хімічне середовище становить небезпеку для контролю або коли конфігурація об'єкта контролю не дає можливості його контролювати безпосередньо, застосовують агрегатні комплекси дистанційного оптичного контролю, до складу яких входять телевізійна установка, світловий прилад і системи позиціонування і транспортування.

Для огляду внутрішніх поверхонь порівняно коротких порожнистих деталей використовуються оптичні трубки цитоскопів, бронхоскопів і т.п.

Цитоскоп - тонка трубка з оптичною системою - має пристрій, що дозволяє змінювати положення об'єктива і напрямок огляду порожнин діаметром більше 8 мм і глибиною до 200 мм при збільшенні 1,1-1,8х.

Оптична система, як правило, складається із змінних окулярів, об'єктивів і обертаючих систем. Може бути передбачена підсвітка на кінці трубки.

Гнучкі телескопічні прилади включають в себе набори волокон. Основним елементом волоконної оптики є світловод, що представляє собою сердечник з оптичного скла з високим показником заломлення n_c з оболонкою також з оптичного скла, але з меншим показником заломлення n_n . Промені світла, що падають на один торець такого світловода, завдяки повному внутрішньому відбиванню поширюються уздовж волокна до іншого торця. Важливою перевагою волоконної оптики є можливість передачі світлової енергії по криволінійним каналам, вільно орієнтованим в просторі. Гранично допустимий радіус вигину світловода при проходженні променів без витікання мод залежить від показників заломлення сердечника і оболонки.

За одиницю вимірювання радіуса вигину світловода умовно прийнятий радіус самого світловода. Чим більше різниця в показниках заломлення сердечника n_c і оболонки n_n , тим менше гранично допустимий радіус вигину світловода.

Однією з особливостей волоконної оптики є розкладання зображення на елементарні площадки розміром, що дорівнює діаметру світловода (від одиниць до десятків мікрон), і передача їх по окремих світловодах, які змінюють форму і положення в просторі, на значні відстані (до сотень метрів). Ця відстань залежить від світлопропускання світловодів, яке визначається коефіцієнтом світлопропускання τ .

Одиничний світловод передає тільки світлову енергію, а для передачі зображення застосовуються джгути з регулярно укладених і склеєних або спечених світловодів.

В освітлювальних джгутах оптичні волокна розташовані безладно; в джгутах для передачі інформації волокна розташовані ідентично на обох кінцях джгута. На вихідному кінці отримується мозаїчне зображення.

Коефіцієнт світлопропускання джгута довжиною 1500-500 мм становить для білого світла 25-50%. Роздільна здатність джгута довжиною близько 1 м становить 12-15 ліній на 1 мм; коротких джгутів - близько 20 ліній на 1 мм. Діаметр волокон для джгутів зазвичай становить 20-50 мкм, в ряді випадків 12 мкм; діаметр джгута зазвичай лежить в межах від 5 до 40 мм.

На рис. 3.4 представлена схема інтроскопа з роздільними інформаційним та освітлювальним каналами. Така конструкція сприяє розширенню доступності в зони обмежених габаритів, проте ускладнює користування інтроскопів необхідністю синхронного управління освітлювальним і інформаційним джгутами. На схемі оптичне випромінювання створюється джерелом 1, передається по гнучкому світловоду 2, відбивається від об'єкта 3 і сприймається джгутом 4.

Зображення зчитується через окуляр спостерігачем 5 або відображається, наприклад, на транспорті 6.

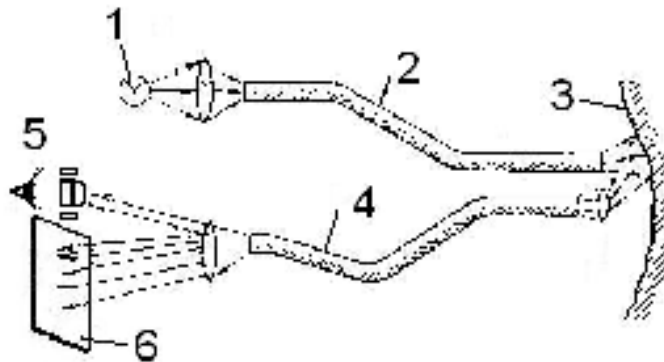


Рис. 3.4. Схема інтроскопа з роздільними інформаційним та освітлювальним каналами: 1 - джерело; 2 - світловод; 3 - об'єкт відбивання; 4 - джгут; 5 - окуляр спостерігача; 6 - транспорт

У оптико-електронних системах контролю око замінює **фотоелемент**. У загальному випадку оптико-електронна система складається з пристрою сприйняття (сканер), пристрою зображення, логічної схеми аналізу зображення і механізму розбраковки продукції. За принципом сканування оглядово-пошукові пристрої розділяються на пристрої поелементного, послідовно-зонального, паралельно-зонального і зонально-поелементного сканування.

У першій з систем сканування КО (контрольованого об'єкта) здійснюється в будь-якій послідовності по кожному елементу поля зору. Можливий повний перегляд контрольованого поля і відтворення повного зображення поля.

У пристрої **послідовно-зонального сканування** сканування носить не дискретний, а неперервний характер. До таких систем належать, наприклад, телевізійні системи. Пристрій дозволяє відтворювати повне зображення об'єкту сканування.

У пристроях **паралельно-зонального сканування** сканування здійснюється одночасно за допомогою двох взаємно перпендикулярних щілин; кожна щілина має свій світлочутливий елемент і свій канал передачі інформації; повне зображення сканованого об'єкта не відтворюється.

Пристрій **зонально-поелементного сканування** працює в два етапи: спочатку здійснюється сканування по зонах і з'ясовується, в якій зоні знаходиться дефект, після цього виконується поелементне сканування конкретної зони.

За принципом дії скануючі пристрої можуть бути оптико-механічні, оптико-електричні, напівпровідникові, фотоелектронні вакуумні, волоконно-оптичні.

В оптико-механічних системах використовуються рухливі скануючі елементи відбивної і заломлюючої оптики - дзеркальні елементи різної форми, клини, багатогранні барабани, лінзи, призми, які здійснюють обертальний, коливальний або зворотно-поступальний рух. Наявність рухливих механічних систем, підвищена складність і мала надійність при тривалій експлуатації є недоліками цих пристроїв.

Інші системи прості, надійні і забезпечують чіткість зображення. Сканування здійснюється за змінною траєкторією електронним способом.

Інші оптичні та оптико-механічні прилади. Ці прилади мають оптичні та механічні елементи і застосовуються для вимірювання лінійних розмірів. Вони бувають контактні і безконтактні, проєкційні, інтерференційні, лазерні або засновані на інших фізичних принципах.

Найбільшого поширення з них отримали оптиметри, довжиномери і інтерферометри.

Оптиметри - це оптико-механічні прилади для вимірювання лінійних розмірів методом порівняння з мірою, засновані на використанні оптико-механічного важеля. Основні типи оптиметрів - вертикальний і горизонтальний. Оптиметри застосовують для вимірювання лінійних розмірів і відхилень форми особливо точних деталей машин і вимірювальних інструментів, а також для перевірки кінцевих мір довжини 3, 4 і 5-го класів точності.

Довжиномери - це оптичні вимірювальні прилади, що мають розмірний елемент - **піноль** зі шкалою високої точності, з якою співставляється шуканий розмір об'єкта контролю. Завдяки цьому контактні вимірювання лінійних розмірів можна робити як методом порівняння з мірою, так і методом безпосередньої оцінки. Відлікові пристрої сучасних довжиномерів виготовляють на базі дифракційної решітки, що дозволяє відраховувати результат з дискретністю 0,2 мкм (у оптиметра 1 мкм). Крім того, сучасні довжиномери електрифіковані і оснащені мікро-ЕОМ, що дає можливість автоматизувати процес вимірювання та обробки його результатів.

Інтерферометри - це оптичні вимірювальні прилади, які використовують інтерференцію. При інтерференції видимого світла виникає картина інтерференцій, тобто ряд спектральних смуг, характерних для видимого світла, симетрично розташованих відносно чорної смуги в середині ряду. Ця смуга служить своєрідним візиром приладу. При зміні розміру об'єкта контролю сприймаючий елемент приладу викликає в перетворювальному пристрої приладу відповідне зміщення картини інтерференції на фоні безпосередньої шкали. За цією шкалою відраховуються покази інтерферометра. Найбільш доцільно використовувати інтерферометри для контролю та перевірки кінцевих мір довжини 1, 2, 3-го класів точності, а також для контролю та перевірки проволочи, використовуваної при вимірюванні середнього діаметра різьби.

Лазерний інтерферометр з мікропроцесором - це інтерферометр з оптичним квантовим генератором - лазером. Лазер зручний тим, що створює

вузько спрямований когерентний пучок світла великої потужності. Порівняно з контактним інтерферометром лазерний має велику чутливість.

Лазерні інтерферометри в основному призначені для вимірювання лінійних або кутових переміщень, що відбуваються в агрегатах машин і в пристроях, від яких вимагається точність рухів в процесі роботи.

3.4. Лазерні методи контролю.

Принцип дії приладів лазерної оптичної дефектоскопії заснований на використанні різних ефектів взаємодії електромагнітного випромінювання з речовиною. Прилади реєструють зміни оптичних характеристик об'єктів контролю. Лазерна дефектоскопія базується на використанні основних властивостей лазерного випромінювання - монохроматичності, когерентності та спрямованості.

Принцип визначення поверхневих дефектів за допомогою лазерних дефектоскопів полягає в наступному. Поверхня, вільна від дефектів, дає певну густину розподілу розсіювання, причому від цього розсіювання приблизно однаковий для кожної точки поверхні. Дефекти поверхні змінюють вигляд розподілу розсіювання випромінювання. Різні види дефектів призводять до різної зміни густини розподілу пучка розсіяного випромінювання. Для визначення поверхневих дефектів протяжних об'єктів застосовують сканування його поверхні лазерним променем, зміна положення якого в просторі може здійснюватися, наприклад, за допомогою обертових або вібруючих дзеркал. У типовій схемі контролю протяжних об'єктів (стрічка паперу, полімерна плівка, листи сталевого прокату) за допомогою дзеркального барабана відбувається сканування виробу по рядках у напрямку, перпендикулярному до його переміщення. Сканування по довжині виробу відбувається за рахунок його власного руху. Частота рядкового сканування визначається мінімальними дефектами, які виявляються. Випромінювання лазера після відбиття від об'єкта направляється оптичною системою на фотопомножувач, перетворюється в електричний сигнал і надходить на блок електронної обробки сигналу [8].

Схему лазерного скануючого мікроскопа - зонда можна використовувати для реєстрації не відбитого від об'єкта випромінювання лазера, а збудженого ним в напівпровіднику фотоелектричного ефекту (фотовідповідь). На екрані кінескопа в цьому випадку спостерігають зображення окремих точок, яскравість яких пропорційна величині фотовідповіді напівпровідника на світловий вплив у відповідних зонах. Такий метод перспективний для контролю інтегральних схем.

3.5. Фізичні основи голографічних методів контролю.

Голограма отримується в результаті інтерференції розділеного на дві частини монохроматичного потоку випромінювання лазера: розсіяного контрольованим об'єктом і прямого (опорного) пучка, що потрапляє на

фотопластинку, минаючи об'єкт. При відтворенні записаного на фотопластинці зображення голограма підсвічується опорним променем. В результаті виникають два видимих об'ємних зображення об'єкта. Принципові схеми голографічного запису і відтворення показані на рис. 3.5.

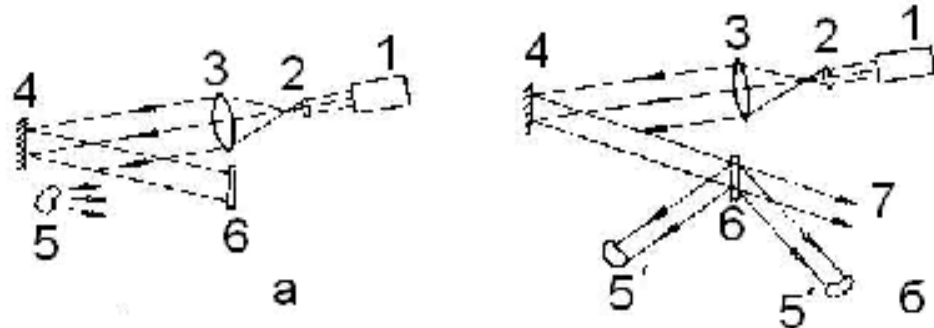


Рис. 3.5. Схема запису (а) і відтворення (б) голографічних зображень:
 1 - лазер; 2 - мікрооб'єкт; 3 - коліматор; 4 - дзеркало опорного променя;
 5 - контрольований об'єкт; 5' і 5'' - уявне і дійсне зображення об'єкта;
 6 - голограма; 7 - промені дифракції нульового порядку

Голограма реєструє як амплітудну, так і фазову інформацію, що міститься в хвильовому фронті. За її допомогою можна розглядати об'єкт з різних точок зору, фотографувати зображення окремих частин об'єкта. Голограми дозволяють проводити прямі вимірювання розмірів об'єктів, знаходити координати окремих точок на поверхні, вивчати його (об'єкта) рельєф, форму і т.д.

Голографічна інтерференція служить для визначення величин деформацій, вібрацій, відхилень від стандарту, співрозмірних з довжиною хвилі використовуваного лазера. Безконтактність, висока чутливість, можливість обстеження порівняно великих поверхонь, дискретна або аналогова реєстрація швидких або повільних процесів зміни стану КО - характерні риси голографічної інтерферометрії.

Принцип голографічної інтерферометрії полягає в наступному. Після експонування і фотообробки голограму встановлюють на місце зйомки, освітлюють лазерним пучком і спостерігають крізь неї об'єкт, що отримав якісь деформації. При цьому об'єкт спостерігається з виникаючою на ньому мережею інтерферометричних смуг. Така картина виникає за рахунок інтерференції фронтів світлових хвиль, відбитих від об'єкта в момент спостереження і відновлених з голограми опорним пучком. Інтерферометричні смуги є геометричним місцем точок рівних переміщень. Часто метод голографічної інтерферометрії реалізується таким чином, що на одну і ту ж пластинку двома експозиціями записуються послідовно голограми від об'єкту, що знаходиться у вихідному і досліджуваному стані.

При цьому сумарна експозиція повинна знаходитися в межах лінійної ділянки характеристичної кривої фотоемульсії [9].

Практичне застосування голографічних методів неруйнівного контролю вимагає підтримки механічної стабільності об'єкта контролю з високою точністю під час експонування голограми, тому голографічні установки повинні мати високу ступінь віброзахисту. Для скорочення часу експозиції доцільно застосування лазерів великої потужності.

Реєструючі середовища, які застосовуються для фіксації голограм, повинні мати високу просторову роздільну здатність (близько 3000-4000 ліній на 1мм). Дана вимога суперечить умові високої енергетичної чутливості фотоемульсії, тому матеріали, які використовуються в голографії, відрізняються низькою світлочутливістю (близько 0,01 одиниць світлочутливості в порівнянні з 35-250 одиницями, використовуваними у звичайній фотографії).

Останнім часом з'явилися термопластичні матеріали, чутливі до випромінювання лазерів. Для них характерний тепловий механізм візуалізації прихованого зображення, який не вимагає фотохімічної обробки. Голограма проявляється після простого нагріву термопластинки безпосередньо на місці експонування, що істотно підвищує продуктивність контролю. Застосування таких термопластиків вимагає використання лазерів великої потужності (порядку 1 Вт). Спостереження голограм може проводитися візуально або за допомогою телевізійних установок.

Методи голографічної інтерферометрії дозволяють давати кількісну оцінку параметрів дефектів як у статиці, так і в динаміці з точністю до 0,1 мм. Голографічні установки застосовують для контролю якості швів в процесі виготовлення крил літака, тепловиділяючих елементів ядерних реакторів, багатошарових друкованих плат, інтегральних схем і т.п.

3.6. Класифікація і загальні вимоги до оптичних приладів для ВОК

За видом приймача променевої енергії розрізняють **три групи оптичних приладів**: візуальні, детекторні і комбіновані.

У візуальних приладів приймач - око (відомості про деякі характеристики зору, які слід враховувати при ВОК, наведені в додатку Б). Це оглядові ендоскопи, лупи, мікроскопи і т.п.

До детекторних приладів відносяться прилади, в яких приймачем служать різні детектори: хімічні реагенти (фотоемульсії), люмінесцентні речовини, спектрометри і т.д.

Комбіновані прилади придатні для огляду об'єкта візуально і за допомогою детектора.

За призначенням прилади ВОК діляться на три групи:

1) прилади для контролю дрібних близько розташованих об'єктів, що знаходяться від очей контролера в межах відстані найкращого зору $l \leq 250$ мм (лупи, мікроскопи);

2) прилади для контролю віддалених об'єктів ($l > 250$ мм) - телескопічні лупи, біноклі, зорові труби;

3) прилади для контролю прихованих об'єктів (ендоскопи, бороскопи, перископічні дефектоскопи).

Розрізняють також **прилади цехового призначення** й **прилади польового використання**.

Прилади цехового призначення застосовуються при постійній температурі від $+ 15^0$ до $+ 20^0\text{C}$, нормальному атмосферному тиску, невисокій вологості.

Прилади польового призначення повинні працювати в умовах температури від -55^0 до $+ 60^0\text{C}$, при трясці, вібраціях, при опадах і т.д. У захисному корпусі (ящику) повинні бути передбачені пристрої для міцного кріплення всіх деталей приладів ВОК, порожнини приладів повинні бути надійно захищені від проникнення вологи, виконані з корозійностійких матеріалів і мати атмосферостійкі захисні покриття. Прилади повинні мати малу масу, бути придатними до перенесення, мати зручно розташовані ручки панелі управління. Повинні бути передбачені пристрої для зменшення негативного впливу розсіяного світла (бленди, діафрагми, світлопоглинаюча обробка деталей). Застосовують наочки, які захищають очі від попадання стороннього світла і знижують стомлення очей.

Важливе значення мають зовнішній вигляд і форма приладу, особливо ендоскопа. Він не повинен мати виступаючих елементів і різких переходів в перетині занурюваної частини, що ускладнюють введення в контрольований механізм і виведення його звідти.

Достовірність візуально-оптичного контролю визначається багатьма факторами, серед яких велике значення мають умови праці. Робоче місце має бути розраховано, як правило, на роботу сидячи. Вентиляція, опалення, освітлення мають забезпечувати комфортні умови праці. Освітленість на робочому місці для контролю і система штучного освітлення вибираються в залежності від кольору і яскравості деталей, що перевіряються, розмірів виявляємих дефектів і їх контрасту з фоном. Лампи для місцевого освітлення необхідно розміщувати так, щоб прямі промені не потрапляли в очі контролера. Край плафона або відбивача повинен розміщуватися трохи нижче рівня очей контролера. Матеріал і колір покриття робочого столу вибирають так, щоб зменшити контрасти яскравості в поле зору контролера і прискорити переадаптацію при чергуванні спостереження деталей і фону, а також не допустити сліпучої дії світла, відбитого від покриття. Поверхня столу не повинна бути білою, її не можна покривати склом.

Колір основних поверхонь робочого приміщення повинен забезпечувати оптимальні умови праці контролера. Для очей найбільш прийнятні світлі тони жовтої, зеленої і частково блакитної зон спектра при слабкій і середній їх насиченості. Стелі і верхню частину стін можна фарбувати в білий колір.

РОЗДІЛ 4. КОНТРОЛЬ ПРОНИКАЮЧИМИ РЕЧОВИНАМИ

Цей вид контролю в цілому базується на здатності тих чи інших речовин проникати в слабо розкриті зовнішні і наскрізні дефекти в твердих стінках контрольованих об'єктів.

4.1. Методи контролю проникаючими речовинами

При контролі проникаючими речовинами використовують газоаналітичний, газогідравлічний, вакуумно-рідинний і капілярний методи (табл. 4.1). Перші три методи об'єднані поняттям «течопошук».

Таблиця 4.1. Методи контролю проникаючими речовинами

Метод	Контрольовані об'єкти	Дефекти, що виявляються
Газоаналітичний	Судини, балони, аміачні трубопроводи	Тільки наскрізні
Газогідравлічний	Балони, дюкери	
Вакуумно-рідинний	Днища і стінки резервуарів	
Капілярний	Будь-які тверді	Зовнішні наскрізні і нескрізні

Газоаналітичний метод полягає в наступному (рис. 4.1).

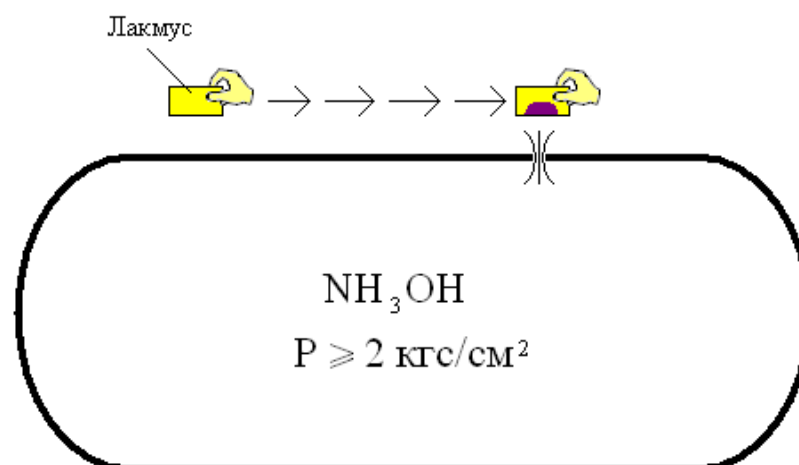


Рис. 4.1. Пошук наскрізних дефектів в стінці балона газоаналітичним методом

Герметично закритий об'єкт наповнюють хімічно активним газом (аміак) під тиском. Як індикатор використовують відрізок лакмусового паперу або спеціальний портативний прилад - газоаналізатор. Лакмусом або датчиком газоаналізатора повільно сканують всю зовнішню поверхню об'єкта. В зоні, де є наскрізний дефект, утворюється витік аміаку, в результаті в цьому місці лакмус темніє, а газоаналізатор дає відповідні покази.

Метод пов'язаний з використанням отруйного газу, тому необхідно застосування спеціальних захисних засобів: оператор повинен виконувати контроль в протигазі і гумових рукавичках. Лакмусовий спосіб більш дешевий, тому що не вимагає спеціальної апаратури, але при виявленні дефектів він пов'язаний з витратою індикаторного паперу.

Газогідравлічний метод в побуті іноді називають «бульбашковим» (рис. 4.2). Герметично закритий об'єкт наповнюють повітрям під тиском і занурюють у прозору рідину (дюкери - підводні переходи різних трубопроводів через водойми - свідомо занурені в неї). У точці, де є наскрізний дефект, утворюється витік повітря в рідину, в результаті в цьому місці в рідині виникає ланцюжок висхідних бульбашок. У побуті цей метод добре знайомий велосипедистам - саме так вони виявляють дрібні проколи в камерах коліс.

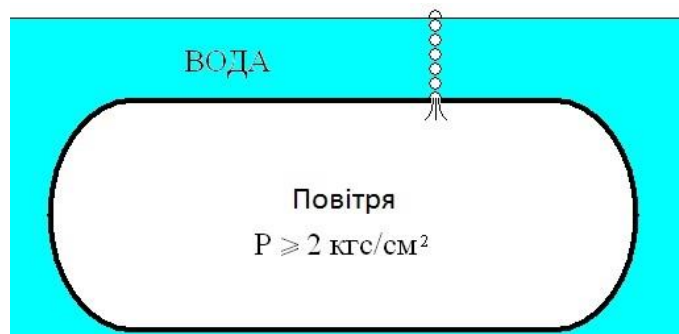


Рис. 4.2. Пошук наскрізних дефектів в стінці балона газогідравлічним методом

Вакуумно-рідинний метод (рис. 4.3) широко застосовується при контролі герметичності днищ і стінок резервуарів для зберігання нафти і нафтопродуктів. Засобами контролю є електричний вакуумний насос, вакуумний манометр і вакуум-камера, що представляє собою лист товстого оргскла із штуцером, обнесений по контуру товстою смугою пористої гуми. Насос, манометр і камера з'єднані між собою гумовими шлангами. В якості індикаторного засобу використовується рідке мило або звичайний косметичний шампунь. Контрольовану ділянку об'єкта рясно покривають шаром мила, накривають вакуум-камерою і відкачують з-під неї повітря. Ступінь вакууму повинна бути не менше - $0,75 \text{ кгс/см}^2$. Якщо під камерою мається наскрізний дефект, то під дією зовнішнього атмосферного тиску зовнішнє повітря спрямовується крізь нього в порожнину камери, і над

дефектом виникає спучення мильного шару, яке оператор добре бачить крізь прозору кришку камери.

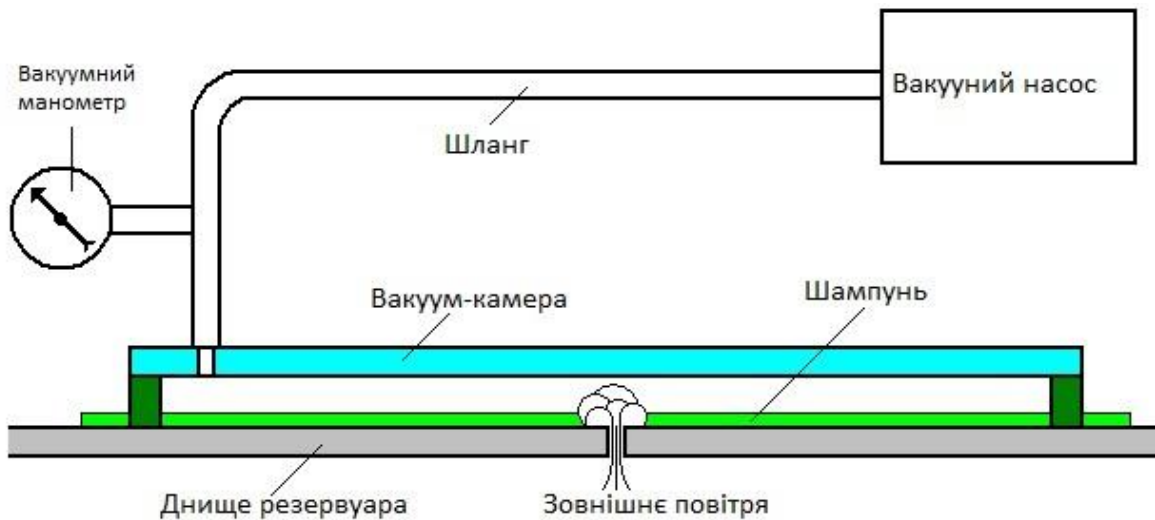


Рис. 4.3. Пошук наскрізних дефектів в днищі резервуара вакуумно-рідинним методом

4.2. Капілярний метод неруйнівного контролю (КНК)

Цей метод придатний тільки для виявлення дефектів на поверхні контрольованого об'єкта. Він заснований на проникненні спеціальної рідини - **пенетранта** - в порожнини поверхневих і наскрізних несучільностей об'єкта контролю, у вилученні пенетранта з дефектів за допомогою проявника покриття і фіксуванні пенетранта. Глибина дефектів, виявляємих КНК, повинна значно перевищувати їхню ширину. Якщо ширина поверхневого ушкодження більше його глибини (риска, подряпина), то воно легко заповнюється пенетрантом і так само легко видаляється з пошкоджень. Такі дефекти, як правило, КНК не виявляються.

КНК зазвичай використовують для виявлення дефектів, не видимих неозброєним оком. Його абсолютну чутливість визначають середнім розкриттям дефекту типу тріщин довжиною 3-5 мм, що виявляється із заданою вірогідністю.

Індикаторні малюнки, які утворюються при контролі, або люмінесціюють в ультрафіолетових променях, або мають забарвлення, викликане вибіркоким поглинанням (відбиванням) частини падаючих на них світлових променів. Лінії індикаторного малюнка мають ширину від 0,05 до 0,3 мм (на відстані найкращого зору це відповідає кутовий ширині від 15" до 1'30"), контраст яскравості 30-60% і більше, а також високий кольоровий контраст. Це значно вище відповідних параметрів поверхневих дефектів, що

виявляються візуально (кутовий розмір від 1' до 10", контраст яскравості 0-5%, кольоровий контраст відсутній).

Капілярний метод являє собою багатоопераційний процес. Типовий перелік операцій включає в себе підготовку виробу до контролю, нанесення індикаторної рідини, видалення її надлишків та проявлення індикаторних слідів дефектів (рис. 4.4).

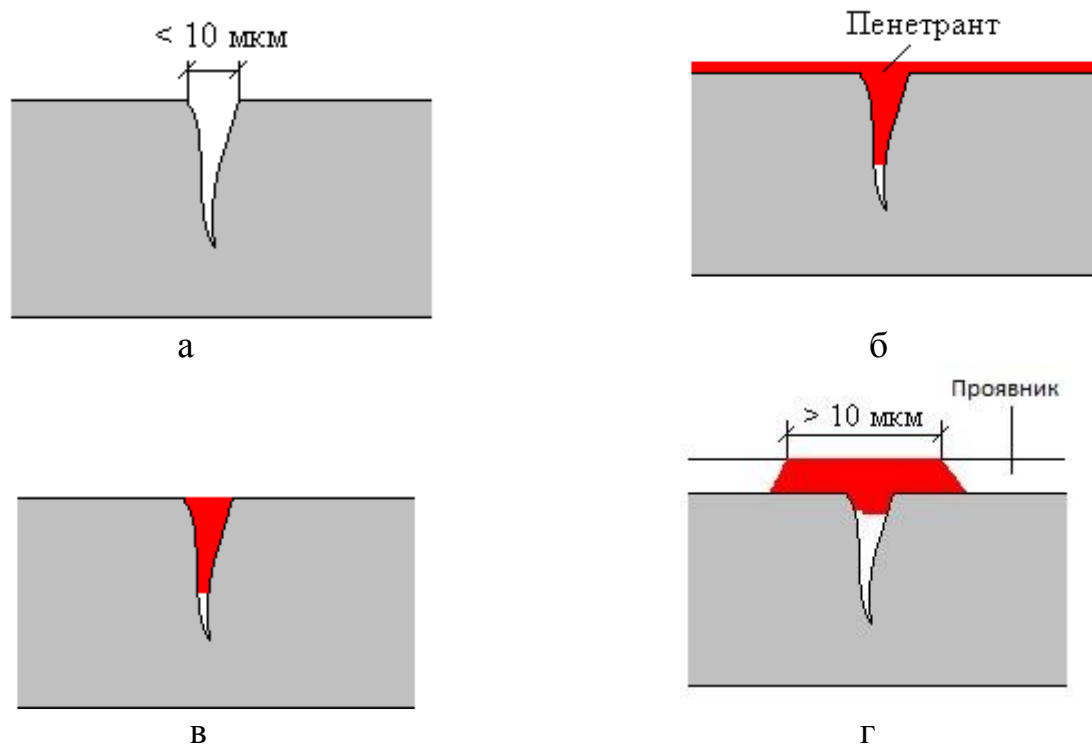


Рис. 4.4. Пошук поверхневих дефектів в металі капілярним (кольоровим) методом

Під час кожної з цих операцій поверхня тріщини вступає в контакт з кількома дефектоскопічними матеріалами, в основному з рідинами. Тому явище змочування поверхні деталі різними рідкими дефектоскопічними матеріалами грає першорядну роль. Тільки завдяки змочуванню можливий контакт між дефектом і дефектоскопічними матеріалами і реалізація капілярного контролю.

Ефективність кожної операції залежить від декількох фізичних явищ, які визначаються фізико-хімічними властивостями контактуючих середовищ і матеріалу об'єкта. Однак складність вибору властивостей дефектоскопічних матеріалів полягає в тому, що в різних операціях одна і та ж рідина повинна мати навіть протилежні властивості. Так, при заповненні тріщини індикаторна рідина повинна мати хорошу проникаючу здатність, щоб якомога краще заповнити порожнину дефекту. Але парадокс полягає в тому, що таку рідину потім важко витягти з тріщини при проявленні (прояву). В результаті пенетрант залишиться в тріщині і не утворює сліду на поверхні, тобто тріщина таким пенетрантом не буде виявлена.

Крім того, слід відразу звернути увагу на те, що крім взаємодії рідких дефектоскопічних матеріалів з твердими поверхнями не можна не брати до уваги взаємодію рідин між собою, а також з газами. Явища розчинення, адсорбції, емульгування, дифузії серйозно впливають на кінцевий результат контролю, насамперед на його чутливість.

При комбінованих способах контролю, що включають в себе капілярний метод, картину ускладнюють фізичні поля (акустичне, магнітне, електромагнітне) і ті явища, які виникають при їх взаємодія з рідкими і твердими дефектоскопічними матеріалами.

При КНК ставляться наступні завдання:

виявлення дефекту,

визначення напрямку дефекту щодо конфігурації деталі,

визначення розмірів і форми дефекту.

У процесі КНК здійснюється таке маркування дефектів:

1. - за кількістю дефектів: А - поодинокі дефекти, Б - багаточисельні дефекти, В - суцільні дефекти;

2. - за напрямком дефектів:

" - дефекти, паралельні напрямку виробу;

⊥ - дефекти, перпендикулярні напрямку виробу;

∠ - дефекти, розташовані під кутом до напрямку виробу.

Основними об'єктами КНК є не феромагнітні матеріали:

лопатки турбін з нікелевих сплавів, у тому числі авіаційних турбін;

титанове кріплення для літальних і космічних апаратів;

литі деталі з кольорових металів для електроніки і систем автоматичного управління;

деталі приладів і апаратів нафтової та хімічної промисловості.

КНК дозволяє діагностувати об'єкти контролю будь-яких розмірів і форм, виготовлених з чорних і кольорових металів і сплавів, пластмас, скла, кераміки, а також інших твердих неферомагнітних матеріалів. При цьому виявляються такі дефекти, як тріщини, пористість, рихлоти.

При КНК застосовують такі матеріали:

1. **В якості пенетранта** - різні рідкі розчини, найчастіше на основі гасу, в який додаються барвники або люмінофори, що світяться під дією ультрафіолетового випромінювання. Наприклад, пенетрант «А» складається з 700 мл гасу, 300 мл бензину Б-70, 30 г темно-червоного барвника. Пенетрант «Е» складається з гасу (800 мл), бензолу (200 мл) і темно-червоного барвника. Існують пенетранти, у яких в гас додані ацетон, бензин і барвник, або трансформаторне масло, скипидар і барвник, і ряд інших.

Люмінесцентні пенетранти являють собою суміші органічних розчинників, масел, гасу з добавками поверхнево-активних речовин (ПАР) і люмінесцентних речовин: масел, нафти тощо.

2. **Очищувальну рідину**, яка призначена для видалення пенетранта з поверхні контрольованого об'єкта. В якості очищувальних рідин використовуються вода, вода з додаванням ПАР, органічні розчинники,

суміш масла з гасом та інші рідини. Наприклад, масло МК-8 - 65% обсягу, толуол - 30%, емульгатор ОП - 7-5%.

3. **Гасник**, який являє собою склад для усунення забарвлення або люмінесцентних залишків пенетранта без видалення його з контрольованої поверхні. В якості гасників використовується, наприклад, вода з кальцинованою содою (гасник O₂₀₁), спирт з поверхнево активною речовиною ОП - 7 (гасник O₃₀₀) та інші речовини.

4. В якості **проявляючих речовин** - агар-агар, крохмаль, порошок окису магнію, суспензія каоліну в ацетоні і багато інших матеріалів, які адсорбують пенетрант, що проник в дефекти, і тим самим дозволяють фіксувати їх на поверхні контрольованого об'єкта.

Для виконання КНК застосовується наступна апаратура:

1 - ванни для миття і насичення виробу пенетрантом;

2 - шафи для сушіння виробів;

3 - пристрої для нанесення пенетранта;

4 - оптичні пристрої для фіксації дефектів візуально, за допомогою фотозйомок і для опромінення пенетранта ультрафіолетовими променями у разі застосування люмінесцентних речовин.

Проникаючу рідину наносять на попередньо очищену поверхню деталей, щоб заповнити порожнини можливих поверхневих дефектів. Тривалість контакту рідини з поверхнею деталі залежить від фізичних властивостей рідини, характеру виявляємих дефектів і способу заповнення рідиною порожнин дефектів. У табл. 4.2 наведені способи заповнення порожнин дефектів пенетрантом. Найбільш простим і поширеним у виробничих умовах є **капілярний спосіб**. При цьому для поліпшення проникнення рідини в порожнини проникаюча рідина або контрольована деталь можуть підігріватися.

При **вакуумному способі** деталь поміщають в герметичну камеру, з якої відкачують повітря. Після подачі проникаючої рідини камеру розгерметизують. Рідина заповнює порожнини дефектів під дією капілярного і атмосферного тисків. При розрідженні близько 1 Па виявляються тріщини шириною на порядок менше, ніж при капілярному просоченні.

Таблиця 4.2. Особливості заповнення порожнин дефектів проникаючою рідиною різними способами

Назва способу	Технологічна характеристика
Капілярний	Мимовільне заповнення порожнин дефектів проникаючою рідиною, що наноситься на контрольовану поверхню змазуванням, зануренням, струменево, розпиленням за допомогою стисненого газу
Вакуумний	Заповнення порожнин дефектів проникаючою рідиною при зниженому тиску в порожнинах
Компресійний	Заповнення порожнин дефектів проникаючою рідиною при впливі на неї підвищеного тиску
Ультразвуковий	Заповнення порожнин дефектів проникаючою рідиною при впливі на неї ультразвукових коливань
Деформаційний	Заповнення порожнин дефектів проникаючою рідиною при впливі на об'єкт контролю пружних коливань звукової частоти або статичного навантаження, яке збільшує ширину розкриття тріщин

При **компресійному способі** рідина швидко заповнює порожнини дефектів під дією капілярного і зовнішнього надлишкового тисків. При цьому досягається більш повне заповнення порожнин дефектів, проте деякі пенетранти змінюють свої властивості при збільшенні тиску - збільшується в'язкість, погіршується змочування твердих тіл, в результаті ефективність способу невелика.

При **ультразвуковому способі** прискорюється процес заповнення порожнин дефектів, особливо забруднених. Високої ефективності спосіб досягає при використанні пенетрантів середньої і високої в'язкості (сумішей масла з гасом), коли напрям коливань збігається з площиною порожнини дефекту.

Під впливом статичних сил збільшується ширина розкриття порожнини дефектів, поліпшуються умови заповнення цих порожнин і виявлення дефектів низьков'язкими рідинами. За звичайних умов, наприклад, заповнення поверхневих тріщин розкриттям 0,002 мм і глибиною 1,5 мм в склі відбувається за 20 с; така ж сама тріщина глибиною 3 мм повністю заповнюється приблизно за 40 с.

Швидкість заповнення наскрізних дефектів залежить від їх розмірів і конфігурації, час заповнення вимірюється секундами.

Індикаторні пенетранти для фарб і люмінофорів, виготовлені на основі розчинників (гас, бензин тощо), досить швидко випаровуються. Тривала витримка пенетранта на контрольованій поверхні може привести до його висихання і випаданню у вигляді осаду з частинок барвника або люмінофора. Ці частинки, будучи сорбентом, можуть призвести до вилучення пенетранта з гирла дефекту; в результаті виявлення дефектів при контролі погіршується. Для запобігання висихання можна періодично наносити додатково пенетрант, проте це процес трудомісткий, особливо при контролі великих площ, тому час знаходження пенетранта на контрольованій поверхні зазвичай обмежений 3-5 хв. Після цього індикаторний пенетрант необхідно видалити з поверхні контрольованого об'єкта (КО).

Способи видалення проникаючої рідини з поверхні вибирають з урахуванням необхідності збереження її в порожнинах дефектів, а також типу пенетранта, шорсткості поверхні, умов контролю, обсягу робіт і необхідної продуктивності праці. При локальному контролі деталей у польових, цехових умовах у разі використання невисихаючих рідин деталі протирають ганчір'ям або папером. При великому обсязі робіт або при контролі шорсткуватих деталей (з чистотою обробки поверхні нижче п'ятого класу) цей спосіб непридатний. У цих випадках застосовують промивання органічними розчинниками, водою тощо. Для видалення невисихаючих рідин застосовують обдув струменем піску, дробу, кісточкової крихти, тирси тощо. Гасінням усувається люмінесценція або забарвлення при використанні спеціальних проникаючих рідин. При контролі масових деталей в цехових умовах застосовують комбінований спосіб видалення проникаючої рідини з поверхні деталей.

Повноту видалення пенетранта визначають візуально або (при люмінесцентному методі) в ультрафіолетовому світлі. Оцінку вважають задовільною, якщо відсутній фон, що світиться або пофарбований.

Якщо фон виявлений, для повторного очищення використовують очищувач типу О-1 або О-2. При температурі навколишнього повітря нижче 8°C індикаторний пенетрант з поверхні КО знімають бяззю, змоченою в спирті. Вологу з поверхні виробу видаляють вологою бяззю до повного зникнення з неї крапель води, після чого поверхня вважається підготовленою до наступної операції. Проявник найчастіше наносять пензлем. При цьому витрати проявника значно менші, ніж при нанесенні його фарборозпилювачем, навколишнє повітря менше насичується шкідливими для людини парами розчинників і аерозолів. У цехових умовах застосовують також спосіб посипання і спосіб накладення липких плівок. Після нанесення проявника деталі витримують при заданій температурі до закінчення процесу прояву, тобто до утворення індикаторного малюнка. Видалення пенетранта з поверхневої тріщини відбувається в міру випаровування рідкої основи проявника і зростання сорбції за допомогою частинок проявника. Спостереження показали, що за 2-4 хв. по всій протяжності поверхневої тріщини утворюється меніск. За цей час розмір індикаторного сліду практично стабілізується (рис. 4.5).

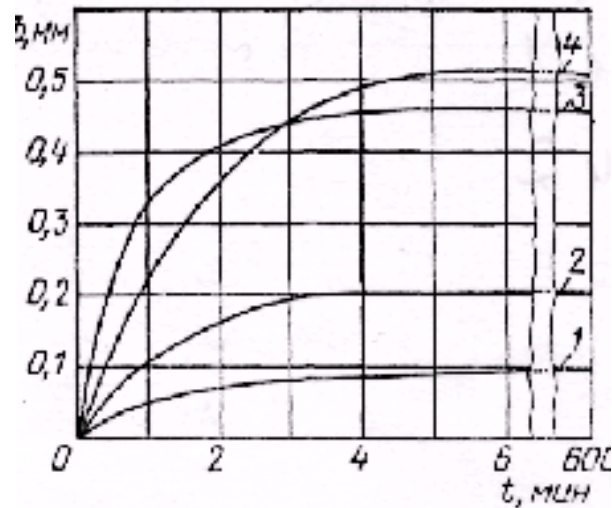


Рис. 4.5. Залежність ширини індикаторного сліду b на металевих зразках з одиничними тріщинами від часу випробування t . Величина розкриття тріщини:

1 - 0,005 мм; 2 - 0,01 мм; 3 - 0,015 мм; 4 - 0,02 мм

Потім відбувається повільне переміщення меніска в глибину тріщини (рис. 4.6) і незначне збільшення індикаторного сліду.

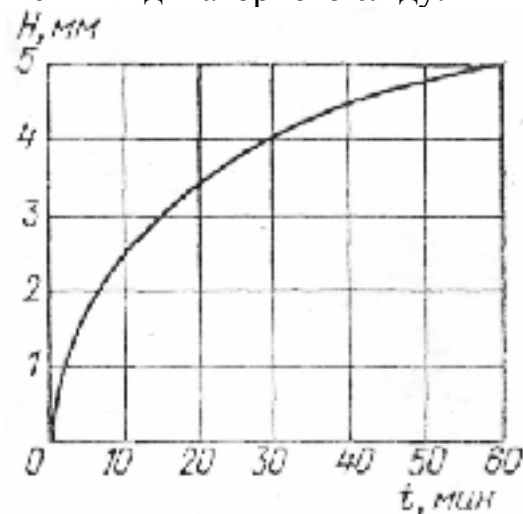


Рис. 4.6. Залежність від часу випробування відстані H між поверхнею зразка і меніском індикаторного пенетранта (при витяганні пенетранта з імітатора поверхневої тріщини розкриттям 0,015 мм)

Розмір індикаторного сліду визначається обсягом пенетранта, витягнутого з гирла тріщини, після утворення меніска по всій її протяжності. Середня ширина індикаторного сліду визначається в основному розкриттям поверхневої одиничної тріщини. Отже, для надійного виявлення поверхневих дефектів при проведенні технологічних операцій контролю необхідно забезпечити збереження пенетранта в гирлі дефекту від моменту нанесення до моменту його видалення з дефекту, тому операції з нанесення і видалення проникаючої рідини і нанесення проявника повинні проводитися

безпосередньо одна за одною з мінімальним інтервалом часу. Не слід допускати тривалого сушіння поверхні після видалення пенетранта, тривалої промивки КО і т.п.

Огляд контрольованої поверхні, як правило, проводять двічі: через 5-6 хв для виявлення великих дефектів і через 25-60 хв. для виявлення дрібних. При люмінесцентному методі контролю використовують ультрафіолетове випромінювання з довжиною хвилі 315-400 нм. Освітленість досліджуваної поверхні повинна бути не нижче 50 лк. Контроль проводять в затіненому приміщенні, а в польових умовах - при місцевому затемненні. При кольоровому контролі природне або штучне освітлення на контрольованій ділянці повинно бути не менше 3000 лк. З поверхонь деталей, що пройшли контроль і визнані придатними, видаляють проявник і сліди інших дефектоскопічних матеріалів одним з перерахованих способів: протиранням, промиванням, анодною обробкою, випалюванням, органічними розчинниками.

В деяких випадках в умовах виробництва виникає необхідність багаторазового контролю. Перед повторним контролем проводять повний цикл підготовки виробів, ретельно промиваючи КО ацетоном, бензином або іншими розчинниками для видалення залишків дефектоскопічних матеріалів з поверхневих дефектів. Невеликі вироби перед повторним контролем рекомендується поміщати на кілька годин в розчинники індикаторного барвника. В якості ілюстрації впливу первинного контролю на наступні перевірки на рис. 4.7 наведені результати двох серій (кожна по п'ять разів) контролю зразків із сталі, на яких при первинному огляді було виявлено 11 одиничних тріщин.

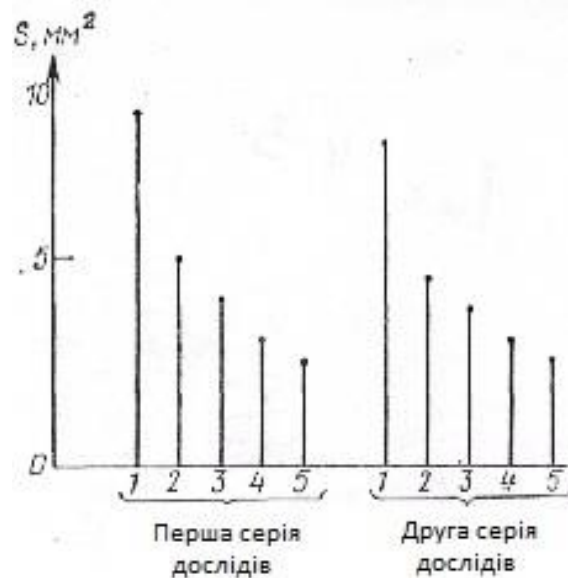


Рис. 4.7. Залежність суми площ індикаторних слідувань одиничних тріщин S від повторних випробувань при багаторазовому контролі кольоровим методом із застосуванням набору матеріалів ДК - 7

Сума площ індикаторних слідів, виявлених на зразках, змінюється залежно від числа проведених раніше випробувань [2].

Між серіями випробувань зразки поміщали на 8-10 год. в розчинники індикаторного барвника. З рис. 4.7 видно, що така обробка зразків майже повністю виключає вплив забруднень дефектів залишками дефектоскопічних матеріалів, які використовувалися на попередніх стадіях контролю.

КНК підрозділяється на чотири рівні, як зазначено в табл. 4.3.

Таблиця 4.3. Характеристики рівнів капілярного методу контролю

Рівень	Максимальні розміри дефекту в мкм		
	Ширина	Глибина	Довжина
I	1	10	0,1
II	10	100	1
III	100	1000	10
IV	Понад 100	Понад 1000	Понад 10

У КНК є верхня і нижня межі чутливості. Верхня межа визначається найбільшою шириною дефекту, при якій пенетрант повністю витікає з нього, утворюючи розмиту хмару. Нижня межа визначається настільки малим дефектом, що пенетранта, який проник в нього, недостатньо для виявлення.

Чутливість КНК визначається геометричним k_r і оптичним k_o факторами: $K_{\text{КНК}} = f(k_r, k_o)$, де f - знак функції.

Геометричний фактор визначається як $k_r = 1 - \frac{y}{b}$, де y - ширина гирла дефекту, а b - ширина пенетранта, що виділився, як показано на рис. 4.8.

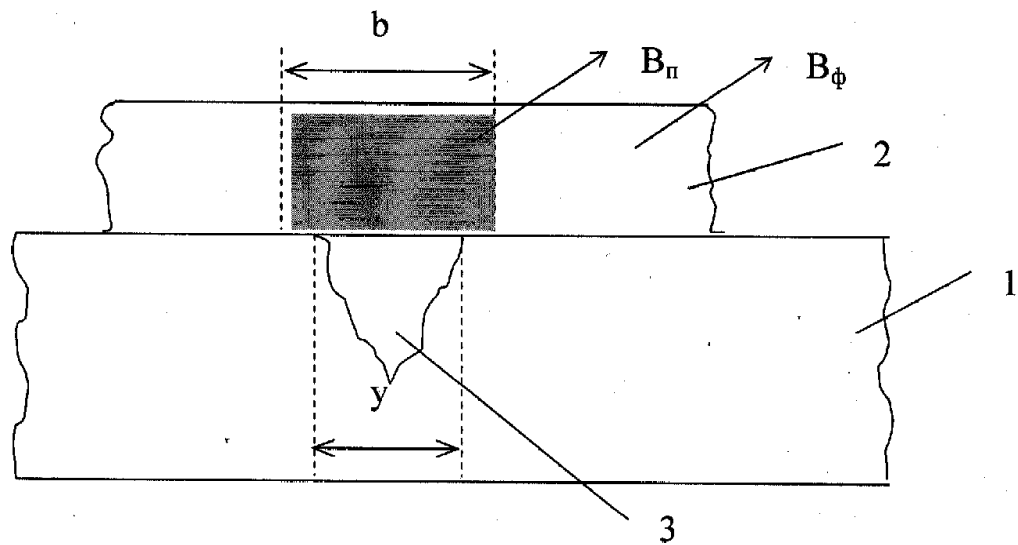


Рис. 4.8. До визначення чутливості КНК

Тут 1 - контрольований виріб, 2 - проявник, 3 - дефект, B_{Φ} і B_{Π} - інтенсивності світла, відбитого від проявника (фон) і від пенетранта, що виділився з дефекту. Оптичний фактор визначається відношенням інтенсивностей світла: $k_o = \frac{B_{\Phi}}{B_{\Pi}}$.

Капілярний контроль слід проводити, як правило, на спеціально обладнаній ділянці контролю площею не менше 20 м^2 . Ділянка має бути обладнана пристосуваннями для переміщення контрольованих деталей, підведенням гарячої та холодної води, стисненого повітря. Стіни і підлога приміщення повинні бути покриті легко матеріалами, що легко миються. На ділянці контролю необхідно забезпечити циркуляцію повітря, концентрація парів застосовуваних речовин в робочій зоні не повинна перевищувати гранично допустиму концентрацію (ГДК).

Прилади для КНК випускаються серійно. В якості прикладу наведемо прилад США «Тінкер АФБ». Останній дозволяє контролювати протягом години до 500 лопаток турбін.

Основні положення, які необхідно знати при КНК, наступні.

1. Підготовку виробів до контролю (видалення рідин з поверхневих дефектів) можна проводити шляхом їх нагрівання або наносячи на їх поверхню проявник. При нагріванні виробів вище температури кипіння рідин відбувається видалення рідини з дефектів за рахунок утворення бульбашок пари. Температура, при якій відбувається викид рідини з дефекту, залежить від величини розкриття дефекту. При широких тріщинах рідина видалається практично миттєво. При нагріванні виробів нижче температури кипіння рідини очищення дефектів відбувається за рахунок випаровування рідин і плівкового масопереносу її по стінках дефекту. Нанесення проявника на

контрольовану поверхню забезпечує видалення рідини з гирла дефектів приблизно за 20 хв.

2. Розмір індикаторного сліду від поверхні одиначної тріщини визначається в основному об'ємом індикаторного пенетранта, що знаходиться в гирлі тріщини, тому надійне виявлення поверхневих дефектів забезпечується за умови збереження пенетранта в гирлі дефекту від моменту його нанесення до моменту вилучення його з дефекту.

3. Огляду з метою виявлення дефектів не піддаються деталі, стан проявника в зонах контролю яких ускладнює видимість індикаторних малюнків. Наприклад, при колірному варіанті КНК огляду не піддаються деталі, якщо в шарі проявника є плями не видаленої червоної проникаючої рідини, плями і патьоки олійно-газової суміші, непокриті проявляючою фарбою ділянки зони контролю, частинки пилу, дрантя, сліди будь-яких сторонніх матеріалів (через застосування забруднених інструментів, пристосувань - фарборозпилювачів, кистей, захватів тощо.).

Загальний огляд проводять неозброєним оком або із застосуванням луп малого збільшення з великим полем зору. При огляді відшуковують забарвлений або люмінесцентний індикаторний малюнок, звертаючи увагу на основні ознаки:

тріщини будь-якого походження, волосовини, заходи, неслітини, непровари, неспаї, плени виявляються у вигляді чітких, іноді переривчастих забарвлених ліній різної конфігурації (рис. 4.9, 4.10);

розтріскування матеріалу, міжкристалітна корозія ділянок поверхні крупнозернистих сплавів проявляються у вигляді групи окремих коротких ліній або сітки (рис. 4.11, б);

міжкристалічна корозія ділянок поверхні дрібнозернистих сплавів виявляється у вигляді плям, розмитих смуг;

пори, виразкова корозія, викришування матеріалу, ерозійні пошкодження поверхні виявляються окремими точками, зірочками (рис. 4.11, а).

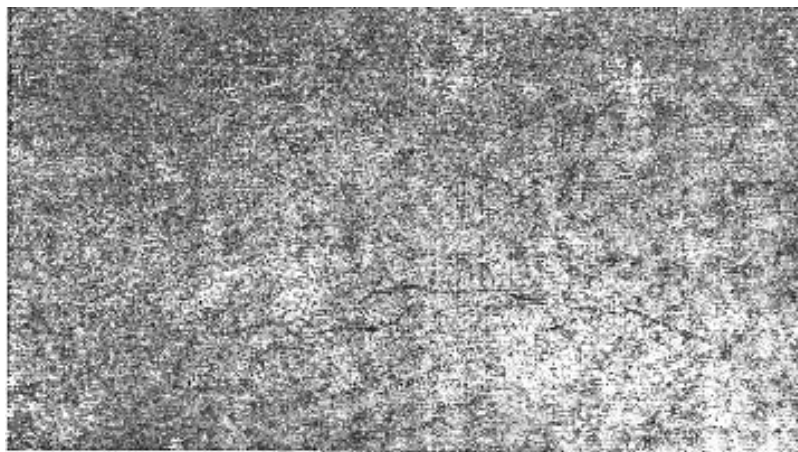


Рис. 4.9. Тріщини на деталі, виявлені КНК

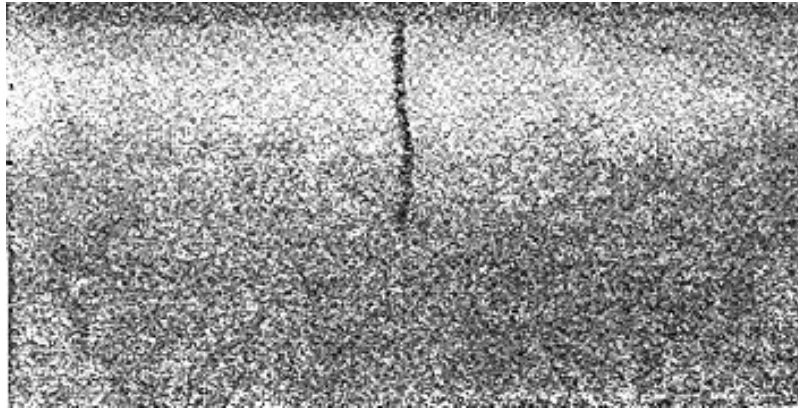


Рис. 4.10. Тріщина на зразку, виявлена КНК в процесі випробувань на втому

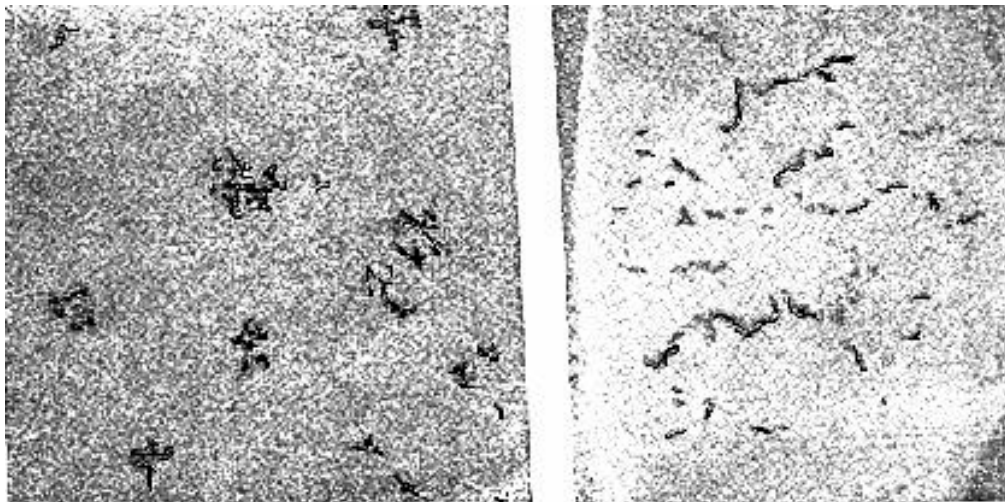


Рис. 4.11. Дефекти, виявлені методами капілярної дефектоскопії:
а - виразкова корозія; б - розтріскування матеріалу

Виявлення малюнка, що відповідає зазначеним вище основним ознакам, слугує підставою для аналізу допустимості дефекту за його розміром, станом, характером.

До недоліків КНК слід віднести високу трудомісткість контролю при відсутності механізації; складність механізації та автоматизації процесу контролю; велику тривалість процесу (від 0,5 до 1,5 год.); зниження вірогідності результатів при негативних температурах, необхідність видалення лакофарбових покриттів і ретельної попередньої очистки контрольованих деталей; низьку ймовірність виявлення дефектів, покритих окисними плівками або стислих значними залишковими або робочими напруженнями в деталі; громіздкість стаціонарного обладнання; шкідливість

деяких дефектоскопічних матеріалів для персоналу і необхідність використання захисних засобів і вентиляції; суб'єктивність контролю, залежність вірогідності результатів від уміння і стану контролера; обмежений термін зберігання дефектоскопічних матеріалів, залежність їх властивостей від тривалості зберігання і температури середовища.

4.3. Фізичні явища, що лежать в основі капілярного контролю

Знання фізичних явищ, що лежать в основі операцій капілярного контролю, дозволяє вживати заходів для підвищення чутливості і надійності контролю і виключати чинники, що знижують чутливість і призводять до неадекватних результатів.

Змочування і поверхневий натяг. Змочування деталі дефектоскопічними матеріалами - головна умова капілярного контролю. Змочування визначається взаємним притяганням молекул рідини і твердого тіла.

Як відомо, на межі двох середовищ (наприклад, рідина - повітря) сили взаємного тяжіння між молекулами рідини і повітря відрізняються від сил тяжіння між молекулами всередині рідини і всередині повітря. Контактуючі середовища поблизу поверхні мають деякий надлишок потенціальної енергії в порівнянні з молекулами, що знаходяться всередині окремо взятої речовини. Цей надлишок називається **вільною енергією поверхні**. Вільна енергія молекул на поверхні більше, ніж у молекул всередині речовини. У зв'язку з цим молекули прагнуть піти всередину речовини, і в результаті середовище змушене набувати форму з мінімальною зовнішньою поверхнею. Так, рідина в невагомості під впливом цього явища має форму кулі. Оскільки поверхні прагнуть скоротитися, виникає сила поверхневого натягу.

Величину поверхневого натягу визначають роботою, вимірюваною в джоулях на квадратний метр (Дж / м²), необхідної для утворення одиниці площі поверхні розділу двох фаз, що знаходяться в рівновазі.

Якщо на межі розділу середовищ виділити довільний майданчик (площадку), то натяг розглядають як результат дії розподіленої сили, прикладеної до периметру цього майданчика. Напрямок сил - по дотичній до межі розділу і перпендикулярно периметру.

Силу, віднесену до одиниці довжини периметра, називають **силою поверхневого натягу**, вимірюють у ньютонах на метр (Н / м) і позначають σ .

Два рівноправних визначення поверхневого натягу відповідають двом застосовуваним для його вимірювання одиницям: Дж / м² і Н / м. З підвищенням температури поверхневий натяг зменшується. Величини поверхневого натягу для найбільш поширених дефектоскопічних матеріалів при температурі 20 ° С і нормальному атмосферному тиску наведені в табл. 4.4.

Таблиця 4.4. Значення поверхневого натягу дефектоскопічних матеріалів

Рідина	Поверхневий натяг $\sigma \cdot 10^{-2}$, Н/м
Вода	7,28
Ацетон	2,37
Пентан	1,50
Толуол	2,85
Бензол	2,90
Ксилол	2,90
Етиловий спирт	2,28
Бутиловий спирт	2,46
Пенетрант ЛШ-6А	2,97

Як видно з таблиці, в капілярній дефектоскопії використовуються рідини з відносно низьким поверхневим натягом, про одну з причин цього говорилося на початку розділу.

Для ілюстрації природи явища змочування розглянемо краплю рідини, що лежить на поверхні твердого тіла (рис. 4.12).

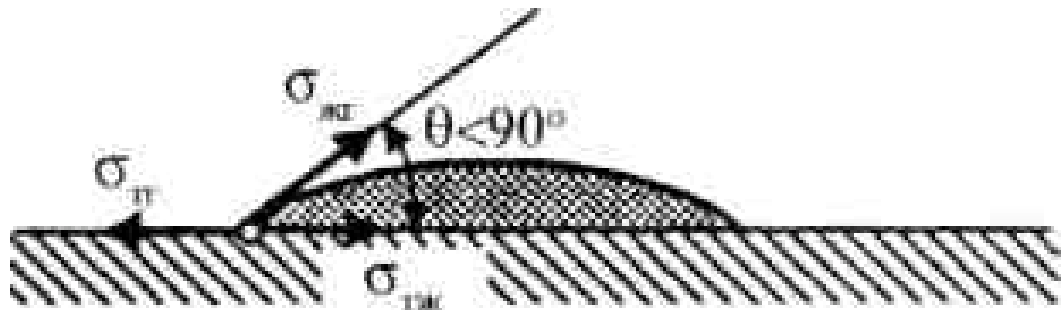


Рис. 4.12. Змочування ($\theta < 90^\circ$) поверхні твердого тіла рідиною: $\sigma_{Т.р}$ - поверхневий натяг на межі «тверде тіло - рідина»; $\sigma_{Т.г}$ - поверхневий натяг на межі «тверде тіло - газ»; $\sigma_{р.г}$ - поверхневий натяг на межі «рідина - газ»; θ - крайовий кут змочування (вимірюється з боку границі розділу «рідина - тверде тіло»)

Тут

$$\cos \theta = (\sigma_{Т.г} - \sigma_{Т.р}) / \sigma_{р.г}. \quad (4.1)$$

Силою тяжіння нехтуємо, оскільки крапля мала. На одиницю довжини периметру, де стикаються тверде тіло, рідина та газ, діють три сили

поверхневого натягу, спрямовані по дотичних до відповідних границь розділу: «тверде тіло - газ» $\sigma_{Т.Г}$, «тверде тіло - рідина» $\sigma_{Т.р}$, «рідина - газ» $\sigma_{р.Г}$. Як правило, у всіх довідниках для $\sigma_{р.Г}$ прийнято позначення σ .

Коли крапля знаходиться в стані спокою, рівнодіюча проекцій цих сил на поверхню твердого тіла дорівнює нулю:

$$\sigma \cos \theta + \sigma_{Т.р} - \sigma_{Т.Г} = 0, \quad (4.2)$$

$$\cos \theta + \frac{(\sigma_{Т.Г} - \sigma_{Т.р})}{\sigma} = 0.$$

Кут θ називають **крайовим кутом змочування**. Він вимірюється з боку рідини.

Якщо $\sigma_{Т.Г} > \sigma_{Т.р}$, то він гострий. З рисунка видно, що при цьому рідина змочує тверде тіло. Чим менше θ , тим сильніше змочування. Граничний випадок ($\theta = 0$) буде відповідати повному змочуванню, тобто розтіканню рідини по поверхні твердого тіла до товщини молекулярного шару.

Якщо $\sigma_{Т.Г} < \sigma_{Т.р}$, то $\theta > 90^\circ$ - тупий і $\cos \theta$ від'ємний. Це означає, що рідина не змочує тверде тіло. Формальною границею змочування і незмочування взятий кут $\theta = 90^\circ$ (змочування $0 < \theta < 90^\circ$ і незмочування $90^\circ < \theta < 180^\circ$). При цьому в першому випадку рідина буде підніматися в капілярі, а в другому - опускатися нижче рівня в посудині (рис. 4.13).

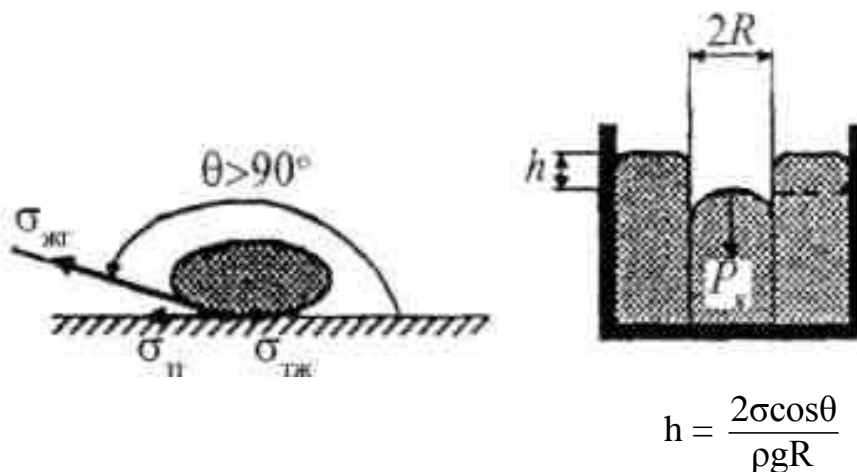


Рис. 4.13. Випадок незмочування ($\theta > 90^\circ$) твердої поверхні рідиною

Поверхневий натяг характеризує властивість самої рідини, а $\sigma \cos \theta$ - змочування цією рідиною поверхні даного твердого тіла. Складову сили поверхневого натягу $\sigma \cos \theta$, що «розмазує» краплю по поверхні, іноді

називають **силою змочування**. Для більшості добре змочувальних речовин $\cos \theta$ близький до одиниці, наприклад, для границі скла з водою він дорівнює 0,685, з гасом - 0,90, з етиловим спиртом - 0,955.

Сильно впливає на змочування стан її поверхні (мікрорельєф і чистота). Наприклад, шар масла на поверхні сталі або скла різко погіршує її змочування водою, $\sigma \cos \theta$ стає негативною. Тому важлива роль очищення поверхні від жирів, масел та інших забруднень деталі перед капілярним контролем.

Адгезія і когезія. Фізична сутність змочування особливо добре пояснюється через поняття адгезії і когезії.

Поняття **когезії** визначається взаємодією всередині рідини або твердого тіла і характеризується **роботою когезії A_k** , тобто роботою, необхідною для розриву стовпчика рідини або твердого тіла з поперечним перерізом одиничної площі.

Адгезія характеризується явищами, пов'язаними із взаємодією приведених в дотик різних тіл, і визначається **роботою адгезії A_a** , тобто тією роботою, яка витрачається при розриві одиниці площі міжфазного поверхневого шару.

Очевидно, що робота когезії A_k дорівнює подвоєному поверхневому натягу a , оскільки при розриві стовпчика рідини (або твердого тіла) одиничної поверхні утворюються дві нові поверхні. Так, наприклад, при розриві стовпчика рідини робота когезії дорівнює $A_k = 2\sigma$.

Робота адгезії A_a супроводжується утворенням двох одиничних поверхонь і ліквідацією міжфазної поверхні. Чим більше адгезія, тим краще відбувається змочування.

Капілярний метод підрозділяється на два різновиди: **кольоровий і люмінесцентний**. Основним індикаторним засобом тут служить спеціальна рідина з високою проникаючою здатністю - **пенетрант** (від грец. «пенетра» - проникаю). При **кольоровому способі** використовується пенетрант ярко - червоного кольору, а для **люмінесцентного** застосовується рідина, що має властивість світитися в ультрафіолетовому опроміненні.

Для пошуку нерозпізнаних оком вузьких (розкриттям менше 10 мкм) тріщин контрольовану ділянку об'єкта зачищають від покриттів, очищають від забруднень, знежирюють спеціальним розчинником (див. рис. 4.4, а) і рясно покривають шаром пенетранта (рис. 4.4, б). Після деякої витримки (5-7 хв, для просочення пенетрантом можливих дефектів) надлишки пенетранту ретельно видаляють бавовняним дрантям (рис. 4.4, в) і при кольоровому способі покривають ділянку іншою спеціальною рідиною - білим проявником, що представляє собою суспензію крейди або гашеним вапном в летучому рідкому носії. У міру висихання проявник перетворюється в білу високопористу корку, і пенетрант, що залишився в порожнині дефекту, за рахунок капілярного ефекту починає підніматися в проявник і внаслідок хаотичності пор розходить над дефектом по ширині.

В результаті червоний слід на білому фоні над дефектом стає досить широким, щоб бути помітним людським оком (рис. 4.4, г).

При люмінесцентному способі після видалення надлишків пенетранта ділянку освітлюють спеціальним ультрафіолетовим ліхтарем; пенетрант, що зберігся в порожнинах дефектів, починає світитися, показуючи оператору ці дефекти.

Приклад виявлення капілярним (кольоровим) методом тріщини у гребному валі теплохода показаний на рис. 4.14.



Рис. 4.14. Приклад виявлення капілярним методом тріщини в гребному валу теплоходу

Капілярний метод також може бути використаний в цілях течепошуку. Для цього одну поверхню стінки об'єкта покривають проявником, а іншу (протилежну) - пенетрантом. Якщо в даній зоні є наскрізний дефект (теча), пенетрант через деякий час проникне крізь нього в проявник і викличе на протилежній поверхні помітний слід.

У Росії капілярний метод регламентований стандартом ГОСТ 18442-80 «Якість продукції. Неруйнівний контроль. Капілярні методи. Загальні вимоги» [10]. Цей стандарт встановлює 5 класів чутливості, характеристики яких наведено в табл. 4.5.

Таблиця 4.5. Класифікація чутливості капілярного контролю

Клас чутливості	Вимоги до підготовки поверхні		Розкриття дефектів, що виявляються, мкм
	Шорсткість, не грубіше	Освітленість, лк, не менше	
I	Rz 2,5	2000	Менше 1
II	Rz 20		Від 1 і більше
III	Rz 40	1500	Від 10 і більше
IV	Rz 80	500	Від 100 і більше
Технологічний	не оброблена		не нормується

Вибір набору реактивів для проведення капілярного контролю в реальних умовах здійснюється на підставі заздалегідь визначеної шорсткості поверхні контролю.

РОЗДІЛ 5. МАГНІТНІ МЕТОДИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ (МНК)

5.1. Загальна характеристика магнітного контролю

МНК застосовуються тільки для контролю деталей і виробів, виготовлених з ферромагнітних матеріалів, що знаходяться в намагніченому стані. МНК засновані на реєстрації магнітних полів розсіювання, що виникають над дефектами, тому ці методи дозволяють визначати тільки поверхневі і підповерхневі дефекти, що залягають у ферромагнетиках на глибинах, що не перевищують 15 мм.

Дефекти найбільш легко виявляються, коли напрямок намагнічування контрольованої деталі перпендикулярний напрямку дефекту. Для оптимального виявлення дефектів при МНК намагнічування контрольованих виробів проводять у двох напрямках, а деталей складної форми - у кількох напрямках.

На рис. 5.1 наведена схема утворення магнітного поля над дефектом. Контрольована деталь 1 з тріщиною 2 поміщена між полюсами N-S постійного магніту (електромагніту). Над тріщиною виникає магнітне поле розсіювання 3, еквівалентне маленькому магніту з полюсами N-S.

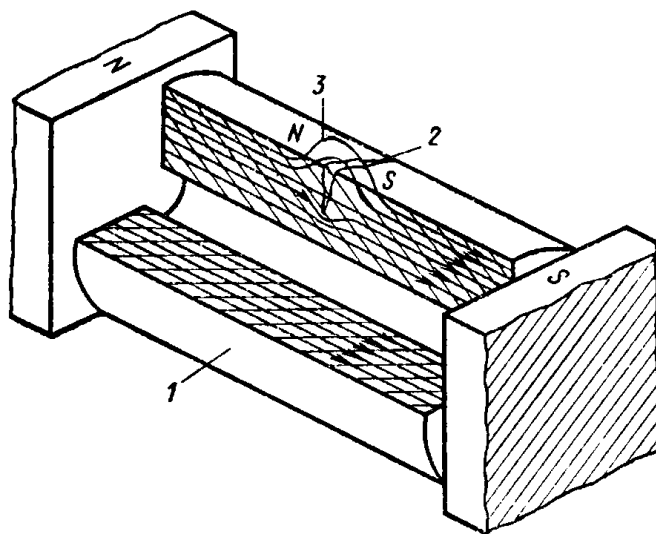


Рис. 5.1. Схема утворення магнітного поля над дефектом

Після намагнічування виробу здійснюється прояв дефектів, який полягає у фіксуванні магнітного поля над дефектом будь-яким методом: порошковим, феррозондовим, магнітографічним та іншими методами, які будуть розглянуті в подальшому. При цьому контроль (виявлення) дефектів здійснюється двома способами:

1. Контроль дефектів за залишковою намагніченістю контрольованого виробу, придатний тільки для магнітотвердих матеріалів з коерцитивною силою H_C більше 800 А / м (більше 10 Е). У цьому випадку прояв дефектів

здійснюється після намагнічування контрольованого виробу та видалення його з поля намагнічування.

2. Контроль дефектів у прикладеному магнітному полі, який застосовується для магнітом'яких матеріалів, у яких коерцитивна сила $H_C < 800 \text{ А / м (10 Е)}$. У цьому випадку прояв дефектів здійснюється після намагнічування контрольованого виробу без його видалення з поля намагнічування, оскільки без прикладеного зовнішнього магнітного поля над дефектами утворюються слабкі магнітні поля розсіювання, що не дозволяють виявити дефект. Цим способом контролюють деталі складної форми, а також у тому випадку, коли потужності джерела живлення недостатньо для намагнічування всієї деталі внаслідок її великих розмірів; в прикладеному магнітному полі робоча індукція поля досягається при майже в чотири рази меншій напруженості магнітного поля.

Після МНК обов'язково проводиться розмагнічування проконтрольованого виробу.

5.2. Теоретичні основи магнітного контролю

Магнітні властивості притаманні всім без винятку оточуючим тілам. Магнетизм так само універсальний, як земне тяжіння і електрика. Однак не у всіх тіл ця властивість виявляється в однаковій мірі. У переважній більшості тіл магнітні властивості дуже слабкі.

Можна вказати два найбільш яскравих прояви магнетизму.

По-перше, це так звані постійні магніти, зазвичай виготовлені із заліза або його сплавів і з'єднань, а також з деяких інших хімічних елементів - нікелю, кобальту і рідкоземельних елементів (лантаноїдів), наприклад гадолінію.

По-друге, прояв аналогічної сили можна побачити, якщо взамін згаданих постійних магнітів взяти провідники (або котушки з них - соленоїди), по яких протікає постійний електричний струм.

Розглянемо два постійних магніти з однакових масивних залізних стрижнів (рис. 5.2).

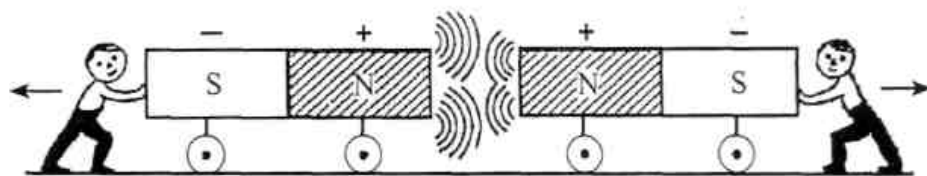


Рис. 5.2. Зусилля при спробі зблизити однойменні кінці постійного магніту

Будемо вважати, що заштрихований кінець стрижня має знак «+» і позначений буквою N («північний полюс», за аналогією з магнітним полем Землі), а не заштрихований кінець - знак «-» і позначений буквою S

(«південний полюс»). Стрижні, зображені на рис. 5.2, спрямовані один до одного однаковими знаками і літерами (+, N). Щоб зблизити стрижні, необхідно докласти зусиль. На рис. 5.3, де стрижні звернені один до одного різними знаками і літерами (+, N і -, S), зусилля спрямовані на те, щоб не дати стержням стикнутися.

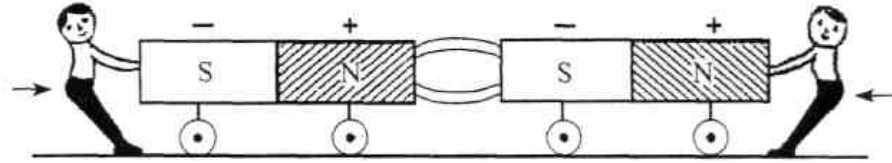


Рис. 5.3. Зусилля при спробі утримати від змикання постійні магніти, спрямовані один до одного різними знаками

Достатньо послабити зусилля, як у першому випадку магнітні стрижні роз'їдуться, а в другому - щільно з'єднаються.

Існує ще один наочний спосіб виявлення магнітної дії постійних магнітів. Якщо близько магніту помістити металеву деталь, яка до наближення до магніту не проявляла ніяких магнітних дій, то поблизу постійного магніту ця деталь сама стане магнітом. На боці деталі, зверненої до магніту, виникне стан, при якому вона завжди буде притягатися до магніту, подібно до різнойменних кінців магнітних стрижнів (рис. 5.4).

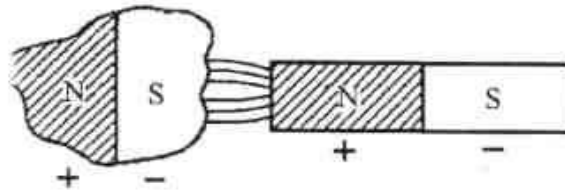
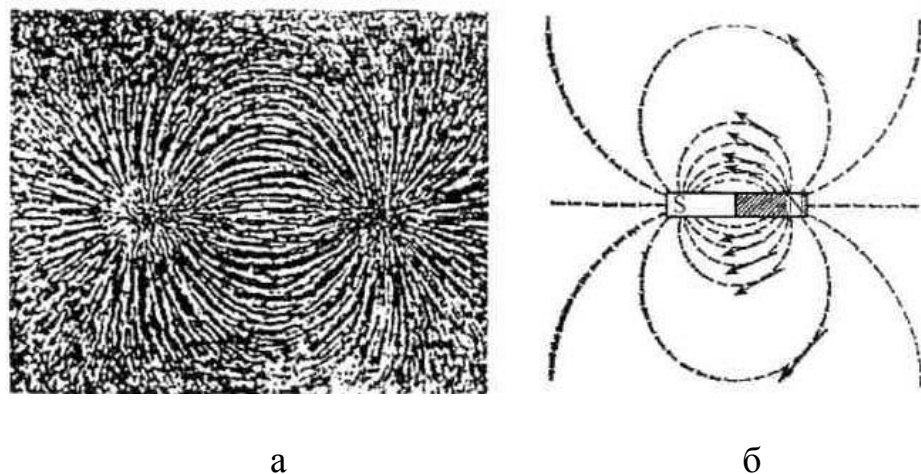


Рис. 5.4. Магнітоіндукційний ефект

Цей ефект можна використати для виявлення в просторі, що оточує магніт, його магнітну дію (рис. 5.5).



а

б

Рис. 5.5. Картина ліній індукції стрижневого магніту, отримана за допомогою магнітних порошків (а), і векторний характер магнітного поля (б)

Прояв таких магнітних дій стрижневим постійним магнітом, отриманий за допомогою магнітних порошоків, показаний на рис. 5.5, а. Частинки порошку, маючи дещо подовжену форму, вишикуються уздовж ліній, які виходять з одного кінця магніту і входять в інший. Їх прийнято називати **лініями індукції** або **магнітними силовими лініями**, оскільки саме уздовж них спрямовані сили, що орієнтують частинки магнітного порошку навколо магніту (рис. 5.5, б стрілки).

Нагадаємо, що кінці магнітів називають **полюсами**. Якщо поблизу магніту немає інших магнітів, яких-небудь великих залізних предметів або покладів магнітної руди, то підвішений магніт завжди орієнтується майже точно уздовж географічного меридіана з півдня на північ.

5.3. Методи магнітного контролю

Магнітному виду контролю піддаються тільки ферромагнітні матеріали.

При магнітному контролі застосовуються різні способи реєстрації дефектів. Їх вибір обумовлений такими факторами:

- 1) геометрією контрольованого виробу;
- 2) необхідною чутливістю контролю;
- 3) заданою роздільною здатністю контролю;
- 4) продуктивністю контролю.

Відповідно до зазначених вимог застосовуються наступні методи **магнітного контролю і відповідно способи реєстрації дефектів при МНК**:

- 1) порошковий спосіб;
- 2) магнітографічний спосіб;
- 3) феррозондовий спосіб;
- 4) метод ефекту Холла.
- 5) індукційний,
- 6) метод магнітної пам'яті металу

Методи 5 і 6 - пасивні, а методи 1-4 - активні, тобто вимагають попереднього намагнічування об'єкта, при якому над дефектом утворюється власне магнітне поле - **поле розсіювання** (рис. 5.6). Поле розсіювання утворюється за рахунок того, що в таких умовах дефект сам по собі перетворюється в невеликий магніт з полюсами на краях, між якими виникає пучок магнітних силових ліній, який частково виступає над поверхнею об'єкта. Ці методи розрізняються між собою за способом виявлення полів розсіювання над дефектами (табл. 5.1).

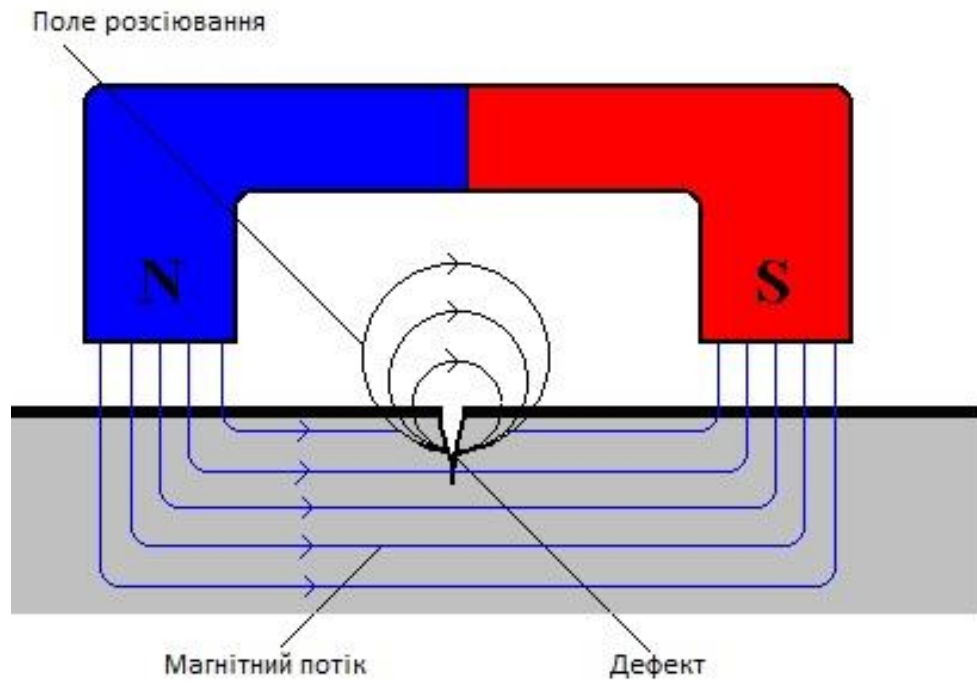
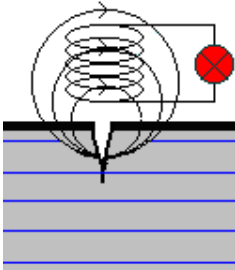
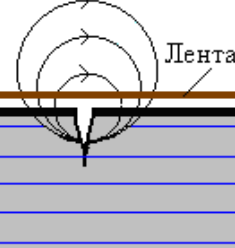
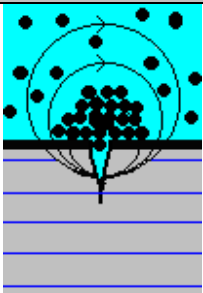


Рис. 5.6. Поле розсіювання над дефектом

Таблиця 5.1. Активні методи магнітного контролю

Метод	Короткий опис	Ескіз
Магнітоферрозондовий	Поле розсіювання над дефектом збуджує ЕРС в датчику - котушці, замкненій на індикатор	
Магнітографічний	Поле розсіювання над дефектом залишає на магнітній стрічці магнітне п'ятно, яке далі візуалізується в спеціальному відеомагнітофоні	
Магнітопорошковий	При поливі поверхні магнітопорошковою суспензією поле розсіювання над дефектом стягує на себе частинки чорного магнітного порошку	
Метод ефекту Холла	Поле розсіювання над дефектом викликає відхилення траєкторії електричного струму пластині Холла	Див. рис. 5.16 і рис. 5.17

5.3.1. Порошковий метод

Найбільш популярний **магнітопорошковий метод**, при якому слабозкріті дефекти візуалізуються за рахунок того, що на них утворюються валіки чорного магнітного порошку, які в кілька разів ширше дефекту і тому помітні оком.

Порошковий спосіб реєстрації дефектів полягає в нанесенні порошку феромагнітного матеріалу на намагнічений контрольований виріб і в реєстрації скупчень цього порошку поблизу дефектів. Над дефектом утворюються локальні магнітні поля розсіювання. На частинки, що потрапили в поле, діють пондеромоторні сили, які прагнуть затягнути їх в місця найбільших концентрацій магнітних силових ліній. Частинки накопичуються поблизу дефекту і одночасно намагнічуються полем розсіювання дефекту. Притягаючись один до одного, ці частинки утворюють ланцюжкові структури, орієнтовані по магнітним силовим лініям поля

дефекту. В результаті відбувається накопичення частинок порошку у вигляді смужок (валиків, жилок, шнурів) над дефектом. Ширина смужки з порошку значно більше ширини тріщини, волосовини, тому магнітопорошковим способом можуть бути виявлені дрібні тріщини та інші поверхневі дефекти, невидимі при візуальному огляді.

В якості феромагнітного матеріалу найбільш часто використовуються чорні порошки оксидів магнетиту Fe_3O_4 , що являють собою суміш закису заліза FeO і окису заліза Fe_2O_3 . Дещо рідше використовується феромагнітний окис заліза Fe_2O_3 . Для отримання буро-червоних порошків використовується червона гама окису заліза γ - Fe_2O_3 . Для виготовлення світлих порошків використовуються спеціально приготовлені суміші залізного і нікелевого порошків і алюмінієвої пудри.

Застосовуються **два способи нанесення** феромагнітного порошку на контрольований виріб.

"Сухий" спосіб полягає в нанесенні на виріб високодисперсного порошку з розмірами частинок 0,1-10 мкм в повітряної суспензії, одержуваної розпиленням порошку в спеціальних установках. Цей спосіб застосовують для виявлення підповерхневих дефектів, а також дефектів під шаром немагнітного покриття товщиною до 200 мкм.

Другий спосіб нанесення сухого порошку на виріб застосовується для грубодисперсійних порошків з розміром частинок від 0,05 до 2 мм. В цьому випадку порошок наноситься за допомогою пульверизатора, гумової груші або хитаючого сита. Цей спосіб застосовується для виявлення відносно великих поверхневих і підповерхневих дефектів, а також для контролю деталей з грубо обробленою поверхнею.

"Мокрий" спосіб нанесення магнітного порошку на поверхню намагніченого контрольованого виробу здійснюють шляхом поливу виробу суспензією магнітного порошку або шляхом занурення виробу у ванну, наповнену суспензією. Магнітна суспензія повинна стекти з поверхні, тобто виріб розташовують з нахилом. Можливий контроль без вилучення деталей з суспензії для огляду. Такий спосіб, наприклад, рекомендується для виявлення шліфувальних тріщин під шаром хрому товщиною до 0,2 мм. Схема контролю представлена на рис. 5.7. Через деталь 2, занурену в ванну 1 з суспензією 5, по струмопровідних шинах 6 пропускають струм $I = (10 \dots 15) D$, де D -діаметр деталі, мм. При цьому відбувається осадження порошку над дефектами.

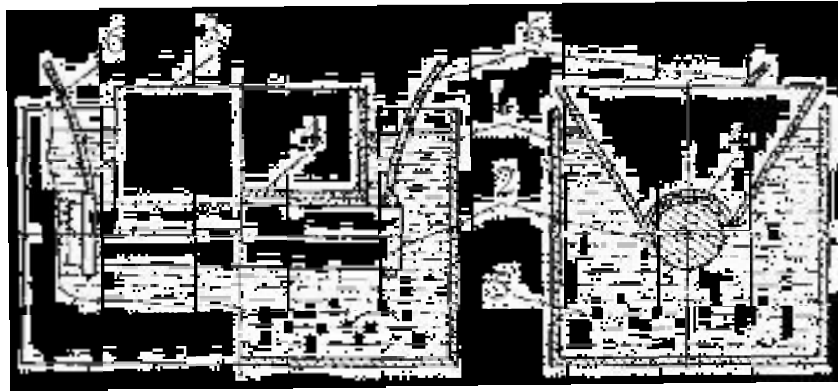


Рис. 5.7. Схема контролю деталі з оглядом її під шаром рідини

Контрольовану деталь оглядають, не витягуючи її з ванни, застосовуючи екран 3 з прозорим дном 4, профільованим за формою деталі. Найбільш часто застосовуються водні суспензії, в одному літрі яких міститься чорний магнітний порошок - 20 г, хромпik калієвий $K_2Cr_2O_7$ - 4 г, сода кальцинована - 10 г, емульгатор ОП-7 або ОП-10 - 5 г.

У цій суспензії іноді хромпik замінюється хімічно чистим нітритом натрію в кількості 15 м В інших складах замість хромпика і емульгатора застосовується мило господарське в кількості всього 1 г.

Для полегшення виявлення дефектів замість чорного магнітного порошку в зазначені суспензії вводять магнітно-люмінесцентний порошок у кількості 4 г. Люмінофорами в порошок служать флуоресцентні смоли, розчинники смол, такі як хлористий метилен, люміноген світло-жовтий (15 г на 100 г магнітного порошку). При опроміненні ультрафіолетовим світлом кварцових ламп з світлофільтрами магнітні порошки з люмінофорами яскраво світяться. Світлофільтри застосовують для виключення видимого світла.

Залежно від способу магнітного контролю - у прикладеному магнітному полі або на залишковій намагніченості, від форми контрольованої поверхні, від чистоти її обробки застосовуються різноманітні суспензії, рідкою фазою яких окрім води є гас, масла та їх суміші.

Результати контролю оцінюють по наявності на КО валику магнітного порошку, видимого оком або через лупу з 2-4 - кратним збільшенням, відтвореного кожен раз при повторному нанесенні суспензії або порошку. Чіткий, не розпливчастий валик свідчить про дефект, що виходить на поверхню, розпливчастий валик - про підповерхневий дефект. Довжина валика дорівнює протяжності дефекту \pm похибка, що дорівнює ширині валика. Магнітопорошковий метод дозволяє виявляти тріщини з шириною розкриття 0,001 мм, глибиною 0,01 мм і більше.

Для визначення дефектів під товстим шаром немагнітного покриття, для контролю ділянок деталей з обмеженими підходами, для виявлення дефектів у кульових з'єднаннях без розбирання і дефектів на внутрішніх поверхнях глибоких отворів в якості емульсії застосовують гумову

(каучукову) суміш з феромагнітним порошком. Цю суміш наносять на контрольований виріб шляхом поливу, а дефекти виявляють по розподілу магнітного порошку у відбитку (репліці) - у затверділій каучуковій суміші. Каучукова суміш фактично являє собою дефектограму - запис розподілу дефектів. Розроблено кілька способів виготовлення з'йомних дефектограм, які можуть підлягати архівації.

Один з них використовує паперову кальку товщиною до 30 мкм. Калька щільно накладається на поверхню контрольованої деталі, зразок намагнічують, і на поверхню кальки наносять клейову суспензію на основі швидко висихаючого клею. Рідкий клей швидко висихає, і осівший над дефектами порошок залишається міцно приклеєним до підкладки. Підкладка знімається з деталі і може зберігатися тривалий час. При інших способах одержання дефектограми застосовують целофан і гумовий клей; закріплюючий лак, що наноситься на магнітний порошок після контролю; липку прозору стрічку, яку наклеюють на закріпленій лаком магнітний порошок. Також дефектограми отримують фотографуванням розподілу магнітного порошку по поверхні контрольованої деталі. Основна трудність останнього способу полягає в усуненні світлових відблисків.

Для магнітопорошкового способу реєстрації контроль за залишковою намагніченістю має деякі переваги перед контролем у прикладеному магнітному полі:

1. можливість установки деталі в будь-яке потрібне положення для гарного освітлення поверхні та огляду;
2. можливість нанесення суспензії як шляхом поливу, так і шляхом занурення у ванну з суспензією одночасно декількох виробів;
3. простота розшифровки результатів контролю, оскільки при контролі порошок у меншій мірі осідає на риски, наклеп, місця грубої обробки поверхні тощо;
4. менша можливість призогу деталей в місцях їх контакту з електроолівцями, так як для залишкового намагнічування струм пропускають по деталі короткочасно (0,01-1с). При контролі в прикладеному магнітному полі спочатку наносять порошок або суспензію на деталь, поміщають її, наприклад, в соленоїд і включають струм в обмотках. Повільно витягаючи деталь з соленоїда, спостерігають за розподілом магнітного порошку на деталі у вихідного вікна котушки.

Осадження магнітного порошку не завжди вказує на наявність дефекту. Утворення поля розсіювання уявного дефекту може відбуватися, наприклад, при структурній неоднорідності, по межі розділу ділянок із структурами, що різко відрізняються. Осадження порошку при цьому нещільне, у вигляді широкої смуги з розмитими межами. При одному і тому ж способі намагнічування осадження порошку відбувається на всіх деталях і в одних і тих же місцях. Знання конструктивних особливостей деталей і технології виготовлення дозволяє розпізнати такий уявний дефект. Осадження порошку в місцях різкого зменшення перерізу деталі можна уникнути, доповнивши переріз деталі феромагнітним предметом, наприклад, вставивши болт. При

повторному намагнічуванні і нанесенні суспензії осадження порошку зазвичай не відбувається, якщо в цьому місці немає дефекту типу порушення суцільності металу.

Можливо також осадження порошку на сліди дотику намагніченої деталі з яким-небудь гострим ферромагнітним предметом (рис. 5.8). Для розшифровки такого дефекту деталь необхідно повторно намагнітити.

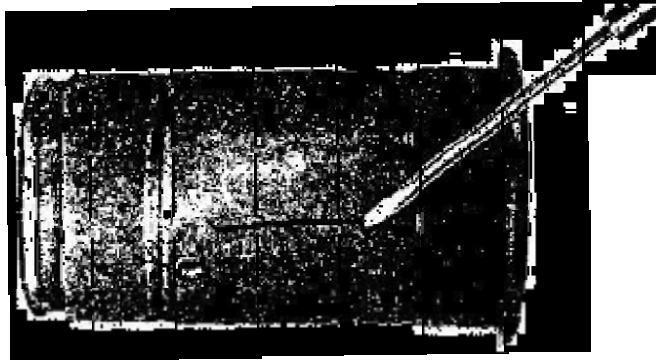


Рис. 5.8. Осадження магнітного порошку в місці торкання намагніченої деталі ферромагнітним предметом

Після повторного намагнічування осадження магнітного порошку в місці зіткнення деталі з ферромагнітним предметом не буде. Щоб відрізнити дефекти, що виходять на поверхню, від помилкових, як контрольні можна застосовувати капілярні методи контролю.

Магнітопорошкову дефектоскопію здійснюють при температурі не нижче 10°C і не вище 40°C на спеціально обладнаній ділянці. Контроль здійснюють за допомогою універсальних або спеціалізованих дефектоскопів, що дозволяють отримувати необхідні поля і створювати оптимальні умови контролю. У комплект дефектоскопа входять намагнічуючі пристрої, пристрої для переміщення деталей на позиції контролю, обладнання для обробки деталей індикаторними складами, освітлювальні й вимірювальні пристрої. Сучасні дефектоскопи комплектуються також пристроями для розмагнічування суспензій і виробів. Розмагнічування виробів контролюють за допомогою приладів типу ФП-1.

При проведенні контролю оператору необхідно дотримуватися певних вимог безпеки, оскільки для намагнічування деталей, наприклад, циркулярним способом через них пропускаються великі струми. Основні вимоги при цьому наступні: обов'язкове заземлення дефектоскопа, використання педальних і кнопкових перемикачів, дотримання загальних правил використання електроустановок споживачами.

При магнітопорошковому методі контролю об'єкт поливають магнітопорошковою суспензією (суспензія вороненого пилу Fe_2O_3 в летучому рідкому носії) в процесі намагнічування (спосіб прикладеного поля, СПП) або після нього (спосіб залишкової намагніченості, СЗН). СЗН застосовують тільки на магнітожорстких сталях, таких як інструментальні і

підшипникові, які довго зберігають поверхневу намагніченість; в більшості ж випадків використовують СПП.

На феромагнітних матеріалах магнітопорошковий метод є кращим в порівнянні з капілярним, оскільки є більш оперативним і простим у застосуванні.

5.3.2. Магнітографічний метод

Магнітографічний метод використовується при контролі зварних з'єднань але рідко, оскільки потрібна дуже складна апаратура і обов'язкове попереднє розмагнічування об'єкта разом з плівкою.

Магнітографічний спосіб реєстрації дефектів полягає в запису магнітних полів розсіювання над дефектом на магнітну стрічку шляхом намагнічування контрольованої ділянки виробу разом з притиснутою до його поверхні магнітною стрічкою і в наступному відтворенні і розшифровці отриманого магнітного запису. При магнітографічному контролі вироби намагнічують за допомогою електромагнітів, рідше застосовують циркулярне намагнічування. Для виявлення внутрішніх дефектів намагнічування здійснюють постійним струмом, а для виявлення поверхневих і підповерхневих дефектів - змінним струмом.

Для прикладу на рис. 5.9 показана схема реєстрації дефектів зварних швів магнітографічним методом: зварений шов 1 з дефектом 2 знаходиться в деталі 3; поле розсіювання від дефекту 2 фіксується магнітною стрічкою 4, накладеною на зварний шов 1 і притиснутою до нього гумовим ременем (на малюнку не показаний). Намагнічуюче поле створюється постійним електромагнітом 6 з роликami 5. Останні служать для полегшення переміщення електромагніту уздовж зварного шва.

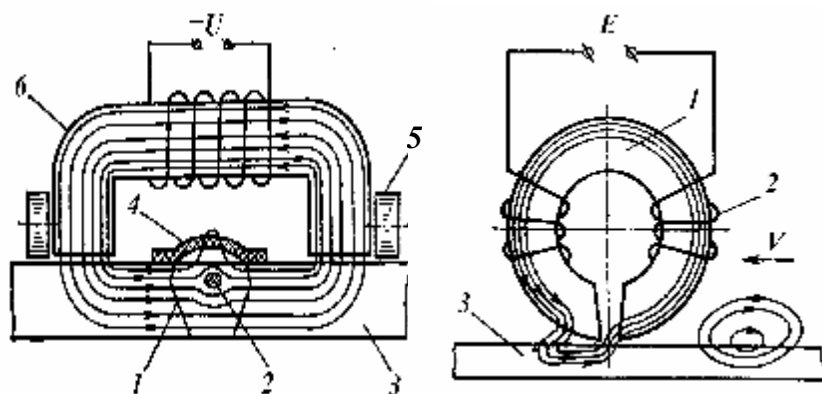


Рис. 5.9. Схема намагнічування зварного шва разом з магнітною стрічкою: 1 - зварний шов; 2 - дефект; 3 - деталь; 4 - магнітна стрічка; 5 - ролики; 6 - електромагніт

Рис. 5.10. Схема кільцевої відтворюючої головки: 1 - магнітна головка; 2 - дві котушки; 3 - магнітна стрічка

Магнітна стрічка, яка застосовується для реєстрації полів розсіювання, аналогічна стрічці, що застосовується в звукозапису і, як правило, складається з шару магнітного порошку оксиду заліза, зваженого в лаку, і немагнітної основи з ацетилцелюлози, поліефірів чи лавсану. Розроблені також спеціально для магнітографічного контролю металеві стрічки.

Зчитування запису на магнітній стрічці здійснюють за допомогою кільцевої відтворюючої головки, схема якої показана на рис. 5.10.

Магнітна головка складається з двох півкілець 1, набраних з пластин магнітом'якого матеріалу (50НХС, 80 НХС, 79НМА та ін.) товщиною 0,1- 0,2 мм. Обмотка головки складається з двох ідентичних котушок 2, що мають по 2000-3000 витків.

При відтворенні запису стрічка 3 переміщається відносно головки 1, частина поля розсіювання замикається через головку, як показано на рис. 5.23, і наводить в котушках 2 ЕРС індукції E . Для реєстрації сигналів E застосовується осцилографічна трубка з електронними блоками, такими ж, як у магнітофонах.

На рис. 5.11 показана структурна схема магнітографічного дефектоскопа

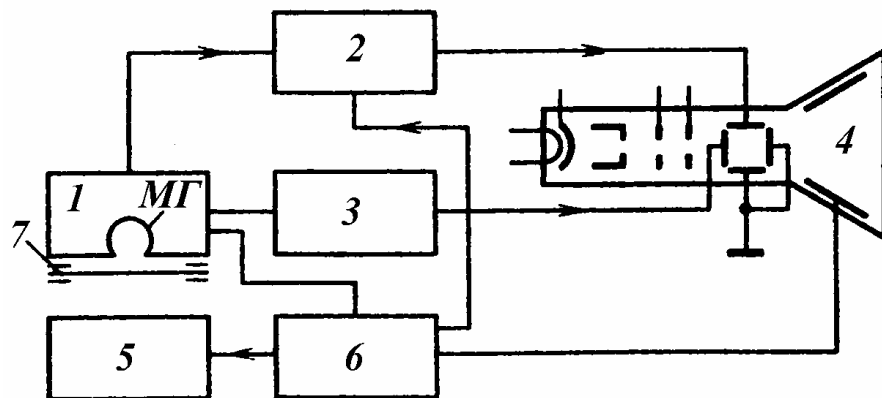


Рис. 5.11. Блок-схема магнітографічного дефектоскопа:

1 - стрічкопротяжний механізм; 2 - підсилювач; 3 - генератор розгортки; 4 - електронно-променева трубка; 5 - зтираючий пристрій; 6 - блок живлення; 7 - магнітна стрічка; МГ – відтворююча (магнітна) головка.

Для індикації сигналів застосовуються магнітографічні дефектоскопи МД-9, МД-11, МДУ-2У, МД-10ІМ та ін. МДУ-2У має подвійну індикацію (імпульсна індикація і відеоіндикація сигналів від дефекту), лінійну швидкість відтворення 12500 мм/с, час одноразової розгортки кадрів 3 с, коефіцієнти підсилення каналів імпульсної індикації $12 \cdot 10^4$, відеоіндикації - $9 \cdot 10^4$, число рядків в кадрі 300 при ширині зони відтворення на стрічці не менше 28 мм. Деякі дані по приладі МНК наведено у додатку.

Перед відтворенням дефектоскоп налаштовують за еталонною магнітограмою із записом магнітного поля дефекту мінімально допустимих розмірів. Потім реєструються всі дефекти, амплітуда імпульсу від яких перевищує амплітуду імпульсу від еталонного дефекту.

Чутливість магнітографічного методу контролю визначається як відношення вертикального розміру (глибини) ΔS мінімального дефекту, який може бути виявлений, до товщини S основного металу КО:

$$K = \frac{\Delta S}{S}.$$

Магнітографією впевнено виявляються площинні дефекти (тріщини, непровари), а також протяжні дефекти у вигляді ланцюжка шлаку, орієнтовані поперек напрямку магнітного потоку. Чутливість магнітографічного методу до поверхневих дефектів така ж або трохи гірше, ніж у магнітопорошкового. Зі збільшенням глибини залягання дефекту його виявлення погіршується (практично можливе виявлення дефекту з вертикальним розміром не менше 10-15% товщини виробу на глибині залягання до 20-25 мм). Округлі внутрішні дефекти виявляються значно гірше. Впевнено виявляються внутрішні площинні дефекти, коли їх вертикальний розмір становить $\Delta S \approx 8..10\%$ товщини зварного шва; внутрішні округлі дефекти можливо виявити тільки при $\Delta S \approx 20\%$.

5.3.3. Феррозондовий метод

Магнітоферрозондовий метод широко застосовується на залізній дорозі для контролю рейкових ланок.

Феррозондовий спосіб реєстрації дефектів в намагнічених матеріалах здійснюється за допомогою магніточутливих приймачів - феррозондів, що складаються з однакових магнітних сердечників з чотирма обмотками, в яких наводиться ЕРС магнітним полем, розсіяним дефектами в контрольованому виробі.

Сердечники феррозондів виготовляються з магнітом'яких матеріалів, які володіють малою коерцитивною силою; зазвичай це пермолой.

Схема феррозонду показана на рис. 5.12. Феррозонд складається з двох паралельних сердечників C_1 і C_2 - напівзондів, кожен з яких має по дві обмотки: одну - збуджуючу змінне магнітне поле (обмотки n'_1 і n''_1), яким намагнічуються сердечники, і другу - індикаторну (обмотки n'_2 і n''_2), для реєстрації ЕРС, наведеної магнітним полем, розсіяним дефектом.

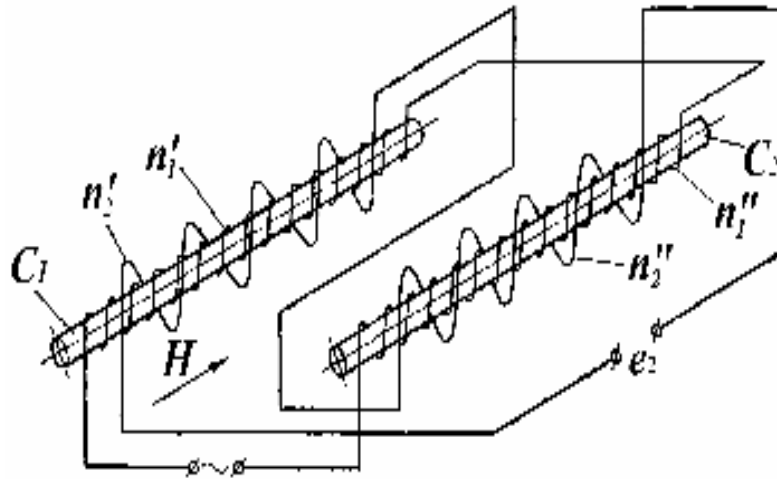


Рис. 5.12. Схема ферозонда для вимірювання напруженості магнітного поля

Залежно від схеми з'єднання обмоток ферозонда останнім можна робити вимірювання або напруженості \vec{H} магнітного поля, або градієнта цього поля $\vec{\Delta H}$. В першому випадку ферозонд називається **полеміром**, а в другому випадку - **градієнтоміром**. На рис. 5.13 показані схеми з'єднання обмоток ферозондів.

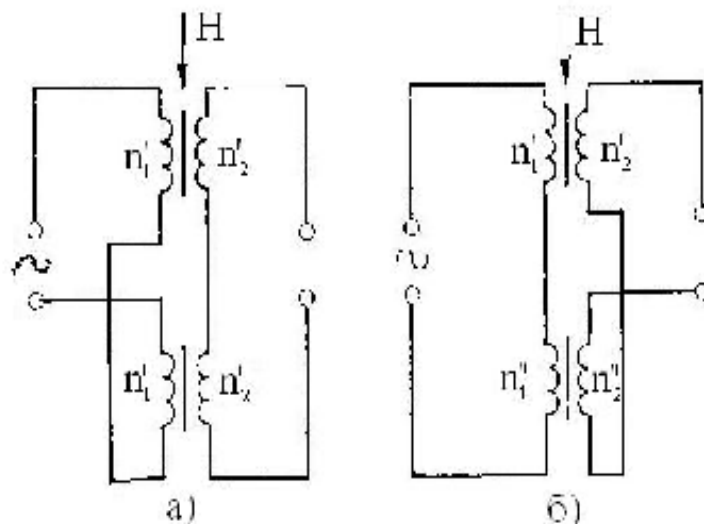


Рис. 5.13. Схема ферозонда-полеміра (а) і ферозонда-градієнтноміра (б)

У полеміра (рис. 5.13, а) однакові первинні обмотки включені зустрічно, їх магнітні поля компенсують один одного, індукції B_1 і B_2 в напівзондах однакові, тому ЕРС у вторинних обмотках дорівнюють нулю.

При дії на ферозонд розсіяного дефектом постійного магнітного поля \vec{H} симетрія в намагніченості сердечників C_1 і C_2 порушується, індукції B_1 і B_2 різні, і в обмотках n_1'' і n_2'' наводиться ЕРС

$$e_2 = \frac{d}{dt}(B_1 + B_2)$$

пропорційна розсіяному полю. Оскільки індикаторні обмотки n'_2 і n''_2 з'єднані послідовно, то їх ЕРС складаються і на виході ферозонда з'являється ЕРС, частота якої в два рази вище частоти збуджуючого поля. Ця ЕРС пропорційна сумі полів $H_1 + H_2$, що діють на сердечники напівзондів: $e_2 = k\mu(H_1 + H_2)$.

У ферозонда-градієнтміра (рис. 5.13, б) намагнічуючі обмотки n'_1 і n''_1 включені послідовно. Наведене ними змінне поле намагнічує осердя C_1 і C_2 напівзондів, збуджуючи ЕРС в індикаторних обмотках n'_2 і n''_2 . Однак останні включені зустрічно, тому ЕРС на виході ферозонда дорівнює нулю. При дії постійного магнітного поля розсіювання \vec{H} індукції B_1 і B_2 стають різними, на виході ферозонда з'являється ЕРС

$$e_2 = \frac{d}{dt}(B_1 - B_2)$$

Ця ЕРС пропорційна різниці магнітних полів \vec{H}_1 і \vec{H}_2 , діючих на сердечники напівзондів, і тому $e_2 = k\mu(\vec{H}_1 - \vec{H}_2) \approx k\mu\vec{\nabla}\vec{H}$

Тут і вище μ - магнітна проникність матеріалу сердечників, k - коефіцієнт пропорційності, що залежить від взаємоіндукції обмоток. У порівнянні з ферозондом - полемером на покази градієнтміра не впливають сторонні магнітні поля, що мають набагато менший градієнт, ніж поле дефекту.

На рис 5.14 приведена структурна схема ферозондового приладу з виходом по другій гармоніці. Сигнал з ферозонду 1 після резонансного підсилювача 2 подається на детектор 3. Ферозонд збуджується генератором 4, що працює на частоті f .

Оскільки на виході ферозонду з'являється сигнал з частотою $2f$, то підсилювач 2 налаштований на цю частоту. Сигнал з генератора 4 через подвоювач частоти 5 подається також на детектор 3, де створює опорну напругу. З детектора 3 сигнал надходить на індикатор I , покази якого пропорційні або напруженості магнітного поля, розсіяного дефектом, або градієнту цього поля - залежно від схеми включення обмоток ферозонду (рис. 5.13, а, б).

Ферозонд, що застосовуються в промисловості, мають достатньо малі розміри - діаметром від 2 до 6 мм.

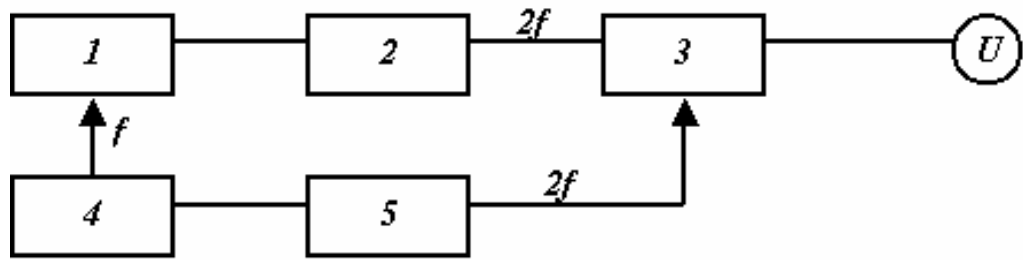


Рис. 5.14. Структурна схема феррозондового приладу з виходом по другій гармоніці

Серійно випускаються ферозонди типів ФП, ФГ і ФГК. Вони мають такі характеристики: чутливість поєміра близько 20 мВ/(А/ см), градієнтміра - 3,5 мВ/(А/см); робоча частота 100 або 130 кГц, довжина сердечника 2 мм, діаметр сердечника 0,1 мм, діаметр робочої частини ферозонда 5 мм. Градієнтміри мають більш високу чутливість і більшу заводо захищеність, ніж поєміри. Для автоматичного контролю і сортування сталевих деталей за твердістю застосовується, наприклад, установка УФСТ-61. Технічні характеристики деяких приладів МНК наведено у додатку.

5.3.4. Метод ефекту Холла.

Принцип дії перетворювача Холла заснований на виникненні ЕРС U_y між гранями А і В прямокутної пластини з напівпровідникового матеріалу (рис. 5.15), по якому протікає струм I в напрямку, перпендикулярному до АВ, коли площина пластини перетинається постійним магнітним полем з індукцією B_z .

Магнітне поле B_z являє собою поле розсіювання на дефектах. Величина ЕРС Холла U_y пов'язана з індукцією B_z формулою $U_y = -vB_z$,

де постійна $v = \frac{R_H I}{h}$, R_H - постійна Холла для даного матеріалу в Ом мм /

Тл; h - товщина в м; I - струм в А, що протікає через пластину. Якщо магнітна індукція B_z вимірюється в теслах, то значення U_y виходить у вольтах.

Оскільки вихідна напруга датчика пропорційна складової поля, нормальної до його площини, можливо вимірювання екстремальних значень напруженості. Перетворювач має лінійну залежність вихідної напруги від напруженості поля в широких межах.

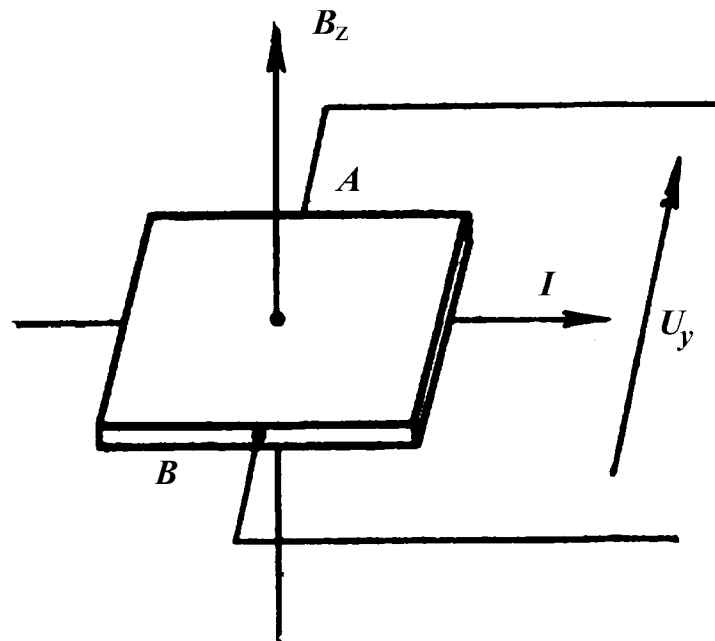


Рис. 5.15. Схема роботи датчика Холла

Основними напівпровідниковими матеріалами, що використовуються при промисловому виготовленні перетворювачів Холла, є кремній Si, германій Ge, арсенід галію GaAs. Кремнієві датчики (перетворювачі) Холла позначаються літерами ДХК, германієві - ДХГ, арсенід-галієві - ХАГ. Струми I , що протікають через перетворювачі різних типів, лежать в межах від 4 до 25 мА; межі вимірюваних магнітних полів складають 10-4 Тл; габаритні розміри коливаються в таких межах: товщина від 0,02 до 0,7 мм; довжина від 2 до 11 мм, ширина від 2 до 7 мм. Такі розміри датчиків Холла дозволяють проводити вимірювання у вузьких зазорах, отворах невеликого діаметру.

При вимірюванні розсіяних дефектами сильних магнітних полів з індукцією більше 0,2 Тл застосовуються напівпровідникові перетворювачі - магніторезистори з антимоніду індію InSb і арсеніду індію InAs. Принцип дії цих перетворювачів заснований на зростанні провідності напівпровідникового матеріалу при внесенні його в магнітне поле.

Метод ефекту Холла (рис. 5.16) знайшов застосування для контролю сталевих канатів. Датчик Холла (пластина Холла, рис. 5.16, а) являє собою прямокутну пластину з напівпровідникового матеріалу (наприклад, арсеніду галію).

У напрямку А-В тече постійний струм I (керуючий струм). Ефект Холла полягає в тому, що при попаданні в пластину локального магнітного поля в ній відбувається викривлення шляху носіїв електричних зарядів (тобто траєкторії керуючого струму), що викликає утворення різниці потенціалів між гранями С і D, тобто виникнення електрорушійної сили E в ланцюзі індикатора (рис. 5.16, б). Виконавчий орган (магнітна головка) засобу контролю об'єктів методом Холла узагальнено являє собою конструкцію, схематично показану на рис. 5.17. Об'єкт переміщується щодо такої головки,

і у випадку потрапляння під неї дефекту на виводах пластини Холла виникає імпульс ЕРС, який реєструється приладом.

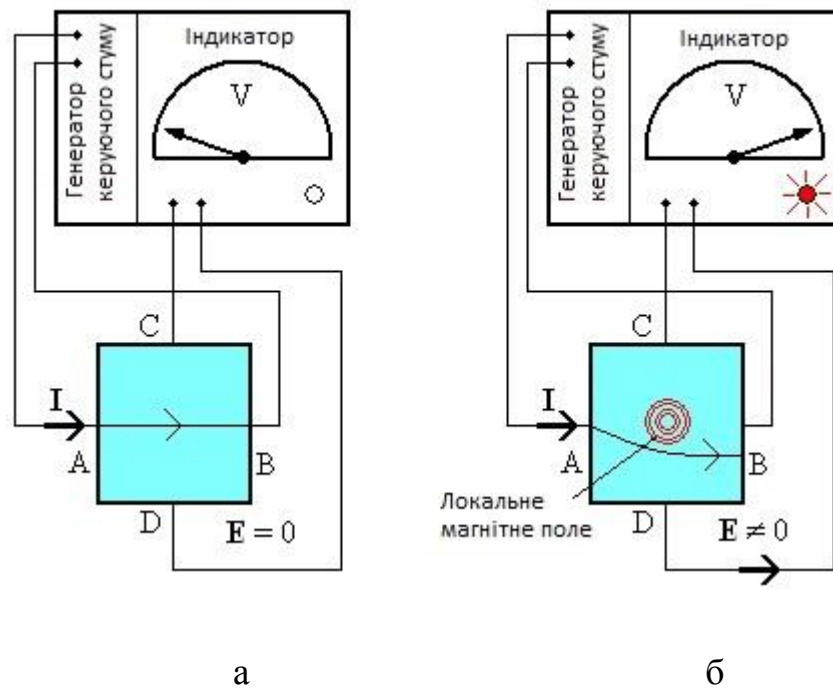


Рис. 5.16. Принцип дії пластини Холла:

а - магнітне вплив відсутній;

б - вплив локального магнітного поля

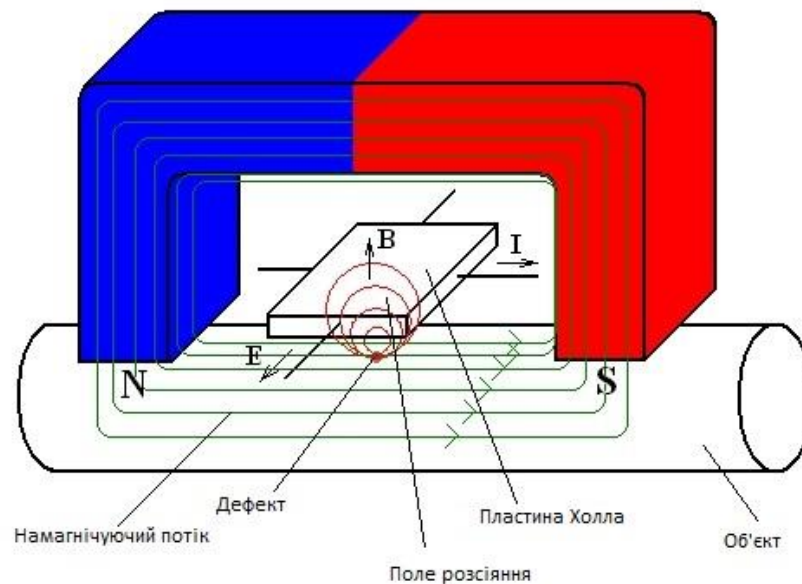


Рис. 5.17. Схематичне представлення конструкції магнітної головки приладу для контролю виробів методом Холла

5.3.5. Індукційний метод

Індукційний метод заснований на явищі самоіндукції. Якщо електричну котушку, замкнену на гальванометр або мілівольтметр, швидко проносити над металом, в якому є зовнішній дефект, то над дефектом виникає неоднорідність електромагнітного поля в котушці, яка створює слабку електрорушійну силу (ЕРС) в ній. Ця ЕРС, яка індукується приладом, і є ознакою дефекту. Цей метод використовувався на залізниці при будівництві перших вагонів-дефектоскопів. На даний час метод практично не застосовується, оскільки володіє **слабкою чутливістю**, яка прямо залежить від швидкості сканування.

5.3.6. Метод магнітної пам'яті металу

Метод магнітної пам'яті металу (МПМ) заснований на вимірюванні і аналізі розподілу власних магнітних полів розсіювання металу, які відбивають їх структурну і технологічну спадковість.

Встановлено, що в зонах сталевих об'єктів, які будь-коли (навіть лише одноразово) зазнали підвищені механічні напруження (далі - зони концентрації напружень, ЗКН), напруженість поля залишкової намагніченості металу H_p змінює свій знак (інверсія: плюс на мінус або навпаки) або звертається в нуль. При контролі методом МПМ цілком достатньо використовувати природну намагніченість, що сформувалася в процесі виготовлення виробу в магнітному полі Землі, а для елементів механічного обладнання постійна намагніченість обумовлена ще й регулярним впливом полів електричних установок, що входять в конструкцію об'єкта (наприклад, електроприводи різних механізмів). Для обладнання, що знаходиться в експлуатації, магнітна пам'ять проявляється у незворотній зміні намагніченості металу в напрямку дії максимальних напружень від робочих навантажень, тобто ступінь небезпеки ділянки відображається не власне значенням напруженості поля H_p , а крутизою її перепаду в ЗКН (рис. 5.18).

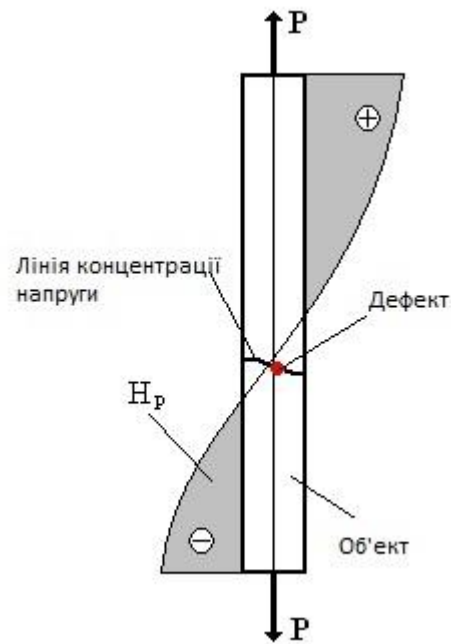


Рис. 5.18. Інверсія знака при залишковій напруженості магнітного поля H_p в зоні, що зазнала концентрацію механічних напружень

Цей метод регламентується стандартом і знаходить застосування, наприклад, на об'єктах котлонагляду. В даний час ведуться успішні розробки щодо його застосування і на сталевих канатах, так як він має ряд переваг перед методом ефекту Холла (портативність засобів контролю і надійність виявлення небезпечних ділянок). На рис. 5.19 наведені фотографії засобів контролю методом МПМ і приклад його проведення.

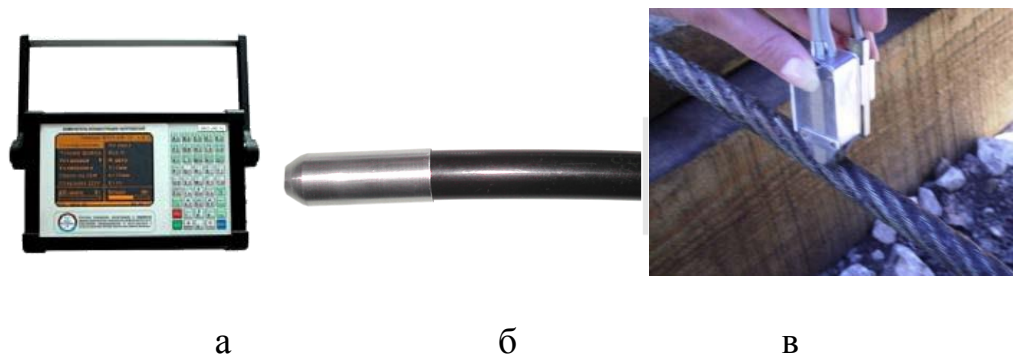


Рис. 5.19. Метод магнітної пам'яті металу:
а - зовнішній вигляд приладу ІКН-4М-16;


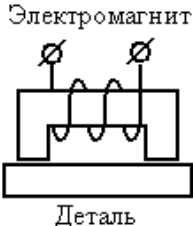
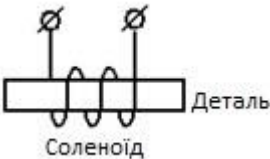
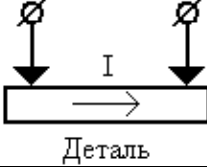
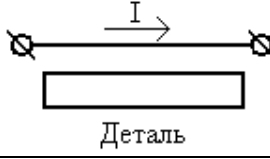
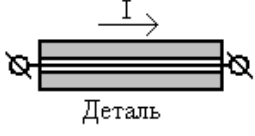
б - виконавчий елемент датчика; в - контроль канату методом МПМ

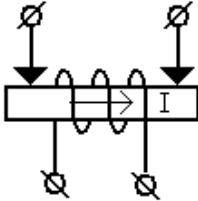
Точність і достовірність методу визначається технологічною послідовністю проведення контролю.

5.4. Способи намагнічування контрольованих виробів

Існує кілька видів і способів намагнічування деталей і об'єктів (табл. 5.2). Ці види та способи вибирають залежно від форми і розмірів контрольованої деталі (об'єкта), типу намагнічуючого пристрою і передбачуваної переважної орієнтації очікуваних дефектів (найкраще виявляються дефекти, орієнтовані перпендикулярно магнітному потоку).

Таблиця 5.2. Види і способи намагнічування

Вид намагнічування	Спосіб	Схема	Переважна орієнтація виявляємих дефектів
Поздовжнє (полюсне)	Постійним магнітом		Поперечні
	Електромагнітом		
	Соленоїдом		
Циркулярне	Пропусканням струму по деталі		Поздовжні
	Пропусканням струму по дроту поруч з деталлю		Уздовж дроту
	Пропусканням струму по дроту в порожнині деталі		Поздовжні

Комбіноване	Пропусканням струму по деталі і соленоїдом		Будь-які
-------------	--	--	----------

Якість МНК істотно залежить від способу намагнічування контрольованого виробу. З метою отримання максимальної чутливості і роздільної здатності магнітного методу неруйнівного контролю застосовуються різні види намагнічування матеріалів, серед яких **п'ять основних**: поздовжнє (полюсне), циркулярне, комбіноване, паралельне, способом магнітного контакту.

Поздовжнім (полюсним) намагнічуванням називається таке намагнічування, при якому магнітні силові лінії частину шляху проходять по виробу, а частину - по повітрю. Це намагнічування здійснюється шляхом розташування контрольованого протяжного виробу правильної форми (циліндричного, прямокутного і т.п.) або між полюсами постійного магніту (електромагніту), або в соленоїд. Після видалення виробу з поля намагнічування за рахунок залишкової намагніченості у виробі виникають два магнітних полюси, N і S, як показано на рис. 5.20. Тому такий метод намагнічування названий полюсним.

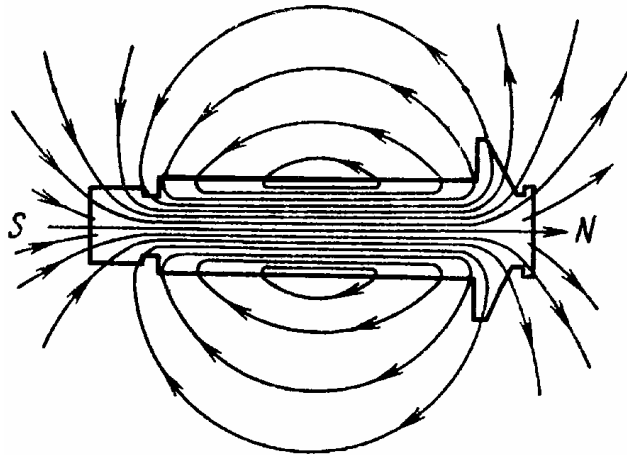


Рис. 5.20. Схема спектра магнітного поля навколо полюсно намагніченої деталі

На рис. 5.21. схематично зображені прийоми полюсного намагнічування. Намагнічування полем стаціонарного електромагніту (рис. 5.21, а) або полем ручного електромагніту (рис. 5.21, б) дозволяє виявляти лінійні дефекти, перпендикулярні осі виробу, а намагнічування полем соленоїда (рис. 5.21, в, г) виявляє дефекти, перпендикулярні осі виробу. Намагнічування зовнішнім полем соленоїда дозволяє виявляти дефекти на внутрішній поверхні отвору, перпендикулярні осі отвору (рис. 5.21, д).

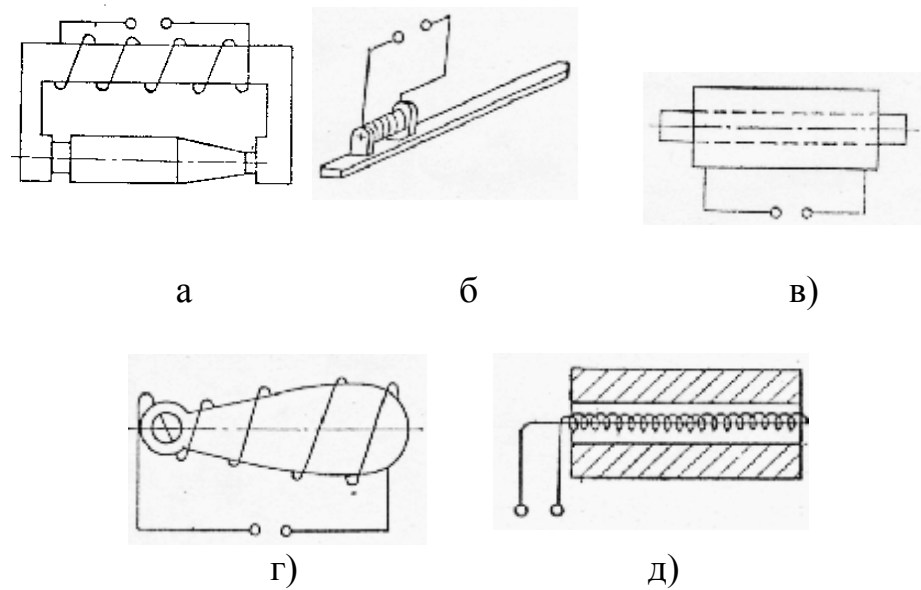


Рис. 5.21. Способи створення полюсного намагнічування:
 а - за допомогою стаціонарного електромагніту; б - за допомогою
 ручного (переносного) електромагніту; в, г, д - полем соленоїда

При полюсному методі розрізняють **поздовжнє намагнічування**, при якому напрямок вектора \vec{H} зовнішнього магнітного поля збігається з напрямком поздовжньої осі деталі (рис. 5.22, а), і **поперечне намагнічування**, при якому вектор перпендикулярний до поздовжньої осі деталі (рис. 5.22, б). Поперечне намагнічування в іншому напрямку прямокутної деталі, як показано на рис. 5.22, в, іноді називають **нормальним намагнічуванням**.

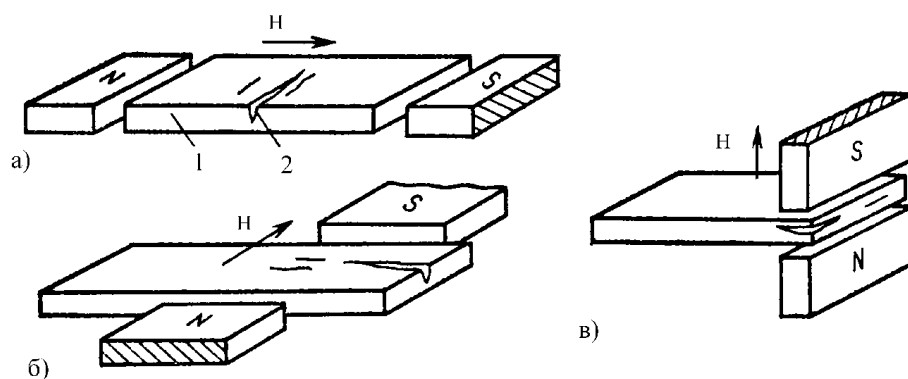


Рис. 5.22. Види полюсного намагнічування:
 а - поздовжнє; б - поперечне; в - нормальне;
 1 - деталь, яка намагнічується; 2 - тріщина

Циркулярним називається намагнічування, при якому магнітні силові лінії мають вигляд концентричних кіл (окружностей), розташованих у площині, перпендикулярній до напрямку струму. При відсутності дефектів магнітні силові лінії замикаються всередині деталі, магнітні полюси не утворюються. При наявності дефекту магнітне поле виходить з деталі, як показано на рис. 5.23.

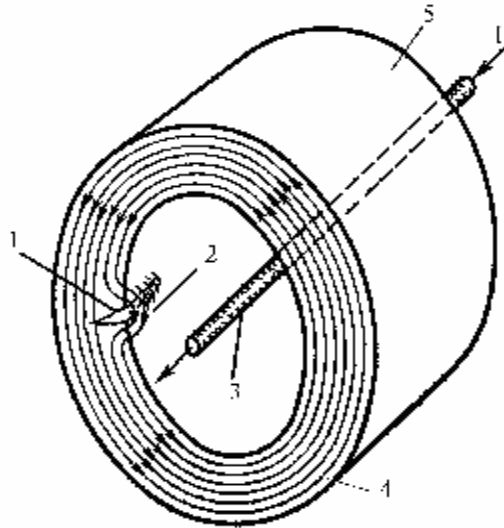


Рис. 5.23. Схема циркулярного намагнічування деталі пропусканням струму по стрижню: 1 - тріщина; 2 - поле розсіювання над тріщиною; 3 - стрижень; 4 - магнітні лінії; 5 - деталь; I - струм

Циркулярний метод намагнічування здійснюється або пропусканням струму по товстому мідному стрижню або дроту, протягнутому через деталь (рис. 5.23), або пропусканням струму безпосередньо через деталь (рис. 5.24). Останній спосіб застосовується для контролю суцільних протяжних деталей, циліндричних порожнистих товстостінних деталей при виявленні дефектів на зовнішній поверхні циліндра, при контролі зварних швів шляхом пропускання струму через шов. Притискні контакти для пропускання струму через деталь називаються **електроолівцями**.

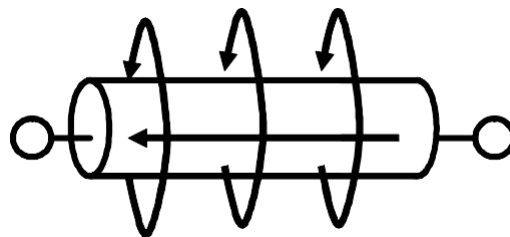


Рис. 5.24. Намагнічування полем струму, що пропускається через деталь

Комбінованим називається намагнічування, при якому магнітне поле збуджується одночасно дією двох або трьох джерел полів, наприклад,

поздовжнім полем електромагніту і одного або двох циркулярних полів прямого струму. При цьому вектори напруженості магнітного поля \vec{H}_1 , \vec{H}_2 та \vec{H}_3 складаються векторно, так що результуючий вектор $\vec{H} = \vec{H}_1 + \vec{H}_2 + \vec{H}_3$ спрямований по гвинтовій лінії.

Комбіноване намагнічування забезпечує максимальне виявлення дефектів, особливо в деталях складної форми.

На рис. 5.25 наведено два приклади схем комбінованого намагнічування циліндричної деталі. Постійний струм i_{np} в електромагніті створює поздовжнє намагнічування деталі з напруженістю магнітного поля \vec{H}_{np} , а змінний струм $i_{ц}$, що пропускається через деталь, створює циркулярне намагнічування деталі з амплітудою напруженості магнітного поля $\vec{H}_{ц}$.

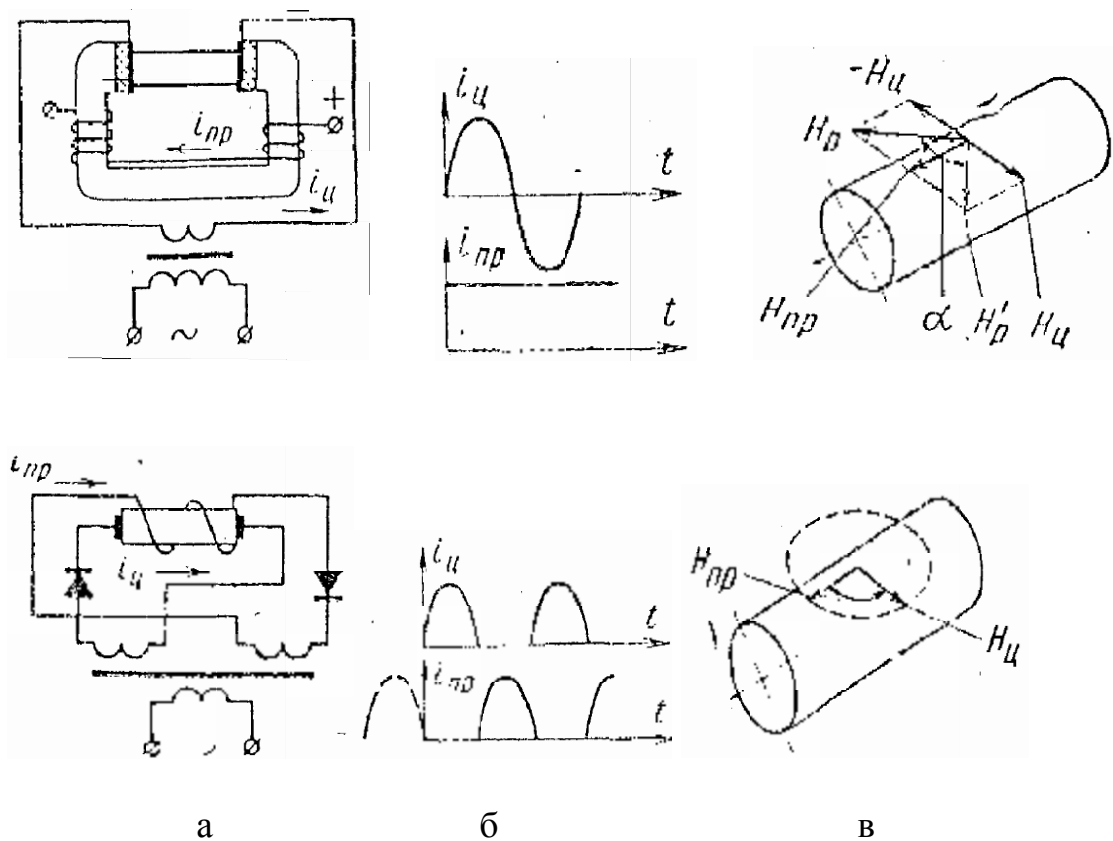


Рис. 5.25. Способи комбінованого намагнічування: а - схема намагнічування; б - крива струму намагнічування; в - схема розташування векторів напруженості намагнічуючих полів

При цьому вектор результуючого поля \vec{H}_p коливається в межах кута δ , як показано на рисунках справа. На першій схемі циркулярне магнітне поле змінюється з частотою f , а поздовжнє магнітне поле постійно. Якщо $\vec{H}_{np} = \vec{H}_{цmax}$, то вектор напруженості магнітного поля змінює свій

напрямок в межах 90^0 . На рис. 5.25 - кут повороту вектора результуючого поля.

На другій схемі намагнічування здійснюється випрямленими однополуперіодними струмами, зсунутими по фазі на 180^0 . При цьому вектор напруженості результуючого магнітного поля збігається або з вектором поздовжнього поля $\vec{H}_{\text{пр}}$, або з вектором напруженості циркулярного поля $\vec{H}_{\text{ц}}$. Кут δ між векторами $\vec{H}_{\text{пр}}$ і $\vec{H}_{\text{ц}}$ дорівнює 90^0 .

На рис. 5.26 наведені інші прийоми комбінованого намагнічування - полем двох або більше струмів, що пропускаються через виріб у взаємно перпендикулярних напрямках (а), полем струму, що пропускається через стрижень, поміщений в отвір виробу, і полем струму, індукованого у виробі (б).

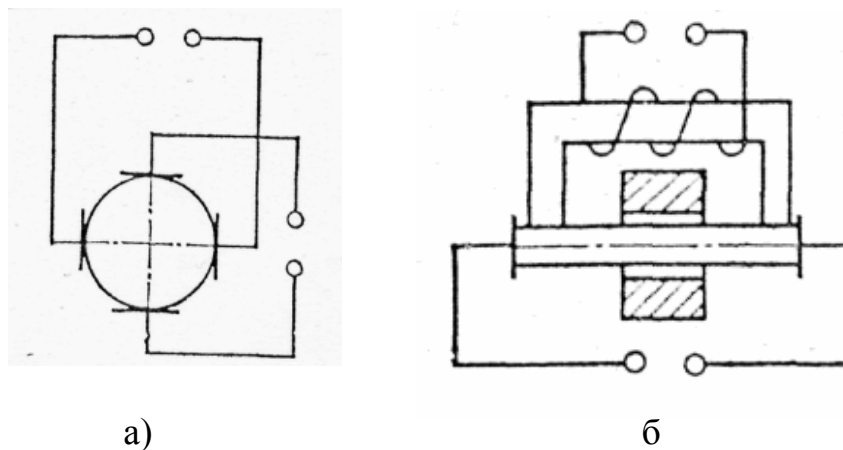


Рис. 5.26. Деякі прийоми комбінованого намагнічування: а - полем двох і більше струмів, що пропускаються через виріб у взаємно перпендикулярних напрямках; б - полем струму, що пропускається через стрижень, поміщений в отвір виробу, і полем струму, індукованого у виробі

Паралельним називається намагнічування, при якому провід з потоком намагнічування розташований паралельно поверхні контрольованої деталі, як показано на рис. 5.27, а, де 1 - кабель із струмом, 2 - контрольований виріб зі щілиною 3.

Для збільшення намагнічування виробу застосовуються додаткові магнітопроводи 4 у вигляді півкілець, закріплених на струмоведучому кабелі 1 на відстані 3-5 мм один від одного і щільно притиснутих до виробу 2 (рис 5.27, б).

Півкільця виготовляються з магнітом'якої сталі Ст-3, стали 10, 20 тощо, ширина півкілець зазвичай становить 15-40 мм, діаметр залежить від величини найбільшого струму, що протікає по кабелю. При пропусканні струму через кабель виникає замкнений магнітний ланцюг: півкільце - ділянка деталі - наступне півкільце. При паралельному намагнічуванні в сталі

типу 30ХГСНА вдається виявити шліфувальні тріщини глибиною 0,05- 0,07 мм, приховані шаром хрому товщиною 50-70 мкм. Такий спосіб намагнічування доцільний, якщо до деталі обмежений підхід і по ній не дозволяється пропускати струм.

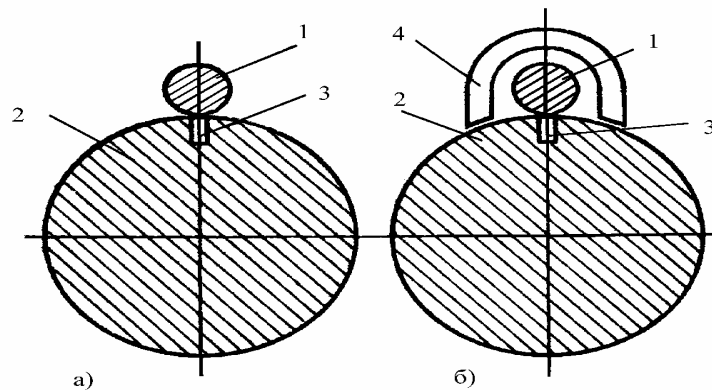


Рис. 5.27. Схема паралельного намагнічування деталі із застосуванням: а – звичайного кабеля; б – кабеля з напівкільцем; 1 – кабель із струмом; 2 – контрольований виріб ; 3 – щілина; 4 – додаткові магнітопроводи

Способом магнітного контакту називається намагнічування контрольованого виробу прямолінійним або підковоподібним постійним магнітом (електромагнітом) шляхом переміщення одного з полюсів магніту по поверхні виробу. Між контрольованою поверхнею і полюсом магніту, що притискається до неї, слід забезпечити хороший магнітний контакт. Другий полюс магніту повинен бути віддалений на можливо більшу відстань від контрольованої поверхні, щоб зменшити його розмагнічуючу дію.

На рис. 5.28 показаний приклад застосування способу магнітного контакту при намагнічуванні циліндричної деталі 1. До її бокової поверхні 2 притиснутий полюсний наконечник 3 полюса N прямого постійного магніту. Наконечник 3 переміщається навколо циліндра з початкового положення НН в кінцеве положення КК.

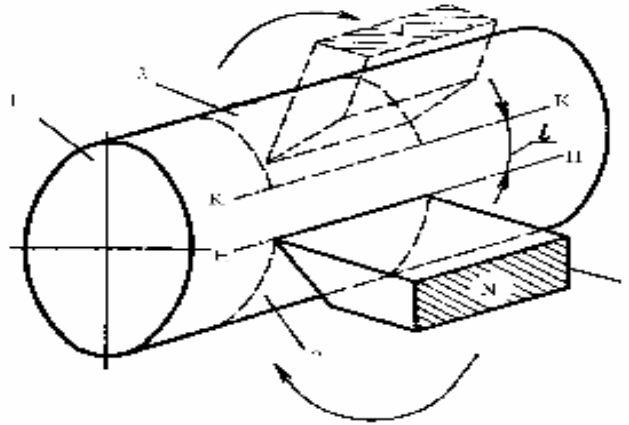


Рис. 5.28. Схема намагнічування ділянки деталі способом магнітного контакту

Полюс магніту переміщують по поверхні деталі в напрямі, перпендикулярному напрямку поширення передбачуваних тріщин. Ширина ефективно намагніченої зони практично дорівнює ширині зони контакту деталі з полюсним наконечником, а довжина дорівнює відстані між початковим і кінцевим положеннями полюса магніту.

Для контролю деталей циліндричної форми магніт переміщують по гвинтовій лінії. Шлях переміщення не повинен бути замкнутий. Відстань l між початковим і кінцевим положеннями має становити не менше $1/3$ частини кола циліндра, якщо його діаметр d менше 30 мм. При $d > 30$ мм величина $l \approx 20 \dots 30$ мм. В іншому випадку може статися розмагнічування або навіть перемагнічування деталі.

При контролі плоских поверхонь полюс магніту переміщують на відстані, що перевищують контрольовану ділянку в обидві сторони на 20-30 мм.

Для гарного намагнічування і, отже, хорошого виявлення тріщин напруженість магнітного поля у полюса магніту повинна бути не менше 70-80 тис. А / м (900 ... 1000 Е).

Вибір способу намагнічування залежить, зокрема, від напрямку поширення дефектів по деталі. Вибирають такий спосіб намагнічування, при якому кут δ між векторами напруженості магнітного поля і напрямом поширення дефектів близький до 90° , при цьому досягається найбільша чутливість методу. При кутах $\delta < 90^\circ$ чутливість значно знижується, а при $\delta \approx 0$ не виявляються навіть дуже великі дефекти. Якщо невідомий напрямок поширення тріщин або деталь має складну форму, намагнічування проводять у двох і більше напрямках, наносячи суспензію і оглядаючи деталь після кожного намагнічування.

Для виявлення дефектів, орієнтованих по різному, однією операцією намагнічування рекомендується застосовувати комбіноване намагнічування.

5.5. Розмагнічування виробів

Після контролю виробів необхідно розмагнітити, оскільки залишкова намагніченість може викликати небажані наслідки. Наприклад, поверхні погано розмагнічених підшипників, інших обертових і дотичних при роботі деталей притягують феромагнітні продукти зносу, що призводить до прискореного виходу деталей з ладу. При швидкому обертанні намагнічених деталей в сусідніх масивних деталях можуть збуджуватися значні вихрові струми. Нерозмагнічені деталі можуть порушити хід годинника і тому подібних механізмів.

Будь-яке розмагнічування (крім нагрівання КО вище температури Кюрі) зводиться до періодичної зміни величини і напрямку магнітного поля, в якому знаходиться КО, з поступовим зменшенням цього поля до нуля. На рис. 5.29 представлений графік зміни індукції в деталі при розмагнічуванні.

Коли напруженість розмагнічуючого поля досягає нульового значення, залишкова індукція в деталі буде також близька до нуля.

Зазвичай застосовують такі способи розмагнічування:

- повільне протягування намагніченого КО через отвір котушки, що живиться змінним струмом частотою 50 Гц. Деталь віддаляють на відстань не менше 1 м від котушки. У цьому випадку змінне поле, володіючи обмеженою глибиною проникнення, ефективно розмагнічує тільки поверхневий шар деталі;

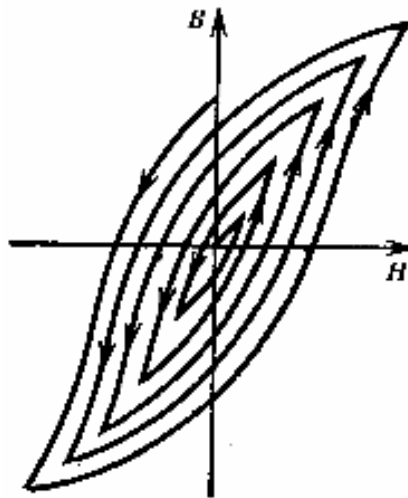


Рис. 5.29. Графік зміни індукції в деталі при розмагнічуванні

- пропускання змінного струму, що дорівнює намагнічуючому, безпосередньо через деталь з поступовим зменшенням його до нуля;
- комутацію постійного струму в соленоїді або в обмотках електромагніту з поступовим зниженням струму до нуля;
- використання електромагніту, що живиться змінним струмом, який поступово знижується до нуля.

Кращий результат досягається з використанням тих же засобів, що застосовувалися при намагнічуванні. Початкове поле розмагнічування

повинно бути не менше поля, що діяло при намагнічуванні. Струм не повинен вимикатися, коли деталь знаходиться у сфері впливу поля; напрямки намагнічуючого і розмагнічуючого полів повинні збігатися.

Для якісного контролю розмагнічування можна використовувати притягання малих магнітних мас. З цією метою підводять нижній кінець ланцюжка з 6-10 канцелярських скріпок до деталі і по відхиленню ланцюжка від вертикального положення (внаслідок її притягання до деталі) судять про розмагніченість деталі.

5.6. Прилади й установки для МНК

Основним приладом МНК є магнітний дефектоскоп.

Універсальний магнітний дефектоскоп У-604-68 (рис. 5.30)

Контрольована деталь поміщається в затискний пристрій ЗУ, приєднаний до вторинної обмотки силового трансформатора Тр. Блок германієвих вентилів ВП забезпечує намагнічування контрольованої деталі випрямленим однонапівперіодним струмом. Якщо вентилялі ВП шунтуються контактами К4, намагнічування здійснюється змінним струмом.

Первинна обмотка понижуючого трансформатора Тр підключена до мережі змінного струму 380/220 В через магнітні підсилювачі МУ1 і МУ2. За допомогою потенціометра R змінюється струм від нуля до максимальної величини.

При розмагнічування деталі вимикають струм управління підсилювачів, в результаті чого виникає перехідний процес у вигляді затухаючої синусоїди і деталь розмагнічується протягом 5-6 с.

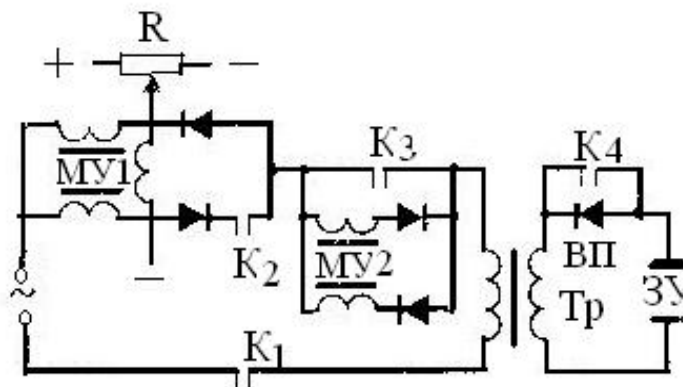


Рис. 5.30. Принципова схема дефектоскопа У-604-68

В комплект дефектоскопа входять ванночка, соленоїди діаметром 110 і 210 мм, кабель, що намагнічує, перерізом 70 мм^2 і довжиною 3 м, а також стрижні для намагнічування.

Найбільший струм, споживаний від однофазної мережі з напругою 220В, складає 500А, найбільший випрямлений однонапівперіодний струм - 10000А, змінний - 7500 А. Найменший струм при намагнічуванні - 40 ... 60А.

Найбільша напруженість поля в соленоїді діаметром 110 мм дорівнює 64000 А/м (800 Е), в соленоїді діаметром 210 мм - 48000 А/м (600 Е).

Дефектоскоп забезпечений гідравлічною системою з насосом для перемішування суспензії щоб уникнути осідання магнітного порошку на дно бачка і подачі суспензії по шлангу на контрольовані деталі. Габарити універсального магнітного дефектоскопа У-604-68: довжина 2800 мм, ширина 950 мм, висота з приладовим щитком 1775 мм.

Універсальний магнітний дефектоскоп УМД - 9000.

Схема дефектоскопа показана на рис. 5.31.

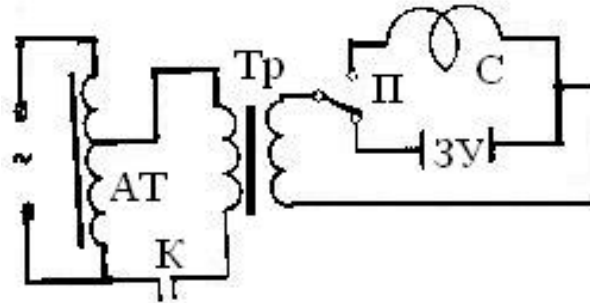


Рис. 5.31. Принципова схема універсального магнітного дефектоскопа УМД-9000

Силовий трансформатор Тр живиться від мережі змінного струму через автотрансформатор АТ, який дозволяє регулювати струм у вторинній обмотці Тр. До останньої за допомогою перемикача П підключається або затискний пристрій ЗУ, або соленоїд С. Контактор К служить для виключення струму при залишковому намагнічуванні. Найбільший намагнічуючий струм 9000 А при живленні від мережі напругою 380 В, максимальна довжина контрольованих деталей до 1700 мм, діаметр - до 900 мм. Габаритні розміри: 2500x910x570 мм.

Пересувний магнітний дефектоскоп ДМП-2.

Схема дефектоскопа показана на рис. 5.32.

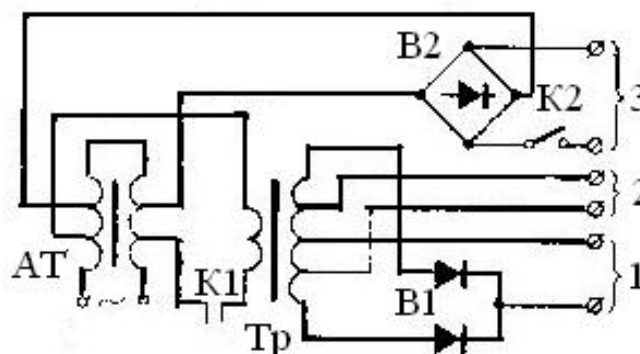


Рис. 5.32. Принципова схема пересувного дефектоскопа ДМП-2:

- 1, 2 - клеми живлення для циркулярного намагнічування;
- 3 - клеми живлення для намагнічування прикладеним полем

Силовий понижуючий трансформатор Тр підключений до мережі через регулюючий силу струму автотрансформатор АТ. Зі вторинної обмотки трансформатора Тр через двохнапівперіодний випрямляч В1 на клеми 1 подається постійний струм силою до 350А для циркулярного намагнічування за допомогою електроолівців. На клеми 2 подається змінний струм силою до 1300А для циркулярного намагнічування за допомогою магнітних присосків.

Клеми 3 служать для живлення постійним струмом електромагніту, в прикладеному полі якого здійснюється контроль.

У комплект дефектоскопа входить переносний бачок з насосом для подачі суспензії по шлангу до контрольованих деталей. Габарити дефектоскопа: 720 x490x910 мм, вага - 265 кг.

РОЗДІЛ 6. СТРУМОВИХРОВИЙ КОНТРОЛЬ (СВК)

6.1. Поняття про струмовихровий контроль

Струмовихровий контроль заснований на аналізі зміни електромагнітного поля вихрових струмів під дією тих чи інших неоднорідностей КО. Оскільки вихрові струми можуть збуджуватися в електропровідних матеріалах, цей метод контролю може бути використаний для будь-яких металів.

Вихрові струми виникають в електропровідних виробках, що знаходяться під впливом змінного магнітного поля. Вперше вихрові струми були виявлені французьким ученим Д.Ф. Араго (1786-1853) в 1824 р в мідному диску, розташованому на осі під магнітною стрілкою, що обертається. За рахунок вихрових струмів диск приходив в обертання. Це явище, назване явищем Араго, було пояснено кілька років потому М. Фарадеєм з позицій відкритого ним закону **електромагнітної індукції**: магнітне поле, яке обертається, наводить в мідному диску струми (вихрові), які взаємодіють з магнітною стрілкою. Вихрові струми були детально досліджені французьким фізиком Ж.Б. Фуко (1819-1868) і названі його ім'ям (струми Фуко). Він відкрив явище нагрівання вихровими струмами металевих тіл, що обертаються в магнітному полі.

Вихрові струми виникають в провідних тілах як внаслідок зміни магнітного потоку в часі, так і в результаті відносного переміщення провідного тіла і магнітного потоку.

Вихрові струми замикаються безпосередньо в провідних виробках, формуючи вихроподібні контури, які зчіплюються з індукуючим їх магнітним потоком.

Відповідно до закону Ленца, змінне магнітне поле вихрових струмів прагне протидіяти змінам магнітного потоку, що індукує вихрові струми, внаслідок чого вони здійснюють розмагнічуючу дію на джерело змінного магнітного потоку, в тому числі і на збуджуючу котушку вихрострумів перетворювача (ВСП), індуктивність якої зменшує власну індуктивність збуджуючої котушки ВСП.

Збудником вихрових струмів може бути поле рухомого магніту, змінне поле струму в проводі, хвиля радіовипромінювання. Найчастіше поблизу поверхні контрольованого виробу поміщається збуджуюча вихрові струми котушка індуктивності зі змінним струмом або комбінація декількох котушок. У свою чергу, електромагнітне поле вихрових струмів впливає на котушки перетворювача, наводячи в них електрорушійну силу або змінюючи їх повний опір. Сигнал може формуватися в тій же обмотці, по якій йде збуджуючий струм, або ж використовується додаткова котушка або котушки.

Вихрові струми викликають відповідні виділення тепла (Джоулева), які називають втратами енергії на вихрові струми. У вихрострумівому контролі ці втрати визначають внесений активний опір ВСП, який може бути одним з інформативних параметрів ВСП при контролі промислових виробів.

Для зменшення втрат енергії від вихрових струмів в магнітопроводах електричних машин і трансформаторів їх виконують з тонких ізолюваних листів електротехнічної сталі (товщиною 0,35 мм), для збільшення питомого електричного опору якої додають до заліза 2-4% кремнію.

Вихрові струми викликають нерівномірний розподіл напруженості магнітного поля в провідному виробі, в якій вони виникають. Це пояснюється тим, що в центральній частині перетину цього виробу магніторушійна сила вихрових струмів, спрямована назустріч основному магнітному потоку, є найбільшою, оскільки ця частина перетину охоплюється найбільшою кількістю контурів вихрових струмів. Таке витіснення магнітного потоку з середини перетину виробу до його поверхні буде тим більше, чим вище кутова частота змінного струму збуджуючої котушки ВСП і чим більше магнітна проникність μ_a матеріалу об'єкта контролю (ОК). При високих частотах магнітний потік проходить лише в тонкому поверхневому шарі контрольованого виробу (рис. 6.1, де $x^2 = \omega \sigma \mu_a R_{OK}^2$ R_{OK} - радіус ОК).

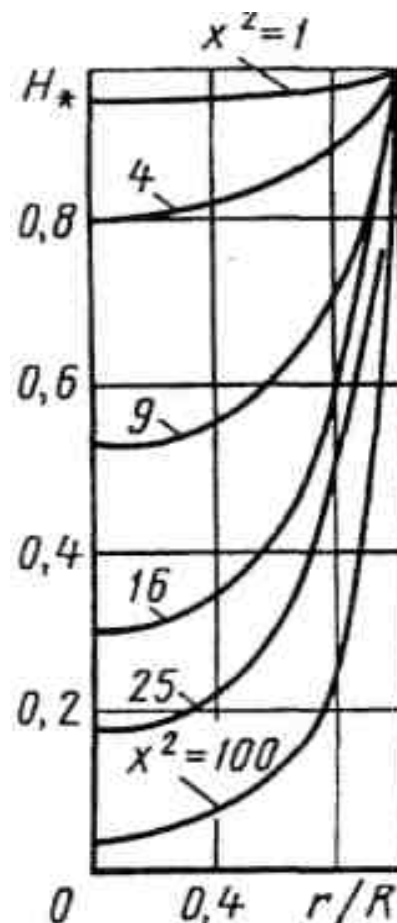


Рис. 6.1. Розподіл модулів відносної напруженості магнітного поля в циліндрі

За своїм характером **явище витіснення магнітного потоку** аналогічно **поверхневому ефекту витіснення струму**, і його іноді називають **магнітним**

поверхневим ефектом. Явище магнітного поверхневого ефекту знаходить широке застосування в індукційному нагріві для плавки і поверхневого загартування металів.

6.2. Загальна характеристика вихрострумowego контролю.

Як зазначалося вище, вихрострумівий контроль заснований на аналізі взаємодії електромагнітного поля зовнішнього джерела (обмотка збудження ВСП) з електромагнітним полем вихрових струмів, збуджених в ОК змінним магнітним полем ВСП.

Розподіл густини вихрових струмів в електропровідному об'єкті контролю визначається джерелом електромагнітного поля, геометричними і електромагнітними параметрами ОК, а також взаємним розташуванням ВСП і ОК. Збуджуюча котушка ВСП може розташовуватися поблизу ОК (рис. 6.2, а - накладний ВСП), а також проходити всередині трубчастого ОК або облягати його (рис. 6.2, б, в - прохідні ВСП).

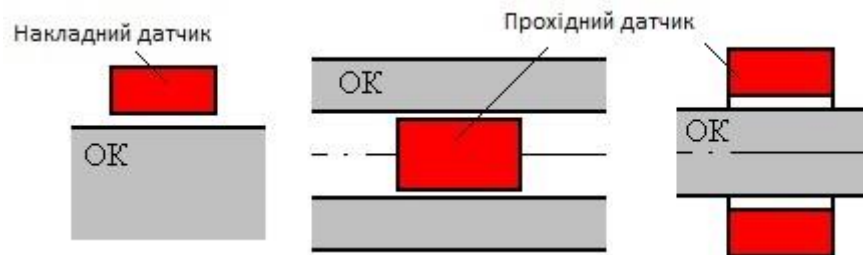


Рис. 6.2. Накладний (а) та прохідні (б, в) ВСП

Форма кривих розподілу вихрових струмів повторює форму витків обмотки збудження ВСП з урахуванням форми ОК (рис. 6.3, струми μ_a). В результаті дії вихрових струмів в ОК змінюється результуюче магнітне поле.

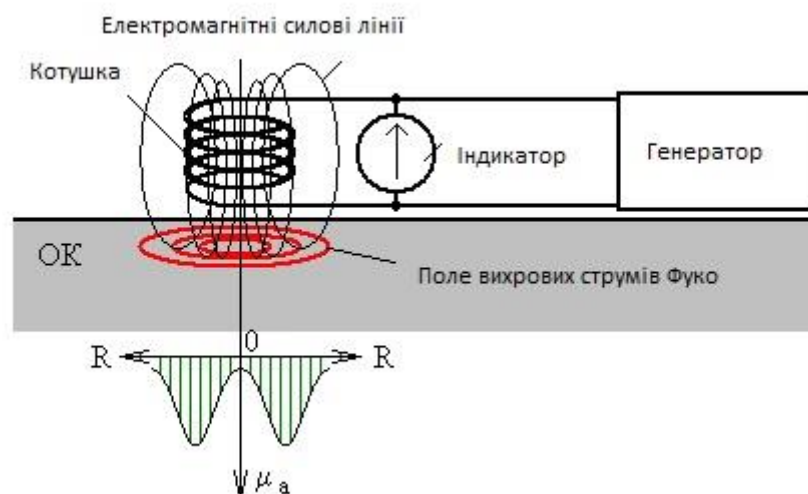


Рис. 6.3. Схема принципу дії приладу з накладним ВСП

З графіка розподілу густини вихрових струмів в ОК видно, що максимального значення вона досягає під витками збуджуючої обмотки ВСП. Під центром збуджуючої обмотки ВСП вихрові струми відсутні, і, отже, виявити дефект в цьому місці ОК не представляється можливим.

Взаємодія збуджуючої обмотки ВСП з об'єктом контролю можна представити схемою повітряного трансформатора, параметри ланцюга вторинної обмотки Z_{BT} якого визначаються еквівалентним контуром вихрових струмів в ОК (рис. 6.4, а).

Як відомо, повітряний трансформатор можна представити схемою заміщення (рис. 6.4, б), на якій R_{BH} - внесений в котушку активний опір, обумовлений втратами енергії в результаті нагрівання ОК вихровими струмами; L_{BH} - вносима індуктивність, обумовлена зміною потокозчеплення індуктивної котушки (обмотки збудження ВСП) за рахунок дії вихрових струмів. Оскільки потокозчеплення ψ через дію вихрових струмів змінюється, індуктивність котушки при наявності поблизу неї електропровідного ОК також зміниться. Параметри R_{BH} і L_{BH} залежать від густини та розподілу вихрових струмів в ОК.

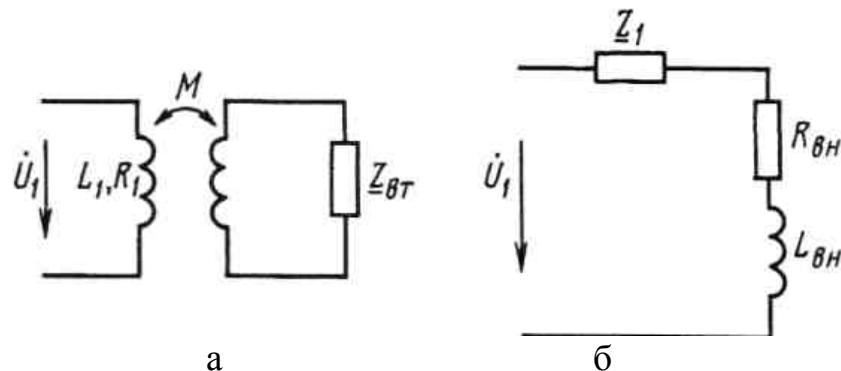


Рис. 6.4. Повітряний трансформатор (а) і його схема заміщення (б)

Для контролю весь виріб або його частину поміщають в поле датчика (рис. 6.5).

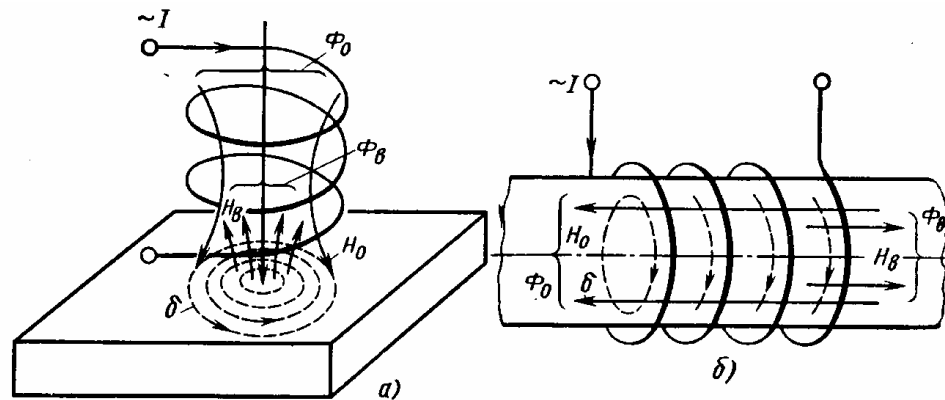


Рис. 6.5. Лінії напруженості магнітних полів H_0 , H_B та густина вихрових струмів при контролі накладним (а) і прохідним (б) датчиком

Вихрові струми збуджують змінним магнітним потоком Φ_0 . Інформацію про властивості виробу датчик отримує через магнітний потік Φ_B , створений вихровими струмами з густиною δ . Вектори напруженості збуджуючого поля H_0 і поля вихрових струмів H_B спрямовані назустріч один одному; електрорушійна сила в обмотці датчика пропорційна різниці потоків $\Phi_0 - \Phi_B$.

Реєструючи напругу на котушці або її опір, можна отримати відомості про контрольований виріб. Напруга і опір котушки залежать від багатьох параметрів, що обумовлює широкі можливості СВК (дефектоскопія, товщинометрія, структурометрія, сортування металу по маркам, контроль стану поверхні і т.д.). З іншого боку, ця обставина ускладнює поділ інформації про різні параметри об'єкта і вимагає використання спеціальних способів фільтрації шумів.

Для аналізу зміни електромагнітного поля зазвичай використовують активний і індуктивний опір котушки, амплітуду напруги, зсув фаз вимірюваної і опорної напруг. Глибина проникнення вихрових струмів залежить від частоти електромагнітних коливань, електричних і магнітних характеристик металу, форми котушки і поверхні виробу. Зазвичай вона коливається від долей міліметра до 1-3 мм.

Чутливість методу залежить від багатьох факторів; за сприятливих умов вдається виявити тріщини глибиною 0,1-0,2 мм протяжністю 1-2 мм, розташовані на глибині до 1 мм.

СВК можна проводити без контакту між котушкою і металом, зазор може становити від часток міліметра до декількох міліметрів. Це дозволяє вільно переміщувати перетворювач, що істотно для автоматизації процесу контролю. Вихідною величиною СВК є електричний сигнал, що дозволяє автоматично реєструвати результати контролю. Ще одна перевага методу -

можливість здійснення контролю з великою швидкістю, сумірною зі швидкістю механічної обробки КО.

Струмовихровий вид контролю (іноді його називають електромагнітний) містить тільки два методи: **вихроструміву дефектоскопію і вихроструміву товщинометрію**. Обидва ці методи на відміну від магнітних можуть застосовуватися на будь-яких твердих металах.

За допомогою **вихрострумівої дефектоскопії** можна виявляти зовнішні і підповерхневі (не глибше 2 мм) дефекти розкриттям від 1 мкм і більше. Створюване котушкою поле вихрових струмів Фуко однорідне, якщо під котушкою немає дефектів. Це поле у відповідь збуджує в котушці вторинну електрорушійну силу, яка певною мірою змінює амплітуду струму. При калібруванні приладу на бездефектному зразку підсумковий рівень амплітуди приймають за базовий, балансуєчи індикатор в нульове значення.

Якщо далі при контролі об'єкта в процесі сканування котушкою його поверхні під датчиком виявляється дефект, то він спотворює поле вихрових струмів, змінюючи ступінь його впливу на амплітуду струму в котушці. Це викликає розбаланс індикатора, що і служить ознакою дефекту.

Котушка накладного датчика зазвичай намотана на феритовий стрижень. Якщо випуск робочого кінця цього стрижня підігнати під профіль контрольованої поверхні, то цим методом дуже зручно контролювати галтельні переходи в точених виробках, різьбові канавки тощо. При контролі трикутної різьби з метою виявлення канавкових тріщин цей метод не має собі рівних за достовірністю і надійністю. У цьому методі використовується портативна апаратура: розмір сучасних вихрострумівих індикаторів тріщин порівняний з кульковими авторучками.

Вихрострумівий метод дефектоскопії широко застосовується в металургії для контролю тонкостінних труб, прутків малого діаметра і дроту.

Вихроструміву товщинометрія використовується для вимірювання товщини металізації на неметалевих матеріалах (наприклад, заготовки для друкованих (печатних) плат в радіоелектроніці) або навпаки - товщини захисних неметалевих покриттів на металі (наприклад, електроізоляція). Зменшення товщини досліджуваного покриття викликає ущільнення поля вихрових струмів під датчиком і посилення його впливу на амплітуду струму в котушці. Оскільки існує кореляція між товщиною покриття і щільністю створюваного поля струмів Фуко, це і дає можливість чисельної оцінки товщини покриття цим методом, але в межах не більше 2 мм.

6.3. Перетворювачі для СВК

Струмовихровий дефектоскоп складається з генератора, перетворювача, підсилювача, аналізатора зміни поля (амплітудний або частотний детектор, фазочутливий елемент) і індикатора.

Залежно від заданого параметра контролю існують різні схемні рішення приладів і різні перетворювачі. Перетворювачі СВК за робочим положенням щодо КО поділяють на **накладні і прохідні**.

Накладні перетворювачі являють собою одну або декілька котушок, що підводяться торцем до поверхні об'єкта (рис. 6.6, а). Їх виконують з феритними сердечниками, які підвищують чутливість і локалізують зону контролю, або без них. Електромагнітна хвиля від полезадаючої системи поширюється в напрямку ОК (рис. 6.5, а). Накладні перетворювачі застосовують для контролю плоских поверхонь або для деталей складної форми, а також у тих випадках, коли потрібно забезпечити локальність контролю і високу чутливість.

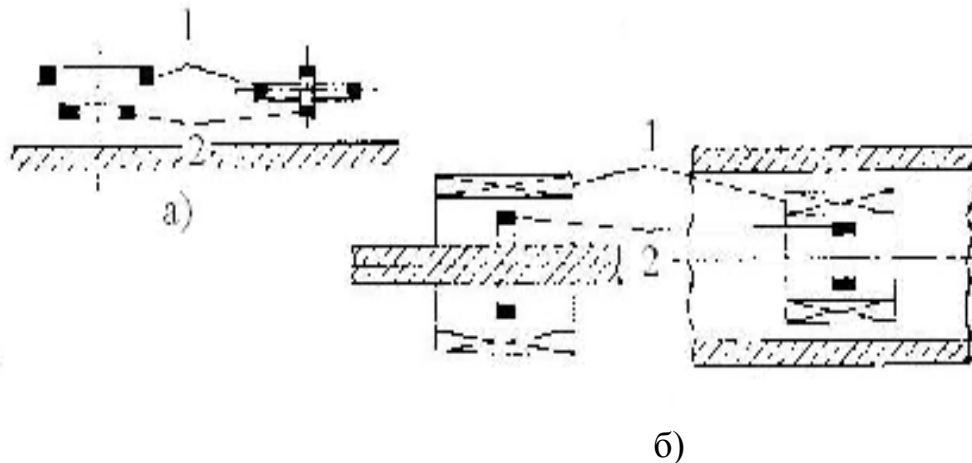


Рис. 6.6. Розташування накладних (а) і прохідних (б) перетворювачів:
1 - збуджуюча котушка; 2 - вимірювальна котушка

Прохідні перетворювачі бувають **зовнішні і внутрішні** (рис. 6.6, б). Електромагнітна хвиля від полезадаючої системи в цьому випадку поширюється вздовж поверхні ОК (рис. 6.5, б).

Прохідні перетворювачі застосовуються для лінійно протяжних виробів і охоплюють КО, рухомий всередині котушки, або рухаються самі всередині об'єкта (наприклад, труби). Прохідні перетворювачі менш чутливі до локальних змін властивостей КО.

Залежно від способу з'єднання обмоток перетворювача розрізняють **абсолютні** (вихідний сигнал визначається абсолютними параметрами ОК і їх зміною) і **диференціальні** (вихідний сигнал визначається різницею властивостей двох поруч розташованих ділянок) датчики.

Абсолютні датчики використовують для контролю електропровідності і проникності матеріалу, розмірів, суцільності.

Диференціальні перетворювачі більш чутливі, але для протяжних дефектів дозволяють визначити тільки початок і кінець дефекту.

За електричними властивостями сигналу розрізняють **параметричні і трансформаторні перетворювачі**. В перших сигналом служить приріст комплексного опору, у других - приріст комплексної напруги, виникаючої в одній або декількох вимірювальних обмотках. В перших датчиках сигнал формується в тій же обмотці, по якій йде збуджуючий струм. В

трансформаторних датчиках вимірювальна обмотка може бути розміщена на тій же котушці (рис. 6.7) або на іншій. Такі датчики мають більш високу температурну стабільність. Параметричні датчики більш прості конструктивно, частотний діапазон роботи у них ширше. Якщо вимірювальні датчики виконані окремо від полезадаючих, то зазвичай вони розташовуються поблизу поверхні ОК.

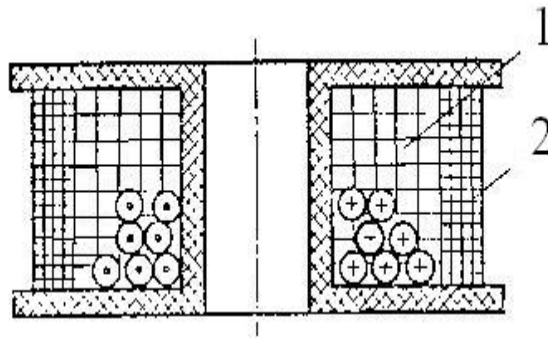


Рис. 6.7. Двохкатушечний датчик:
1- збуджуюча обмотка; 2 - вимірювальна обмотка

Кожну обмотку датчика прийнято замінити еквівалентним витком, а вихрові струми - еквівалентним контуром струму діаметром D_e . Для прохідного датчика $D_e = D_{II}$ або $D_e = D_B$ (рис. 6.8). Для накладного датчика значення D_e залежить від відстані еквівалентного витка збуджуючої обмотки датчика до виробу h і визначається наближено за формулою $D_e = D_q + 1,5h$. Для характеристики, що враховує властивості матеріалу виробу (електропровідність σ , магнітна проникність μ), частоту збуджуючого поля $f = \frac{\omega}{2\pi}$ і розмір контуру вихрових струмів D_e , вводиться поняття узагальненого параметра

$$B = \frac{D_e \sqrt{\sigma \mu_0}}{\sqrt{\mu_r}}$$

Для немагнітних матеріалів $\mu_r = 1$, $B = B_0 = D_e \sqrt{\sigma \mu_0}$.

В якості D_e на практиці приймають середній діаметр котушки $D_{сер}$. Узагальнений параметр B за фізичним змістом є відношенням індуктивного опору еквівалентного контуру вихрових струмів до активного опору контуру в контрольованому виробі.

6.4. Прилади для СВК

Найпростіша схема приладу для СВК наведена на рис. 6.8. Однакові датчики Д1 і Д2 включені в мостову схему з реєструючим мікроамперметром мКА. На датчики подається від генератора змінна напруга « ~ ».

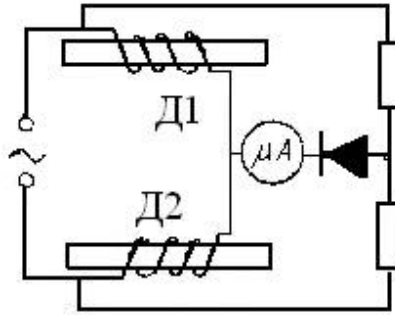


Рис. 6.8. Схема вимірювального моста з двома датчиками

У полі датчика Д1 розташований контрольний зразок 1, а в полі датчика Д2 - контрольований виріб 2. Якщо виріб і зразок однакової якості, то міст збалансований, через індикатор мкА струм не тече. Якщо виріб відрізняється від зразка, наприклад через дефект, то міст розбалансується і прилад мкА зафіксує протікаючий струм.

Якщо датчики Д1 і Д2 неоднакові, то при помещенні в їх поле ідентичних виробів буде спостерігатися залишкова напруга, для усунення якої схема моста ускладнюється.

Більш досконала схема диференціального включення датчиків показана на рис. 6.9, а. У цій схемі обмотки датчиків Д1 і Д2 входять в резонансні контури зі змінними ємностями С1 і С2. Ці ємності, а також змінний опір R3 служать для балансування схеми і установки мкА на нуль, коли магнітні поля датчиків Д1 і Д2 однакові. При цьому в контурах настає резонанс з однаковими максимальними напругами $V_1 = V_2$. Резонансні криві контурів показані на рис. 6.9, б. Якщо датчик Д1 проходить над дефектною ділянкою виробу, його індуктивність зміниться на величину ΔL і стане рівною L_1 , а опір зміниться на величину ΔR . Добротність першого контуру понизиться, і резонансна крива 1 заміниться кривою 1', а робоча точка займе положення L' . Напруга на першому контурі впаде і стане рівною $V' < V_2$. Тоді між контурами виникне різниця потенціалів $V_2 - V'$ і стрілка індикатора відхилиться в одну сторону. Якщо дефект з'явиться під датчиком Д2, то стрілка відхилиться в іншу сторону.

Цю ж схему можна використовувати в вимірниках товщини діелектричних покриттів. У цьому випадку датчик Д2 розміщується всередині приладу. Робоча точка вимірювального контуру вибирається на лівій гілці резонансної кривої $U(C)$, коли датчик Д1 розміщений на матеріалі без покриття (крива 1, рис. 6.9, в). Конденсатором С2 схема врівноважується, і індикатор показує нульове значення, якщо датчик розміщений на металі без покриття або віддалений від металу на велику відстань.

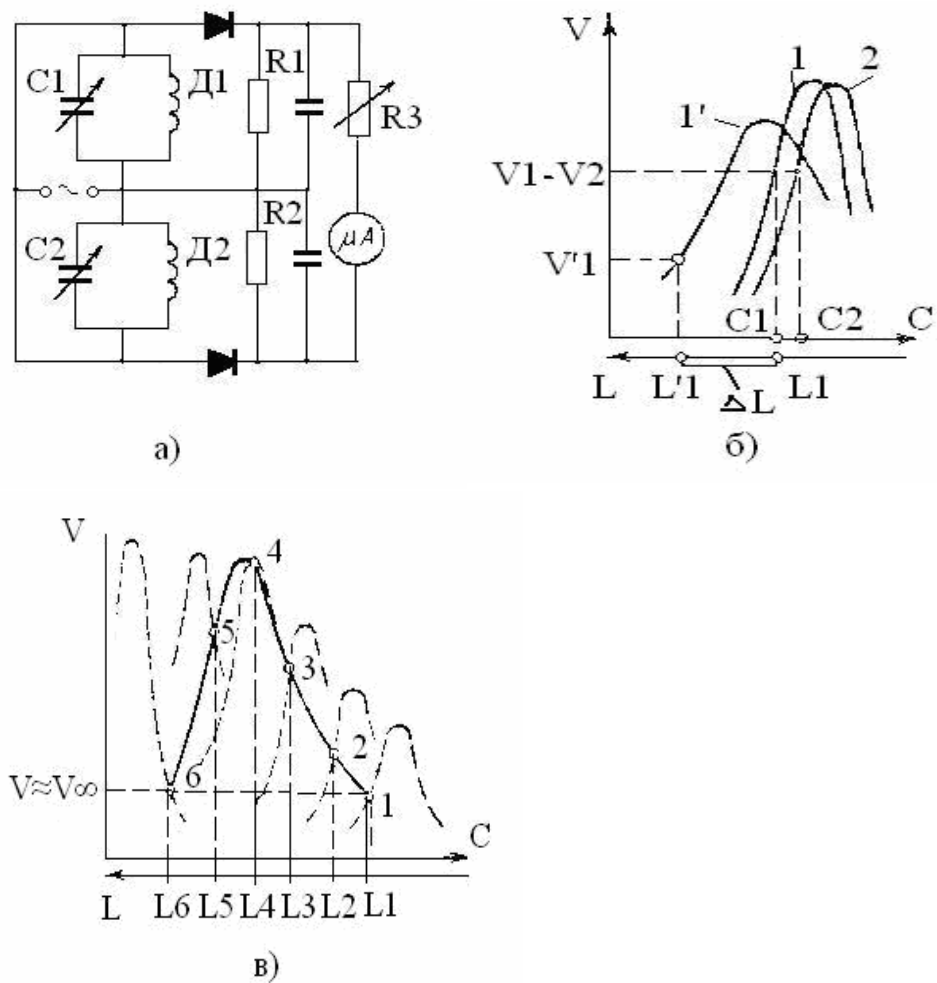


Рис. 6.9. Диференціальна схема з двома паралельними резонансними контурами (пояснення в тексті)

Зі збільшенням товщини покриття зростає індуктивність у вимірювальному контурі, максимум резонансної кривої зростає і зміщується вліво. Напряга спочатку зростає, а потім зменшується до значення $U \approx U_{\infty}$, змінюючись по суцільній кривій.

При розміщенні датчика Д1 на металі з покриттям відомої товщини резистором R3 індикатор приладу градуують, встановлюючи відповідне цій товщині значення.

Щоб в процесі виявлення дефектів покази індикатора не залежали від відстані датчика до контрольованого виробу, необхідно використовувати більш складні схеми.

При контролі електромагнітними індукційними дефекторами типу ЕМІД використовують два диференціально включених датчика, один з яких приєднаний до еталонного зразка, а інший - до контрольованого виробу. При цьому на виході двох трансформаторних датчиків виникає напруга, амплітуда і фаза якої визначається різницею властивостей і еталонного зразка, і контрольованого виробу. Ця напруга спостерігається на екрані

електронно-променевої трубки (ЕПТ) у вигляді кривої, яка дозволяє оцінити властивості виробу декількома способами:

- 1) за формою кривої;
- 2) за фазою (положення нулів і максимумів) кривої;
- 3) за відхиленням кривої від горизонтальної розгортки променя (по амплітуді);
- 4) за поєднанням декількох параметрів кривої.

Характеристики деяких приладів СВК наведено у додатку. Переваги методу СВК порівняно з іншими методами виявлення поверхневих дефектів (наприклад, капілярним методом) найбільш значні при контролі сталей із захисними покриттями; при контролі деталей в процесі експлуатації машин; при контролі прокату в технологічному процесі; при масовому контролі однотипних деталей, наприклад, куль, роликів, втулок, обойм шарикопідшипників та інших деталей в процесі їх виготовлення.

РОЗДІЛ 7. ЕЛЕКТРИЧНИЙ КОНТРОЛЬ

7.1. Загальна характеристика електричного контролю

Електричний контроль включає в себе три методи: **електропотенціальний, електроіскровий і електроємнісний.**

Електропотенціальний метод призначений для вимірювання глибини зовнішніх тріщин в металі, виявлених раніше іншими методами. Він заснований на вимірюванні електричного опору R (мікрооми) локальної досліджуваної ділянки електропровідного об'єкта і порівнянні результату з опором аналогічного еталонного (завідомо бездефектного) елемента такої ж довжини. Проте в таких умовах мова йде про вимірювання дуже малих значень опору, тому використовується струм високої частоти, що характеризується активним проявом так званого **скін-ефекту**, а в якості вимірювального пристрою застосовується вимірювач дуже малих значень електроопору - мікрометр, включений за схемою моста Уїнстона.

Скін-ефект (від англ. skin - шкура) полягає в тому, що електричне поле струму високої частоти (ВЧ) охоплює не всю висоту перерізу провідника, а лише сегментоподібну приповерхневу зону між електродами (рис. 7.1).

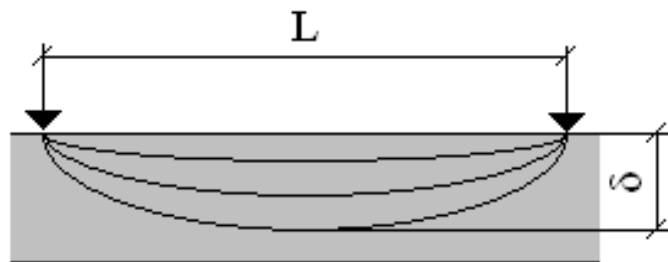


Рис. 7.1. До пояснення поняття «скін-ефект»

При цьому максимальна глибина проникнення струму в матеріал δ , м, залежить від частоти струму:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_a \sigma}} = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_a}},$$

де ω - кругова частота струму, c^{-1} ; μ_a - абсолютна магнітна проникність матеріалу, Гн/м; $\sigma = 1/\rho$ - питома електрична провідність матеріалу, $Om^{-1} \cdot m^{-1}$; f - лінійна частота струму, Гц.

Принцип дії електропотенціального методу вимірювання глибини тріщини показаний на рис. 7.2.

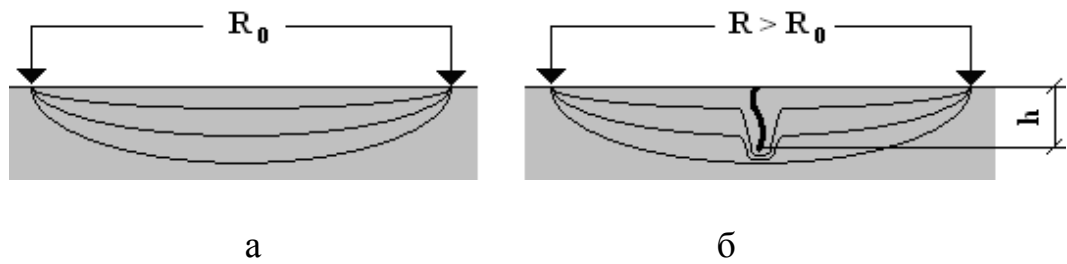


Рис. 7.2. Принцип дії електропотенціального методу вимірювання глибини тріщини

Як видно з рисунка, при незмінній дистанції L між електродами (забезпечується конструкцією датчика) електроопір R_0 бездефектної ділянки (варіант а) менше опору R ділянки з тріщиною (варіант б), так як у другому випадку основна частина струму, що йде поблизу поверхні, змушена обтікати тріщину. Встановлено, що існує досить виражена пропорція між глибиною тріщини h і різницею цих опорів, що і дозволяє застосовувати цей метод. На цьому принципі, наприклад, побудований тріщиномір ІГТ-10.

Електроіскровий і електроємнісний методи широко використовуються в машинобудуванні, суднобудуванні, авіаційній і космічній промисловості і призначені для вимірювання товщини ізолюючих покриттів провідників в електричних системах. Крім того, **електроіскровий** метод дозволяє виявляти місця наскрізного пробоя ізоляції. При цьому основним елементом апаратури є вимірювач дуже великих значень електроопору - мегаомметр, один полюс якого підключається до досліджуваного провідника, а другий - до електрода, яким сканують поверхню ізоляції. У місцях, де її товщина зменшується, спостерігається пропорційне цьому зменшення опору, а там, де є наскрізний пробій, виникає вольтова дуга (іскра), оскільки прилад використовує струм великої сили. У цьому випадку покази приладу пульсують (рис. 7.3).

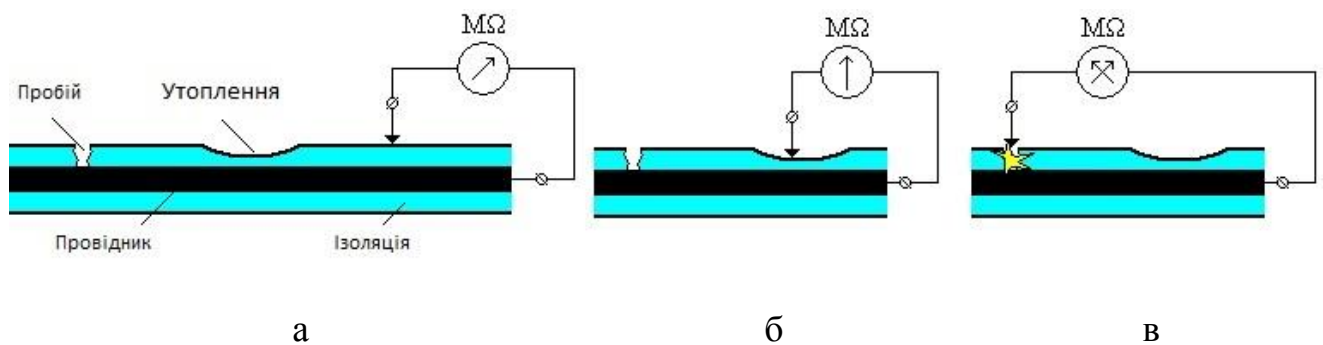


Рис. 7.3. Реакція електроіскрового приладу на стан ізоляції:
а - на бездефектній ділянці; б - в зоні утончення ізоляції; в - на пробії

При **електроємнісному методі** основним елементом апаратури є вимірювач ємності - мікрофарадометр, один полюс якого підключається до досліджуваного провідника, а другий - до спеціальної металевої пластини, якою сканують поверхню ізоляції (рис. 7.4).

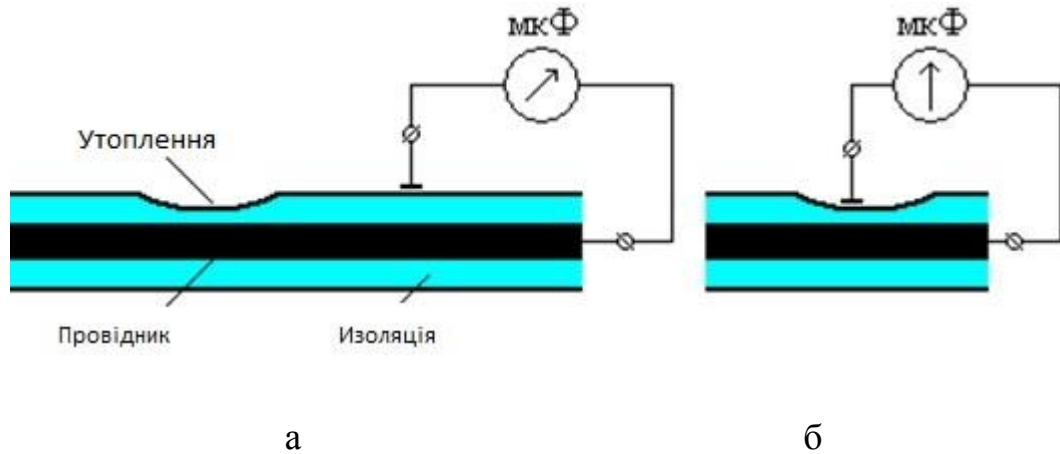


Рис. 7.4. Реакція електроємнісного приладу на стан ізоляції:
а - на бездефектній ділянці; б - в зоні утончення ізоляції

Провідник і пластина, розділені ізоляцією, в сукупності створюють конденсатор великої ємності. У місцях, де є зменшення товщини ізоляції, спостерігається пропорційне цьому зменшення ємності.

РОЗДІЛ 8. РАДІОХВИЛЬОВИЙ КОНТРОЛЬ

8.1. Загальна характеристика радіохвильового контролю

Радіохвильовий контроль застосовується головним чином в будівництві для пошуку і дослідження металевих включень в неметалевих матеріалах (наприклад, арматура в залізобетоні або трасування прихованої електропроводки в стіні будівлі, якщо її схема загублена). Цей вид контролю може бути реалізований двома методами: **наскрізним (радіотіньовим) і радіолокаційним**.

Радіохвильовий контроль заснований на тому, що всі метали є перешкодою для радіохвиль, відбиваючи або поглинаючи їх (поглинання радіохвиль відбувається шляхом їх перетворення в електричний струм в металі, якщо цей метал надійно заземлений).

Наскрізний (радіотіньовий) метод відноситься до класу методів проходження. Він полягає в тому, що крізь досліджуваний об'єкт пропускають потік радіохвиль (рис. 8.1, а). Якщо на шляху потоку в об'єкті є металеве включення, воно відтіняє частину хвильового потоку і амплітуда A сигналу на прийомі падає щодо значення A_0 , отриманого на вільній ділянці, що і є ознакою присутності металевого включення (рис. 8.1, б).

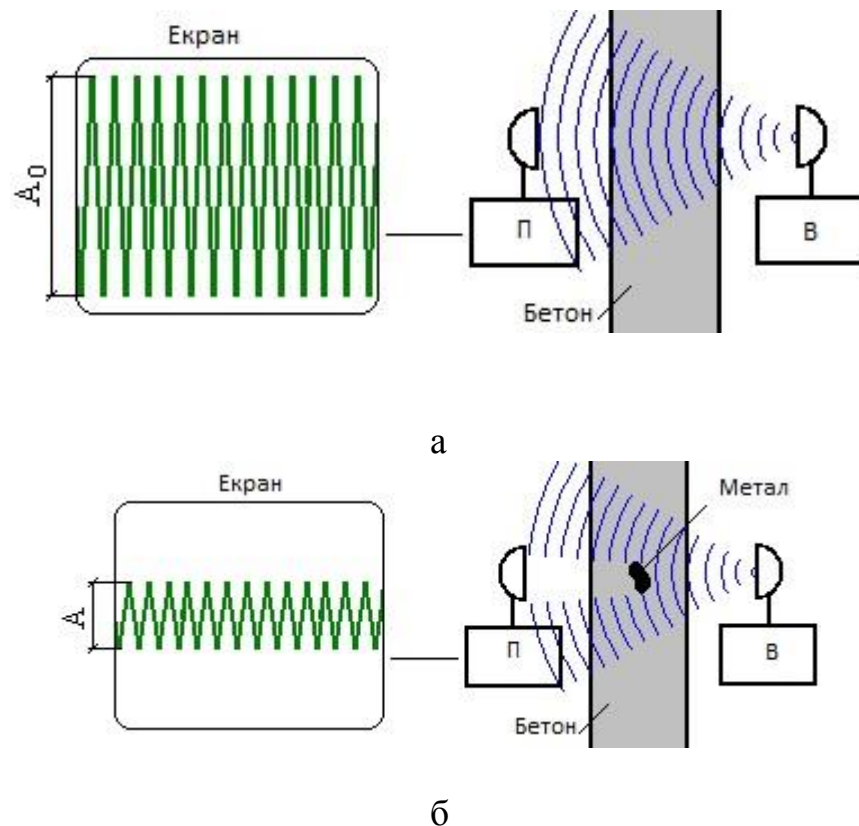


Рис. 8.1. Принцип наскрізного радіохвильового методу:
 а - на ділянці об'єкта без металевих включень;
 б - на ділянці з металевим включенням

Серед **достоїнств** наскрізного методу можна відзначити наступні:

- може бути реалізований в безперервному режимі випромінювання радіохвиль, що істотно спрощує радіоапаратуру;
- не критичний до заземлення досліджуваних металевих включень.

Недоліки наскрізного методу:

- вимагає двостороннього доступу до об'єкта з максимально співвісним розташуванням антен випромінювача і приймача;
- не дає можливості визначити глибину залягання металевих включень.

Радіолокаційний метод відноситься до класу методів відбивання. Він полягає в тому, що в досліджуваній об'єкт запускають імпульси радіохвиль (рис. 8.2). Якщо на шляху потоку в об'єкті є незаземлене металеве включення, воно відбиває частину хвильового потоку, і сумісна по випромінюванню і прийому антена приладу приймає радіоехо від металевого включення.

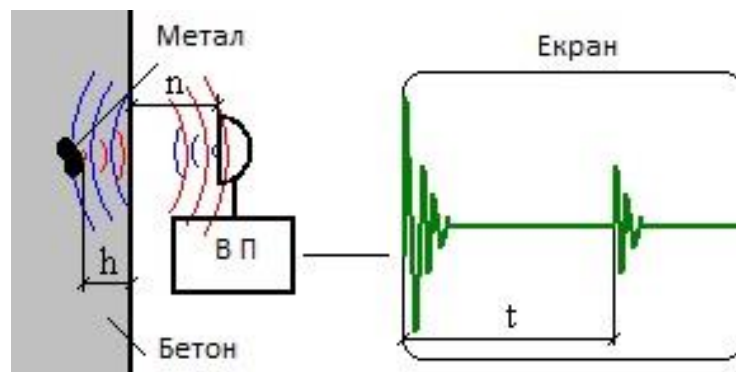


Рис. 8.2. Принцип радіолокаційного методу

Переваги радіолокаційного методу:

- не вимагає двостороннього доступу до об'єкта;
- дозволяє автоматично визначити глибину залягання металевих включень:

$$h = 0,5C \cdot t - n,$$

де C - швидкість поширення радіохвиль (швидкість світла); t - час між посилкою імпульсу і прийомом його відбиття (вимірюється в наносекундах); n - фіксована величина зазору між поверхнею об'єкта та антеною.

Недоліком радіолокаційного методу є те, що заземлені металеві включення дають слабе відбивання радіохвиль.

РОЗДІЛ 9. РАДІАЦІЙНИЙ КОНТРОЛЬ (РК)

9.1. Радіаційний контроль та його види

Радіаційний контроль - це вид НМК, заснований на взаємодії проникаючого іонізуючого випромінювання (ІВ) з контрольованим об'єктом (КО). Всі методи радіаційного контролю засновані на пропусканні іонізуючого випромінювання через твердий матеріал об'єкта і тому відносяться тільки до класу методів проходження. Радіаційні методи найчастіше застосовують при контролі якості зварних з'єднань.

Система радіаційного контролю (РК) складається з чотирьох основних елементів (рис. 9.1):

1. джерела випромінювання,
2. об'єкта контролю,
3. детектора випромінювання,
4. засобів розшифровки та оцінки результатів контролю.

Властивості елементів системи контролю, які впливають на результати, називають характеристиками системи контролю або її параметрами.

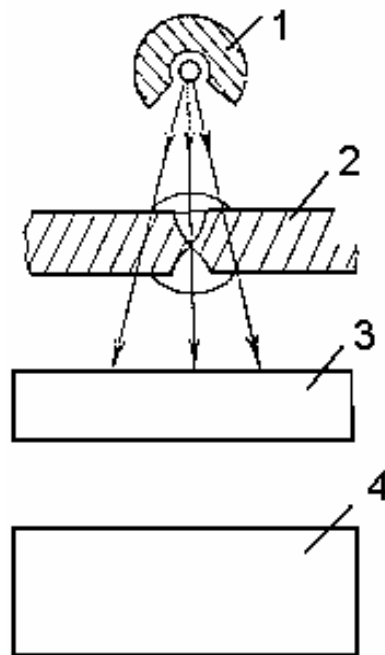


Рис. 9.1. Система радіаційного контролю:

1 - джерело випромінювання; 2 - об'єкт контролю; 3 - детектор випромінювання; 4 - засоби розшифровки та оцінки результатів контролю

До характеристик джерела випромінювання відносяться:

1. енергія та інтенсивність випромінювання, розмір активної частини випромінювача;
2. об'єкт контролю характеризується товщиною і густиною матеріалу;

3. характеристики детектора випромінювання - контрастність, чутливість, ефективність тощо.

Засоби розшифровки та оцінки результатів контролю обумовлені кваліфікацією і досвідом дефектоскопіста і досконалістю технічної документації.

До параметрів системи РК відносяться також величини, що характеризують взаємне розташування елементів системи контролю в просторі і в часі, наприклад, відстань від джерела випромінювання до детектора, час експозиції тощо.

Система РК в цілому також характеризується величиною дефектів, виявляємих з заданою ймовірністю і продуктивністю контролю. Вимоги до цих основних характеристик залежать від вимог до якості контрольованих виробів.

В групу методів радіаційного контролю входять **рентгенографічний, гамаграфічний і рентгеноскопічний**.

Схема **рентгенографічного методу** показана на рис. 9.2. Джерелом випромінювання є спеціальний генеруючий апарат, розташований по один бік від об'єкта, а на іншому боці кріпиться рентгеновська фотоплівка, упакована в гнучку світлонепроникну касету. Апарат керується дистанційно (ДУ) за допомогою реле часу, яким задається час просвічування (експозиції).

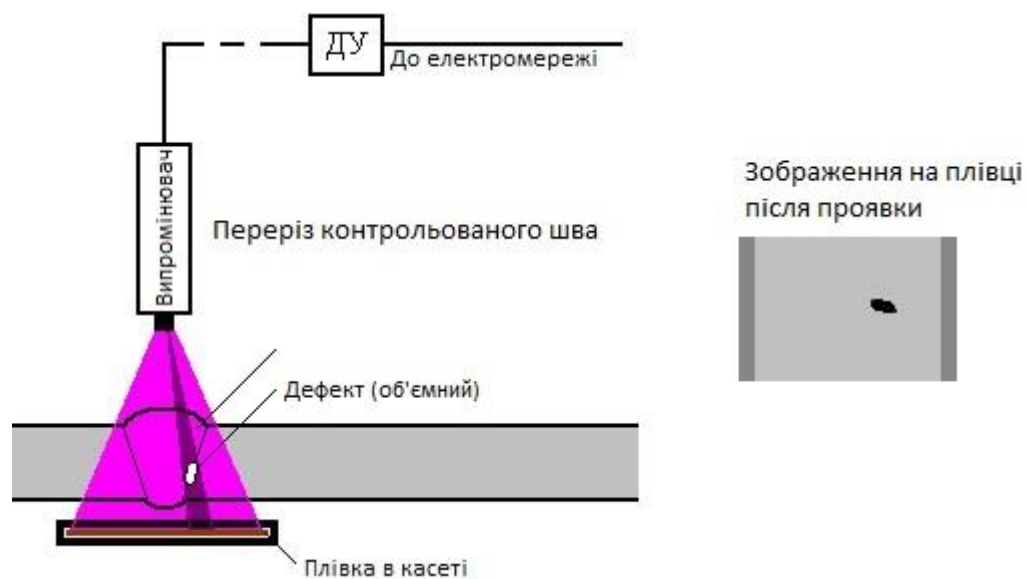


Рис. 9.2. Схема рентгенографічного методу

Гамаграфічний метод (рис. 9.3) відрізняється від рентгенографічного тим, що тут застосовуються негенеруючі (тобто неперервно самовипромінюючі) потужні природні джерела гамма-випромінювання -

елементи з радіоактивних металів (уран, стронцій, іридій, кобальт), поміщені в спеціальні переносні свинцеві колби з дистанційно керованим затвором.

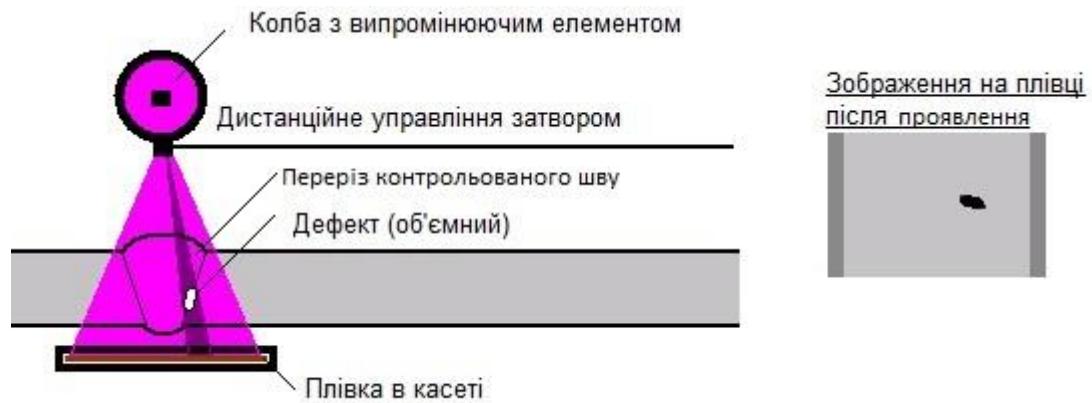


Рис. 9.3. Схема гамаграфічного методу

Цей метод характеризується більшою потужністю випромінювання, ніж рентгенографічний, і тому дозволяє здійснювати контроль більш товстих сталевих об'єктів - до 40 мм (рентгенографічний - до 25 мм). Він не потребує електроживлення, але лабораторії, які застосовують його, повинні бути обов'язково забезпечені спеціальним сховищем для джерел випромінювання та спеціальним автомобілем для їх перевезення.

На відміну від рентгенографічного та гамаграфічного **рентгеноскопічний метод** (рис. 9.4) - стаціонарний, оскільки в цьому випадку потужний рентгенівський апарат, перетворювач зображення і контрольований об'єкт повинні бути поміщені в спеціальній камері (бункері). Товсті стіни камери виконані з бетону з свинцевим наповнювачем (дріб), приміщення забезпечене датчиками присутності, а входні двері - датчиком закриття: система не буде працювати, якщо двері камери відкриті або в камері перебувають люди. З трьох розглянутих тут методів рентгеноскопічний - найпотужніший, він дозволяє просвічувати сталеві вироби товщиною до 80 мм. Отримане зображення перетворюється в телевізійне та по кабелю передається на монітор, розташований у віддаленому від рентген- камери приміщенні оператора.

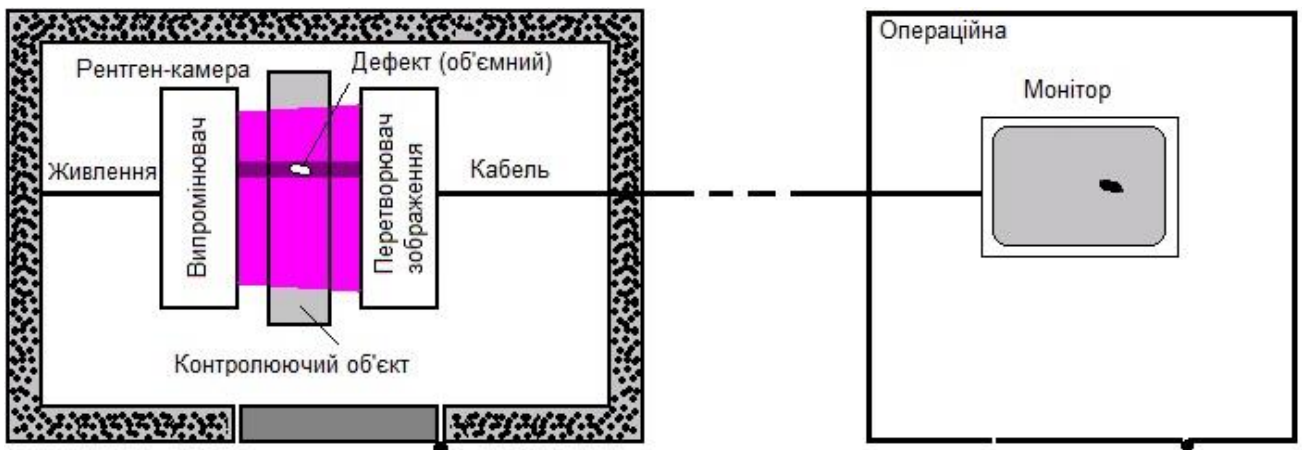


Рис. 9.4. Схема рентгеноскопичного методу

9.2. Класифікація радіаційних методів неруйнівного контролю

За видами використовуваного іонізуючого випромінювання РК поділяється на:

- 1) рентгенівський контроль;
- 2) контроль моноенергетичним β -випромінюванням;
- 3) контроль гальмівним випромінюванням прискорювачів електронів;
- 4) контроль потоком теплових нейтронів;
- 5) γ - контроль;
- 6) контроль потоком протонів;
- 7) контроль немонаенергетичним β -випромінюванням радіоактивних ізотопів;
- 8) контроль потоком позитронів.

Залежно від завдань, що стоять перед контролем, і вида виробу, найбільш ефективний той або інший вид випромінювання. Так, для контролю зварних та паяних з'єднань ефективно використання 1-7-го видів випромінювань, для контролю злитків і виливків і виявлення в них тріщин, пор, рихлоти, ліквациї - 1,3,5-й види; неправильності форми внутрішніх закритих порожнин також впевнено виявляються цими видами випромінювання. Мікродеталі, елементи електронної техніки - дефекти пайки, обриви і оплавлення проводів виявляються при застосуванні 1,2,4,6-го видів, а втома матеріалу (контроль деталей і вузлів, що були в експлуатації) - 8-м видом.

Способи реєстрації радіаційних зображень поділяються на три групи:

1. **радіографічні** (фотографічний, ксерорадіографічний, строборадіографічний тощо);

2. **радіоскопічні** (способи радіаційної інтроскопії: візуальні радіаційні, тобто бачення радіаційних зображень на екрані перетворювача, радіотелевізійні, стереорадіоінтроскопічні);

3. **радіометричні** (іонізаційний; спектрометричний; сцинтиляторний).

Найбільшого поширення набули рентгенографія, рентгеноскопія і γ -контроль.

9.3. Джерела і властивості іонізуючого випромінювання

Для створення іонізуючого випромінювання (ІВ) використовуються рентгенівські апарати (рентгенівські трубки); прискорювачі заряджених частинок; радіоактивні ізотопи.

Рентгенівські трубки служать джерелами характеристичного і гальмівного випромінювання в широкому діапазоні енергій (від 0,5 до 1000 кеВ). Їх використовують для просвічування сталевих листів, деталей товщиною до 120-160 мм.

Прискорювачі електронів є джерелами високоенергетичного гальмівного випромінювання (до 35 МеВ). Використовуються для просвічування сталевих листів великої товщини (> 450 мм). Вони служать також джерелами β -випромінювання великої енергії і генераторами нейтронного потоку.

Радіоактивні ізотопи є джерелом рентгенівського α -, β - і γ -випромінювання, потоків нейтронів і позитронів, і використовуються для просвічування сталевих виробів завтовшки до 200 мм.

Для отримання рентгенівського випромінювання використовують рентгенівську трубку, що представляє собою скляну колбу, з якої відкачано повітря до $10^{-4} - 10^{-6}$ Па (рис. 9.5).

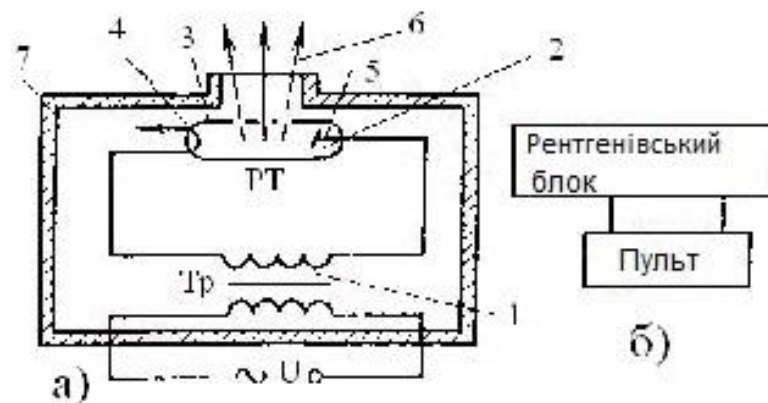


Рис. 9.5. Принципова схема (а) і блок-схема (б) рентгенівського апарату-моноблоку:

- 1 - трансформатор; 2 - рентгенівська трубка; 3 - скляна колба; 4 - катод; 5 - анод з мішенню; 6 - рентгенівське випромінювання; 7 - кожух

У посудину впаяно два електроди - катод 4 у вигляді спіралі з товстого вольфрамового дроту і анод 5 з мідного порожнього циліндра («антикатод») з привареною до нього мішенню з вольфраму.

До спіралі катода подається низьковольтна напруга (2-12 В), а до електродів - висока напруга (більше 10 кВ).

При розжаренні спіралі внаслідок термоелектронної емісії з неї вилітають електрони, які спеціальним пристроєм фокусуються у вузький пучок і під дією електричного поля з великою швидкістю рухаються до аноду.

Струм, що проходить через трубку, вимірюється міліамперметром на пульті управління. Струм трубки регулюється зміною ступеня розжарення нитки катода. Електрони, що потрапляють на мішень аноду, гальмуються в ній і втрачають швидкість, а отже, і кінетичну енергію. Частково кінетична енергія електронів перетворюється на променисту енергію, яка виділяється у вигляді фотонів гальмівного випромінювання, використовуваного при дефектоскопії виробів, а частина переходить в теплову.

Частка кінетичної енергії $R(\%)$, перетвореної на рентгенівське випромінювання, залежить від анодної напруги U і порядкового номера матеріалу мішені Z :

$$R = 1,4 \cdot 10^{-7} ZU.$$

Для вольфрамової мішені ($Z = 74$) при напрузі менше, ніж 100 кВ $R \approx 0,01\%$, при $U = 100$ кВ $R = 1\%$, а при $U = 2$ МВ - більше 20%. Більша частина енергії перетворюється в тепло, яке необхідно відводити від анода охолоджуючим середовищем (масло, вода, газ). У деяких випадках для зменшення розігріву анода його виконують таким, що обертається.

Ділянка мішені аноду, на якій фокусується рентгенівське випромінювання, називається **дійсною фокусною плямою (пятном) трубки**. Проекція її в напрямку виходу променів - **ефективною фокусною плямою**.

Фокусні плями можуть бути лінійними із співвідношенням сторін 1: 1,25 або круглими. Трубки з фокусною плямою від 100 мкм до 1 мм - гострофокусні, з плямою менше 100 мкм - мікрофокусні.

Інтенсивність випромінювання рентгенівської трубки можна регулювати анодним струмом і напругою. При зміні струму (тобто нагріві катода) змінюється тільки інтенсивність, а при зміні напруги змінюється і енергія випромінювання. Мінімальна довжина хвилі рентгенівського випромінювання, що утворюється, відповідає максимальній енергії кванта. Енергія кванта тим більше, чим вище швидкість електронів, яка визначається напругою на трубці:

$$eU = hv = h\left(\frac{c}{\lambda_0}\right),$$

де e - заряд електрона, що дорівнює $1,6 \cdot 10^{-19}$, Кл, U - напруга на трубці, В, c - швидкість світла; λ_0 - найменша довжина хвилі випромінювання в спектрі рентгенівського випромінювання трубки. З формули видно, що енергетичний спектр гальмівного випромінювання визначається величиною напруги на трубці. Чим вище напруга, тим більше швидкість електронів, тим більше енергія випромінювання, тим менше довжина хвилі і тим більше проникаюча здатність випромінювання.

Оскільки електрони, що випускаються катодом, мають неперервний розподіл швидкостей, енергетичний спектр гальмівного випромінювання має неперервний характер, тобто в ньому присутні кванти зі всілякими значеннями енергій - від нуля до деякого максимального значення, що відповідає максимальній кінетичній енергії електронів, що гальмуються.

Якщо енергія електрона настільки велика, що він вибиває електрони з внутрішніх оболонок атомів речовини мішені, на фоні неперервного спектру гальмівного випромінювання виникає лінійчатий спектр характеристичного випромінювання (рис. 9.6). Підбираючи матеріали мішені, можна отримувати різні спектри.

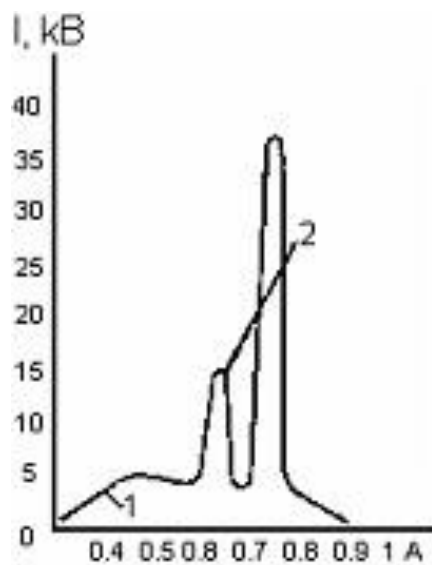


Рис. 9.6. Суцільний (1) і лінійчатий (2) спектри рентгенівського випромінювання для мішені з молібдену при $U = 35$ кВ

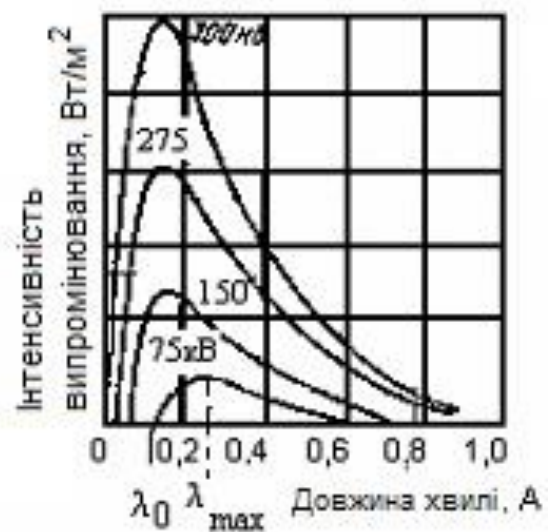


Рис. 9.7. Спектри гальмівного рентгенівського випромінювання при різних напругах

На рис. 9.7 представлена спектральна інтенсивність випромінювання трубки при різних напругах. Встановлено, що довжина хвилі випромінювання максимальної інтенсивності $\lambda_{\max} = \frac{3}{2}\lambda_0$. Нижче λ_0

випромінювання не існує. Як видно з формул, енергія випромінювання залежить тільки від напруги, від величини анодного струму вона не залежить.

Існують різні модифікації конструкції рентгенівської трубки. Двоелектродні трубки (з напругою $U \leq 200 - 300$ кВ) мають електричне фокусування електронів, при якому розмір фокусної плями не змінюється у всьому діапазоні регулювання анодного струму і напруги. Трубки з винесеним анодом, які використовуються для панорамного просвічування, мають додаткове магнітне фокусування. При напругах від 300кВ до 2МВ застосовують секціоновані (каскадні) трубки, які мають додаткові проміжні кільцеві електроди, що забезпечують вирівнювання електричного поля по довжині трубки. Магнітне фокусування дозволяє регулювати розмір фокусної плями. Сучасні рентгенівські трубки роблять розбірними; антикатода знімні.

На рис. 9.8 представлена принципова конструкція двоелектродної рентгенівської трубки.

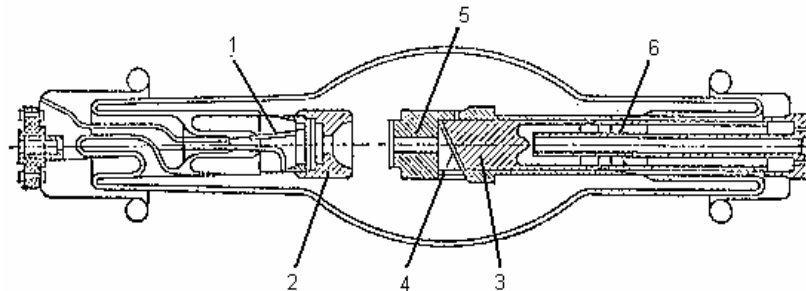


Рис. 9.8. Принципова конструкція двоелектродної рентгенівської трубки:

- 1 - катод; 2 - фокусувальний пристрій; 3 - анод; 4 - вольфрамова мішень;
5 - чохол анода; 6 - патрубок для введення охолоджуючої рідини

Рентгенівський апарат складається з електронної рентгенівської трубки, вміщеної в захисний кожух, катодного і анодного генераторних пристроїв, штатива, масляного насоса, пульта управління.

Бак генераторного пристрою, кожух з трубкою і бак насоса заповнені трансформаторним маслом, яке слугує ізолятором. Масло, прокачується через захисний кожух та охолоджує анод трубки (це можуть бути і вода або зріджені гази). Захисний кожух виконують із свинцевого листа, об'єм заповнюється маслом. Масло від насоса надходить спочатку на порожнистий анод трубки, а потім в захисний кожух. Для виходу випромінювання в кожусі є спеціальне вікно, закрите матеріалом, слабо поглинаючим випромінювання. У трубках, розрахованих на м'яке випромінювання $\lambda_0 >$

0
 2Å , $U < 30$ кВ, вікна закрите берилієм, який добре пропускає таке випромінювання.

Бетатрон.

Бетатрон - індукційний прискорювач електронів (рис. 9.9, 9.10) - складається з електромагніта, рентгенівської бетатронної камери, блоку

живлення і пульта управління. Від решти застосовуваних у дефектоскопії прискорювачів він відрізняється портативністю.

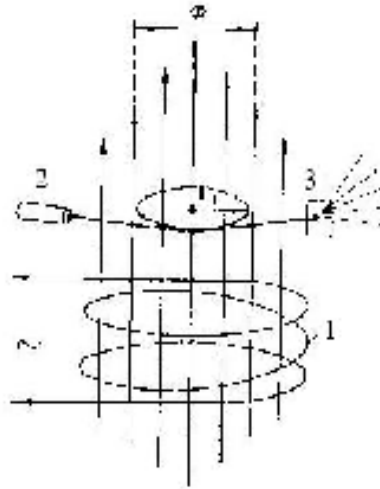


Рис. 9.9. Схема роботи бетатрона: 1 - котушка збудження; 2 - інжектор; 3 - мішень; Φ - магнітний потік

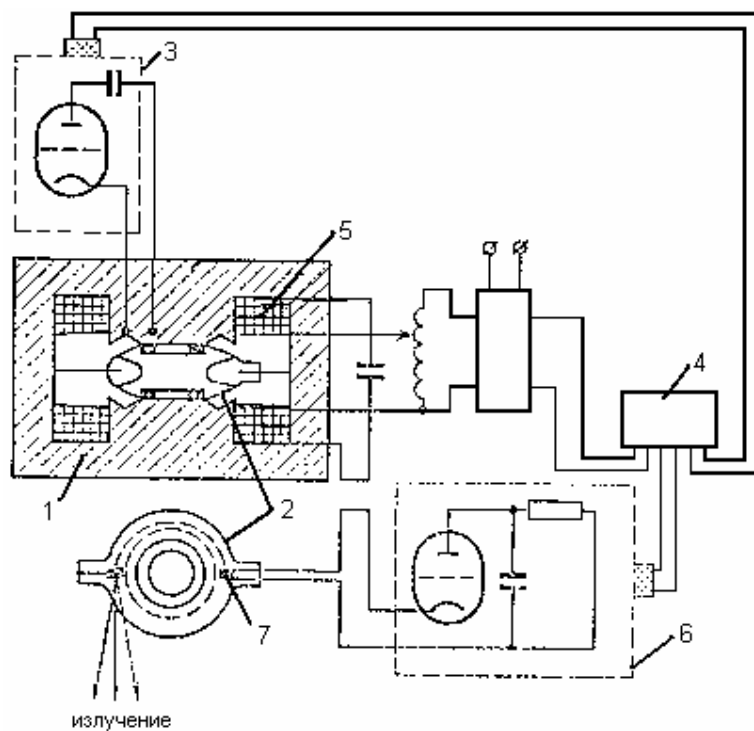


Рис. 9.10. Схема бетатрона:
1 магнітопровід; 2 - камера; 3 - блок живлення; 4 - пульт управління; 5 - котушка електромагніта; 6 - блок живлення інжектора; 7 - інжектор

В один з патрубків бетатронної камери вставлений інжектор (електронна гармата). Система інжекції змонтована в окремому блоці або під облицювальним кожухом електромагніту. Електромагніт призначений для

індукування у вакуумній камері бетатрона електричного поля, необхідного для прискорення та управління рухом електронів.

Скляна кільцева камера розташована між полюсами електромагніту і є джерелом гальмівного випромінювання. Блок живлення подає на котушки змінний струм. Виникаючий магнітний потік, що змінюється синусоїдально, індукує в камері вихрове електричне поле. Під дією цього поля електрони, введені в камеру інжектором, рухаються з прискоренням по колу.

За кожен оборот електрони одержують відносно невеликий приріст енергії, приблизно 15-20 еВ, що пояснюється невеликою напруженістю електричного поля. Магнітне поле зростає від нуля до максимального значення за чверть періоду; напрямок вихрового електричного поля за цей проміжок часу не змінюється. За цей проміжок часу електрон встигає зробити величезне (до декількох мільйонів) число обертів. При цьому електрони прискорюються до енергії декількох десятків мегаелектрон-вольт. Прискорені електрони зміщуються з рівноважної орбіти і спрямовуються на мішень з платини або вольфрама. В результаті гальмування електронів в матеріалі мішені виникає жорстке гальмівне випромінювання ($\lambda < \lambda_0$, зазвичай $0,2-2 \text{ \AA}$).

Вихід випромінювання сильно залежить від енергії прискорених електронів. Максимальна енергія гальмівного випромінювання лише ненабагато менше максимальної енергії прискорених електронів, розрахованої за формулою $E = 3 \cdot 10^2 H_0 r_0 - 0,511$, де E -енергія електронів, МеВ; H_0 - напруженість магнітного поля, Гс; r_0 - радіус камери, см.

В бетатронах з великим радіусом вакуумної камери, в яких електрони набувають великої енергії, отримується більш інтенсивне гальмівне випромінювання, ніж в бетатронах з малим радіусом камери. Ефективна енергія випромінювання становить $(0,3 - 0,5) E_{\max}$.

Фокусування пучка електронів відбувається в процесі їх прискорення, в результаті чого фокусна пляма бетатрона має маленькі розміри (0,1-0,01 мм). З нього виходить інтенсивний і дуже вузький пучок з кутом розходження (раствора) $5 \dots 6^\circ$, завдяки чому забезпечується висока різкість знімків, що дає високу чутливість методам просвічування.

Серійно випускаються бетатрони для дефектоскопії виробів зі сталі (до 450 мм товщини), алюмінію (до 1800 мм), титану (до 880 мм). Бетатрон Б5М-25 застосовується в медичній практиці. Розроблені бетатрони як в стаціонарному виконанні, так і пересувні. Розміри електромагніта від 400, 520 мм до 1500, 1700 мм для великих камер (відповідно і вага від 100 кг до 5000 кг).

Лінійні прискорювачі і мікротрони. В лінійних прискорювачах частинки одноразово проходять електричне поле з великою різницею потенціалів, тобто прискорюються по прямому методу.

На рис. 9.11 представлена схема лінійного прискорювача з бігучою хвилею.

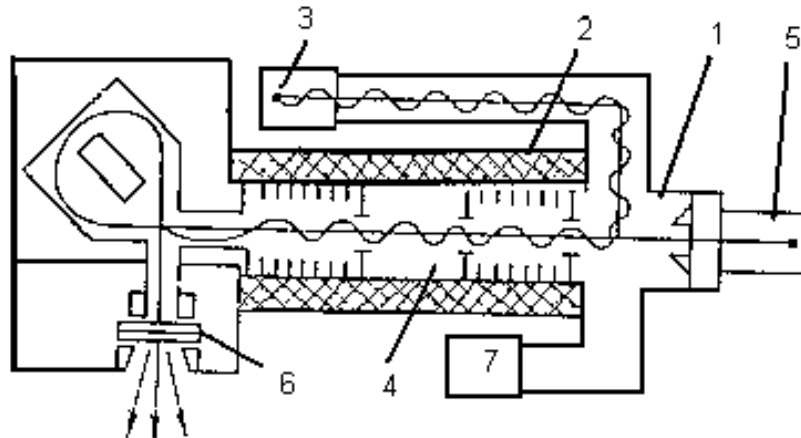


Рис. 9.11. Схема лінійного прискорювача:
1 - камера; 2 - електромагніт; 3 - генератор; 4 - хвилевід; 5 - електронна гармата; 6 - мішень; 7 - вакуумний насос

Електрони, що генеруються гарматою 5 імпульсно з енергією 30-100 кеВ, прискорюються електричним полем бігучої електромагнітної хвилі, створюваної височастотним генератором 3 в циліндричному хвилеводі 4 (на кожні 30 см шляху в хвилеводі електронам надається енергія приблизно 1 МеВ). Електричне поле біжучої хвилі направлено по осі циліндра. Прискорені електрони потрапляють на мішень 6, в якій виникає гальмівне випромінювання великої інтенсивності. Так, лінійні прискорювачі з енергією 10-25 МеВ створюють гальмівне випромінювання, потужність експозиційної дози якого на відстані 1м від мішені складає 2000-25000 Р/хв, що дозволяє використовувати їх для контролю зварних швів товщиною 400-500 мм.

Лінійний прискорювач з секціонованою прискорюючою трубкою складається з великої кількості проміжних електродів. На кожен електрод подається зростаюча вдвічі постійна напруга. Найбільша напруга досягає 1-2 МеВ і більше при струмі 0,2 мА. Діаметр фокусної плями ~ 1 мм. Використовується для контролю деталей товщиною 125-250 мм.

Лінійний прискорювач зі стоячою хвилею складається з інжектора електронів, джерела змінної напруги і металевого резонатора, усередині якого розташовані пролітні (пролетные) металеві трубки. Електрони із інжектора потрапляють в порожнину (полость) резонатора і проходять уздовж пролітних трубок. Під дією електричного поля в проміжках між трубками електрони прискорюються і в кінці шляху гальмуються на мішені, де і генерується гальмівне випромінювання.

Мікротрон (рис. 9.12) - циклічний резонансний прискорювач електронів з постійним за часом і однорідним магнітним полем.

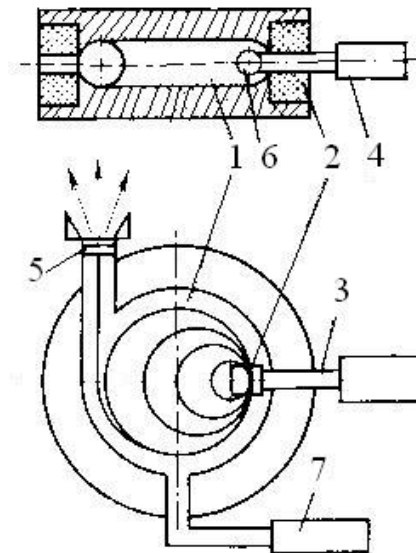


Рис. 9.12. Схема мікротрона:

1 - камера; 2 - електромагніт; 3 - хвилевід; 4 - електронна гармата;
5 - мішень; 6 - резонатор; 7 - вакуумний насос

Електрони, запущені в вакуумну камеру 1, рухаються по колах різного радіусу, які мають спільну точку дотику в місці розташування резонатора, надвисокочастотне полі якого прискорює електрони. Резонанс прискорення створюється внаслідок кратного збільшення періоду високочастотної напруги при кожному перетині електронами прискорюючого зазору резонатора. Резонатор збуджується через хвилевід 3 за допомогою потужної імпульсної електронної гармати 4. Вакуумна камера знаходиться під неперервною відкачкою за допомогою насоса 7. Прискорені електрони на останній орбіті або попадають на мішень 5, в якій виникає рентгенівське випромінювання, або за допомогою спеціального пристрою виводяться з камери. Електронний пучок мікротрона на відміну від інших типів прискорювачів володіє високою моноенергетичністю. Мікротрон дозволяє прискорити електрони до енергії в кілька сотень МеВ. Ефективна фокусна пляма мікротрона невелика (близько 2-3 мм). Мікротрон МД10 дає випромінювання експозиційної дози на відстані 1м від мішені і дозволяє просвічувати деталі товщиною до 500 мм. Час просвічування деталі товщиною 200 мм складає близько 10 с.

Радіоізотопні джерела γ - і β -випромінювання.

Джерело випромінювання являє собою закриту ампулу (заварену або завальцовану) з корозійно-стійкої сталі або сплавів алюмінію і для герметичності зверху покриту епоксидним клеєм. Усередині ампули поміщаються штучні радіонукліди, одержувані в ядерних реакторах при опроміненні речовин в нейтронних потоках або при обробці продуктів розпаду, що утворюються в реакторах.

До радіаційно-фізичних характеристик радіоактивних джерел випромінювання відносяться період напіврозпаду, спектр випромінювання,

питома активність, потужність експозиційної дози на відстані 1м від джерела і геометричні розміри випромінювача.

Внутрішні розміри ампули визначають розміри активної частини джерела. Проекція активної частини ампули в напрямку просвічування утворює фокусну пляму джерела.

Для гамма-дефектоскопії застосовують ізотопи з високою питомою активністю, такі як кобальт $^{60}\text{Co} = 100\dots 200 \left(\frac{\text{Ки}}{\text{г}}\right)$, цезій $^{137}\text{Cs} = 25 \left(\frac{\text{Ки}}{\text{г}}\right)$, селен ^{75}Se , іридій ^{192}Ir , тулій ^{170}Tm , європій $^{152}\text{Eu} + ^{154}\text{Eu}$ та інші (найбільша питома активність становить у марганцю $^{54}\text{Mn} = 200 \frac{\text{Ки}}{\text{г}}$).

Енергетичні спектри випромінювання застосовуваних джерел складаються з окремих груп γ -квантів і гальмівного спектру, що виникає при гальмуванні β -частинок. В спектрах більшості радіонуклідів, використовуваних при дефектоскопії, інтенсивність гальмівного випромінювання нехтуючи (надзвичайно) мала. Інтенсивність окремих ліній дискретного спектру і співвідношення між ними визначаються числом виходу γ -квантів різних енергій на акт розпаду (у відсотках).

В радіаційній дефектоскопії застосовують радіонукліди з періодом напіврозпаду від декількох днів до десятків років. В табл. 9.1 наведені деякі відомості про найбільш поширені радіонукліди.

Гамма-дефектоскоп складається з наступних основних блоків: радіаційна головка з джерелом випромінювання; пристрій для безпечної зарядки приладу ампулами, пульт управління дистанційним переміщенням ампул, випуском і перекриттям гамма-випромінювання; штатив для кріплення радіаційної головки відносно об'єкта контролю.

Радіаційні головки мають свинцевий або вольфрамовий захист, що забезпечує зниження потужності дози випромінювання на відстані 1м від джерела, що знаходиться в положенні зберігання, до гранично допустимої дози $2,8 \text{ мР} / \text{год}$ ($2,01 \cdot 10^{10} \text{ А/кг}$) і менше, а на відстані 0,1м - до $100 \text{ мР} / \text{год}$ ($7,17 \cdot 10^9 \text{ А/кг}$) і менше. Конструктивно головки виконують з джерелом випромінювання, що може переміщуватися або нерухомим.

Таблиця 9.1. Основні характеристики деяких радіонуклідів, застосовуваних в дефектоскопії

Радіонуклід	Період напіврозпаду	Вихід γ -квантів на розпад, %	Енергія γ -кванта, МэВ	Енергія β -частинок
$^{60}_{27}\text{Co}$	5,25 года	1,0 1,0 <10 ⁻³	1,33 1,17 2,5	0,318 МэВ
$^{137}_{55}\text{Cs}$	11000 дней	100	0,661	1,17 МэВ – 8% 0,52 МэВ – 92%
$^{75}_{34}\text{Se}$	120,4 дня	1,1 3,9 20 61 1,8 71 29 1,5 10 0,13	0,066 0,0967 0,121 0,136 0,199 0,264 0,279 0,304 0,400 0,572	

Конструктивно всі дефектоскопи радіаційного контролю поділяються на **універсальні шлангові дефектоскопи і дефектоскопи затворного типу.**

В **універсальних шлангових дефектоскопах** (рис. 9.13) джерело випромінювання поміщається в криволінійний канал - лабіринт і фіксується в положенні зберігання спеціальним замком. Після відкриття замка джерело може бути переміщене до вихідного вікна головки (фронтальне просвічування конусним пучком випромінювання) або може подаватися в зону контролю з радіаційної головки по гнучким ампулопроводу 6. У цьому випадку панорамний пучок випромінювання формується за допомогою змінних колімуєчих (коллимируючих) головок 7. Переміщення джерела здійснюється ручним або електроприводом з пульта управління 1. Відстань між пультом і головкою у переносних приладів від 3,5 до 12 м; біля пересувних - до 50 м.

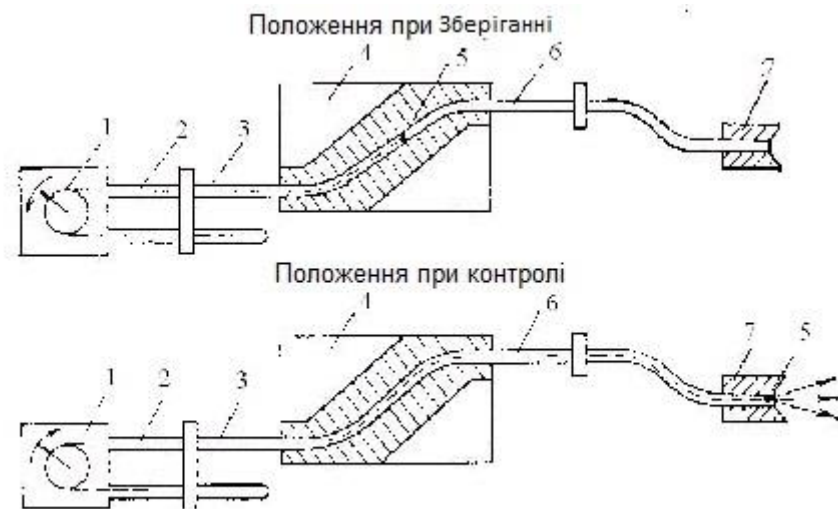


Рис. 9.13. Схема гамма-дефектоскопа шлангового типу:
 1 - привід управління; 2 - подаючий трос; 3 - з'єднувальний шланг;
 4 - радіаційна головка; 5 - тримач джерела випромінювання;
 6 - ампулопровід; 7 - колімуюча головка

На рис. 9.14 представлена схема дефектоскопа **затворного типу**, призначеного для роботи в польових, цехових, монтажних умовах. Існує кілька модифікацій таких дефектоскопів.

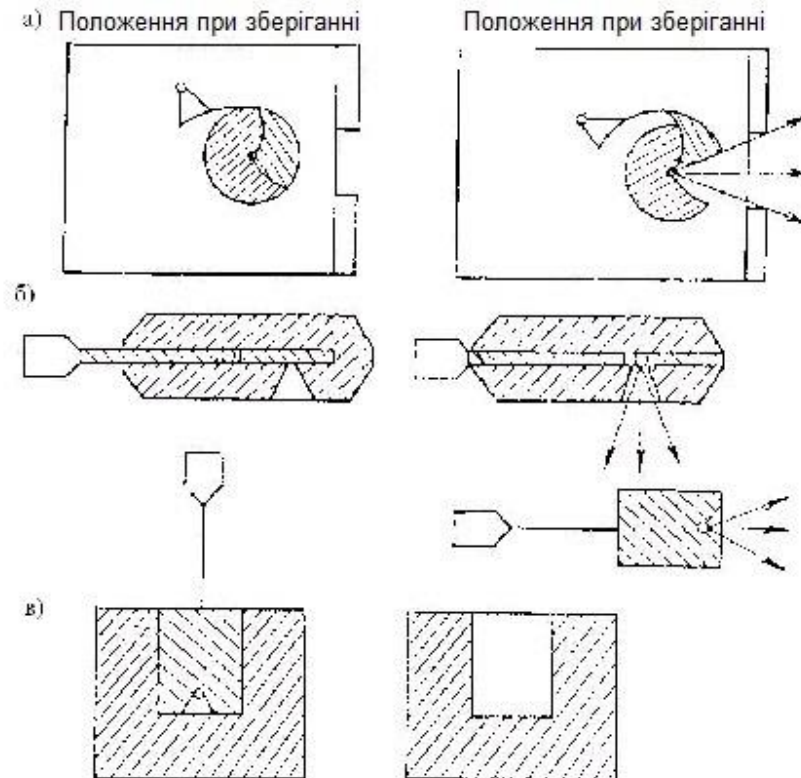


Рис. 9.14. Схеми дефектоскопа затворного типу:
 а - гамма-дефектоскоп з відкриванням затвору; б - гамма-дефектоскоп з переміщенням джерела; в - гамма-дефектоскоп з виємною склянкою

9.4. Чутливість радіаційного контролю

На рис. 9.15 наведена схема радіаційного контролю виробу 1, усередині якого є дефект 2. Для визначеності припустимо, що 1 - металева деталь, а 2 - шлакове включення або непроплав в ній.

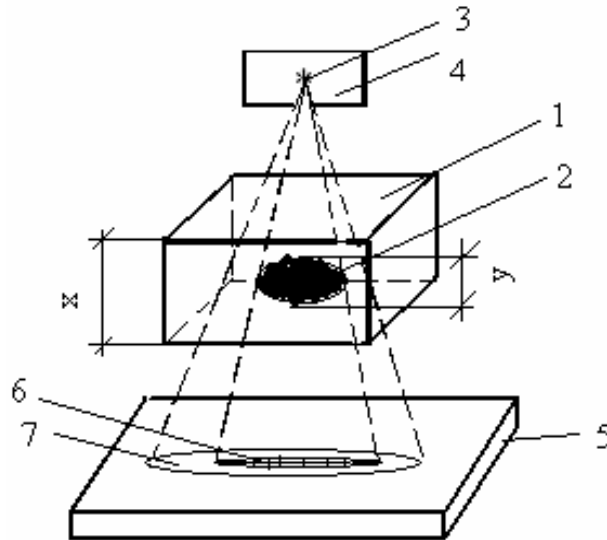


Рис. 9.15. До визначення чутливості методів РК

Джерело радіаційного випромінювання 3 (рентгенівська трубка, радіоактивний ізотоп, джерело β -частинок і т.п.) розташоване в захисному екрані 4. Реєстратором дефектів є рентгенівська плівка 5, розташована під контрольованим виробом 1. Радіаційне випромінювання, пройшовши через контрольований виріб 1 з дефектом 2, викличе різне потемніння фотоплівки 5: більш сильне 6, що відповідає зображенню дефекту 2, і більш слабке 7, що відповідає зображенню частини деталі 1 без дефектів. Ця обставина пояснюється тим, що дефекти в металевих деталях, як правило, мають щільність (густину) у багато разів менше, ніж щільність самої деталі. Ці дефекти - раковини, шлак, газові порожнини тощо. Такі неметалеві включення у багато разів слабкіше поглинають радіаційне випромінювання, ніж бездефектний метал.

Далі припустимо, що густина почорніння фотоматеріалу пропорційна інтенсивності випромінювання J , падаючого на фотоплівку (область 7 на рис. 9.15). Якщо в області 6, яка відображає дефект, інтенсивність радіаційного випромінювання дорівнює J_1 , то контрастність K зображення дефекту на фотоплівці буде дорівнює:

$$K = J - J_1. \quad (9.1)$$

Для обчислення величини контрастності припустимо, що коефіцієнт поглинання радіаційного випромінювання в матеріалі виробу дорівнює α_1 , а в матеріалі дефекту - α_2 . Товщина виробу і дефекту дорівнюють відповідно

x і y (рис. 9.15). Нехай інтенсивність джерела випромінювання дорівнює J_0 . Після проходження бездефектної частини виробу інтенсивність пройденого випромінювання J буде дорівнювати

$$J = J_0 \exp(-\alpha_1 x). \quad (9.2)$$

Під місцем розташування дефекту інтенсивність випромінювання

$$J = J_0 \exp(-\alpha_1(x-y) - \alpha_2 y). \quad (9.3)$$

В цьому виразі перший доданок в показнику ступеня експоненти враховує ослаблення інтенсивності випромінювання в матеріалі виробу, а другий доданок - в матеріалі дефекту.

Підставивши вирази (9.3) і (9.2) у формулу (9.1), отримаємо контрастність зображення дефекту

$$K = J \left\{ 1 - \exp\left[-(\alpha_1 - \alpha_2)y\right] \right\}. \quad (9.4)$$

Розміри дефекту y завжди мізерно малі в порівнянні з розмірами x контрольованого матеріалу, а коефіцієнт поглинання α_2 в матеріалі дефекта y багато разів менше коефіцієнта поглинання α_1 в контрольованому матеріалі. Розкладаючи експоненціальну функцію в степеневий ряд, з виразу (9.4) отримаємо

$$K = J \left\{ 1 - 1 + (\alpha_1 - \alpha_2)y - \dots \right\} = J(\alpha_1 - \alpha_2)y. \quad (9.5)$$

З виразу (9.5) випливає, що контрастність зображення дефектів при РК, по-перше, пропорційна товщині дефекту y і, по-друге, пропорційна різниці коефіцієнтів поглинання випромінювання в матеріалах виробу і дефекту $\alpha_1 - \alpha_2$.

Ці результати природно було очікувати виходячи з уявлень про фізичні процеси при радіаційному контролі.

Більш цікавий висновок з формули (9.5) можна отримати, якщо її спростити, враховуючи, що завжди $\alpha_2 \ll \alpha_1$. Тоді

$$K = J\alpha_1 y. \quad (9.6)$$

З виразу (9.6) випливає, що контрастність зображення дефектів тим більше, чим більше коефіцієнт поглинання випромінювання в контрольованому матеріалі. Цей висновок прямо протилежний висновку, наприклад, при контролі за допомогою випромінювання ультразвукових

хвиль, коли чіткість контролю знижується із зростанням коефіцієнта поглинання хвиль.

Вираз (9.6) дозволяє зробити практично важливий висновок: контроль за допомогою радіаційного випромінювання найбільш ефективний для матеріалів з великими коефіцієнтами поглинання. Це в основному метали.

9.5. Способи реєстрації радіаційних зображень

Найбільшого поширення в радіаційній дефектоскопії отримав радіографічний контроль з використанням в якості детектора випромінювання радіографічної плівки. В якості джерел випромінювання при цьому контролі використовуються всі три типи джерел випромінювання.

Різновидом радіографічного контролю є **флюорографічний метод**, при якому розподіл інтенсивності іонізуючого випромінювання перетворюється у видиме світло на сцинтиляторному екрані і потім реєструється за допомогою оптичної системи на флюорографічній плівці (рис. 9.16, а, б).

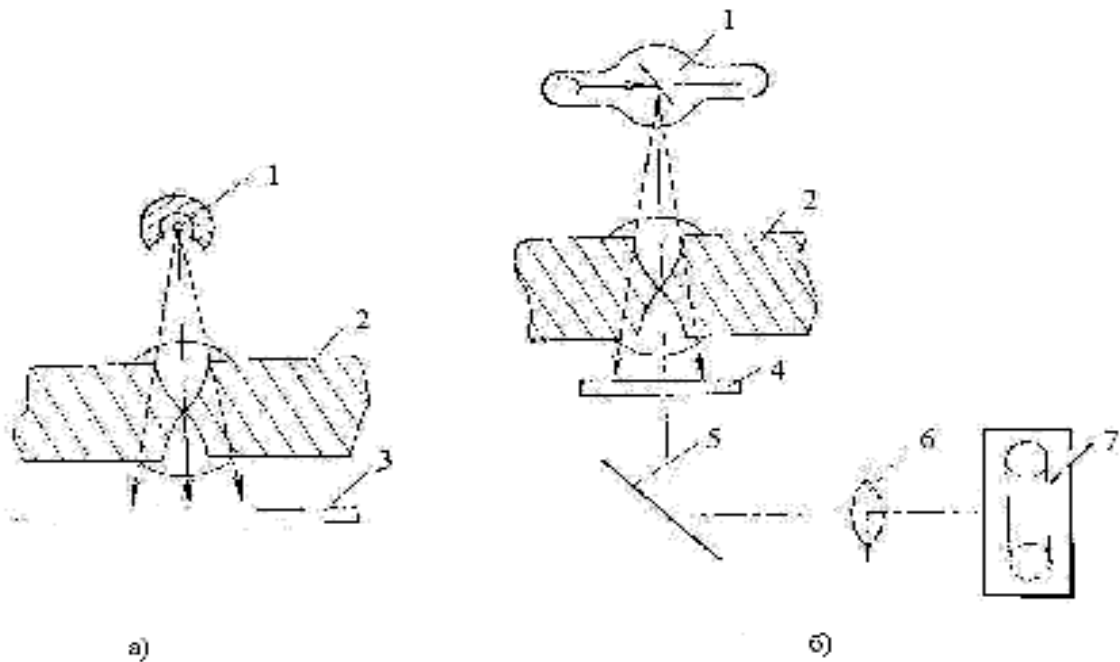


Рис. 9.16. Схема радіографічного контролю з використанням:
 а - радіографічної плівки; б - флюорографічної плівки;
 1 - джерело випромінювання; 2 - контрольований об'єкт; 3 -
 радіографічна плівка; 4 - монокристалічний екран; 5 - дзеркало з
 поверхневим відбиванням; 6 - оптична система; 7 - касета з флюорографічною
 плівкою

Найбільшого поширення в якості детектора при радіографічному методі контролю отримали **радіографічні плівки**.

Радіографічні плівки поділяють на дві групи:

1. безекранні для використання без флуоресцентних екранів або з металевими підсилюючими екранами, і

2. екранні плівки, які застосовуються спільно з флуоресцентними екранами.

Основними характеристиками плівок є спектральна чутливість, контрастність і роздільна здатність. На рис. 9.17 представлена схема будови радіографічної плівки. Основою плівки служить гнучка прозора підкладка 4 з негорючої пластмаси - ацетилцелюлози. На підкладку з двох сторін наносять чутливу до випромінювання емульсію 2, що представляє собою шар желатини товщиною 10-30 мкм, у якій рівномірно розподілені мікрокристали бромистого срібла. Розміри мікрокристалів не перевищують 3 мкм. Для збільшення міцності з'єднання між емульсією і підкладкою лежить шар спеціального клею 3, званий підшаром. Зовні на емульсію наносять захисний шар 1 із задубленої желатини товщиною до 1 мкм для запобігання емульсії від механічних пошкоджень.

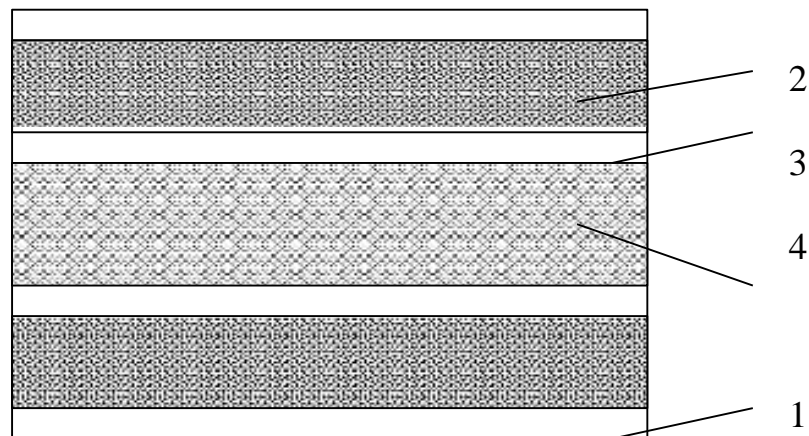


Рис. 9.17. Схема будови радіографічної плівки

Під впливом випромінювання бромісте і хромісте срібло розкладаються і виділяють срібло чорного кольору. Подвійний шар фотоемульсії збільшує чутливість в два рази.

Чутливість плівки визначається оптичною густиною почорніння $D = \lg\left(\frac{F_0}{F}\right)$, де $\frac{F_0}{F}$ - непрозорість плівки, F_0, F - інтенсивність світлового потоку, що падає на плівку і що проходить через неї. Густина почорніння абсолютно прозорого знімка ($F_0 = F$) дорівнює нулю. Густина почорніння пропорційна експозиції H_E , яка дорівнює добутку часу витримки на інтенсивність падаючих променів. На рис. 9.18 представлений приблизний вигляд характеристичної кривої плівки, яка є залежністю густини почорніння від логарифма експозиції.

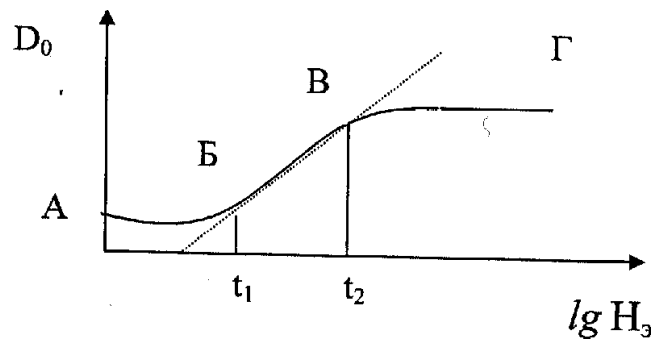


Рис. 9.18. Характеристична крива радіографічної плівки

Початкова ділянка характеристичної кривої відповідає відсутності випромінювання. Вона характеризує густину вуалі D_{01} - величину густини обробленої плівки, яка не піддана опроміненню. Її величина лежить в межах $0,1 \leq D_{01} \leq 0,3$

При тривалому зберіганні D_{01} збільшується. Ділянку кривої АБ називають областю **недотримки**. В цій області почорніння плівки зі збільшенням експозиції незначне. На ділянці БВ густина почорніння пропорційна експозиції. Ця область відповідає області робочих експозицій у радіографії. Тангенс кута нахилу робочої ділянки називають коефіцієнтом контрастності плівки. Ділянка ВГ відповідає області **перетримки**.

Чутливість плівки вимірюють величинами, зворотними величині дози випромінювання, необхідної для отримання густини, що перевищує на 0,85 густину вуалі.

Випадково виникаючі скупчення і розрядження зерен срібла створюють враження зернистості зображення і погіршують виявляємість дрібних дефектів при радіографічному контролі.

Зернистість називають також гранулярністю G . Із збільшенням енергії випромінювання гранулярність зростає. Велику гранулярність мають зображення, отримані із застосуванням підсилюючих флуоресцентних екранів. Гранулярність радіографічних знімків, а також розсіювання випромінювання в емульсії радіографічних плівок призводить до того, що стрибкоподібна зміна інтенсивності випромінювання на границях дефекту реєструється як плавна зміна густини почорніння радіографічної плівки. Кількісну характеристику величини розмиття називають **власною нерізкістю** радіографічних детекторів випромінювання u_n . Величина власної нерізкості безекранних радіографічних плівок залежить від спектрального складу випромінювання і дорівнює 0,4 мм при використанні в якості джерела випромінювання ^{60}Co , 0,28 мм при використанні нии ^{192}Ir і 0,1 мм для ^{170}Tm . При використанні гальмівного випромінювання з максимальною енергією в спектрі від 150 до 250 кеВ величина власної нерізкості змінюється від 0,1 до 0,17 мм.

Радіографічні плівки можна використовувати в комбінації з екранами (металевими або флуоресцентними).

Екранні радіографічні плівки призначені для реєстрації випромінювання оптичного діапазону, що виникає при впливі іонізуючого випромінювання на флуоресцентні екрани. Вони сенсibilізовані в оптичному діапазоні випромінювання, їх спектральна чутливість узгоджена зі спектром випромінювання флуоресцентних екранів.

У порівнянні з безекранними плівками екранні мають велику чутливість і менший коефіцієнт контрастності. Власна нерізкість екранних плівок при використанні гальмівного випромінювання з максимальною енергією в спектрі 150 - 250 кеВ становить 0,6 мм.

Підсилюючі металеві екрани застосовують для скорочення часу просвічування. Підсилююча дія металевих екранів заснована на вибиванні з них вторинних електронів під дією іонізуючого випромінювання. Вибиті електрони діють на емульсію плівки і викликають додаткову фотохімічну реакцію, яка посилює дію первинного випромінювання.

Металеві екрани виконують з важких елементів - свинцю, міді, рідше - з вольфраму і титану. Екрани встановлюють позаду і попереду радіографічної плівки. Застосування екранів призводить до скорочення експозиції. Задній екран захищає плівку від розсіяного випромінювання. Товщина екрана для різних джерел випромінювання приведена в табл. 9.2.

Таблиця 9.2. Характеристики металевих екранів

Джерело випромінювання	Матеріал екрану	Товщина екрану, мм	
		переднього	заднього
Рентген 100-200 кВ	Pb	0,05	0,1
Рентген 100-200 кВ	Pb	0,1	0,2
^{60}Co	Pb , Cu	0,4	0,5
^{170}Tm	Pb	0,2	0,4
Прискорювач 3-12 МеВ	Pb , Cu	0,5	1-2

Флуоресцентні екрани виготовляють на основі люмінофорів. Підсилююча дія флуоресцентних екранів пов'язана з додатковим впливом на плівку світіння, виникаючого в люмінофорі під дією іонізуючого випромінювання. В якості люмінофорів використовують суміш дрібних

кристалів сульфїду цинку і сульфїду кадмію, активованих сріблом ZnS (Ag); CdS (Ag), а також CaWO₄; (Ba, Pb) SO₄; Gd₂O₂S (Tb).

Люмінофор із зв'язуючою речовиною наносять на папір або картон. Радіографічних плівку розміщують між двома флуоресцентними екранами, у разі використання односторонніх радіографічних плівок - один екран, розташований з того боку плівки, на яку нанесена емульсія. При високих енергіях випромінювання перед переднім екраном або замість нього встановлюють металевий екран.

Основними характеристиками підсилюючих флуоресцентних екранів є коефіцієнт підсилення і величина власної нерізкості.

Коефіцієнт підсилення - відношення часу експозиції при використанні флуоресціюючих екранів, необхідного для отримання знімка із заданою оптичною густиною, до часу експозиції на тій же плівці без підсилюючих екранів. Величина коефіцієнта підсилення залежить від енергії випромінювання.

Власна нерізкість флуоресцентних екранів пов'язана з розсіюванням світла в екранах і залежить від густини упаковки зерен флуоресцентної речовини в екрані. Величина власної нерізкості флуоресцентних екранів значно перевищує величину власної нерізкості радіографічної плівки і становить від 0,4 до 0,6 мм.

Флуоресцентні екрани випускають серійно. Деякі відомості про флуоресцентні екрани наведено в табл. 9.3.

Таблиця 9.3. Характеристики флуоресцентних екранів

Тип екрану	Люмінофор	Кількість люмінофору на екрані, мг / см ²	
		переднього	заднього
«Стандарт»	CaWO ₄	60	60
«УС»	ZnS(Ag)	30	110
«Р-9»	Cd ₂ O ₂ S(Tb)	120	120

Коефіцієнт контрастності флуоресцентних екранів $k_n = 1$. Коефіцієнт контрастності екранних радіографічних плівок значно нижче, ніж коефіцієнт контрастності безекранних плівок. Отже, при однаковому радіаційному контрасті загальний контраст зображення на знімках, отриманих з використанням флуоресцентних екранів, значно нижче, ніж на знімках, отриманих при використанні безекранних плівок з металевими екранами.

Радіаційний контраст, створюваний джерелами випромінювання, не залежить від детектора випромінювання. Отже, застосування флуоресцентних екранів призводить до погіршення виявляємості дефектів. Однак радіаційний контраст може бути збільшений при використанні

флуоресцентних екранів на основі рідкоземельних елементів з великим коефіцієнтом підсилення, оскільки їх застосування дозволяє знизити напругу на рентгенівській трубці. Це, в свою чергу, збільшує коефіцієнт ослаблення випромінювання і дозволяє отримати контраст зображення, що перевищує контраст зображення, одержуваний при використанні безекранних плівок.

Різновидом радіографічного контролю є **ксерорадіографія**. **Ксерорадіографія** - спосіб отримання зображення на поверхні тонкого шару напівпровідникового матеріалу, електропровідність якого залежить від інтенсивності іонізуючого випромінювання.

Ксерорадіографічна пластина - тонкий шар селену високої чистоти (99,992%), напильний у вакуумі на поліровану провідну підкладку. Як матеріал підкладки найчастіше використовується алюміній, можливе використання латуні, скла чи паперу з провідними шарами. Товщина шару селену становить 100-400 мкм. Чутливість пластин K визначають величиною, зворотною дозі випромінювання, при якій досягається задана густина почорніння. Перед проведенням експонування пластину сенсібілізують, для чого її з заземленою підкладкою (подложкой) пересувають над дротяним електродом, що знаходиться під напругою 5-10 кВ відносно заземленої підкладки. В результаті виникає коронний розряд, і поверхня селенового шару, звернена до електрода, заряджається до потенціалу 600 В щодо підкладки.

Операція сенсібілізації і подальшого експонування пластини проводиться в темряві. Сенсібілізовану пластину поміщають в світлонепроникну касету і розташовують за КО. Під дією іонізуючого випромінювання електропровідність пластини зростає і потенціал селенового покриття знижується пропорційно дозі випромінювання, поглиненого в шарі селену під зарядженою ділянкою. На наступній стадії ксерорадіографічного процесу потенціальний рельєф, що утворився на селеновому шарі, проявляють, для чого на поверхню пластини з боку селенового шару напильють попередньо заряджені частинки дрібнодисперсного порошку барвника. В результаті електростатичної взаємодії заряджених частинок з потенційним рельєфом селенового шару пластини отримують просторовий розподіл шару барвника, який відображає розподіл інтенсивності випромінювання за КО.

Після проявлення зображення на ксерографічній пластині його переносять на папір і закріплюють.

Папір з липким шаром гумовим валиком накочують до пластини, потім папір витримують в парах органічного розчинника або нагрівають. При цьому липкий шар паперу розмякає і утворює з барвником міцне зображення.

Ксерографічна установка дозволяє ефективно контролювати вироби зі сталі товщиною 25-30 мм. Це перспективний вид контролю, роздільна здатність теоретично складає 50 ліній/мм. В даний час якість випускаємих пластин дозволяє отримати роздільну здатність близько 10 ліній/мм і більше (у рентгенографічних плівок роздільна здатність поки вище). При низьких енергіях випромінювання чутливість ксерографічних пластин перевищує

чутливість радіографічних плівок, тому їх застосування перспективно при контролі тонких сталевих виробів та виробів з легких сплавів.

При радіографічному методі контролю важливий правильний вибір відстаней між джерелом, контрольованим об'єктом і детектором. Фокусна відстань F - відстань від джерела випромінювання до детектора, лінійний розмір фокусної плями Φ , відстань від джерела до дефекту a і від дефекта до плівки b пов'язані співвідношенням

$$U_{\Gamma} = \frac{b\Phi}{a} = \frac{b\Phi}{(F-b)},$$

де U_{Γ} - геометрична нерізкість (рис. 9.19).

З формули видно, що геометрична нерізкість може бути зменшена застосуванням джерела з можливо малим лінійним розміром фокусної плями, установкою касети з плівкою впритул до просвічуваної ділянки і збільшенням фокусної відстані.

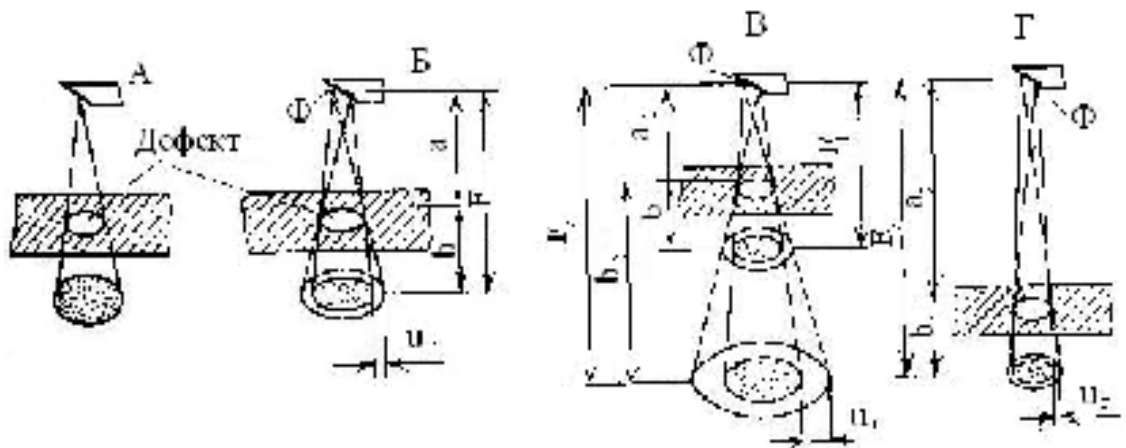


Рис. 9.19. Основні геометричні співвідношення при радіографічному контролі:

A - точкова пляма; Б - лінійна пляма;

В, Г - зміна нерізкості при зміні відстані між дефектом і детектором

Якщо відстань від дефекту до плівки велика (KO великий або плівку не можна прикласти впритул до поверхні об'єкта), зображення дефекту виходить збільшеним, з розмитими краями, зниженим радіаційним контрастом. Величина геометричної нерізкості має максимальну величину для дефектів, розташованих на поверхні виробу, зверненої до П.

Від вибору фокусної відстані F залежать продуктивність контролю і мінімальні розміри виявляємих дефектів.

Продуктивність радіографічного контролю прийнято вимірювати лінійним розміром або площею ділянки деталі, контрольованої за одиницю часу. При зростанні F зростає розмір контрольованої ділянки, зменшується нерізкість (ефект розмитості). Однак надмірне збільшення фокусної відстані веде до значного збільшення часу експозиції, що знижує продуктивність контролю.

При реєстрації зображення дефектів геометрична нерізкість сумується з власною нерізкістю радіографічної плівки U_{Π} . Нерізкість зображення на радіографічній плівці погіршує виявлення дефектів, особливо коли величина нерізкості порівнянна з розмірами дефекту. Для контролю зварних та стикових з'єднань, литих виробів рекомендується дотримуватися деяких оптимальних геометричних співвідношень між джерелом, контрольованим об'єктом і детектором.

При просвічуванні деталей, що мають різкі перепади товщини, отримуються дуже контрастні негативи. Зображення тонких частин виходить занадто темним, а товстих - занадто світлим (оптична густина почорніння виходить за межі оптимальних значень). В цих випадках вживають таких заходів:

1) проводять просвічування при великих значеннях напруги порівнянно з оптимальними;

2) у вікна захисного кожуха встановлюють фільтри (вони фільтрують м'яке випромінювання і створюють пучок жорсткого випромінювання - зі збільшенням жорсткості випромінювання контрастність зменшується);

3) використовуються менш контрастні плівки без підсилюючого флуоресціюючого екрану;

4) застосовують дві плівки з різною чутливістю;

5) застосовують спеціальні компенсатори - тверді (прокладки з матеріалу деталі), сипучі (дрібний дріб, металеві або пластичні мастики, сурик, парафін) або рідкі - водні розчини хлористого або йодистого барію.

Наведемо основні правила просвічування, що забезпечують високу чутливість радіографічного методу:

- фокусна пляма має бути по можливості якнайменшою;
- фокусна відстань повинна бути по можливості максимальною;
- плівка повинна бути дрібнозернистою (висококонтрастною);
- розмір поля опромінення повинен бути якомога менше;
- плівка повинна бути розташована якомога ближче до КО;
- вісь робочого пучка випромінювання повинна бути спрямована перпендикулярно плівці;
- слід зменшувати дію розсіяного випромінювання на плівку.

Для розшифровки результатів контролю широко використовують негатоскопи. До найбільш вдалих відносять ті, в яких в якості джерела використані галогенні лампи. Їх відрізняють невеликі габарити, потужний світловий потік, хороша рівномірність освітлення вихідного вікна.

Радіоскопічний метод заснований на представленні кінцевої інформації про іонізоване випромінювання на флуоресцентному екрані за допомогою електронно-оптичних перетворювачів, оптичних підсилювачів і телевізійних систем. Як джерело іонізуючого випромінювання використовують рентгенівські апарати, а також потужні джерела випромінювання високої енергії - лінійні прискорювачі мікротронів. При радіоскопічному контролі в якості детекторів використовуються флуоресцентні або монокристалічні екрани. Зображення з цих екранів через оптичну систему передають на

приймальною трубкою телевізійної системи і спостерігають з потрібним підсиленням (рис. 9.20). Як детектори випромінювання можуть бути також використані рентген - відікони, які одночасно є і детектором випромінювання, і передавальною телевізійною трубкою. Зображення, підсилене телевізійною системою, спостерігають на екрані відео-контрольного пристрою (рис. 9.21). Джерелами випромінювання в таких випадках служать рентгенівські апарати.

Обов'язковим елементом будь-якої схеми є вхідний екран - перетворювач тіньового радіаційного зображення в зображення, представлене іншою формою енергії.

В якості перетворювачів при радіоскопічному методі контролю використовують:

1. рентгенооптичні перетворювачі, які перетворюють радіаційне зображення у видиме;
2. фоторезистивні перетворювачі, що переводять радіаційне зображення в рельєф провідності на напівпровідниковому екрані;
3. рентгено-електронні перетворювачі, що перетворюють радіаційне зображення в потік електронів.

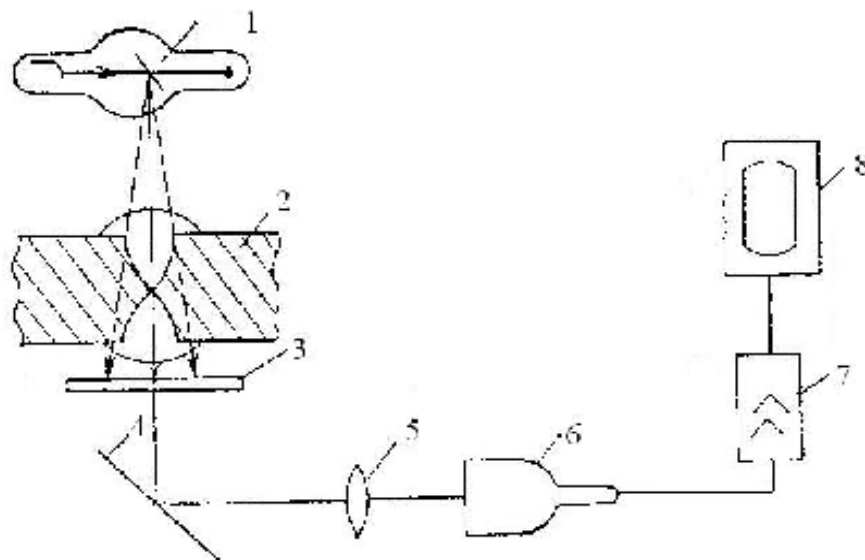


Рис.9.20. Схема радіоскопічного контролю з використанням монокристалічного екрану:

- 1 - джерело; 2 - контрольований об'єкт; 3 - монокристалічний екран;
 4 - дзеркало з поверхневим відбиванням; 5 - оптична система;
 6 - передавальна телевізійна трубка; 7 - підсилювач;
 8 - відеоконтрольний пристрій

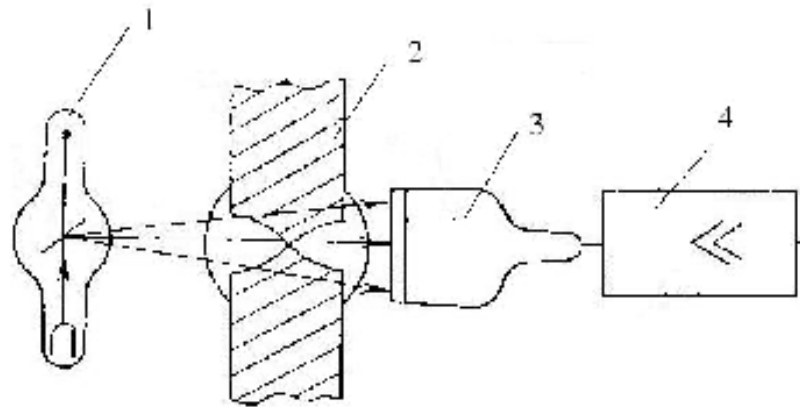


Рис. 9.21. Схема радіоскопічного контролю з використанням рентгенотелевізійної установки з рентген-відіконом:
1 - джерело; 2 - контрольований об'єкт; 3 - рентген-відікон;
4 - підсилювач

В останніх двох випадках необхідно подальше перетворення потенціального рельєфа або потоку електронів в оптичне зображення.

Радіоскопія дозволяє спостерігати як безпосереднє зображення об'єкта контролю на екрані, так і дистанційну передачу зображення телевізійною системою.

До основних характеристик елементів схем радіоскопічного контролю належать:

- квантовий вихід - число носіїв інформації, які генеруються в приймачі на один поглинений квант;

- ефективність виходу, або ККД знімання інформації - частка носіїв інформації, які можуть бути використані для подальшого формування зображення;

- чутливість перетворювача, яка характеризується відношенням світлового потоку або струму електронів на виході перетворювача до потужності експозиційної дози;

- інерційність перетворювача, яка характеризується інерційною сталою τ реакції перетворювача на включення або вимикання випромінювання;

- контрастність перетворювача k_{Π} , яка характеризується зміною радіаційного зображення після перетворення; для більшості перетворювачів $k_{\Pi} \leq 1$, тобто в кращому випадку перетворювач не погіршує контрасту первинного зображення;

- роздільна здатність r_{Π} , яка визначається числом ліній на міліметр при 100% -му контрасті радіаційного зображення $k_{\Pi}=1$;

- власна нерізкість U_{Π} перетворювача, $U_{\Pi} = \frac{1,5}{r_{\Pi}}$;

- частотно-контрастна характеристика – функціональний зв'язок між роздільною здатністю перетворювача і контрастом одержуваного зображення.

Найчастіше в якості екранів використовують рентгенооптичні перетворювачі, флуороскопічні і монокристалічні екрани.

Флуороскопічні екрани являють собою шар люмінофора, змішаного з речовиною, нанесений на підложку. Флуороскопічні екрани не прозорі для власного випромінювання, товщина шару люмінофора невелика. При збільшенні випромінювання ефективність флуороскопічних екранів знижується. Роздільна здатність не перевищує 2-3 ліній / мм.

Монокристалічні екрани виконані з монокристалів лав йодистого цезію або натрію, активованого талієм.

CsJ (Tl) більш чутливий, ніж NaJ (Tl). Вони володіють меншим квантовим рівнем, але більшою поглинає здатністю; спектр випромінювання краще відповідає чутливості фотокатодов передавальних телевізійних трубок. Роздільна здатність близько 10 ліній / мм. Екрани прозорі для власного випромінювання, товщина застосовуваного екрану залежить від енергії випромінювання. Чим більше енергія випромінювання, тим більше ефективно застосування монокристалічних екранів.

Флуороскопічні і монокристалічні екрани безінерційного. Серійно випускаються екрани різної форми: диски (до 200 мм в діаметрі), пластини (до 1500x1000x20 мм), блоки, плівки товщиною 0,05-0,5 мм.

До іншого виду перетворювачів - фоторезисторні перетворювачі - відносяться рентген-відікони. Це передавальна телевізійна трубка, чутлива до іонізуючого випромінювання. Перетворення радіаційного зображення в потенційний рельєф відбувається в тонкому шарі напівпровідника, нанесеного з внутрішньої сторони вхідного вікна рентген - відікона. Мала товщина шару напівпровідника дозволяє отримати хорошу роздільну здатність, що перевищує роздільну здатність радіографічного знімка. Перетворення зображення на вхідному вікні трубки має переваги перед передачею оптичного зображення з екрану, оскільки усуваються два етапи перетворення: рентген - світло і оптична передача, усуваються втрати в оптичній системі. Недолік - система володіє значною інерційністю, що не дозволяє спостерігати зображення в динаміці, поле рентгенівського контролю обмежено полем фотопровідної мішені.

Рентгеноелектронне перетворення використовують в рентгенівських електронно-оптичних перетворювачах (РЕОП).

Електрони, що вибиваються іонізуючим випромінюванням з вхідного вікна РЕОП, прискорюються високою напругою і фокусуються на вихідному вікні, на яке нанесений шар люмінофора (рис. 9.22). Під дією прискорених електронів на вихідному вікні виникає зменшене оптичне зображення. Роздільна здатність - до 50 ліній/мм.

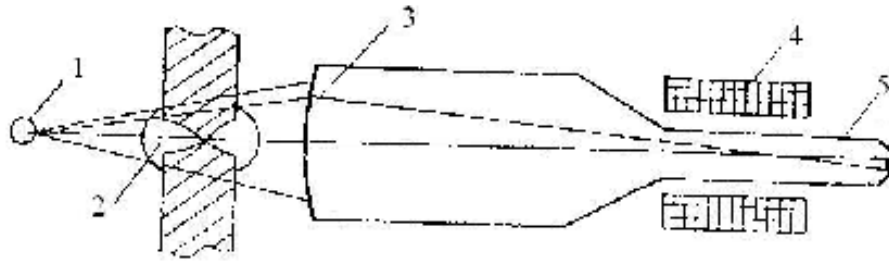


Рис. 9.22. Схема рентгенівського електронно-оптичного перетворювача:

- 1 - джерело випромінювання; 2 - контрольований виріб; 3 - фотокатод;
4 - фокусуючі котушки; 5 - вихідний екран

Радіоскопічний метод контролю дозволяє досліджувати КО безпосередньо в момент просвічування. Мала інерційність дозволяє контролювати об'єкт під різними кутами, це полегшує розшифровку результатів контролю, дозволяє відокремити зображення КО від шуму, що виникає в тракті формування зображень.

Зазвичай максимальна товщина КО зі сталі не перевищує 10-45 мм (рідше 80-150 мм). У цьому випадку необхідно застосування потужних джерел іонізуючого випромінювання (мікротронів або лінійних прискорювачів). **Основний недолік** радіоскопічного методу контролю - неякісний документальний запис результатів контролю; складна електронна апаратура; великі габарити і маса блоку перетворювача.

При **радіометричному контролі** інтенсивність іонізуючого випромінювання вимірюють послідовно в різних точках за КО (рис. 9.23). В якості джерел зазвичай використовують радіоактивні джерела випромінювання або прискорювачі електронів. В якості детекторів найчастіше застосовуються сцинтиляторний детектор, напівпровідниковий детектор, рідше - іонізаційні камери та газорозрядні лічильники.

Вузький пучок іонізуючого випромінювання переміщається по КО, послідовно просвічуючи всі його ділянки. Випромінювання, що пройшло через об'єкт, реєструється іонізаційним детектором випромінювання, на виході якого утворюється електричний сигнал з величиною, пропорційною інтенсивності поступаючого випромінювання. Електричний сигнал, пройшовши підсилювач, реєструється індикаторним пристроєм - самописцем, осцилографом, міліамперметром тощо. За наявності дефекту реєструючий пристрій відзначає зростання інтенсивності.

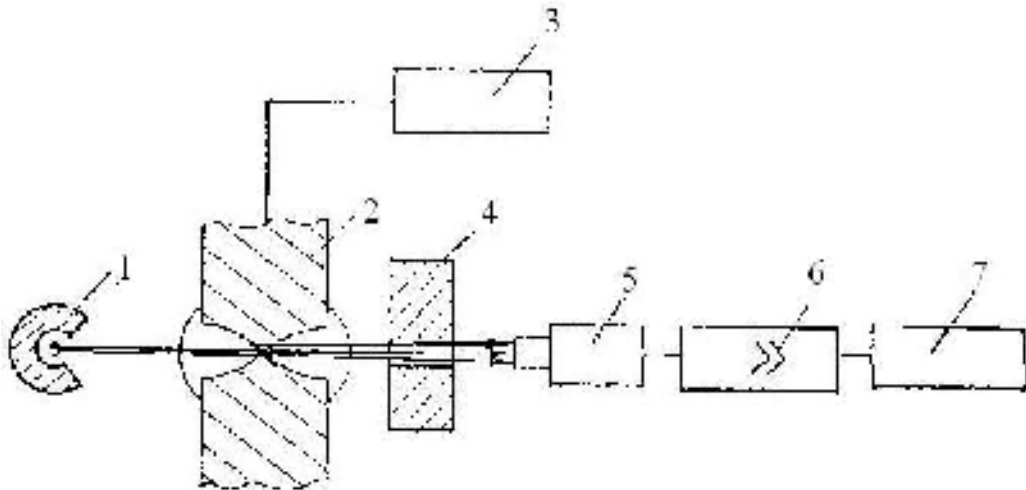


Рис. 9.23. Схема радіометричного контролю:

1 - джерело випромінювання; 2 - контрольований об'єкт; 3 - механічний пристрій для переміщення контрольованого виробу; 4 - коліматор; 5 - детектор випромінювання; 6 - підсилювач, самописець

Для збільшення роздільної здатності потрібен дуже вузький пучок. Однак якщо пучок дуже вузький, то знижується число фотонів, що потрапляють на детектор. Зазвичай площа вікна коліматора становить близько 1 см^2 .

Радіометричні методи дозволяють визначити протяжність дефекту і його променевої розмір. Довжина дефекту

$$L_{\text{деф}} = l_1 \frac{V_0}{V_1} a$$

де $L_{\text{деф}}$ - довжина дефекту; l_1 - протяжність імпульсу на діаграмній стрічці, V_0 - швидкість контролю, V_1 - швидкість запису, a - розмір вікна коліматора в напрямку КО. Об'ємні дефекти визначаються з точністю до 3-5%.

Переваги радіометрії - висока чутливість (0,3-3%), можливість безконтактного контролю, висока (порівняно з радіографією) продуктивність.

До недоліків слід віднести необхідність одночасного переміщення на однаковій відстані джерела іонізуючого випромінювання і дефекту; неможливість визначення форми і глибини розташування дефекту; неможливість усунення впливу розсіяного випромінювання.

У промисловості використовується для контролю сталених виробів товщиною від 20 до 1000 мм.

Принцип роботи **іонізаційних детекторів** заснований на іонізуючій дії випромінювання на газ. Вихідним сигналом є іонізаційний струм або імпульси струму, що виникають при дії на газове середовище випромінювання.

На рис. 9.24 наведено графік залежності імпульсу струму від напруги на електродах, на якому виділені робочі ділянки різних іонізаційних

детекторів випромінювання. В залежності від величини напруги U , що подається на електроди, існують різні режими роботи трубки: $U_1 \leq U \leq U_2$ - режим насичення, $U_3 \leq U \leq U_4$ - режим пропорційності, $U_4 \leq U \leq U_5$ - режим газового розряду.

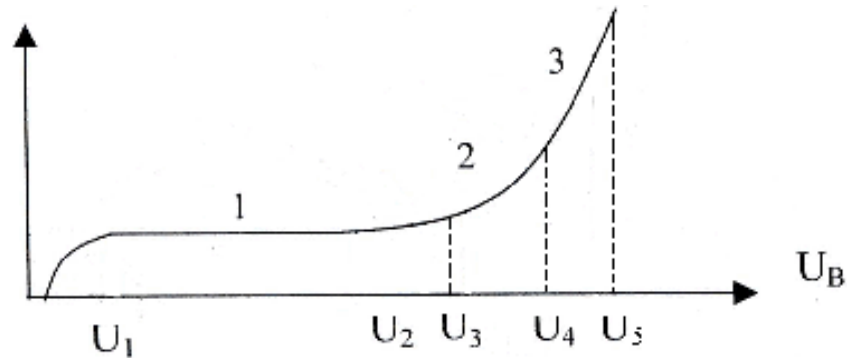


Рис. 9.24. Залежність імпульсу струму вихідного сигналу від напруги на електродах газорозрядного лічильника при різних режимах роботи

Іонізаційні камери працюють в режимі насичення іонізаційного струму при порівняно невеликих напругах, що подаються на електроди $U_{ел}$ (100-220 В).

Детектування α - і β - частинок відбувається за рахунок безпосередньої іонізації цими частками газу в камері; детектування γ - квантів обумовлено в основному вторинними електронами, які вивільняються при взаємодії цього випромінювання зі стінками камери. Для детектування потоку теплових нейтронів, які не іонізують газ безпосередньо, в матеріал камери або газ вводять добавки (кадмій, бор), що забезпечують ядерну реакцію, в процесі якої утворюються заряджені частинки.

Пропорційні лічильники (ПЛ) (рис. 9.25) працюють в режимі газового підсилення (область 2 рис. 9.24), де імпульс струму пропорційний первинній іонізації. На електроди подається напруга $U \geq 300 - 400$ В, електрони, створені випромінюванням всередині лічильника, набувають енергії, достатньої для іонізації газу. Виникаючі при цьому вторинні електрони рухаються до ніті аноду з прискоренням і створюють на своєму шляху нові електрони і т.д. Виникає лавиноподібний процес, званий **газовим підсиленням**. Коефіцієнт газового підсилення становить $10 \dots 10^4$ і пропорційний прикладеній напрузі. Вихідний сигнал ПЛ значно більше сигналу іонізаційної камери. За величиною імпульсу можна судити про вид випромінювання або його енергії.

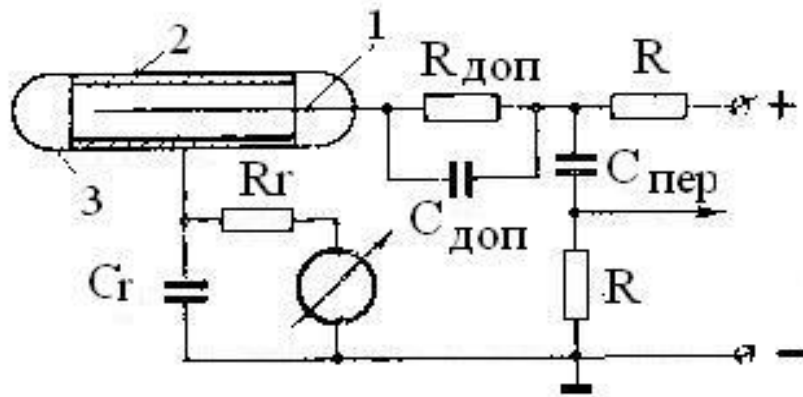


Рис. 9.25. Схема пропорційного лічильника:
1 - нитка аноду; 2 - катод у вигляді металевого циліндра; 3 - скляний балон

Лічильники Гейгера-Мюллера також є пропорційними, але працюють в режимі самостійного розряду (область 3 рис. 9.24), коли амплітуда імпульсу не залежить від виду та енергії реєстрованого випромінювання. Напруга $U_{\text{ел}}$ в цьому випадку складає $\sim 700 - 1000 \text{ В}$.

При цій напрузі відбувається збудження молекул газу (випромінювання ультрафіолетових фотонів та інтенсивне вибивання іонами вільних електронів з катода), що призводить до розряду по всій довжині нитки анода. Вплив навіть однієї частинки викликає неперервний розряд по всьому об'єму лічильника, як це відбувається в неонових трубках. Для реєстрації наступної частинки необхідно автоматично перервати розряд в трубці.

В самогасячих лічильниках в газ, що наповнює лічильник, вводять гасячу добавку - гази органічних сполук, кисень або галогенні сполуки.

Самогасячі галогенні лічильники працюють при менших напругах $U_{\text{ел}} \approx 400 - 450 \text{ В}$ і володіють високою чутливістю. Вихідний сигнал цих лічильників не залежить від типу випромінювання і має велику амплітуду (від 1 до 50 В).

Лічильники Гейгера-Мюллера використовуються для вимірювання густини потоку частинок або потужності дози різних видів випромінювання.

Напівпровідникові детектори (НПД) (рис.9.26) працюють за принципом фотопровідності, тобто під дією падаючого випромінювання в детекторі з напівпровідника (Ge;Si) виникає потік носіїв електричного струму. Напівпровідникові лічильники працюють за принципом іонізаційної камери.

Якщо на напівпровідниковий детектор, що володіє n-p - переходом, падає β - випромінювання (або γ - кванти), то в його чутливій області виникають пари «електрон - дірка» подібно парам «електрон - іон» в камері. Число утворених пар «електрон - дірка» пропорційно енергії, втраченій в чутливій області детектора ($\sim 3 \cdot 10^5$ пар на 1 MeV енергії, втраченої в процесі іонізації).

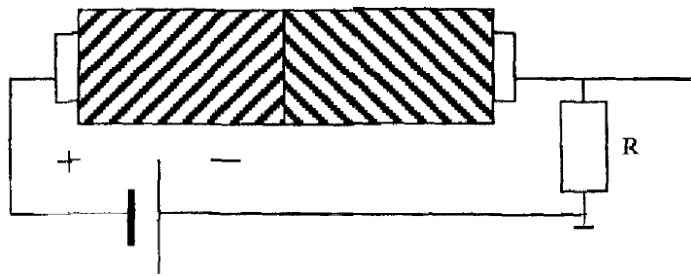


Рис. 9.26. Схема напівпровідникового лічильника

У разі прикладання заірної напруги (n-шар підключається до позитивного полюсу батареї, а р-шар - до негативного) в ланцюгу лічильника протікає струм, аналогічний іонізаційному. Цей струм значно більше струму камери, оскільки гальмуюча здатність твердої речовини в сотні разів більше гальмуючої здатності газу, а на утворення пари «електрон - дірка» затрачається енергії менше, ніж на утворення пари «електрон - іон». Чутлива область W може досягати 10 мм; такі лічильники успішно працюють при низьких температурах, у вакуумі, вони не чутливі до магнітних полів, компактні.

Сцинтиляторні, або радіюлюмінесцентні, детектори. Робота їх заснована на світлозбуджуючій дії випромінювання на речовину. Такими речовинами є люмінофори, або сцинтилятори, які перетворюють поглинену енергію іонізуючого випромінювання у видиме світло.

Під дією рентгенівського або γ - випромінювання флуороскопічні екрани на основі сульфідів цинку і кадмію $ZnS (Ag)$; $CdS (Ag)$ дають жовто-зеленувате світіння, яке відповідає максимальній чутливості ока. Люмінофори на основі $CaWO_4$; $(Ba,Pb)SO_4$ дають інтенсивне світіння у синій, фіолетовій і ультрафіолетовій областях спектру, до якого чутлива фотоемульсія рентгенівських плівок. Застосовуються також органічні сцинтилятори - антрацен, стилбен, n-терфелін.

Сцинтиляторний лічильник (рис. 9.27) складається із сцинтилятора 1, фотоелектронного помножувача (ФЕП) 2 та електронної реєструючої апаратури.

ФЕП являє собою скляний балон, на частині внутрішньої поверхні якого нанесено сур'мяноцезієве покриття, що служить фотокатодом 3. У середині трубки є кілька електродів - помножувачів (дінодов), підключених до дільника напруги. Для живлення ФЕП використовують стабілізовані високовольтні джерела напруги в 1000-2000 В.

При попаданні іонізуючого випромінювання сцинтилятор випускає фотони видимого світла у вигляді окремих спалахів. Під впливом цих фотонів з катода ФЕП 3 вириваються фотоелектрони, які електричним полем направляються на діноди. Тут вони в результаті вторинної емісії електронів підсилюються. Загальний коефіцієнт посилення ФЕП складає $10^5 \dots 10^9$.

Амплітуда імпульсу струму пропорційна інтенсивності випромінювання, що потрапляє на сцинтилятор.

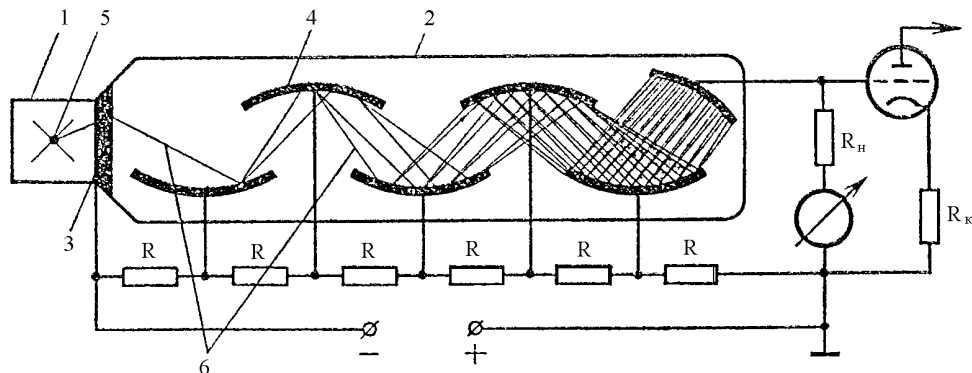


Рис. 9.27. Схема сцинтиляторного лічильника:

1 сцинтилятор; 2 - фотоелектронний помножувач; 3 - фотокатод; 4 - діоди; 5 - фотони; 6 - фотоелектрони

Сцинтиляторні лічильники можна застосовувати для вимірювання числа заряджених частинок, γ -квантів, швидких і повільних нейтронів; для вимірювань потужності дози іонізуючого випромінювання (ІВ). Для реєстрації γ -квантів ці лічильники більш ефективні, ніж газорозрядні, і рівноцінні напівпровідниковим.

Томографія. Суть методу полягає в отриманні різкого зображення тільки тих частин об'єкту, які знаходяться в тонкому (не більше 2 мм) шарі на певній глибині або в декількох тонких шарах, розділених інтервалами заданої товщини (кроком томографії). Цього домагаються, наприклад, синхронним переміщенням (рис. 9.28) рентгенівської трубки ($A_1 \rightarrow A_3$) і касети з екранами і плівкою ($O_1 \rightarrow O_3$) відносно просторового центру качення (качєния) O . У результаті одержують зображення виділеного шару MN , розташованого в площині, що проходить через центр качіння.

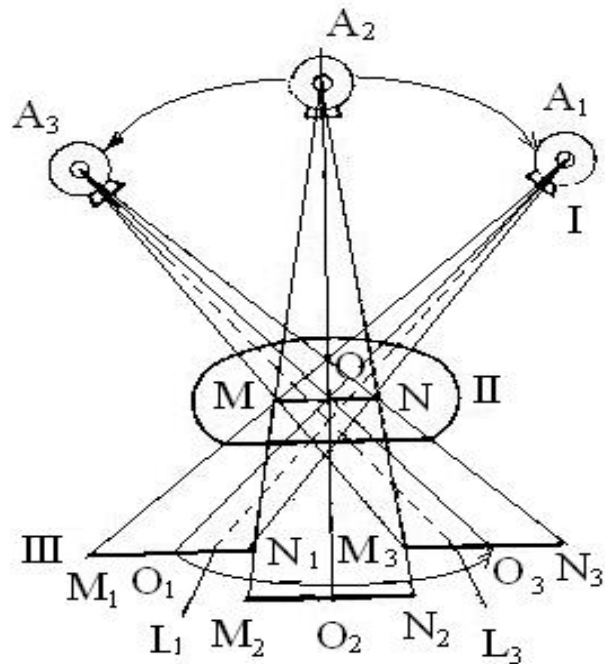


Рис. 9.28. Схема утворення томографічного зображення:
I - рентгенівська трубка; II - об'єкт контролю; III - касета з плівкою

Це зображення являє собою геометричне місце точок виділеного шару, тіні яких нерухомі по відношенню до плівки. Таким чином, в томографії використовують ефект динамічної нерізкості зображення. Синхронний рух джерела випромінювання і плівки щодо об'єкту дозволяє розмити зображення неаналізуємих дефектів або шару, зображення яких в зазвичай прийнятому методі радіографії накладаються одне на одне, і більш різко виділити зображення необхідного для виявлення дефекту або шару. Мінімальна товщина виділяемого шару складає 1,5 мм.

В даний час широко використовують **комп'ютерну томографію**. У порівнянні зі звичайним рентгенівським зображенням томограми мають набагато вищу інформативність, оскільки детально показують внутрішню геометричну структуру, розподіл густини і елементного складу матеріалу. Підвищений обсяг інформації в рентгенівській комп'ютерній томографії отримується за рахунок великого числа первинних перетворювачів (від 250-500 до 2000), неперервного обертання системи «перетворювач - детектор» навколо об'єкта на 360° .

Томографи дають можливість вирішення багатьох завдань неруйнівного контролю. Їх застосовують для контролю об'єктів з невеликим загасанням випромінювання, наприклад, композитів, вуглепластиків, гуми товщиною до 20 мм і розміром до 1,5 м при роздільній здатності за густиною 0,2%. За допомогою томографів впевнено виявляються тріщини з розкриттям 0,01-0,02 мм, що на порядок вище звичайної радіографії.

9.6. Заходи безпеки при радіаційному контролі

Всі радіаційні методи пов'язані з високою небезпекою. Тому при проведенні радіаційної дефектоскопії повинні бути вжиті заходи щодо захисту від іонізуючого випромінювання. Розроблені «Основні санітарні правила роботи з радіоактивними речовинами та джерелами іонізуючих випромінювань» ОСП-72, а також «Норми радіаційної безпеки» НРБ-69. У відповідності з НРБ-69 встановлені гранично допустимі дози і межі випромінювань.

Гранично допустимою межею (ГДМ) називають річний рівень опромінення персоналу, який не викликає при рівномірному накопиченні дози протягом 50 років несприятливих змін у стані здоров'я самого опроміненого та його потомства.

Встановлено 3 категорії опромінюваних осіб:

А - персонал (професійні працівники, які безпосередньо працюють з джерелами іонізуючого випромінювання);

Б - окремі особи з населення;

В - населення в цілому.

До категорії Б належать особи, які працюють у приміщеннях, суміжних з тими, де працює персонал А, а також особи, що проживають в межах санітарно-захисної зони підприємства.

Для персоналу встановлені гранично-допустимі дози (ГДД), а для окремих осіб з населення - межі доз. ГДД встановлені для чотирьох груп критичних органів або тканин тіла. Так, для всього організму ГДД опромінення осіб категорії А дорівнює 0,05 Зв/рік, В - 0,005 Зв/рік.

Для проведення РК можуть залучатися особи, які досягли 18-річного віку, пройшли попередньо медичний огляд, вивчили інструкції та методики просвічування та правила технічної експлуатації установок. Всі особи, які проводять радіаційний контроль, повинні проходити медичний огляд не рідше 1 разу на рік.

Доза опромінення всього організму, гонад або червоного кісткового мозку представника персоналу не повинна перевищувати дозу опромінення, яка визначається за формулою $D \leq 0,05 (N - 18)$, де D - доза, Зв; N - вік, роки; 18 років - вік початку професійного опромінення.

У будь-якому випадку доза, накопичена у віці до 30 років, не повинна перевищувати 0,6 Зв. Найбільша доза за квартал для чоловіків - не більше 0,03 Зв, для жінок - не більше 0,013 Зв.

Дозу опромінення вимірюють за допомогою індивідуальних дозиметрів, які слід носити в нагрудній кишені.

Зниження рівня радіації досягається спрямуванням випромінювання в сторону землі, зменшенням часу опромінення, збільшенням відстані від джерела до працюючого.

Найбільш поширений спосіб захисту від іонізуючого випромінювання - екранування - ослаблення випромінювання шаром важкого матеріалу. Стіни приміщень, перекриття підлог захищають важкими металами, такими як

свинець, свинцеве скло, вольфрам, барит, використовується також бетон, цегла. Захист повинен забезпечувати зниження дози на робочих місцях до $2,8 \cdot 10^{-5}$ Зв/год; в суміжних приміщеннях доза опромінення не повинна перевищувати $2,8 \cdot 10^{-6}$ Зв/ год.

В залежності від часу роботи джерела іонізуючого випромінювання протягом тижня, сили струму в рентгенівській трубці, напруги на трубці, відстані від джерела до захисної огорожі товщина стінки зі свинцю може становити від 0,5 мм до 25 мм і, відповідно, до 620 мм з бетону ($\rho = 2,35$ кг / м³).

Спеціальними нормативними документами передбачені наступні особливі заходи безпеки при здійсненні радіаційного контролю:

1. При проведенні рентгенографічного та гамаграфічного контролю в зоні робіт не повинно бути сторонніх осіб. Ця зона обмежується радіусом 25 м від місця зйомки для рентгенографічного та 50 м для гамаграфічного методу. При цьому джерело випромінювання слід орієнтувати в такому напрямку, в якому найменш ймовірна присутність людей.

2. Ділянка проведення рентгенографічного та гамаграфічного контролю повинна бути обнесена з'ємною огорожею. У перекритих проходах і проїздах повинен бути вивішений знак радіаційної небезпеки (рис. 9.29).



Рис. 9.29. Знак радіаційної небезпеки

3. Оператор повинен бути одягнений:

при проведенні рентгенографічного контролю - в білий халат або комбінезон і в білий головний убір;

при проведенні гамаграфічного контролю - також і в спеціальний захисний фартух з свинцевим наповнювачем.

4. При проведенні контролю будь-якими радіаційними методами оператор повинен мати при собі лічильник Гейгера для контролю навколишнього радіаційного фону, а також індивідуальний нагрудний радіаційний дозиметр для фіксування накопиченої дози опромінення. У процесі експозиції оператор повинен стежити за навколишнім фоном і в разі

перевищення допустимого рівня віддалитися від джерела на безпечну відстань. Особи, у яких індивідуальним дозиметром зафіксовано перевищення допустимої дози опромінення, відсторонюються від участі у проведенні радіаційного контролю на термін, встановлюваний відповідними органами.

5. На зовнішній стороні дверей приміщень для зберігання джерел випромінювання, дверей рентген-камер для рентгеноскопічного контролю і на бортах спецавтомобілів для перевезення засобів гамаграфічного контролю повинен бути нанесений знак радіаційної небезпеки. На двері рентген-камери рекомендується змонтувати підсвічування знака із загорянням синхронно з включенням апарату. Спецавтомобіль повинен бути також забезпечений жовтим проблисківим маячком та спеціальним піддоном в днище салону для доставки несправних джерел до місця їх поховання (заклинювання відкритого затвора джерела гамма-випромінювання є радіаційною аварією, і таке джерело ремонту не підлягає).

6. Усі лабораторії, що здійснюють радіаційний контроль, повинні мати відповідну ліцензію та санітарно-гігієнічний паспорт (заключення), що видаються відповідними органами. Окремими паспортами повинні бути забезпечені рентген-камери і спецавтомобілі.

Переваги радіаційних методів - наочність результатів контролю і можливість виявлення дрібних округлих дефектів (пор), які ультразвуковою дефектоскопією визначаються ненадійно.

Крім високої небезпеки, радіаційні методи мають наступні **недоліки**:

1. Апаратура не схильна до портативності (вага найбільш легких апаратів в повному комплекті досягає 20 кг).

2. Апарати для рентгенівського контролю характеризуються великою витратою електроенергії; рентгенографічний і гамаграфічний методи - витратою плівки та засобів її хімічної обробки.

3. Неможливо виявити найбільш небезпечні площинні дефекти, так як вони практично не впливають на гальмування променевої енергії: сукупна густина залишається однаковою в області дефекту і поза ним (рис. 9.30).

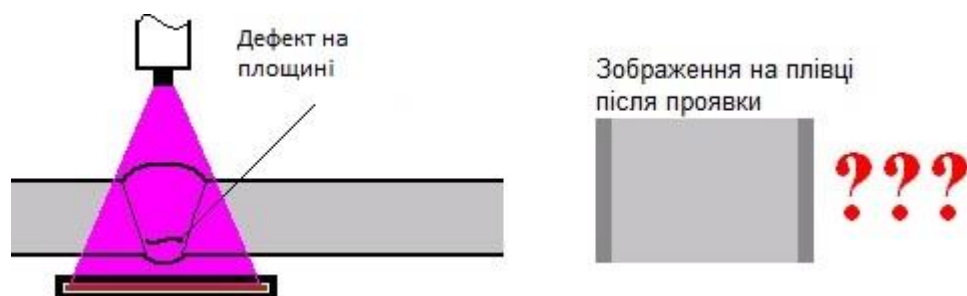


Рис. 9.30. Пропуск радіаційним методом існуючого дефекту

В кінці 1990-х рр. за результатами значної кількості міжнародних досліджень було встановлено, що достовірність радіаційного контролю метала в середньому становить лише 19%. У зв'язку з цим інтерес до радіаційних методів на даний час поступово знижується: більшість лабораторій воліє застосовувати ультразвуковий контроль, втричі більш доствірний і повністю безпечний.

РОЗДІЛ 10. АКУСТИЧНИЙ КОНТРОЛЬ

Коливання - це рух точки відносно деякого її середнього положення, що володіє повторюваністю, наприклад коливання маятника.

В акустиці зазвичай розглядають коливання точки середовища відносно положення, в якому точка перебувала у спокої.

Хвилі - коливальні рухи, що поширюються у просторі: коливання однієї точки передаються сусідній і т.д. У більшості видів неруйнівного контролю (радіаційному, оптичному, тепловому, радіохвильовому) використовуються електромагнітні коливання і хвилі. На відміну від них в акустичних видах використовуються **пружні механічні коливання і хвилі в твердому середовищі**.

10.1. Теоретичні основи методу

Пружність - властивість точок середовища повертатися до первісного стану після припинення впливу сили. Рідкі, газоподібні і тверді середовища відновлюють свій об'єм після стиснення або розрідження, але під дією сил інерції точки продовжують рухатися після досягнення первісного стану. В результаті стиснення переходить в розтягнення, а потім знову в стиск - виникають пружні коливання. Такий процес поширюється в просторі і утворює пружну хвилю (рис. 10.1, а, б).

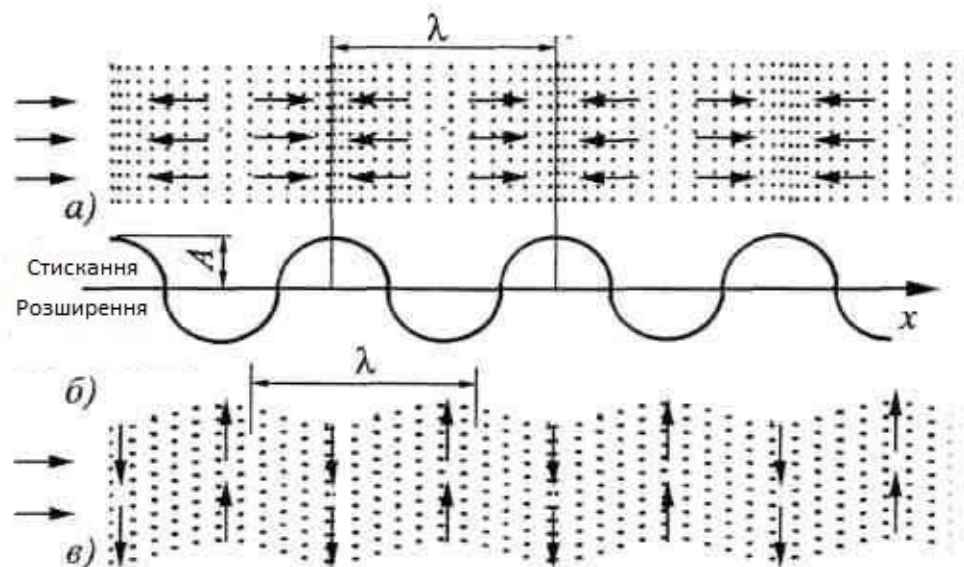


Рис. 10.1. Поздовжня (а) і поперечна (в) хвилі і хвильовий процес (б)

Зазвичай акустичні коливання відбуваються в області, де механічна напруга пропорційна деформації для твердого тіла або тиск пропорційний зміщенню для рідини, газу. Це область пружної взаємодії, їй відповідає **лінійна акустика**. Однак при великих відхиленнях від положення рівноваги

пропорційність порушується. Це область **нелінійної акустики**. Неруйнівному акустичному контролю, як правило, відповідає тільки область **лінійної акустики**.

Коливальний процес характеризується двома основними величинами: **частотою і амплітудою коливань**.

Частота - кількість коливань в секунду (с). Її позначають буквою f . Одне коливання в секунду - 1 герц (Гц). При УЗ-контролі зазвичай частоту коливань вимірюють у **мегагерцах** (МГц) - мільйонах коливань в секунду або **кілогерцах** (кГц) - тисячах герц. Залежно від частоти f пружні коливання і хвилі називають по-різному (табл. 9). При високочастотному акустичному контролі зазвичай застосовують коливання частотою 0,5-10 МГц, а при низькочастотному - частотою 0,015-0,1 МГц.

Таблиця 10.1. Діапазон частот пружних коливань

Назва коливань та хвиль	Якісне визначення	Діапазон частот, Гц	
		фізичний	умовний
Інфразвук	Нижче границі слухового діапазона людини	<16–25	<20
Звук	Діапазон слуха людини	від 16–25 до (15–20)·10 ³	20–20 000
Ультразвук	Вище границі слухового діапазона людини	від (15–20)·10 ³ до 10 ⁹	(20·10 ³)– 10 ⁹
Гіперзвук	Довжина хвилі менше довжини вільного пробігу молекул повітря	>10 ⁹	

Тривалість одного коливання називають **періодом** T . Його вимірюють у секундах або мікросекундах (мкс):

$$f = 1 / T.$$

Коливання від точки до точки середовища передаються з певною швидкістю - швидкістю поширення звуку c . Відстань, яку пробігає хвиля за один період коливань, називають довжиною хвилі λ :

$$\lambda = cT = c / f.$$

Швидкість поздовжніх звукових хвиль у багатьох металах приблизно дорівнює $6000 \text{ м/с} = 6 \text{ мм/мкс}$ (сталь, алюміній, титан). При частоті 6 МГц довжина такої хвилі становить близько 1 мм .

Швидкість поперечних хвиль, як правило, складає близько половини від швидкості поздовжніх, отже, довжина поперечних хвиль приблизно вдвічі коротша. Хвилі довжиною $\sim 1 \text{ мм}$ (точніше, $0,2\text{-}10 \text{ мм}$) зазвичай використовуються при високочастотному УЗ-контролі металів. Невелика довжина хвилі в порівнянні з розміром перетворювача дозволяє створити хвилю, що поширюється направлено, яку розглядають як пучок променів.

В акустиці часто застосовують поняття «**кругова (циклічна, кутова) частота**»

$$\omega = 2\pi f$$

і «**хвильове число**»

$$k = \frac{\omega}{c} = 2\pi\lambda$$

Амплітуда коливань - це найбільше відхилення точки від положення рівноваги. Крім того, пружні коливання характеризують різними іншими фізичними величинами. Для рідин і газів найчастіше використовують такі величини: **зміщення u** частинок з положення рівноваги, швидкість руху часток (**коливальну швидкість**) та **акустичний тиск p** .

Для твердих тіл зазвичай використовують **вектор зміщення \vec{u}** та **тензор акустичних напружень**. Надалі для спрощення формул коливання в твердому тілі будемо, як правило, характеризувати їх акустичним тиском, що не цілком правомірно, але істотно спрощує математичний апарат. Там, де виникає необхідність, враховуються особливості твердого тіла.

Будемо позначати амплітудні значення відповідними великими буквами, а в загальному випадку - літерою **A**. В УЗ-дефектоскопії зазвичай застосовують коливання з амплітудою зміщення $10^{-11}\text{-}10^{-4} \text{ мм}$. Акустична напруга, що виникає при цьому у сталі на частоті 2 МГц , досягає значень $10\text{-}10^8 \text{ Па}$ (паскаль).

Енергія акустичної (звукової) хвилі - це додаткова енергія, обумовлена наявністю цієї хвилі. Енергія акустичної хвилі в одиниці об'єму середовища називається **густиною (щільністю) звукової енергії**. Вона складається з кінетичної і потенціальної частин. Для плоскої біжучої звукової хвилі кінетична і потенціальна частини енергії рівні і густина повної енергії, виражена через амплітуду тиску P , визначається за формулою

$$E = \frac{P^2}{(\rho c^2)},$$

де ρ - густина середовища.

Інтенсивність (сила) звуку J - середня за часом енергія, що переноситься звуковою хвилею через одиничну площадку, перпендикулярну до напрямку поширення хвилі, за одиницю часу. Для періодичної звукової

хвилі усереднення проводиться або за проміжок часу, набагато більший у порівнянні з періодом, або за ціле число періодів. Для плоскої синусоїдальної бігучої хвилі інтенсивність, виражена через амплітуди тиску P і зміщення U , дорівнює

$$J = \frac{P^2}{(2\rho c)} = 0,5\rho c\omega^2 U^2.$$

Інтенсивність використовуваних при контролі хвиль зазвичай дуже мала: $< 10^{-5}$ Вт/м в місці випромінювання УЗ. При УЗ-контролі, як правило, реєструють не інтенсивність, а амплітуду хвиль.

В УЗ-контролі зазвичай вимірюють ослаблення амплітуди A' щодо амплітуди порушених в ОК коливаний A_0 . Для цього застосовують логарифмічні одиниці порівняння - **децибелі** (дБ). Вирази в децибелах, коли це необхідно підкреслити, будемо виділяти кутовими дужками $\langle \rangle$:

$$\left\langle \frac{A'}{A_0} \right\rangle = 20\lg\left(\frac{A'}{A_0}\right) = 10\lg\left(\frac{J'}{J_0}\right).$$

Оскільки $A' < A_0$, децибелі будуть негативними, однак в УЗ-дефектоскопії знак «-» прийнято опускати. На рис. 10.2 приведена номограма перекладу відносних одиниць в позитивні і негативні децибелі.



Рис. 10.2. Номограма перекладу відносних величин в децибелі.

Попарно використовують шкали I-I', II-II', III-III'

Приклад. Як відношення амплітуд $A'/A_0 = 0,045$ виражається в децибелах?

Знаходимо поділку 0,045 на шкалі II'. Проти нього на шкалі II розташовано $\left\langle \frac{A'}{A_0} \right\rangle = 26,9$ дБ зі знаком «-», але його не вказуємо.

Якщо втрати невеликі, то збуджений коливальний процес триває дуже довго. При відсутності втрат виникають **безперервні гармонійні** коливання, тобто такі, що змінюються за синусоїдальним законом. В УЗ-контролі зазвичай коливання збуджують і одразу ж (через кілька мікросекунд) намагаються погасити. В результаті спостерігається короткочасний хвильовий процес - **імпульс**.

Одним з параметрів коливань і хвиль є їх **фаза**. Вона характеризує стан коливального процесу в певний момент часу. Якщо коливання безперервні, то фаза коливань і саме коливання повторюється через кожен період. Для імпульсів сувора повторюваність параметрів коливань через період відсутня. Кажуть, що дві безперервні гармонічні хвилі знаходяться в протифазі, якщо їх фази відрізняються на пів-періода. Якщо на яку-небудь точку діють дві такі хвилі з однаковими амплітудами, крапка не коливається, а якщо фази цих хвиль збігаються, амплітуда коливань збільшується в 2 рази. Явище накладання хвиль з урахуванням їх фази називають **інтерференцією**.

10.2. Методи акустичного контролю

З усіх видів неруйнівного контролю акустичний - найбільш «багатий» за кількістю методів. Класифікація цих методів наведена в табл. 10.2, їх опис - в табл. 10.3.

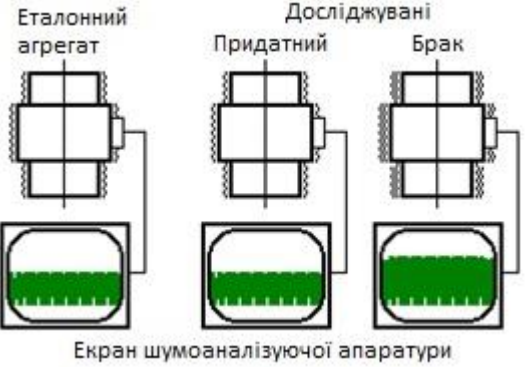
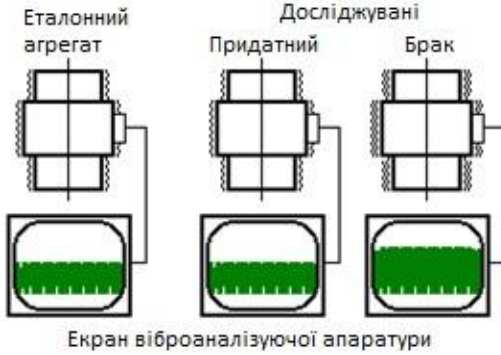
Таблиця 10.2. Методи акустичного контролю

Активні								Пасивні											
Ультразвукові методи бігучих хвиль						Спектральні		Імпедансний	Акустико-емісійний	Спектральні									
Заснова ні на проход- женні		Комбіно- вані		Засновані на відбиванні		Вимушених коливань	Вільних коливань												
Тіньовий амплітудний	Тіньовий часовий	Велосиметричний	Дзеркально-тіньовий	Ехо- тіньовий	Ехо-наскрізний	Ех-ометод	Ехо-дзеркальний метод	Дельта-метод	Дифракційно-часовий	Реверберацийний	Товщинометрія	Локальний	Інтегральний	Локальний	Інтегральний	Імпедансний	Акустико-емісійний	Шумодіагностичний	Вібродіагностичний

Пасивні методи - методи контролю, при яких не потрібно внесення в матеріал енергії даного виду (дефект сам проявляє себе її (енергії) випромінюванням).

Активні методи - методи контролю, при яких в матеріал вноситься енергія даного виду і про стан матеріалу судять по явищам, що відбуваються з цією енергією.

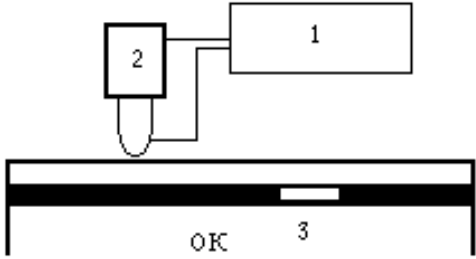
Таблиця 10.3. Короткий опис методів акустичного контролю

Ме тод	Схема контролю	Опис
Пасивні методи Спектральні методи		
Шумодіагностичний (варіант)		<p>На працюючих однотипних агрегатах вимірюють амплітудно-частотні характеристики шумів, які порівнюють з такими ж для еталонного (завідомо бездефектного) агрегату. У разі кардинальної відмінності від характеристик еталона агрегат виводять з експлуатації</p>
Вібродіагностичний		<p>На працюючих однотипних агрегатах вимірюють характеристики активності вібрації, які порівнюють з такими ж для еталонного (завідомо бездефектного) агрегату. У разі кардинальної відмінності від характеристик еталона агрегат виводять з експлуатації</p>

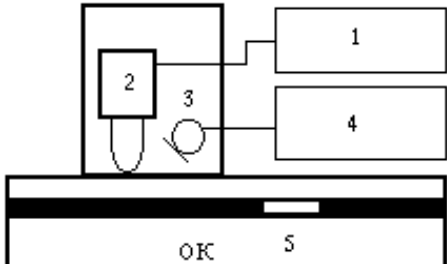
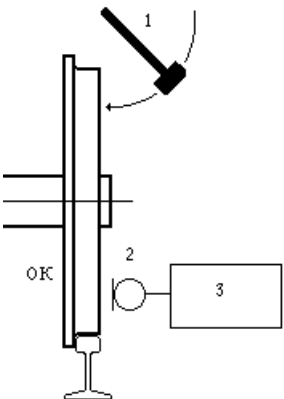
Акустико-емісійний

Варіант		<p>Об'єкт контролю піддають механічній нарузі (наприклад, у сосуді створюють внутрішній тиск). При цьому тріщини, що розвиваються, збільшуються скачками. При кожному акті збільшення (скачку) від венця тріщини в матеріал випромінюється імпульс акустичної енергії («щелчок», емісія). Такі імпульси сприймаються і аналізуються спеціальною апаратурою</p>
---------	---	--

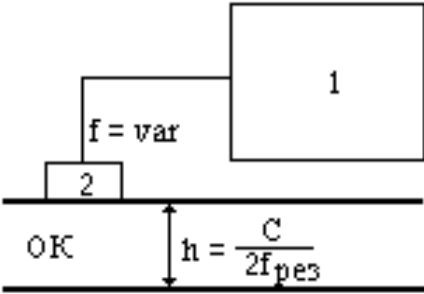
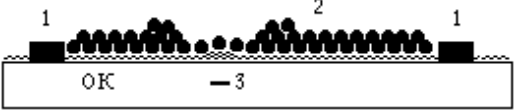
Активні методи Імпедансний метод

Варіант		<p>Прилад 1 збуджує безперервні акустичні коливання у випромінюючій п'єзопластині, розташованій зверху датчика 2. Приймаюча п'єзопластина розташована знизу датчика і розділена з випромінюючою сталевим стрижнем. Якщо шаруватий ОК якісно склеєний, то в контакті наконечника з поверхнею ОК він добре демпфує (загальмовує) приймальну п'єзопластину, і велика частка звукової енергії в ній змушена переходити в електричну. Якщо під датчиком дефект 3 (непроклей), то в цій зоні імпеданс ОК (опір коливанням) менше, демпфування слабше і амплітуда електросигналу на приймальній пластині нижче.</p>
---------	---	--

Спектральні методи вільних коливань

Локальний		<p>Використовують для контролю багат шарових неметалевих і композитних матеріалів. Вібратором 2 до точки об'єкта контролю прикладають коливання, що виробляються генератором 1. Коливання у відповідь (відбиті) приймають мікрофоном 3. Індикатор 4 покаже різку зміну коливань при розташуванні вібратора над дефектом 5</p>
Інтегральний (варіант)		<p>Об'єкт контролю (наприклад, залізничне колесо) піддають удару спеціальним молотком 1. Звук у відповідь приймають мікрофоном 2 і за допомогою спеціальної апаратури 3 аналізують його частотний спектр. За характером спектра судять про наявність або відсутність дефектів в ОК</p>

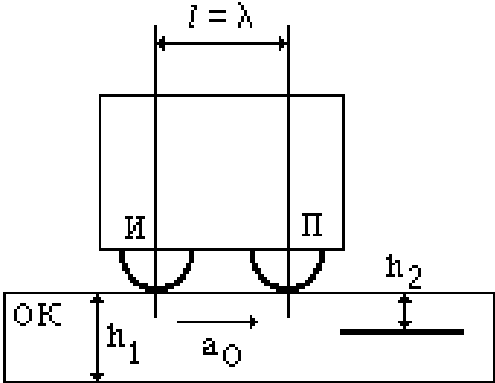
Спектральні методи вимушених коливань

<p>Локальний резонансний (резонансна товщинометрія)</p>		<p>Товщиномір 1 посилає на перетворювач 2 коливання змінної частоти f. Коли частота досягає такого значення, при якому довжина хвилі в ОК $\lambda = \frac{c}{f} = 2h$, об'єкт входить в активний резонанс. Це значення частоти (резонансне) фіксується, і по ньому прилад визначає товщину h ОК (c - швидкість звуку в ОК)</p>
<p>Інтегральний резонансний</p>		<p>Значну ділянку поверхні ОК піддають безперервним коливанням за допомогою вібраторів 1 і покривають алюмінієвою пудрою 2. В зоні дефекту 3 внаслідок резонансу коливання більш активні, і тому осідання пудри менше</p>

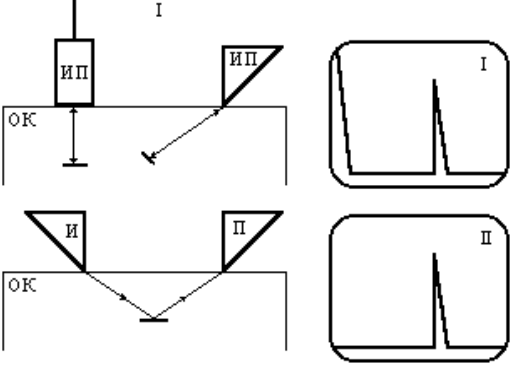
Ультразвукові методи біжучих хвиль

Методи проходження

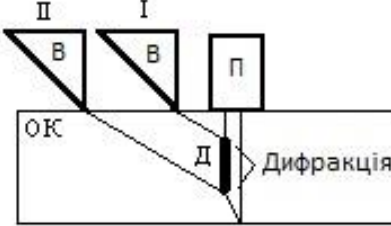
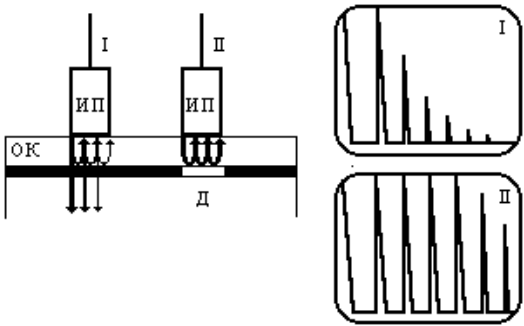
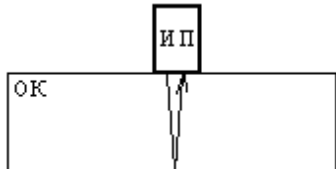
Тіньовий амплітудний		<p>Імпульсні або неперервні ультразвукові хвилі пропускають скрізь плоский ОК від випромінювача (И) до приймача (П). Якщо між И та П дефектів немає, то хвилі проходять безперешкодно, і на приймачі – сигнал великої амплітуди (варіант I). Малий дефект (Д) відтіняє частину потоку, і амплітуда спадає (варіант II). Великий дефект повністю перекриває потік, обнуляючи сигнал на приймачі (варіант III). Глибина залягання і розміри дефекту апаратурно не оцінюються. Необхідний двосторонній доступ до ОК</p>
Тіньовий часовий		<p>Імпульси ультразвукових хвиль пропускають скрізь плоский ОК від випромінювача И до приймача П. Якщо між И та П є дефект Д середньої величини, він відтіняє частину потоку, а бокові промені, що відхиляються, падають на його край, де зазнають дифракції. Попадаючи в приймач дещо пізніше прямого потоку 1, дифрагмовані промені 2 утворюють окремий слабкий сигнал. За різницею часу приходу сигналів судять про розміри дефекту. Глибина залягання не визначається. Необхідний двосторонній доступ до ОК</p>

Велосиметричний (варіант)		<p>Точкові випромінювач і приймач жорстко скріплені. Випромінювач збуджує в плоскому ОК вигибні (изгибные) хвилі Лемба моди a_0. Дистанція між осями И та П приблизно дорівнює довжині хвилі. Оскільки фазова швидкість хвиль Лемба залежить від товщини цілого шару, а дефект ділить цю товщину, то в дефектній зоні фазова швидкість зменшується і фаза сигналу на прийомі зсувається відносно фази на випромінюванні. Зсув фаз вказує на дефект.</p>
---------------------------	---	--

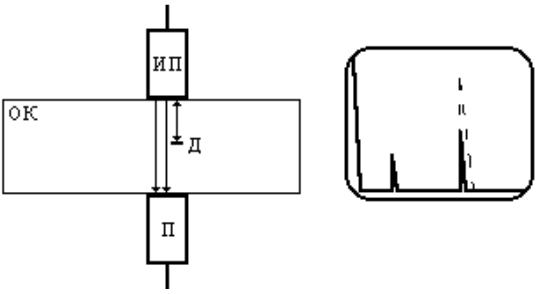
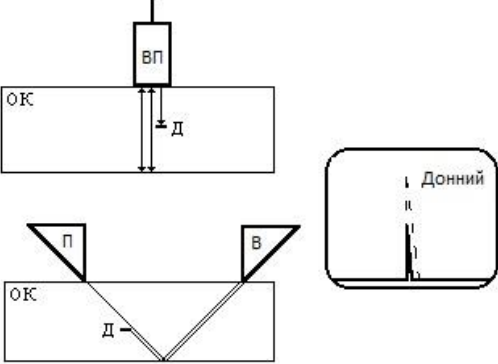
Методи відбивання

Ехометод		<p>В сумісному (совмещенном) 1 або роздільному 2 режимі роботи апаратури імпульс ультразвукових хвиль посилається в ОК. Якщо на його шляху зустрічається дефект, то імпульс частково відбивається від нього і повертається до перетворювача, створюючи сигнал на прийомі (ехосигнал). В роздільному режимі зображення зондуючого імпульсу (того, що посилається) на екрані вудсутнє.</p>
----------	---	--

Ехо-дзеркальний метод («тандем»)		<p>Призначений для оцінки форми і розмірів заздалегідь виявленого внутрішнього дефекту в плоскому об'єкті. В роздільно-суміщеному режимі апаратури дефект опромінюється імпульсами ультразвукових хвиль. Якщо відлуння в ИП лише трохи перевищує відлуння в П, і обидва сигнали середньої амплітуди (варіант I), припускають круглу форму дефекту. Якщо сигнал в ИП потужний, а в П відсутній (варіант II), припускають плоску форму і похилу орієнтацію. Якщо не вдається отримати відлуння обома перетворювачами (варіант III), припускають горизонтальну плоску форму. Якщо відлуння в П вище, ніж в ИП (варіант IV), то дефект плоский вертикальний. Розводячи і зближуючи ИП і П, за дистанцією між ними в позиціях пропадання сигналів можна оцінити висоту дефекту</p>
Дельта-метод		<p>Застосовується для оцінки висоти заздалегідь виявлених внутрішніх дефектів. У роздільному режимі роботи апаратури імпульс ультразвукових хвиль надсилається в ОК так, що опромінюється верхній край дефекту (позиції I). За дифрагованим ехосигналом визначають глибину залягання верхнього краю. Потім, розсуваючи И і П, знаходять позицію опромінення нижнього краю (II). Різниця показів глибини є висотою дефекту</p>

Дифракційно-часовий		<p>Застосовується аналогічно дельта-методу, але прийом дифрагованих сигналів від країв дефекту здійснюється прямим датчиком, встановленим над дефектом, у тому числі з використанням відбивання від протилежної поверхні ОК</p>
Ревербераційний		<p>У суміщеному режимі роботи апаратури імпульс ультразвукових хвиль надсилається в шаруватий (клеєний) ОК. Якщо склейка якісна (І), то основна частина імпульсу йде через клей, а мала частка відбивається назад. На поверхні ОК частина цієї частки йде в ИП, утворюючи перший пік, а частина знову заглиблюється в ОК, і з нею відбувається те ж саме. Так як основна частка завжди добре проходить углиб ОК, то реверберації у верхньому шарі швидко слабшають і на екрані амплітуда піків спадна. Дефект (Д) типу «непроклей» перешкоджає уходу сигналу (ІІ), і в цьому випадку реверберації в першому шарі потужні</p>
Товщинометрія		<p>Товщиномір вимірює час t пробігу сигналу до протилежної поверхні ОК і назад і визначає товщину ОК як $h = 0,5C t$, де C - відома швидкість звуку в даному матеріалі</p>

Комбіновані методи

ЕХО-ТІНЬОВИЙ		<p>В роздільно-суміщеному режимі апаратури імпульси ультразвукових хвиль надсилають в ОК. Якщо на тракті є дефект, то імпульс частково відбивається від нього в суміщений перетворювач (ИП) як ехосигнал. Окремим приймачем (П) оцінюють спад амплітуди наскрізного сигналу, спричинений дефектом. Володіє якостями ехометоду + підтвердження дефекту тіньовим принципом, але потребує двостороннього доступу до ОК</p>
Дзеркально-тіньовий		<p>У суміщеному (прямий ИП) або роздільному (похилі И та П) режимі апаратури імпульси ультразвукових хвиль посилають в ОК. Якщо на тракті є дефект, то він перекриває шлях, викликаючи падіння донного сигналу. За падінням донного сигналу судять про наявність і величину дефекту. Необхідний односторонній доступ до ОК, при похилому - виявлення дефектів будь-якої форми і орієнтації. Не дає глибину залягання дефекту</p>

Ехо-наскрізний		<p>Застосовується тільки в металургійній промисловості на виході ліній прокату листів. В імерсійній ванні (контактна рідина - веретенне масло) лист на вальцях прокатується між рядами (матрицями) із суміщених (ИП) і додаткових прийомних (П) перетворювачів. При нормальному стані листа (варіант I) спостерігається строго впорядковане розташування відлуння (еха) від границі верхнього шару рідини і ОК (1), від границі ОК і нижнього шару рідини (2) і наскрізного сигналу (3). Варіанти II-IV показують зсув сигналів при попаданні в область контролю локальних уточнень (утонений). Якщо в області контролю виявляється розшарування або захід (закат) (варіант V), то між 1-м і 2-м сигналами з'являється потужне відлуння від нього (4), а сигнали 2 і 3 слабшають аж до обнулення. Ряди ИП і П вишукуються по всій ширині аркуша. Метод вимагає спеціальної багатоканальної апаратури і застосовується тільки в автоматичному режимі</p>
----------------	--	---

Спектральні методи (серед пасивних - шумодіагностичний і вібродіагностичний; серед активних - методи вільних і вимушених коливань) засновані на аналізі параметрів безперервних коливань, які не переміщуються по об'єкту.

Методи біжучих хвиль засновані на аналізі параметрів безперервних (тінювий амплітудний) або імпульсних (інші) коливань (хвиль), що переміщуються по об'єкту.

Шумодіагностичний метод застосовується не тільки на динамічно працюючих агрегатах, а й з метою течопошуку на трубопроводах, посудинах

і резервуарах. Течі виявляються по шуму, створюваному тертям, витекаючого через дефект середовища про його краю.

Вібродіагностичний метод використовується як обов'язковий при діагностиці компресорів газопровідних систем у металургійному виробництві.

Акустико-емісійний (АЕ) метод забезпечує виявлення дефектів, що розвиваються, за допомогою реєстрації та аналізу акустичних хвиль, що виникають в процесі пластичної деформації і росту тріщин в контрольованих об'єктах. Крім того, метод АЕ дозволяє виявити витікання робочого тіла (рідини або газу) через наскрізні отвори в контрольованому об'єкті. Зазначені властивості методу АЕ дають можливість формувати адекватну систему класифікації дефектів і критерії оцінки технічного стану об'єкта, засновані на реальному впливі дефекту на об'єкт.

Характерними особливостями методу АЕ, що визначають його можливості, параметри та області застосування, є наступні:

1. Метод АЕ забезпечує виявлення і реєстрацію лише дефектів, що розвиваються, що дозволяє класифікувати дефекти не за розмірами, а за ступенем їх небезпеки.

2. У виробничих умовах метод АЕ дозволяє виявити прирощення тріщини на десяті частки міліметра. Гранична чутливість акустико-емісійної апаратури за розрахунковими оцінками складає порядку $1 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^2$, що відповідає виявленню стрибка тріщини протяжністю 1 мкм на величину 1 мкм, що вказує на досить високу чутливість до зростаючих дефектів.

3. Властивість інтегральності методу АЕ забезпечує контроль всього об'єкта з використанням одного або декількох датчиків АЕ, нерухомо встановлених на поверхні об'єкту.

4. Метод АЕ дозволяє проводити контроль різних технологічних процесів та процесів зміни властивостей і стану матеріалів.

5. Положення і орієнтація дефекту не впливають на його виявляємість.

Метод АЕ може бути використаний для контролю об'єктів при їх виготовленні - в процесі приймальних випробувань, при періодичних технічних перевірках, в процесі експлуатації.

Метою АЕ- контролю є виявлення, визначення координат і стеження (моніторинг) за джерелами акустичної емісії, пов'язаними з несучільностями на поверхні або в об'ємі стінки сосуди, зварного з'єднання і виготовлених частин і компонентів. Джерела АЕ рекомендується при наявності технічної можливості оцінити іншими методами неруйнівного контролю. АЕ-метод може бути використаний також для оцінки швидкості розвитку дефекту в цілях завчасного припинення випробувань і запобігання руйнування виробу. Реєстрація АЕ дозволяє визначити утворення свищів, наскрізних тріщин, протікань в ущільненнях, заглушках, арматурі і фланцевих з'єднаннях.

АЕ-контроль технічного стану обстежуваних об'єктів проводиться тільки при створенні в конструкції напруженого стану, що ініціює в матеріалі об'єкта роботу джерел АЕ. Для цього об'єкт піддають навантаженню силою, тиском, температурним полем і т.д. Вибір виду навантаження визначається

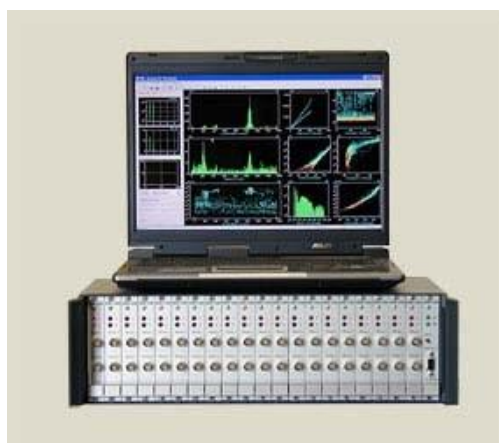
конструкцією об'єкта та умовами його роботи, характером випробувань. На рис. 10.3 наведені фотографії деяких сучасних акустико-емісійних систем.



а



б



в



г



д



е

Рис. 10.3. Сучасні акустико-емісійні системи:
а - «Малахит АС-12А» (Росія); б - «Малахит АС-14А» (Росія);
в - «Малахит АС-15А» (Росія); г - «Екситонів-4080» (Росія);
д - «АФ-44» (Молдова); е - «Лель» («А-Line 32D», США)

Імпедансний метод (від англ. impedance - опір) широко застосовується в аерокосмічній промисловості. Тільки цей метод дозволяє достовірно оцінити якість спайки надлегких стільникових (сотових) панелей, які застосовуються в конструкціях елементів крил літаків і корпусів супутників.

Локальний метод вільних коливань використовують у військовій промисловості для перевірки якості приєднання звукопоглинаючих покриттів на корпусах підводних човнів.

Застосування **інтегрального методу вільних коливань** пасажирів залізничних поїздів можуть спостерігати під час стоянки на великих станціях.

Резонансні методи вимушених коливань на даний час практично не використовуються, оскільки завдання дефектоскопії та товщинометрії більш точно вирішують імпульсні ультразвукові методи.

Тіньовий амплітудний метод - найперший в історії виникнення ультразвукової дефектоскопії (був відкритий в 1928 р в Росії інженером С.Я. Соколовим). Використовується тільки при контролі великих виливків і поковок. Перевагами методу є те, що він може бути реалізований в простому безперервному режимі випромінювання ультразвуку, і те, що хвилі проходять товщину об'єкта лише в одну сторону (це знижує втрати їх амплітуди від загасання на великому зерні матеріалу об'єкта).

Недоліки тіньового амплітудного методу:

- вимагає двостороннього доступу до об'єкта із співвісним розташуванням випромінювача і приймача;

- не дозволяє визначати глибину залягання дефектів.

Тіньовий часовий метод є продуктом вдосконалення тіньового амплітудного методу із застосуванням імпульсного режиму. Він дозволяє не тільки виявити внутрішній дефект в поковці або литві, а й оцінити його розміри.

Велосиметричний метод (від англ. velocity - швидкість і грец. «метріко» - вимірюю), крім показаного варіанту, в іншому вигляді застосовується для оцінки якості (визначення марки) бетону. Об'єкт з бетону відомої товщини піддають прозвучуванню (прозвучиванню) за принципом тіньового методу, вимірюючи в ньому швидкість звуку. Для бетону характерна яскраво виражена пряма залежність швидкості звуку від його якості (дисперсійності). Тому метод знайшов застосування в будівництві.

Жоден з інших ультразвукових методів контролю на даний час не може зрівнятися за популярністю з **ехометодом**. Інформативність, мобільність, безпека, портативність, економічність і автономність електроживлення, достатність одностороннього доступу до об'єкта, а головне - більш висока достовірність контролю - ось ті якості, за яких цей метод значно виграє перед рентгеном. Якщо рентгену в найбільш потужному (рентгеноскопічному) варіанті доступні для контролю сталеві об'єкти не товще 80 мм, то для ультразвукового ехометоду цей розмір може вимірюватися метрами. Ехометод дозволяє не лише виявляти внутрішні дефекти, але й оцінювати їх

величину, відрізнити площинні дефекти від об'ємних, визначати глибину залягання.

Єдиний показник, за яким радіаційні методи мають пріоритет перед ультразвуковим ехометодом, - це ілюстративність результатів контролю. Але і ця проблема в акустиці сьогодні вирішується з використанням приладів, зображених на рис. 10.4. Наприклад, на рис. 10.4,в наведена фотографія сучасного ультразвукового дефектоскопа Х-32, побудованого на так званих фазованих (фазированных) акустичних решітках (ФАР) і показуючого приблизні образи виявляємих дефектів. Застосування ехометоду регламентується стандартами.



а



б



в

Рис. 10.4. Приклади ультразвукових дефектоскопів:
 а - цифроаналоговий ультразвуковий дефектоскоп «ЕРОСН LT»;
 б - виявлення подібним дефектоскопом моделі дефекта в сталевому зразку; в - ФАР-дефектоскоп «Х-32»

В даний час важко знайти таку галузь промисловості, де б не застосовувався ультразвуковий ехометод з метою оцінки якості зварних з'єднань, металевих і неметалевих деталей і елементів.

Ехо-дзеркальний метод раніше при контролі зварних з'єднань котлоагрегатів вважався як обов'язковий для оцінки форми і розмірів дефектів, заздалегідь виявлених ехометодом, але через негативний вплив габаритів датчиків він міг бути використаний тільки на об'єктах товщиною більше, ніж 40 мм. Зараз такі завдання успішно вирішуються за допомогою **діфракційно-часового та дельта-методу**.

Ревербераційний метод застосовується для перевірки якості міжметалевої адгезії в біметалах, наприклад, при діагностиці стану плакуючих (плакируючих) наплавлень на внутрішній поверхні варочних котлів папіровиробничого виробництва.

Ультразвукова товщинометрія (імпульсним ехометодом) – невід'ємна процедура при діагностуванні судин, трубопроводів, резервуарів, а також у суднобудівельному і судноремонтному виробництві. На об'єктах Укртехнагляду в більшості випадків задовольняє точність вимірювання $\pm 0,1$ мм, але деякі сучасні товщиномери (наприклад, ті, що випускаються німецькою фірмою «Крауткремер») дозволяють вимірювати товщини від 1 до 50 мм з точністю $\pm 0,001$ мм (рис. 10.5).



Рис. 10.5. Вимірювання товщини стінки труби ультразвуковим товщиноміром

Ехо-тіньовий метод застосовується як допоміжний при лабораторному контролі невеликих, але відповідальних деталей. Для нього необхідний спеціальний дефектоскоп з додатковим прийомним каналом.

Дзеркально-тіньовий метод використовується як додатковий (що підтверджує результати ехометоду) при контролі товстих зварних з'єднань котлоагрегатів і трубопроводів в електроенергетиці.

Ехо-наскрізний метод, зокрема, реалізований російсько-німецькою компанією «Нордінкрафт» у вигляді стаціонарної установки для контролю листового прокату на Череповецькому металургійному комбінаті (рис. 10.6).



Рис. 10.6. Установка «Нордінкрафт» для автоматичного контролю ехо-наскрізним методом листового прокату на Череповецькому металургійному комбінаті

Система автоматичного контролю передбачає повну відсутність оператора контролю на етапі розшифровки даних датчика, що істотно підвищує точність і достовірність контролю.

РОЗДІЛ 11. ТЕПЛОВИЙ КОНТРОЛЬ

11.1. Загальна характеристика теплового контролю

Тепловий вид неруйнівного контролю включає в себе методи інфрачервоної дефектоскопії та пірометрії.

Інфрачервона дефектоскопія знайшла застосування в цивільній промисловості лише наприкінці 1970-х рр. Метод заснований на тому, що в місцях дефектів металу підігрітого об'єкта або в зонах стоншування стінок трубопроводу з підігрітим середовищем тепло передається від внутрішньої до зовнішньої поверхні стінки дещо більшою мірою, ніж в оточуючих бездефектних зонах. Тепловізор перетворює картину теплового розподілу на поверхні об'єкту в відеозображення. Чутливість сучасних тепловізорів обчислюється десятими частками градуса.

Зовнішній вигляд деяких тепловідеокамер показаний на рис. 11.1. Всі прилади забезпечені лазерним покажчиком контрольованої зони.



Рис. 11.1. Сучасні моделі тепловізорів:

а - «SAT S-160»; б - «SAT S-280»; в - «SAT HY-6800»; г - «SAT G-90».

На сучасному етапі дистанційність інфрачервоного методу дефектоскопії характеризується задовільною достовірністю контролю об'єкта, нагрітого щодо навколишнього середовища на $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, з відстані до 50 м. Результати контролю в режимі реального часу записуються на магнітний або лазерний носій. Розподіл температури тепловипромінювання, яке сприймається, за шкалою Цельсія характеризується тонами і відтінками кольорового зображення на тепловідеокадрі.

На рис. 11.2 показаний процес обстеження тепловізором агрегату (електродвигуна), а на рис. 11.3 наведені деякі приклади термограмм - підсумкових документів інфрачервоної дефектоскопії об'єктів. З останнього прикладу видно, наскільки показові результати тепловідеозйомки навіть при контрасті температур між об'єктом і зовнішнім середовищем лише в $5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Інфрачервона дефектоскопія все більш широко застосовується при діагностиці котлоагрегатів, паропроводів, теплотрас, промислових витяжних

труб, об'єктів металургійного виробництва. Перевагами методу є дистанційність і можливість контролю об'єкта в процесі його експлуатації. Недолік - висока вартість апаратури.



Рис. 11.2. Процес обстеження тепловізором працюючого агрегату

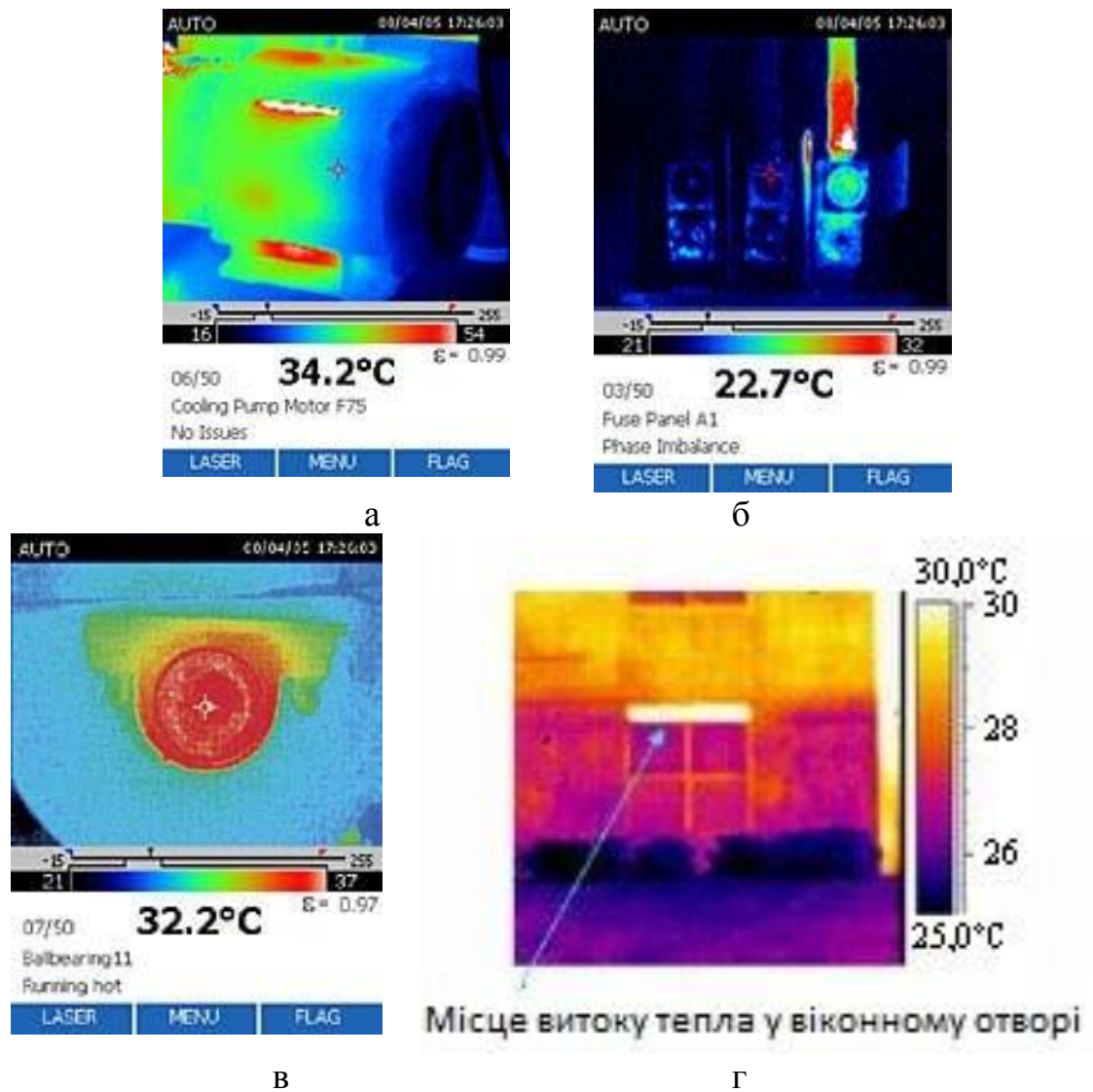


Рис. 11.3. Приклади термограмм:

- а - перегрів електродвигуна може вказувати на занижені номінальні характеристики, недостатнє охолодження або проблеми з електроживленням;
- б - різниця температур між електроклемами - на несиметричність навантаження, наявність гармонік, несправність компонентів, роз'ємів або проводів;
- в - висока температура шарикопідшипників є ранньою ознакою швидкої відмови обладнання;
- г - виявлено місце витоку тепла з житлової квартири

Пірометрія - дистанційне вимірювання температури об'єкта - застосовується в ливарному виробництві для оцінки температури розплавів і в теплоенергетиці. Виконується більш простими приладами - пірометрами (рис. 11.4).

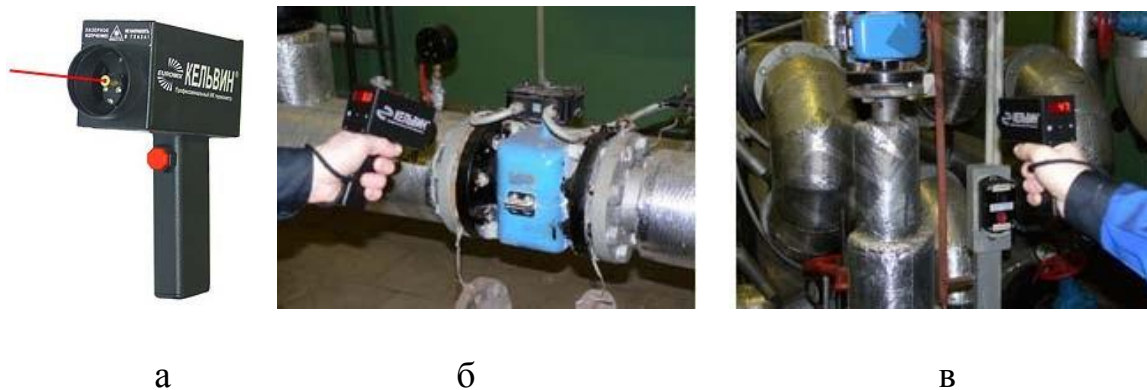


Рис. 11.4. Пірометр марки «Кельвін»:
а - зовнішній вигляд; б, в - вимірювання температури паропроводів

Переваги апаратних засобів пірометрії полягають у виведенні оператора із зони дії підвищеної температури.

СЛОВНИК ТЕРМІНІВ І ВИЗНАЧЕНЬ

Абсорбція - поглинання будь-якої речовини з навколишнього середовища всією масою поглинаючого тіла.

Адсорбція - поглинання речовини з газового або рідкого середовища поверхневим шаром адсорбенту.

Аустеніт (від імені нім. металурга Roberts-Austen) - структурна складова залізовуглецевих сплавів, твердий розчин вуглецю (до 2%).

Волосовини - результат деформації малих неметалевих включень і газових бульбашок. Ці дефекти мають вигляд тонких прямих ліній розмірами від часток міліметрів до декількох сантиметрів. Волосовини зустрічаються у всіх видах конструкційних сталей.

Волочіння - протяжка металу через отвір для одержання прутка або дроту.

Висадка - спосіб обробки металу, продавлювання його через отвір.

Гомогенізація - надання однорідності будови і складу металів, сплавів, емульсій тощо.

Гарячі тріщини - тріщини, які виникають в результаті руйнування закристилизованого скелета сплаву під дією термічних і усадочних напружень, особливо при швидкому твердінні сплаву, коли термічному стиску металу перешкоджає лінійна форма. Поверхня таких тріщин сильно окислена, в зламі має темний вигляд. При деформації злитка вони не заварюються, а, навпаки, розвиваються. Характерними ознаками гарячих тріщин є їх нерівні (рвані) краї і значна ширина.

Дендрити - мінеральні агрегати (іноді кристали) деревовидної форми. Утворюються в результаті швидкої кристалізації по тонких тріщинах або в в'язкому середовищі. Характерні для самородних елементів (золото, срібло, мідь), оксидів марганцю, льоду тощо.

Дефект - кожна окрема невідповідність продукції вимогам, що встановлені нормативною документацією (ГОСТ, ОСТ, ТУ тощо). До невідповідностей відносяться порушення суцільності матеріалів і деталей, неоднорідність складу матеріалу: наявність включень, зміна хімічного складу, наявність інших фаз матеріалу, відмінних від основної фази тощо. Дефектами є також будь-які відхилення параметрів матеріалів, деталей і виробів від заданих, таких як розміри, якість обробки поверхні, волого-і теплостійкість і ряд інших фізичних величин.

Заходи - дефекти прокату у вигляді задирок глибиною понад 1 мм, загорнених в протилежних напрямках, що виникають при надлишку металу у валках.

Зневуглецевування - процес, який спостерігається при нагріванні сталевих виробів в середовищі, що містить надлишок парів води, водню, вуглекислого газу, внаслідок чого відбувається вигорання вуглецю в приповерхневих шарах, що знижує міцність сталі; виникають тріщини глибиною 1-2,0 мм.

Кування (ковка) - спосіб обробки металу ударним впливом.

Ліквация - специфічний дефект литого металу, неоднорідність хімічного складу по скелету дендрита і об'єму зерна.

Люкс - одиниця освітленості в СІ.

Коксування - насичення поверхневих шарів вуглецем, що підвищує крихкість і схильність до тріщиноутворення, спостерігається при нагріванні сталевих виробів в середовищі з надлишковим вмістом оксиду вуглецю.

Навуглецевування - насичення поверхневих шарів вуглецем.

Недобраковка - неправильне віднесення до придатної партії виробів, що містять неприпустимі дефекти (F - ймовірність недобраковки).

Непровари - це дефект у вигляді місцевого несплавлення в зварному з'єднанні через неповне розплавлення кромки або поверхонь раніше виконаних валиків шва. Як правило, виникають через порушення режиму зварювання або технології підготовки поверхонь.

Непроклеї - дефект клейового з'єднання, що виникає в результаті неякісного очищення поверхонь, що склеюються або порушення режиму склеювання.

Непропай - основний дефект пайки, зазвичай виникає при недостатньо ретельній зачистці поверхонь, що спаюються, або через порушення температурного режиму.

Неслітини і неспаї - дефекти, що виникають в результаті переривань в струмені розплаву, мають вигляд тонких прошарків нез'єданого металу.

Оптична сила - величина, що характеризує заломлюючу здатність лінз.

Перебраковка - помилкова забраковка виробу.

Піщані раковини - порожнини в тілі виливка, повністю або частково заповнені формувальним (формовочним) матеріалом.

Плени - плівки на поверхні або всередині виливки, що складаються з оксидів.

Повний випромінювач - первинний світловий еталон, що відтворює одиниці світлових величин - сили світла (кандела), яскравості (ніт), світлового потоку (люмен) і т.д. Являє собою трубку заданого перетину з окису торію, занурену в посудину з платиною, що твердіє. Випромінювання, що виходить з отвору трубки при 2042 К, приймають за випромінювання абсолютно чорного тіла яскравістю $6 \cdot 10^5 \text{кд/м}^2$.

Пористість - місцеве скупчення газових бульбашок або усадочних раковин.

Пресування - спосіб обробки металу статичним впливом.

Пережоги або перегрів виникають при термічній обробці через недотримання температурного режиму, часу витримки, швидкості нагріву і охолодження деталі. Перегрів приводить до утворення грубозернистої структури оксидних і сульфідних виділень на границях зерен, пережог викликає утворення великого зерна і оплавлення границь зерен, що сприяє в подальшому руйнуванню металу.

Прижоги - локальні перегартовані ділянки.

Посічки - дрібні тріщини, що виникають через нерівномірності усадки при сушінні і випалі виробу.

Прищі - дрібні здуття в матеріалі на глибині 1-2 мм, які утворюються при згорянні органічних домішок в кінці випалу і початку охолодження.

Бульбашки - дрібні і великі здуття на поверхні кераміки, що виникають під дією газоподібних продуктів розкладу оксиду заліза або сульфідів при температурі, коли в матеріалі вже утворилася в'язка склоподібна фаза, яка перешкоджає виділенню газів.

Риски - дефекти у вигляді відкритих подряпин глибиною 0,2- 0,5 мм, що виникають в результаті попадання дрібних частинок на поверхню прокату.

Рихлоти - місцеве скупчення дрібних усадочних раковин при крупнозернистій структурі металу.

Свищі - великі пори, що утворюються при зварюванні в середовищі вуглекислого газу, а в деяких випадках і під флюсом, на великих струмах. Розміри внутрішніх пір коливаються від 0,1 до 2-3 мм в діаметрі, а іноді і більше. Пори, що виходять на поверхню, можуть мати і великі розміри. Так звані червеутворені пори мають довжину до декількох сантиметрів.

Сколювальні тріщини - тріщини, які виникають на поверхні деталей через малу пластичність вихідних матеріалів при холодному об'ємному штампуванні і поширюються під кутом 45° до напрямку діючого зусилля.

Термічні тріщини - зазвичай добре видимі глибокі розриви поверхні виливки. Причина виникнення - високі температурні напруження розтягу, що збігаються за знаком із залишковими напруженнями. Поверхня зламу розкритої тріщини - дрібнозерниста окислена.

Усадкові раковини - це порівняно великі відкриті або закриті порожнини довільної форми з грубою шероховатою, іноді окисленою поверхнею, що знаходяться в тілі виливка. Усадкові раковини розташовані зазвичай в потовщених місцях виливки, де метал твердне в останню чергу.

Флокеноподібні дефекти з'являються найбільш часто в середньовуглецевих і середньолегованих сталях при підвищеному вмісті в них водню, зазвичай в центральній зоні кованих або катаних заготовок великих перетинів. Флокени мають вигляд тонких звивистих тріщин, що представляють собою в зламі плями з поверхнею характерного сріблястого кольору, округлої форми.

Холодні тріщини виникають під дією термічних і усадочних напруг, в результаті різної швидкості охолодження різних ділянок виливки. Ці тріщини мають світлу, неокислену поверхню і можуть заварюватися при деформації злитка.

Колір - світловий тон. Різні довжини хвиль світла збуджують різні кольорові відчуття. Довжина хвилі 380 нм сприймається як фіолетовий колір, 470 нм - синій, 480 нм - блакитний, 520 нм - зелений, 580 нм - жовтий, 600 нм - помаранчевий, 640 нм - червоний, 700 нм - пурпурний.

Шлакові раковини - порожнини, заповнені шлаком.

Штапування - кування або пресування в штамп-форму.

ЛІТЕРАТУРА

1. Алешин Н.П., Щербинский В.Г. Радиационная, ультразвуковая и магнитная дефектоскопия металлоизделий. – М.: Высш. шк., 1991. – 271 с.
2. Розина М.В. и др. Неразрушающий контроль в судостроении: Справ. дефектоскописта / М.В. Розина, Л.М. Яблоник, В.Д.Васильев. – Л.: Судостроение, 1982. – 152 с.
3. Неразрушающие испытания: Справ. / Под ред. Р. Мак-Мастера. Кн.1. – М. – Л.: Энергия, 1965. – 504 с.
4. Новокщенова С.М. Дефекты стали: Справ. – М.: Металлургия, 1984. – 200 с.
5. Белокур И.П. Дефектология и неразрушающий контроль. – Киев: Вища шк., 1990. – 207с.
6. Неразрушающий контроль металлов и изделий: Справ./Под ред. Г.С.Самойловича. – М.: Машиностроение, 1976. – 456 с.
7. Марков П.И. Волоконно-оптическая интроскопия. – М.:Машиностроение, 1987. – 286 с.
8. Белокур И.П., Коваленко В.А. Дефектоскопия материалов и изделий. – Киев: Тэхника, 1989. – 192 с.
9. Неразрушающий контроль. Россия. 1999-2000 гг.: Справ. / В.В. Ключев, Ф.Р.Соснин, С.В. Румянцев и др.; Под ред. В.В. Ключева. – М.: Машиностроение, 2001. – 616 с.
10. Адаменко А.А. Современные методы радиационной дефектоскопии. – Киев: Наук. думка, 1984. – 215 с.
11. Справочник по радиационной безопасности / В.Ф. Козлов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 191 с.
12. Вредные химические вещества. Радиоактивные вещества: Справ. изд. / Под ред. В.А. Филова. – Л.: Химия, 1990.– 463 с.
13. Яковлев С.Г. Методы и аппаратура магнитного и вихретокового контроля: Учеб. пособие.– СПб.: Изд-воСПБГЭТУ «ЛЭТИ», 2003. – 88 с.
14. Паврос С.К. Неразрушающий контроль изделий радиографическим методом.– СПб.: Изд-воСПБГЭТУ «ЛЭТИ», 2005. – 25 с.
15. Неразрушающий контроль : справ. : в 8 т. / под общ. ред. В. В. Ключева. – 2-е изд., испр. – М. : Машиностроение, 2008.
16. Ермолов, И. Н., Останин Ю.А. Методы и средства неразрушающего контроля качества : учеб. пособие для инж.-техн. спец. вузов / И. Н. Ермолов. – М. : Высш. шк., 1988. – 368 с.
17. Неразрушающий контроль и диагностика : справ. / В. В. Ключев, Р. Соснин, А. В. Ковалев [и др.]; под ред. В. В. Ключева. – 3-е изд., перераб. И доп. – М. : Машиностроение, 2005. – 656 с.
18. Методы неразрушающего контроля. Ч. 1. Неразрушающие методы контроля материалов и изделий : учеб. пособие / В. И. Афанасов, Н. И. Кашубский, А. А. Кузнецов [и др.]. – Красноярск : ИПК СФУ, 2009. – 104 с. –

(Методы неразрушающего контроля : УМКД № 1588-2008 / рук. творч. коллектива А. Ю. Смолин).

19. Методы неразрушающего контроля : методические указания к лабораторным работам / сост. : В. И. Афанасов, Н. И. Кашубский, А. А. Кузнецов, А. Ю. Смолин. – Красноярск : ИПК СФУ, 2009. – (Методы неразрушающего контроля : УМКД № 1588-2008 / рук. творч. коллектива А. Ю. Смолин).

20. Методы неразрушающего контроля : метод. указания по самостоятельной работе / сост. : В. И. Афанасов, Н. И. Кашубский, А. А. Кузнецов, А. Ю. Смолин. – Красноярск : ИПК СФУ, 2009. – 32 с. – (Методы неразрушающего контроля : УМКД № 1588-2008 / рук. творч. коллектива А. Ю. Смолин).

21. Методы дефектоскопии сварных соединений / под ред. В. Г. Щербинского. – М. : Машиностроение, 1987. – 360 с.

22. Выборнов, Б. Н. Ультразвуковая дефектоскопия / Б. Н. Выборнов. – 2-е изд. – М. : Металлургия, 1985. – 256 с.

23. Ермолов, И. Н. Теория и практика ультразвукового контроля / И. Н. Ермолов. – М. : Машиностроение, 1981. – 240 с.

24.. Матис, И. Г. Электроемкостные преобразователи для неразрушающего контроля / И. Г. Матис. – 2-е изд. – Рига : Знание, 1982. – 302 с.

25. Кучина, А. А. Оптические приборы для измерения шероховатости поверхности / А. А. Кучина. – Л. : Машиностроение, 1981. – 197 с.

26. Белокур, И. П. Дефектоскопия материалов и изделий / И. П. Белокур, В. А. Коваленко. – Киев : Техника, 1989. – 192 с.

27. Крылович, В. И. Ультразвуковые частотно-фазовые методы исследования и неразрушающий контроля / В. И. Крылович ; ред. А. Г. Шашков. – Минск : Наука и техника, 1985. – 175 с.