

Диха О. В., Рудик О. Ю.

КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ ПОКРИТТІВ



Навчальний посібник

Хмельницький 2021

УДК 621.793/.795:669.018

Д50

*Рекомендовано до друку Вченою радою
Хмельницького національного університету
як навчальний посібник для студентів ЗВО
(лист № 041/1415 від 04.12.2020)*

Рецензенти:

- Аулін В. В.** – д-р техн. наук, проф. кафедри експлуатації та ремонту машин Центральноросійського національного технічного університету (м. Кропивницький);
- Ляшук О. Л.** – д-р техн. наук, проф., зав. кафедри автомобілів Тернопільського національного технічного університету ім. Івана Пулюя;
- Гордєєв А. І.** – д-р техн. наук, проф. кафедри машинобудування Хмельницького національного університету

Диха О. В., Рудик О. Ю.

Д50

Контроль якості покриттів : навч. посіб. / О. В Диха, О. Ю. Рудик.
Хмельницький : ХНУ, 2021. 166 с.

ISBN 978-966-330-384-0

Наведені основні дефекти і фізико-хімічні властивості покриттів, подана оцінка їх механічних властивостей, класифікація методів контролю та технологічних випробувань.

Для студентів спеціальності 132 «Матеріалознавство» за ОПІ «Відновлення та технічний сервіс автомобілів» та викладачів, аспірантів і студентів інших спеціальностей при вивченні питань, пов'язаних з контролем якості покриттів.

УДК 621.793/.795:669.018

ISBN 978-966-330-384-0

© Диха О. В., Рудик О. Ю., 2021
© ХНУ, оригінал-макет, 2021

Якість продукції, що випускається на машинобудівних підприємствах, значною мірою залежить від кількості та якості вимірювань, за допомогою яких контролюються як технологічні параметри виробничих процесів, так і параметри, характеристики й властивості одержуваних виробів. У машинобудуванні до 15 % трудових витрат припадає на виконання лінійних і кутових вимірювань, які забезпечують якість, надійність і взаємозамінність виробів.

Точність вимірювань, нормування й контроль характеристик процесів і продукції за всіх часів були необхідні людині для її творчої діяльності. З розвитком промисловості й торгово-економічних зв'язків, світовому співтовариству потрібна була система, яка забезпечує одержання достовірних і за можливістю повних даних про стан матеріального світу.

Підвищення рівня надійності і збільшення ресурсу машин та інших об'єктів техніки можливо тільки за умови випуску продукції високої якості у всіх галузях машинобудування. Це вимагає безперервного вдосконалення технології виробництва і методів контролю якості покриттів. На сьогодні усе більшого поширення набуває стоцентний неруйнівний контроль покриттів на окремих етапах виробництва. Для забезпечення високої експлуатаційної надійності машин і механізмів велике значення має також періодичний контроль їх стану без демонтажу або з обмеженим розбиранням, який проводиться при обслуговуванні в експлуатації або при ремонті.

Висока якість машин, приладів, устаткування – основа успішної експлуатації, отримання великого економічного ефекту, конкурентоспроможності на світовому ринку. Тому комплекс глибоких знань і певних навичок в області контролю якості покриттів є необхідною складовою частиною професійної підготовки фахівців з машинобудування і, зокрема, матеріалознавства.

Навчальний посібник «Контроль якості покриттів» призначений для студентів спеціальності 132 «Матеріалознавство», які вивчають освітньо-професійну програму «Відновлення та технічний сервіс автомобілів».

Для успішного оволодіння дисципліною необхідно:

– використовувати базові методи аналізу речовин, матеріалів та відповідних процесів з коректною інтерпретацією результатів (ПРН 22);

– володіти методами забезпечення та контролю якості матеріалів (ПРН 23);

– уміти експериментувати та аналізувати дані (ПРН 9);

– обирати та застосовувати придатні типові методи досліджень (аналітичні, розрахункові, моделювальні, експериментальні тощо); правильно інтерпретувати результати таких досліджень та робити висновки (ПРН 19).

Мета дисципліни – професійна підготовка студентів спеціальності у галузі контролю якості покриттів.

Предмет дисципліни – руйнівні та неруйнівні методи контролю та методики визначення основних параметрів якості покриттів.

Завдання дисципліни – уміти визначати параметри якості покриттів; для визначення експлуатаційних характеристик деталей.

Результати навчання. Студент, який успішно завершив вивчення дисципліни, повинен уміло використовувати понятійний апарат; знати теоретичні засади руйнівних та неруйнівних методів контролю якості покриттів і методики визначення їх основних параметрів; уміти практично втілити отримані знання при визначенні параметрів якості покриттів із застосуванням комп'ютерних технологій, зокрема, SolidWorks Simulation.

1.1. Методи дослідження покриттів

Лабораторні методи дослідження захисних технологічних покриттів умовно розділяються на дві великі групи залежно від вирішуваних з їх допомогою задач. До першої групи відносяться методи дослідження, вживані при синтезі складів покриттів, туго плавких з'єднань, розробці і виборі оптимальних параметрів технології приготування і нанесення покриттів, а також при дослідженні високотемпературних процесів в матеріалах покриттів, на межах розділу контактуючих фаз, в поверхневих шарах сплавів і при вивченні механізму захисної дії покриттів, кінетики високотемпературних реакцій, дифузії, структури, змін хімічного складу і властивостей покриттів і сплавів під дією високої температури, корозійного навколишнього середовища, високошвидкісного газового потоку та інших зовнішніх чинників.

Друга група методів пов'язана з вибором покриттів стосовно конкретних умов їх експлуатації і з набором інформації про властивості покриттів для визначення їх відповідності вимогам, що пред'являються. У цій групі на перший план виступають методи випробувань, які дозволяють оцінити властивості покриттів, композицій «покриття – сплав» при експлуатаційних параметрах з метою забезпечення можливості розробки надійних рекомендацій по застосуванню покриттів і відповідної конструкторської і технологічної документації на виробі.

Не дивлячись на існування великого числа методів випробувань покриттів, об'єктивне кількісне оцінювання їх властивостей є достатньо важким завданням. Деякі методи, наприклад визначення міцності зчеплення, виявляються непридатними для порівняльних випробувань через принципові відмінності в складах, технології

отримання і властивостях випробовуваних об'єктів. Ряд лабораторних методів (випробування термостійкості, ерозійної стійкості, жаростійкості) не забезпечують відповідності між умовами і параметрами випробувань в лабораторії і експлуатаційними умовами роботи покриттів (швидкість нагрівання, склад газового середовища і т. п.).

Оцінка широкого спектра властивостей і поведінки матеріалів покриттів, композицій «покриття – сплав» можлива лише за умови використання в роботі найрізноманітніших методів. Чим більші методичні можливості дослідника, тим повніше інформація про покриття і вище надійність рекомендацій з їх застосування. Чим більше методів використовується для випробувань покриття, тим повніше розкривається перспектива його поведінки в різних умовах експлуатації, точніше визначається відповідність вимогам, що пред'являються, багатогранність яких важко реалізувати навіть за допомогою довершених лабораторних методів дослідження.

Роботи зі створення, дослідження, випробування та оцінювання якості покриттів проводять у певній послідовності:

- 1) використовують лабораторні методи дослідження матеріалів і покриттів;
- 2) застосовують методи випробувань і оцінювання властивостей перспективних композицій;
- 3) проводять стендові випробування;
- 4) здійснюють експлуатаційні випробування покриттів.

На третьому і четвертому етапах важливого значення набувають методи неруйнівного контролю якості покриттів.

Лабораторні методи дослідження і випробувань покриттів необхідні для отримання інформації про якість початкових матеріалів покриттів, встановлення залежностей властивостей і будови покриттів від їх складу, зовнішніх чинників, а також для отримання характеристик, необхідних конструкторам для розрахунків, вибору відповідного покриття, розробки конструкторської і технологічної документації.

Методи контролю початкових матеріалів включають визначення вологості, дисперсійний аналіз порошків, хімічний та рентгеноструктурний аналіз, дилатометрію, денситометрію.

До основних методів дослідження матеріалів покриттів відносять віскозиметрію, диференціальний термічний аналіз, петрографію, дилатометрію, хімічний аналіз, спектральний і мікрорентгено-спектральний аналізи, оптичну та електронну мікроскопію, рентгено-структурний та рентгенофазовий аналізи, інфрачервону спектро-

скопію, а також методи дослідження теплофізичних, хімічних, механічних, електричних та деяких інших властивостей.

Дослідження композицій «покриття – підкладка» проводяться з використанням методів визначення змочувальної здатності, міцності зчеплення (адгезії), корозійної стійкості, жароміцності тощо.

Проведення стендових, виробничих та експлуатаційних випробувань вимагає вибору критеріїв оцінювання покриттів, розробки відповідних методик стосовно конкретних випробувальних установок і умов роботи покриттів. Критеріями оцінювання можуть бути зміни зовнішнього вигляду покриття, втрата маси, наявність тріщин, сколів, випромінювальні характеристики (коефіцієнт чорноти, коефіцієнт віддзеркалення), електричні властивості, напруження при деформації металу, коефіцієнт тертя, стійкість інструменту, якість поверхні і точність заготовок, твердість, мікротвердість поверхневих шарів, механічні та антикорозійні властивості сплавів, що захищаються, працездатність, час роботи або число циклів при заданих параметрах (температура, швидкість газового потоку, тиск, різкі перепади температури і т.п.) навантаження виробів.

Для стендових і виробничих випробувань захисних технологічних покриттів використовуються молотові та пресові установки, вживані для гарячої обробки тиском металів і оснащені пристроями та приладами для контролю напруження, швидкості та ступеня деформації, температури заготовок або інструменту і т.п. Для отримання стабільних характеристик покриттів необхідно контролювати і додержувати технологічні параметри процесу їх нанесення.

1.2. Класифікація дефектів покриттів

Дефект – кожна окрема невідповідність продукції вимогам, встановленим нормативною документацією.

Класифікація дефектів за способом виявлення:

- явні (поверхневі – виявляють оком, візуально);
- приховані (виявляють спеціальними засобами).

Дефекти підрозділяють залежно від передбачених для контролю даного виробу правил, методів і засобів. До правил контролю відносять його розпорядок (кількість продукції, що перевіряється, час перевірки, її графік); до методів – технологію (способи, прийоми, послідовність операцій), обсяг (число контрольованих показників

або параметрів), точність. До засобів контролю відносять використовуване устаткування (стенди, випробувальні машини, оснащення), вимірювальну та апаратуру реєстрації, а також інструменти і прилади. Багато явних дефектів виявляють візуально при зовнішньому огляді. Проте якщо який-небудь дефект виявляють за допомогою приладів або інструментів (за умови, що це передбачено технічною документацією), то такий дефект відносять до категорії явних, не дивлячись на повну неможливість його виявлення без спеціальних технічних засобів і методів.

Так, до прикладу, виявлені відхилення точності верстата від стандартизованих норм точності на декілька мікрметрів неможливо виявити візуально. Мікрметри вимірюють тільки з використанням спеціальних високоточних інструментів і пристосувань. Порушення точності верстата – дефект, безумовно, явний, оскільки і норми точності, і методи, і засоби контролю регламентовані стандартами. Приховані дефекти найнебезпечніші, а їх пошук не передбачений нормативно-технічною документацією. Їх виявляють, як правило, після надходження продукції до споживача або при додаткових, не передбачених раніше перевірках, які проводять у зв'язку з виявленням явних дефектів.

Виявлені дефекти, залежно від можливого їх впливу на службові властивості деталі, класифікують на критичні; значні та малозначні. При класифікації враховують характер, розміри, місце розташування дефекту на деталі, особливості деталей і виробів, їх призначення, умови використання (експлуатації).

Критичний дефект – за наявності якого використання продукції за призначенням неможливе або виключається через невідповідність вимогам безпеки або надійності. Конструктори машин, які з досвіду знають, які критичні дефекти можливі при виробництві та експлуатації виробів, обов'язково вносять у стандарти і технічні умови вимоги про обов'язковий контроль і виявлення таких дефектів у кожній одиниці продукції на стадії виготовлення і періодичних перевірках наявності критичних дефектів на стадії експлуатації.

Значний дефект – який істотно впливає на використання продукції за призначенням і (або) на її довговічність, але не є критичним. Наприклад, недостатня твердість напрямних верстатів, через яку знижується їх довговічність, є типовим значним дефектом. Контроль значних дефектів здійснюють вибірково (тобто не на кожному виготовленому верстаті, а на верстаті з невеликої партії, що характеризує якість верстатів всієї партії).

Малозначний дефект – який не впливає на використання продукції за призначенням і на її надійність. Найчастіше це дефекти зовнішнього вигляду – результат недбалості зберігання і транспортування. Відсутність малозначних дефектів контролюють вибірково.

Для багатьох видів продукції наявність декількох малозначних дефектів може бути рівносильне одному значному, а то і критичному, оскільки продукція не може бути використана за призначенням. У машинобудуванні також існує класифікація, згідно з якою браковану продукцію підрозділяють на дефекти:

- **критичні** – мають один критичний дефект або сукупність значних і малозначних дефектів, еквівалентних критичному;
- **значні** – мають хоч би один значний дефект або сукупність малозначних дефектів, еквівалентних значному;
- **малозначні** – мають малозначні дефекти, за відсутності дефектів значних і критичних.

Класифікація дефектів за можливістю виправлення: поправні (ті, що усуваються); непоправні (неусувні).

Поправний дефект – усунення якого можливо і доцільно, **неусувний** – усунення якого технічно неможливо і недоцільно. Поправні та непоправні дефекти визначають стосовно умов виробництва і ремонту з урахуванням витрат та інших чинників. Наприклад, якщо в масовому виробництві пілососів виявлена партія виробів з малозначними дефектами корпусу, то простіше всього не ремонтувати дефектні корпуси, а замінити їх кондиційними. Адже ці деталі виготовляються на автоматизованих виробничих лініях, а ремонт не автоматизуєш. Тому легше виготовити нову деталь, ніж відремонтувати дефектну.

Системи забезпечення якості покриттів направлені на своєчасне виявлення і попередження дефектів. Цей принцип діє на всіх етапах життєвого циклу продукції – проектування, виготовлення, використання або експлуатація.

Якщо виріб має дефект, то це означає, що щонайменше один з показників його якості або один з параметрів вийшов за граничне значення, встановлене стандартами, або не виконано якунебудь вимогу стандартів або технічних умов. Тепер ми підійшли до явища, на попередження якого націлена вся система контролю якості. Це – брак, тобто продукція, передача якої споживачу не допускається через наявність дефектів. Брак, як і дефекти, підрозділяють на дві категорії: поправний брак (вироби з усуненими дефектами); непоправний брак (вироби з неусувними дефектами).

1.3. Групи дефектів залежно від етапу виникнення

Наведена класифікація дефектів буде неповною, якщо не врахувати етапи виникнення дефектів покриттів. Дефекти *залежно від етапу виникнення* підрозділяють на конструктивні; виробничі; експлуатаційні.

Конструктивні дефекти, як випливає з назви, народжуються на етапі конструювання машин, за конструкторською дошкою. Вони виникають, не дивлячись на достатньо складну і надійну систему контролю конструкторських документів – креслень, розрахунків, схем і т.д. Конструктивний дефект – наслідок помилок і прорахунків, допущених при конструюванні. До дефектів цього роду відносять неправильний вибір покриттів деталей машин. Наприклад, конструктор призначив покриття, яке неможливо одержати у цей період часу. На прохання відділу матеріально-технічного постачання конструктор вирішує заміну покриття на інше, що є на заводі. Проте нове покриття володіє недостатньою зносостійкістю порівняно із закладеним спочатку. Деталі виготовлені, машина зібрана, результати приймально-здавальних випробувань позитивні, але через деякий час – відмова унаслідок передчасного виходу з ладу (зносу) цієї деталі. Це приклад типового прихованого дефекту, у цьому випадку – конструктивного. Неправильне призначення покриттів при розрахунку і конструюванні машин зустрічається не так вже часто, частіше – на стадії виробництва, як у наведеному вище прикладі.

Виробничі дефекти виникають через порушення вимог технологічних регламентів, режимів обробки і контролю якості. Крім того, виробничі дефекти можуть виникати в результаті неправильно розроблених технологічних процесів.

Виробничі дефекти, які виникають через порушення або недосконалість технологічних процесів, контролюють і виявляють, як правило, на тому етапі виробництва, коли їх виникнення вірогідніше. Чим далі від місця виникнення виявляється виробничий дефект, тим дорожче він обходиться машинобудівникам.

Експлуатаційні – дефекти деталей, вузлів, агрегатів, машин у цілому, які виникають на стадії експлуатації машин в результаті зносу, корозії, втоми і т.д., а також неправильного технічного обслуговування або використання. Технічний стан машин у процесі експлуатації не залишається незмінним; він погіршується із збільшенням напруження. Через знос і пошкодження знижується працездатність, а отже, і надійність машин.

Дефекти лакофарбувальних покриттів: погана адгезія (зчеплюваність фарби з поверхнею деталі, що фарбується) – результат грубих порушень технологічного процесу фарбування. Якісне проведення операцій знежирення і ґрунтовки (підготовки поверхонь до фарбування) багато в чому визначає якість і міцність кінцевого шару.

Якість гальванічних покриттів (металізація) цілком залежить від строгого дотримання всіх технологічних вимог: підготовки поверхонь деталей до металізації; режимів температури і часу витримки в гальванічних ваннах; підтримка електродитів в повній відповідності з рецептурами. При порушенні технологічних вимог змінюється товщина шару металевого покриття, його суцільність, що може викликати корозію деталі (окиснення, іржу).

Об'єкти контролю якості покриттів: початкові матеріали (порошки, дріт, гази, лаки, фарби, електродити тощо); якість підготовки поверхонь під покриття (шорсткість поверхні, чистота); технологічний процес нанесення покриття; якість покриття (зовнішній вигляд, товщина, міцність зчеплення, пористість тощо); засоби технологічного оснащення; технологічна дисципліна.

1.4. Види і вплив зовнішніх дій на покриття

При нанесенні покриттів необхідно представляти основні чинники, які впливають на них в процесі експлуатації. Ці відомості необхідні при моделюванні зовнішніх дій як в процесі нанесення покриттів, так і при оцінюванні якості готової продукції. Завдання випробувальної техніки полягає в тому, щоб максимально наблизити умови випробувань до екстремальних умов експлуатації та кількісно визначити зміну в цих умовах основних властивостей, функцій і характеристик виробів, матеріалів і покриттів. Види впливових чинників та їх значення залежно від умов експлуатації встановлюють в стандартах і технічних умовах, а для новостворюваної продукції – в технічних завданнях на їх розробку. До чинників, які впливають на матеріали і покриття в процесі експлуатації, відносять механічні, кліматичні, біологічні, спеціальні середовища, іонізуючі та електромагнітні випромінювання (див. рис. 1.1).

Механічні дії є статичними, вібраційними і ударними навантаженнями, лінійними прискореннями і акустичним шумом. Вони викликають руйнування унаслідок розтягнення, стиснення, вигину, кручення, зрізу, втискування і втоми матеріалу виробів.

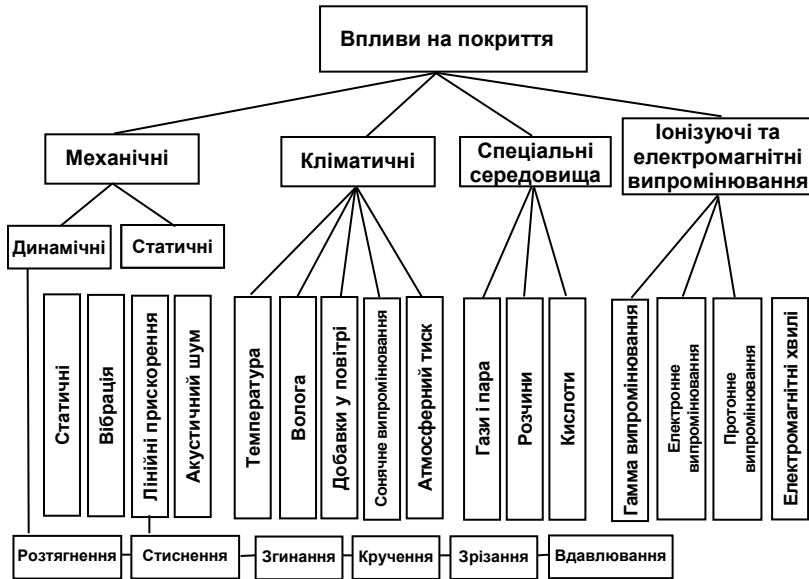


Рис. 1.1 – Види чинників, які впливають на вироби, матеріали і покриття в процесі експлуатації

Вироби, призначені для функціонування в умовах дії механічних навантажень, повинні бути міцними і стійкими при дії цих навантажень. Вироби, не призначені для функціонування в умовах дії механічних навантажень, повинні бути тільки міцними при дії цих навантажень.

Кліматичні дії. Основними кліматичними чинниками, що впливають на працездатність виробів, є температура, вологість, домішки в повітрі, сонячне випромінювання і атмосферний тиск.

Як і механічні, кліматичні чинники дії на практиці в більшості випадків діють одночасно, що викликає посилення їх руйнуючого ефекту. Ступінь зміни параметрів виробу тим значніше, чим більше число впливових кліматичних чинників, вище їх ефективність і час дії.

Біологічні дії в сильному ступені впливають на надійність і працездатність виробів, причому найбільше існує грибкових утворень, які відносяться до нижчих рослин, що не мають фотосинтезу. Оптимальними умовами розвитку цвілевих грибків є відносна вологість повітря більше 85 %, температура 20–30 °С і застій повітря.

Захист від біологічних чинників дії здійснюють хімічним і конструктивним методами; хімічні отрути і покриття використовують для захисту від цвілевих грибків і комах. Проте найбільш ефективний захист за допомогою конструктивних заходів, зокрема шляхом заміни матеріалів, схильних до утворення цвілі або їстівних для комах і гризунів, шляхом зміни внутрішнього клімату пристрою, зменшення відносної вологості повітря, створення надійніших захисних оболонок і т.д.

Спеціальні середовища – пари хімічних речовин, хімічні розчини (дезінфікуючі, дезактивувальні, дегазаційні), кислоти, гази та інші речовини, у присутності яких можуть працювати вироби. Вироби, призначені для роботи в спеціальних середовищах, повинні володіти підвищеною стійкістю до дії цих середовищ, і для перевірки її проводять відповідні випробування.

Для скорочення часу випробувань збільшують концентрацію хімічно активних компонентів середовища дії, підвищують температуру і відносну вологість. Випробувальне устаткування повинне забезпечувати задані значення концентрації, температури, тиску і відносної вологості спеціального середовища. Тривалість випробувань повинна відповідати тривалості дії на апаратуру спеціальних середовищ, а параметри випробувального режиму – кількісним і якісним характеристикам цих середовищ в умовах експлуатації. Для боротьби з дією спеціальних середовищ, передбачають спеціальні конструктивні виконання та спеціалізовані покриття які створюють умови експлуатації, при яких дія цих середовищ стає найменшою.

Іонізуючі та електромагнітні випромінювання. Сучасні вироби, особливо вироби космічної і ядерної техніки, піддаються дії іонізуючих випромінювань, які створюють при взаємодії з речовиною заряджені атоми і молекули – іони. Гамма-випромінювання, нейтронне, електронне, протонне випромінювання, а також альфа-частки можуть викликати пошкодження. Найбільшу небезпеку представляють потік нейтронів і гамма-випромінювання, вплив яких посилюється залежно від їх інтенсивності і часу дії. Безперервна проникаюча радіація викликає поступову необоротну зміну електричних, механічних, хімічних та інших властивостей покриттів.

Імпульсна радіація, що діє короткий час (10^{-7} – 10^{-3} с), призводить до незворотних змін електрофізичних властивостей виробу, а також через велику щільність створюваної іонізації, може викликати і оборотні зміни електричних характеристик матеріалів і покриттів. Великі дози опромінювання нейтронами підвищують твер-

дість вуглецевої сталі на 40 %, корозійностійкої – на 100 %, нікелю – на 140 %. В результаті опромінювання нейтронами опір розриву вуглецевих сталей збільшується на 10 %, корозійностійких – на 20 % і нікелю – на 40 %.

Зміна хімічних, механічних, електричних та інших властивостей матеріалів і виробів в умовах дії іонізуючих випромінювань вимагає створення спеціальної випробувальної техніки, розробки радіаційностійких матеріалів і покриттів, застосування спеціалізованої радіаційної технології та інших заходів.

Практика показує, що у більшості випадків матеріали і покриття зазнають механічних, кліматичних, біологічних та інших зовнішніх дій. Ці дії взаємно пов'язані одна з одною, і необхідно досліджувати результуючий ефект від їх сумісного впливу. Це найважче завдання і воно повинне також моделюватись на випробувальному устаткуванні.

1.5. Фізико-хімічні властивості покриттів

1.5.1. Структура і фазовий склад покриттів

Структуру покриттів вивчають за допомогою металографічного аналізу (рис. 1.2).

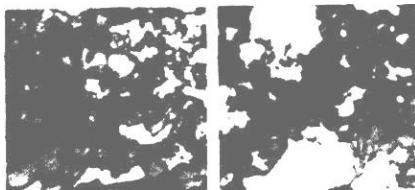


Рис. 1.2 – Мікроструктура покриття X20H80 – BN, напиленого аргон-водневим струменем з різною ентальпією

Металографічним методом на поперечних або малокутових шліфах за допомогою мікроскопів типу МІМ-8 виявляють наявність або відсутність змін мікроструктури, меж зерен біля поверхні та в поверхневих шарах металу в порівнянні з серцевиною зразків.

Специфічним завданням є відділення покриття від підкладки. Це завдання розв'язується шляхом повним або частковим видаленням матеріалу підкладки без пошкодження шару покриття. Металеві підкладки видаляють спочатку механічною обробкою на металорі-

зальних верстатах, а потім хімічною обробкою шляхом труення в розчинах кислот. Неметалічні пористі та волокнисті матеріали з підкладок зрізують.

Виготовлення шліфів включає шліфування, полірування, доведення до дзеркальної поверхні, травлення (хімічне, термічне) для виявлення структурних особливостей покриття. Шліф за допомогою смоли прикріплюють до скла полірованою стороною. Потім послідовним шліфуванням зворотної сторони (контроль здійснюється під мікроскопом) товщину шліфа поступово доводять до потрібної товщини (0,2–0,3 мм).

Виготовлення шліфів з пористих покриттів включає також просочення зразків у тридцятипроцентній фенольно-фурфурольній смолі або бакелітовим лаком в ацетоні. Зразки поміщають в розчин і витримують в бюксі з притертою кришкою 20–25 год. Витягують з розчину, сушать на повітрі, а потім в термостаті по 30 хв при температурах 60, 80, 120 і 160 °С. У такий спосіб вдається помітно підвищити міцність високопористих покриттів і матеріалів. Поверхню, яку передбачається аналізувати, необхідно відзначити перед виготовленням шліфа.

Дуже тонкі зразки покриттів доцільно склеювати між собою, щоб уникнути полемки. Для склеювання зразків покриттів можна використовувати епоксидну смолу ЕД-5 і поліетилен-поліамід як отверджувач. Склад, що містить 13 % отверджувача від маси смоли, скляною паличкою наносять на поверхню зразків, скріпляють їх і встановлюють на предметне скло для сушіння.

При виготовленні шліфів для вимірювання товщини покриттів особлива увага звертається на те, щоб не вийшов косий зріз, оскільки в останньому випадку замірятиметься не дійсна, а збільшена товщина. Для виготовлення якісних шліфів для петрографічного аналізу можна також застосувати наступну методику:

- вирізають зразок 5–15 мм (застосовують алмазні круги);
- цементують зразок в циліндричній оправці діаметром 20–40 мм і заввишки 10–20 мм так, щоб поверхня зразка, яку необхідно аналізувати, була поблизу торцевої поверхні цементуючої речовини (як цементуючу речовину можна використати акрилову або стероакрилову пасту; часто використовують епоксидні смоли);
- шліфують поверхню зразка в оправці на шліфувальних шкурках з дисперсністю частинок, яка зменшується (100, 50, 25, 14, 10 і 7 мкм) по 5–20 хв на кожній шкурці. Якість шліфування контролюють під мікроскопом 50^{\times} – 100^{\times} . Шліфування шкуркою можна

закінчувати і переходити на найдрібнішу, коли на поверхні шліфа є лише подряпини, відповідні грануляції зерен на шкурці. Якщо неможливо якісно обробити весь шліф, тоді вибирають і контролюють частину поверхні шліфа;

– після шліфування, проводять полірування на алмазних пастах, послідовно зменшуючи грануляцію (використовують пасту 20, 10, 5, 1 і 0,5 мкм). У багатьох випадках досить використовувати для завершення поліровки пасту 1 мкм. Контроль якості полірування здійснюють також під мікроскопом $200\times$ – $400\times$. Найретельніше полірування необхідно проводити на самій дрібнодисперсній основі з використовуваних паст;

– шліф промивають спиртом перед контролем на мікроскопі. Полірування закінчують, коли не видно слідів обробки і додатково вона не збільшує кількість і чіткість спостережуваних на шліфі деталей текстури.

У більшості випадків, окрім особливо твердих покриттів, полірування на грубозернистих алмазних пастах, за винятком найбільш дрібної, можна замінити полірковою на дрібнодисперсних корундових порошках грануляцією 20, 10, 5, 3 та 1 мкм, замішаних на машинному або високовакуумному маслі. При цьому вдається зменшити витрату дорогої алмазної пасту в 5–10 разів.

Через високу крихкість покриттів, особливо окисних, виготовлення якісних шліфів може бути досягнуте лише при ручній обробці. Для остаточного полірування використовують сукно і оксамит.

1.5.2. Пошаровий хімічний аналіз

Надійність результатів хімічного аналізу початкових матеріалів покриттів має виключно важливе значення при роботі з матеріалами високої чистоти, а також при використанні для отримання покриттів заданого хімічного і фазового складів. У цих випадках використовують методи хімічного аналізу матеріалів високої чистоти або розробляють спеціальні методики контролю хімічного складу покриттів, тугоплавких з'єднань.

З поверхні зразків діаметра 50–70 мм і довжиною 100–200 мм різцем знімають від 3 до 10–15 шарів стружки завтовшки 0,05 або 0,1 мм. Ефективність захисної дії покриттів оцінюють за наслідками хімічного аналізу на вміст в кожному шарі стружки легуючих елементів сплаву. Наприклад, сталеву стружку аналізують на зміст вуглецю, хрому, нікелю, молібдену, марганцю; стружку нікелевих сплавів – на зміст алюмінію, хрому, молібдену, ніобію за стандарт-

ними методиками. Для випробувань необхідні 2–3 зразки сплаву після нагрівання із захисним покриттям. Ще один зразок необхідний для проведення аналізу хімічного складу сплаву в початковому стані (за відсутності таких даних досліджуваної плавки) і зразок для аналізу сплаву після нагрівання без захисного покриття.

Аналіз складу і розподілу хімічних елементів на поверхні покриттів здійснюють за допомогою методів, заснованих на аналізі вторинних частинок, які виникають при бомбардуванні зразка первинними частинками. Як первинні і вторинні частинки використовуються фотони, електрони, позитивні і негативні іони. Вони проникають в поверхню досліджуваного матеріалу на величину в декілька ангстремів, яка і визначає чутливість методів. Найбільш розроблені наступні методи аналізу поверхні покриттів: фотоелектронна і електронна спектроскопія і мас-спектроскопія вторинних іонів (аналізатори типу «Куломатік»). Вони дозволяють оцінити чистоту матеріалу нанесеного покриття, його склад, ступінь і стан окиснення. Висока точність аналізу забезпечується повною автоматизацією процесу спалювання стружки з видачею результатів аналізу на світлове табло. На поперечних шліфах можна досліджувати ці властивості по товщині покриття.

1.5.3. Оцінювання товщини покриттів

Для оцінювання товщини покриттів (товщина декілька мкм), користуються непрямими методами. Після режимів нанесення покриттів, вимірюють швидкість осадження на зразках-свідках – шліфованих пластинках відомої товщини з матеріалу виробу, розташованих перпендикулярно або під деяким кутом до парового потоку і на різній відстані від нього. За часом протікання процесу осадження покриття на виріб, оцінюють його товщину. Якщо виріб правильної геометричної форми, то товщину покриття перевіряють вимірювальним інструментом. Кожен процес має свої особливості та характеристики, які можна оцінити візуально. При вакуумному нанесенні покриттів візуально оцінюють рівномірність (відсутність бризок і т.п.), суцільність, лущення, здуття, колір покриття тощо. Перегрів виробу в процесі напилювання можна визначити за запотіванням або розплавленням покриття.

Оцінка товщини покриттів може здійснюватися наступним методом: у вакуумну камеру поміщають одночасно сталевий зразок і скло, розташовуючи їх симетрично відносно випарника. Після нанесення металу у вакуумі, проводять вимірювання товщини покриття

на склі за допомогою подвійного мікроскопа Лінника МИС-11 або вертикального оптиметра ІКВ. Для вимірювання потрібно одержати різку межу (сходінку), висота якої рівна товщині напиленого шару. Межу «метал – скло» можна одержати, видаляючи зі скла частину напиленого шару лезом бритви або спеціально виготовленим різцем типу токарного відрізного. Напилений шар не повинен відшаруватися від скла, оскільки при цьому утворюється повітряний зазор, висота якого входить у вимірювану товщину. Цей метод дозволяє виміряти товщину покриття в різних точках зразка.

Середню товщину покриття визначають методом зважування зразка до і після напилання або шляхом зважування зразка з покриттям і того самого зразка після травлення металу покриття у відповідному розчині (наприклад, алюміній на сталі – в розчині їдкого натру). Товщина плівки розраховується за формулою:

$$h = \frac{P_2 - P_1}{S \cdot d}, \quad (1.1)$$

де P_1 – вага зразка без покриття; P_2 – вага зразка з покриттям; S – площа поверхні зразка; d – щільність матеріалу покриття.

Для визначення товщини вакуумних алюмінієвих і титанових покриттів на тонколистовій сталі можна скористатися методом травлення основи в розчині HNO_3 . Товщина плівок алюмінію і титану, що виходять при цьому, визначається оптиметром ІКВ.

Товщину цинкових, кадмієвих, мідних і нікелевих вакуумних покриттів можна визначити методами, передбаченими стандартами для відповідних гальванічних покриттів. Для неруйнівного контролю товщини покриттів на сталевих деталях застосовують прилади, засновані на оцінці сили відриву магніту від поверхні деталі, або які використовують ослаблення магнітного поля, що викликається покриттям з немагнітного металу (одним із таких приладів є товщиномір ІТП-1). Товщину покриття визначають за ступенем розтягнення динамометричної пружини, що забезпечує відрив магніту від деталі.

Для визначення товщини покриттів використовують також β -товщиноміри типу ВТП-1 і БТП-3, засновані на визначенні інтенсивності розсіяних β -променів, відбитих від вимірюваного шару. Приладами такого типу можна вимірювати покриття, у яких атомна вага відрізняється від атомної ваги основи не менше ніж на чотири атомних одиниці.

1.5.4. Адгезійна та когезійна міцність покриттів

При проведенні процесу нанесення покриттів на виріб необхідно забезпечити міцне зчеплення покриття з поверхнею виробу (адгезійну міцність) і міцність самого покриття (когезійну міцність). При поганій адгезії руйнування металу значно прискорюється: корозія починається в місці неміцного зчеплення і корозійне середовище проникає під покриття.

Адгезійна міцність залежить від наступних чинників:

- 1) стану (способу підготовки) напилуваної поверхні;
- 2) ступеня розвитку хімічної взаємодії напилуваного матеріалу з основою (технологічного режиму нанесення покриття і, в першу чергу, від температури підкладки);
- 3) напружень, які виникають на межі «напилений шар–основа»;
- 4) подальшої термічної обробки.

Висока адгезійна міцність можлива тільки в результаті хімічної взаємодії, при якій виникає перехідний шар між покриттям і основою.

Когезійна міцність покриттів залежить від наступних чинників:

- 1) фазового і хімічного складу напиленого шару і залишкових напружень у ньому;
- 2) розміру зерна напиленого шару;
- 3) пористості покриття: чим вона менше, тим міцність вище;
- 4) міцності зв'язку між напилюваними частинками. Щоб між напилюваними частинками була достатня міцність, необхідно забезпечити протікання процесів рекристалізацій. При проходженні рекристалізації на межі частинок, межі між частинками виявляються усередині рекристалізаційних зерен і це сприяє підвищенню міцності;
- 5) однорідності структури: чим вона вище, тим вище міцність.

1. Природа сил зчеплення. Передбачити величину сил зв'язку покриття з основою в загальному випадку не представляється можливим, оскільки в даний час наші знання про природу сил зчеплення досить обмежені.

Деякі дослідники вважають, що закріплення плівки здійснюється електричними силами і пов'язано з утворенням подвійного електричного шару. На думку інших, основну роль грають хімічні та сорбційні зв'язки. Висловлюється припущення, що у вакуумних плівок, які наносяться при кімнатній температурі, зчеплення здійснюється в основному електричними й сорбційними силами; у плівок, осаджених при підвищеній температурі, вже слід чекати посилення ролі хімічних зв'язків.

З досвіду гальванотехніки відомо, що на деякі метали, покриття з хорошою адгезією може бути нанесено лише при спеціальній попередній обробці. При електроосажденні для отримання хорошої адгезії необхідно, щоб покриття продовжувало відтворення структури і кристалічної решітки основного металу, або щоб іони, що розрядилися, розташовувалися в безпосередній близькості до ґраток основного металу (у полі сил молекулярного тяжіння), або, нарешті, щоб іони, що розрядилися, розташовувалися усередині ґраток основного металу з утворенням сплаву. Для досягнення цих умов наносять початковий шар (Сi, Ag, Sn) із спеціальних електролітів.

Якщо метал покритий шаром захисного оксиду, то для нанесення покриття з хорошою адгезією його поверхню спеціально активують. У протилежність цьому, на деяких металах спеціально створюється окисний шар. У деяких випадках для поліпшення адгезії застосовують подальшу термічну обробку.

Слід відмітити, що адгезія електролітичних покриттів значно вища, ніж покриттів, які наносяться металізацією розпилюванням на повітрі. В цьому випадку адгезія залежить від енергії удару рідкого металу, і досягти хорошого зчеплення без подальшої термічної обробки можна тільки на шорстких поверхнях. Для отримання відмінної адгезії в цих випадках необхідно, щоб розміри мікронерівностей поверхні відповідали розміру напилюваних частинок.

Більшість металів при нанесенні покриттів способом занурення в розплав утворюють сплави з основним металом, що у багатьох випадках забезпечує хорошу адгезію. Тонкі плівки, нанесені методом вакуумного осаждення, добре контактують з основою. Це доводиться тим, що вони точно обкреслюють всі дефекти і неоднорідності поверхні. При цьому слід відмітити, що плівки, одержані методом катодного розпилювання, мають набагато кращу адгезію порівняно з плівками, одержаними вакуумним випаровуванням. Головна відмінність між цими двома способами полягає в значенні кінетичної енергії атомів, які ударяють у поверхню.

Вважається також, що адгезія покриття до основного металу забезпечується переважно механічним зчепленням, тоді як сплав, взаємна дифузія і фізичний зв'язок ван-дер-ваальсовими силами слугують доповненням до механічного зчеплення. Це означає, що міцність зчеплення покриття з основою визначається величиною і характером шорсткості поверхні основного металу.

2. Методи визначення адгезії. При визначенні міцності зчеплення напилених покриттів необхідно оцінити міру достовірності

вибраних лабораторних методик випробувань, оскільки результати випробувань різними методами значно розрізняються.

Метод липкої стрічки. Полягає в накладенні на поверхню покриття спеціальної липкої стрічки з подальшим її відривом. Якщо стрічка відривається разом з покриттям, то адгезію вважають поганою. Цей метод має чисто якісний характер. Крім того, при хорошому зчепленні він абсолютно непридатний.

Випробування на стирання. Застосовуються для визначення опору стиранню плівки. Проте з таких вимірювань неможливо безпосередньо обчислити силу зчеплення.

Метод протягування навантаженої голки з хромистої сталі, що має гладко закруглений кінець. Навантаження на голку поступово збільшується до тих пір, поки не досягне критичної величини, при якій плівка відділяється і голка залишає чистий канал. Але при товщині, більшій 30 нм, необхідне навантаження не залежить від товщини плівки. Цей метод був застосований для оцінювання адгезії вакуумних плівок до скла. Основна перевага методу полягає у високій точності визначення критичного навантаження ($\pm 5\%$).

Випробування на зріз (зсув). Вважається, що ці випробування найбільшою мірою відповідають умовам експлуатації.

Випробування проводять з використанням зразка (рис. 1.3).

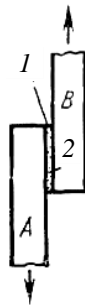


Рис. 1.3 – Випробування на міцність зчеплення покриття при зсуві для плоских склесних зразків: 1 – покриття; 2 – клей

Такий зразок одержується приклеюванням металевої пластини *B* до поверхні покриття з основним металом *A*.

Під час випробування визначають максимальне зусилля, при якому відбувається відділення покриття від основного металу. Шляхом ділення значення цього зусилля на площу приклеювання визначають міцність покриття на зріз.

Необхідно стежити за тим, щоб в процесі дії зрізуючого навантаження на основний метал і металеву пластину в робочій зоні зразка виникали чисті напруження зрізу.

Міцність зчеплення покриття визначають також шляхом випробування на зсув за схемою, наведеною на рис. 1.4.

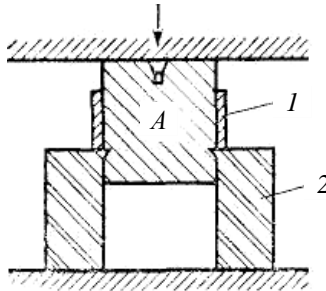


Рис. 1.4 – Випробування на міцність зчеплення покриття при зсуві для циліндричних зразків: 1 – покриття; 2 – матриця

На центральну частину поверхні циліндричного зразка А (основного металу) напилюють досліджуване покриття. Зразок без покриття входить по ковзній посадці в матрицю. Потім зразок з покриттям встановлюють в матриці так, щоб покриття спиралося на торцеву її поверхню. Міцність зчеплення при зсуві для такого зразка визначають як відношення зусилля навантаження зсуву до площі циліндричної поверхні, на яку напилено покриття.

Проте методика, заснована на зрізі окремих частинок або покриття в цілому, має ряд недоліків.

1. Покриття знаходиться в складно напруженому стані. При використанні методики для детонаційних покриттів спостерігається зминання частинки і виникнення місцевих напружень, які значно перевершують середню напруження зрізу або відриву.

2. Ніж для зрізання, практично неможливо переміщати точно межею «покриття – підкладка». Відбувається зріз або частини покриття, або підкладки (напилення здійснюють на заздалегідь оброблені підкладки; при цьому може відбуватися зріз виступів, що також призводить до спотворення отриманих результатів).

3. Зріз проводять з краю покриття, де умови формування відрізняються від умов формування основної частини покриття.

Клейовий метод (метод нормального відриву). Вимірюють адгезію прикладенням сил, перпендикулярних поверхні розділу, при

цьому покриття відривають від основного металу. Тонкі покриття наносять на підготовлену поверхню двох циліндричних зразків, потім їх покривають шаром клею холодного затвердіння і затискають. При цьому обидві змащені клеєм поверхні стикаються (рис. 1.5).

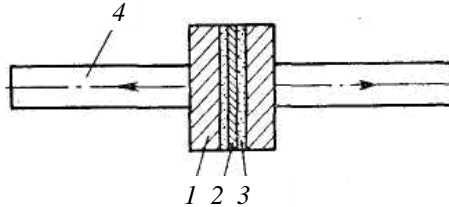


Рис. 1.5 – Зразок для визначення міцності зчеплення тонких покриттів:
1 – підготовлений зразок; 2 – прошарок клею; 3 – покриття;
4 – затискні цапфи (стрілки вказують напрям навантаження)

Після застигання клею зразок поміщують в розривну машину і визначають величину міцності зчеплення покриття з основою. Щоб уникнути нерівномірного навантаження зразка (через можливу невелику неспіввісність затискувачів) рекомендується застосовувати затискну головку з кульовим шарніром. Товщина напиленого покриття при цьому методі випробувань повинна бути не менше 0,25 мм і мати рівномірну товщину по всій поверхні. Як клей використовують епоксидну смолу. Діаметр зразка в більшості випадків не перевищує 10–40 мм. Міцність на розрив визначають за формулою:

$$\sigma = \frac{4P}{\pi \cdot D^2}, \quad (1.2)$$

де P – розтягувальна сила, кН; D – діаметр зразка, см.

Цей метод випробувань призначений тільки для покриттів, міцність зчеплення яких з основою не перевищує міцності клею (міцність на розрив 20–50 МПа). Істотним недоліком клейової методики є залежність міцності на розрив фіксованого зразка від його діаметра. Збільшення діаметра фіксованого зразка в два рази призводить до збільшення міцності зчеплення, більше, ніж у 1,5 рази. Вказана залежність пояснюється впливом краю покриття, де відрив полегшений. При збільшенні діаметра зразка вплив крайового ефекту зменшується. Проте, при визначенні міцності зчеплення цим способом одержують дані, які перевищують результати випробувань на міцність зчеплення витягуванням штифта.

Випробування витягуванням штифта – для покриттів значної товщини. У циліндричний або конічний центральний отвір (рис. 1.6), виконаний в основному металі *A*, вставляють штифт *B* так, щоб торцева поверхня штифта і поверхня основи знаходилися в одній площині. Після складання і попередньої обробки зразків, для додання їм шорсткості, на верхню поверхню напилюють покриття.

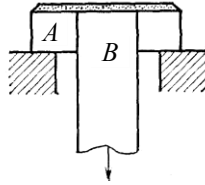


Рис. 1.6 – Схема випробування на міцність зчеплення витягуванням штифта (штифтова проба)

При випробуванні, основу *A* встановлюють на упори, а штифт *B* витягають вниз. Відношення навантаження, при якому відбувається відрив штифта від покриття, до площі його напиленого торця, характеризує міцність зчеплення покриття з основою.

Штифтовий метод є найбільш поширеним серед методів вимірювання адгезії детонаційних покриттів. Для його застосування необхідні спеціальні зразки (рис. 1.7, *a*), які складаються з оправки *1* і штифта *4*, закріпленого гвинтом *3*; штифт може бути конусоподібним або циліндричним.

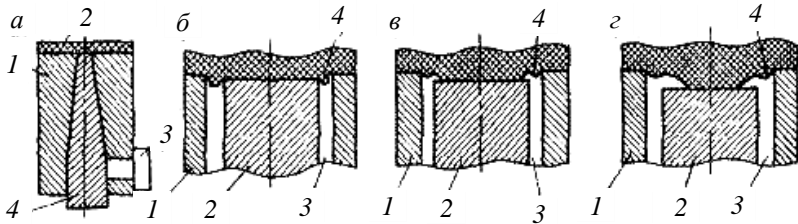


Рис. 1.7 – Схеми вимірювання адгезії штифтовим методом:
a – дослідний зразок; *b–z* – схеми відриву

Пристосування виготовляють так, щоб торець штифта був в одній площині з поверхнею оправки. Після піскоструминної обробки пристосування розбирають, промивають спиртом або іншим розчинником, знову збирають і фіксують гвинтом *3*. Потім напилюють покриття *2*, гвинт *3* знімають і відривають штифт *4* від покриття.

Однак штифтовий метод характеризується рядом недоліків.

1. Штифтова методика дозволяє визначати адгезію лише при товщині покриття більше 0,3–0,5 мм, тобто міцність зчеплення з підкладками покриттів завтовшки 0,1–0,2 мм, які зазвичай використовуються, не може бути зміряна цим методом. В той самий час відомо, що при збільшенні товщини покриттів у 2–3 рази міцність зчеплення зменшується в 1,5–3 рази.

2. Методика дозволяє визначати лише міцність самого шару, тобто когезію. Вимірювання адгезії цим методом неможливе.

3. При виготовленні зразків між штифтом 2 і оправкою 1 утворюється зазор 3 (див. рис. 1.7, б, в). Величина зазору коливається від декількох до десятків мікрометрів. Дуже мала величина зазору призводить або до появи значних сил Ван-дер-Ваальса, або до зварювання штифта і оправки високошвидкісними гарячими частинками. У разі більшої величини зазору в нього затікають розплавлені частинки 4, які скріплюють штифт 2 і оправку 1 (рис. 1.7, б–г). Отже, необхідне зусилля на відрив штифта від покриття і на відрив його від оправки. Тому такий метод визначення міцності зчеплення дає занижені значення.

Метод центрифуги. Тонкі плівки наносяться на циліндричний ротор ультрацентрифуги. Швидкість, необхідна для відриву плівки, залежить як від сил зчеплення, так і від міцності плівки на розрив. Плівку розрізають на смужки, паралельні осі циліндра. При цьому розривні зусилля усуваються і можна заміряти сили зчеплення. Цей метод дозволяє вимірювати адгезію лише слабозчеплених плівок.

Метод ультразвукової вібрації. Заснований на тому, що при проходженні звукових хвиль через матеріали різної щільності, частина хвиль відображається від поверхні розділу цих матеріалів. Якщо покриття в окремих місцях відокремлене від основи, то у виниклих повітряних зазорах ультразвукові хвилі відображатимуться, і на екрані приладу буде видно сигнал, відбитий від місця дефекту.

Метод анодування. Якщо адгезія плівок погана, то в процесі анодування з'явиться здуття, плівка луштитиметься і легко відшаровуватися. Оксидовані плівки при хорошій адгезії містять лише акуратні наскрізні пори, число яких залежить від якості плівок.

Фотометричний метод. Використовується зв'язок між зміною блиску покриття і його адгезією до основи. Якщо ріст кристалів відбувається не рівномірно всією поверхнею, а на окремих ділянках, то це призводить до шорсткості поверхні і більшому роз-

сіюванню світла, що зменшує блиск. Такі покриття мають, у свою чергу, погану адгезію.

Метод перегину. Найбільш простий метод якісного визначення міцності зчеплення покриття з підкладкою – згинання і розгинання зразка-свідка і візуальне оцінювання якості зчеплення покриття з основою в місці згинання зразка (фіксація перших ознак відшаровування і руйнування покриття). Цей метод особливо зручний для випробувань листових матеріалів. Шари з поганою адгезією розтріскуються і відшаровуються, шари з відмінною адгезією не відшаровуються аж до руйнування основи.

Метод дряпання (погано зчеплене з основою покриття при дряпанні відшаровується) і **надрізу ножем**. Найбільший інтерес представляє прорізання покриття до основи у вигляді рівномірної сітки з подальшими термоциклічними випробуваннями в необхідному середовищі. Якість покриття оцінюють за кількістю ділянок, що відшарувалися.

Абразивне обдування покриття, сформованого після 3–5 пострілів за секунду. Для обдування використовують порошок корунду грануляцією 70–120 мкм. Коли покриття недостатньо якісні, то після 1–3 пострілів в режимі абразивного обдування спостерігається часткове його відшаровування і розтріскування, яке легко фіксувати візуально або при збільшенні в 5–50 разів. Вказаний метод при використанні автоматичної установки з скорострільністю 1 постріл за секунду дозволяє випробовувати декілька сотень покриттів за зміну. При цьому можна визначити діапазон значень технологічних параметрів, при яких виходять достатньо якісні покриття. Проте абразивно-ерозійний метод є якісним і не дозволяє проводити кількісне оцінювання міцнісних характеристик.

1.5.5. Пористість покриттів

Визначення пористості покриття є важливим показником для оцінювання його міцнісних і захисних властивостей. Так, вирішальний вплив на корозійну стійкість металів, надає пористість катодних металевих покриттів, тобто таких, які мають менш негативний потенціал, ніж основний метал. На сьогодні пористість прийнято підрозділяти на **відкриту** і **закриту**. При відкритій пористості пори сполучаються з поверхнею, тобто із зовнішнім середовищем. Пори, ізольовані від зовнішнього середовища, утворюють закриту пористість.

Поява пористості може бути викликана такими причинами:

- усадкою під час переходу рідкої фази в тверду;
- зменшенням розчинності газів з пониженням температури;
- закриттям газу частинками при їх попаданні на поверхню.

Слід зазначити, що закрита пористість, як правило, викликана всіма перерахованими причинами, а відкрита – першими двома. Зменшення пористості покриттів можна досягти за рахунок наступних процесів: напilenня в нейтральному середовищі або вакуумі; пластичної деформації, ущільнювача напilenних шарів; відпалу-спікання напilenого шару. Міцність і пористість покриттів залежно від технологічних чинників і матеріалу покриттів може змінюватися в досить широких межах. Так, межа міцності на вигин плазмових покриттів змінюється від 18 до 230 МПа, а пористість – від 4,8 % до 33 %. При плазмовому напilenні пористість може виникати за рахунок змін об'єму під час переходу речовини з рідкого в твердий стан, неповного розчинення частинок, зміни розчинності газів із зміною температури.

В зв'язку з цим розрізняють *первинну* і *вторинну* пористість. Первинна пористість – пористість, яка виникає при кристалізації за рахунок об'ємних змін (усадки) під час переходу речовини з рідкої в твердий стан. Вторинна пористість виникає за рахунок зменшення розчинності газів з пониженням температури.

У вакуумних покриттів пори можуть бути різних розмірів. Великі пори утворюються унаслідок неоднорідності поверхні, що захищається, попадання сторонніх частинок в процесі конденсації металу та інших причин. Дрібні пори визначаються характером структури і процесом формування вакуумного конденсату.

Розглянемо деякі методи визначення пористості металевих покриттів на сталі.

Фероксильний метод. Заснований на тому, що в каналах пор під дією відповідних реактивів з'являються продукти реакції основного металу, що мають певне забарвлення. Так, для металів, більш електропозитивних, ніж Fe (Cu, Ni, Pb, Cr), можна застосовувати розчин, який містить 200 г/л $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ і 30 г/л концентрованої сірчаної кислоти. Після триразового занурення зразка на 10 с в цей розчин за наявності пор спостерігається виділення міді в результаті витіснення її залізом з мідно-сірчаноокислого розчину. Основним реактивом для виявлення пор в металевих покриттях на сталі є залізо-синеродистий калій (червона кров'яна сіль). Вказаний метод покладений в основу державних стандартів на методи визначення порис-

тості цинкових, олов'яних, мідних, нікелевих і хромових покриттів. Цим методом можна зробити підрахунок числа наскрізних пор в покритті. Пористість оцінюється числом пор, що знаходяться на 1 см^2 випробовуваної поверхні.

Електрофотографічний метод. Полягає в накладенні на випробовувану деталь (поверхню) фотопаперу. Під дією невеликого постійного струму (зразок – анод) змінюється забарвлення в місцях тріщин і пор. Для застосування вказаного методу необхідно знати умови, при яких під час анодного окиснення в розчин переходять іони основного металу, а метал покриття не піддаватиметься істотним змінам. Необхідно вибрати такий електроліт, який при цій ЕРС забезпечує перехід в розчин тільки іонів основного металу. Наприклад, в електроліті, що є $0,1 \text{ н}$ розчином K_2SO_4 , при напрузі на електродах (катод алюмінієвий) менш ніж $2,5 \text{ В}$ через пори в нікелевому покритті розчиняється залізо, цинк, мідь та інші метали, які можуть бути виявлені на електрограмі відповідним реактивом.

Метод наповнення пор. Дозволяє оцінювати пористість покриттів, які мають пори, невидимі в звичайний оптичний мікроскоп навіть при максимальних збільшеннях ($0,05\text{--}0,1 \text{ мкм}$). Перед випробуванням зразок добу витримують в ексикаторі, після чого зважують на аналітичних вагах або мікровагах (m_1). Потім зразок поміщають в судину з веретенним маслом, нагрітим до 150° С , масло при цьому наповнює пори покриття. Зразок в судині з маслом охолоджують до кімнатної температури, витягують з судини і залишки масла на поверхні з видаляють фільтрувальним папером. Зразок повторно зважують (m_2). Маса масла в порах покриття $m = m_2 - m_1$. Знаючи щільність масла (ρ), легко знайти об'єм пор в покритті, відкритих на поверхні:

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{m_2 - m_1}{\rho}. \quad (1.3)$$

Пористість, відкрита з поверхні:

$$\beta = \frac{V}{V_i} = \frac{m_2 - m_1}{\rho \cdot h \cdot S}, \quad (1.4)$$

де V_o – об'єм покриття; h – товщина покриття; S – досліджувана поверхня.

Для контролю повного видалення масла з поверхні після наповнення пор, можна скористатися оптичним поляризаційним методом: до занурення в масло визначають на гоніометрі параметри еліп-

тичної поляризації світла для досліджуваної поверхні (Δ і 2ψ), потім після наповнення пор видаляють залишки масла до тих пір, поки вимірювані параметри Δ і 2ψ не співпадуть з первинними значеннями.

Метод анодування. Застосовується для оцінювання пористості алюмінієвих покриттів на сталі. При анодуванні алюмінію на його поверхні формується діелектрична окисна плівка, яка проводить струм тільки через свої отвори. Очевидно, основні дефекти в цій плівці утворюватимуться на порах покриття, і струм, що проходить, зростає із збільшенням пористості.

Метод протравлення основи. Його можна застосовувати для оцінювання пористості алюмінієвих (і титанових) покриттів на тонколистовій сталі. Розчинення сталеві основи проводять в розчині, що містить седемдесятипроцентний (за об'ємом) насиченого розчину мідного купоросу і двадцятип'ятипроцентний (за об'ємом) концентрованої азотної кислоти. В процесі розчинення додають невеликими порціями концентровану азотну кислоту. Повне розчинення основи визначається по відсутності осадів міді на поверхні зразка. Пористість відокремленого таким чином від основи покриття досліджується спостереженням під мікроскопом на просвіт. Число і розміри пор, а також їх розподіл, можуть бути зафіксовані на мікрофотографіях.

Метод випробування у розчині. Для вимірювання пористості дроту застосовується метод вимірювання об'єму газу, що виділяється протягом 3 год із зразка, зануреного в п'ятнадцятипроцентний розчин HNO_3 при кімнатній температурі. Для контролю вимірюють також зменшення ваги зразків при вказаних випробуваннях і шляхом хімічного аналізу визначають кількість заліза в розчині.

Гравіметричний метод. Дозволяє визначити наскрізну пористість покриття. Під наскрізною пористістю розуміють відношення сумарної площі пор S до площі покриття S_0 :

$$\beta_1 = \frac{S}{S_0}. \quad (1.5)$$

Для її визначення визначають вагу сталевих зразків однакової площі з покриттям і без покриття: m_1 і m_1^0 ; опускають обидва зразки на певний час в розчин, який не діє на покриття і розчинює лише основу. Після промивки і сушіння знов зважують зразки, знаходять m_2 та m_2^0 , після чого розраховують наскрізну пористість β_1 :

$$\beta_1 = \frac{S}{S_0} = \frac{m_1 - m_2}{m_1^0 - m_2^0}, \quad (1.6)$$

де $m_1^0 - m_2^0$ – зменшення ваги за той самий час (площа поверхні та сама).

Властивості покриттів визначаються не тільки величиною і характером пористості, але і параметрами текстури: розміром і формою пор, розподілом їх за розмірами і за об'ємом зразка, їх зв'язаністю, розміром і формою зерен і т.д. Значне практичне значення має також будова перехідної зони між покриттям і підкладкою. Найбільше розповсюдження для якісного і кількісного аналізу геометрії пор, знайшли оптичні методи. Оскільки витрати на ремонт покриття і виробничі збитки можуть бути достатньо значними, то необхідним стає проведення профілактичного контролю наявності дефектів покриттів.

Сучасні методи контролю пористості наступні:

– **метод вологої губки.** Застосовний для виявлення дефектів непровідних покриттів товщиною не більше 500 мкм, нанесених на провідну підкладку. Особливо цей метод підходить для контролю порошкових покриттів і тонких покриттів, коли потрібно уникати пошкодження покриття. На змочену губку подається струм низької напруги. При переміщенні губки над дефектом, рідина проникає через мікроотвір до підкладки і замикає електричний ланцюг. Виникаючий при цьому електричний струм дає звуковий сигнал в детекторі;

– **високовольтний метод.** Цей метод застосовується для виявлення дефектів в непровідних покриттях завтовшки не більше 7 мм, нанесеного на провідну підкладку. Він підходить для перевірки стану захисних покриттів трубопроводів. За допомогою цього методу можливий контроль захисних покриттів на бетоні.

Джерело живлення створює постійний струм високої напруги, який подається на відповідний зонд із замиканням через землю до підкладки. При переміщенні зонда по поверхні покриття, наявність дефекту виявляється за іскрою, що виникає в місці контакту. Одночасно детектор видає звуковий і світловий сигнал. Цей метод може використовуватися для виявлення всіх типів дефектів, але при контролі тонких покриттів потрібно дотримуватися обережності.

1.5.6. Щільність покриттів

Щільність є однією з важливих характеристик покриттів. Величину її необхідно знати для визначення загальної пористості.

Хоча при отриманні покриттів відомого хімічного складу і з відомою кристалічною ґраткою щільність може бути узята з довідників, проте в більшості випадків щільність необхідно визначати (наприклад, щільність плазмових покриттів менше теоретичної щільності напилюваного матеріалу; причинами появи пористості в напиленому шарі є неоднорідність потоку частинок – їх різний ступінь розігрівання, можливість пружної деформації при ударі об поверхню, недостатня пластичність частинок у момент удару і т.д.).

Щільність може бути визначена різними методами. Найчастіше використовується **метод пікнометрії**. Застосування капілярних пікнометрів і досить точного термостатування дозволяє визначити щільність з похибкою 1–5 кг/м³. Для реалізації методу зразки дроблять, поміщають в пікнометри відомого об'єму, визначають масу пікнометра: сухого m_1 і заповненого рідиною m_2 , із зразком (порошок) m_3 та із зразком, просоченим рідиною m_4 . Щільність матеріалу при цьому:

$$\rho = \frac{m_3 - m_1}{m_3 - m_4 + m_2 - m_1 - A_3 \cdot \rho_p (m_3 - m_1) / \gamma_i}, \quad (1.7)$$

де ρ_p – щільність рідини, якою заповнюється пікнометр.

Проте, за наявності закритих пор, а також при недостатньо повному просоченню відкритих пор, спостерігається систематична помилка у величині щільності. Для підвищення точності може бути застосована вакуумне просочення. Найточніше щільність може бути зміряна **методом флотації** (чутливість $\sim 10^{-3}$ кг/м³). Для цього зразки поміщають в рідину з щільністю, близькою до щільності досліджуваного зразка.

Контрольні питання

1. Що використовують для створення, дослідження, випробування та оцінювання якості покриттів?
2. Які основні методи дослідження матеріалів покриттів?
3. Що відносять до засобів контролю покриттів?
4. Які критерії оцінювання покриттів?
5. Чи передбачений пошук прихованих дефектів нормативно-технічною документацією?
6. Від чого залежить якість гальванічних покриттів?

7. Яким шляхом здійснюють захист покриттів від біологічних чинників?
8. Що візуально оцінюють при вакуумному нанесенні покриттів?
9. Що розуміють під наскрізною пористістю?
10. Як визначаються властивості покриттів?
11. Як класифікують дефекти залежно від етапу виникнення?
12. Від чого залежить адгезійна міцність покриттів?
13. Від чого залежить когезійна міцність покриттів?
14. За якою формулою знаходять об'єм у покритті відкритих з поверхні пор?
15. Які установки використовуються для стендових і виробничих випробувань захисних технологічних покриттів?
16. Яким дефектом є недостатня твердість напрямних верстатів, через яку знижується їх довговічність?
17. Який дефект не впливає на використання продукції за призначенням і на її надійність?
18. Який дефект є наслідком помилок і прорахунків, допущених при конструюванні?
19. Які дефекти виникають через порушення вимог технологічних регламентів, режимів обробки і контролю якості?
20. За допомогою якого аналізу вивчають структуру покриттів?
21. Якими методами користуються для оцінки товщини покриттів у декілька мікрометрів?
22. Як оцінюється рівномірність покриттів при вакуумному їх нанесенні?
23. Що виникає внаслідок усадки під час переходу рідкої фази у тверду?
24. Яка пористість виникає за рахунок зменшення розчинності газів з пониженням температури?
25. Який метод застосовується для оцінки пористості алюмінієвих покриттів на сталі?
26. Який метод дозволяє визначити наскрізну пористість покриття?
27. Який метод є найбільш поширеним серед методів вимірювання адгезії детонаційних покриттів?

Література: [1–3; 10; 13]

2.1. Класифікація механічних руйнівних випробувань

Жодне покриття не надаватиме ефективної дії, якщо, окрім захисних властивостей, не володітиме певними механічними властивостями – твердістю, пластичністю і т.д. Механічні властивості покриттів залежать від умов їх нанесення. Так, при електроосажденні вони залежать від щільності струму, температури, руху і складу електроліту; при металізації розпилюванням – від швидкості подачі дроту, відстані між пістолетом і виробом і т.д., при вакуумній металізації – від тиску і складу залишкових газів, від температури поверхні, що захищається тощо. Визначення механічних властивостей покриттів набуває важливого значення у тих випадках, коли міцність покриття багато більше (на один-два порядки) міцності матеріалу підкладки. Інформація про міцнісні та пружні властивості покриттів необхідна не тільки для прогнозу їх працездатності розрахунковими методами, але і для розробки технології їх отриманнями та аналізу результатів випробувань.

Ці методи полягають у проведенні випробувань зразків матеріалів, заготовок, деталей, складальних одиниць і готових виробів із застосуванням руйнівних навантажень і фіксацією умов руйнування. Після проведення руйнівних випробувань об'єкти таких випробувань не можуть бути використані за призначенням. Звідси витікає, що застосування методів руйнуючого контролю і випробувань обмежується багатьма виробничими та економічними чинниками.

Класифікацію механічних випробувань проводять за:

а) способом і часом дії навантаження (*статичні, динамічні, втомні*);

б) типом і схемою прикладення навантаження (*твердість, розтягнення, стиснення, згинання, кручення*);

в) температурою, при якій проводять випробування (*нормальній, зниженій або підвищеній*).

Методи механічних випробувань регламентовані державними стандартами. Залежно від діючого на випробовуваний матеріал навантаження розрізняють:

– *статичні* випробування, навантаження, які характеризують плавним і повільним прикладенням навантаження, до випробовуваного зразка; такий характер навантаження дозволяє вимірювати з достатньою точністю силу, прикладену до зразка, а також деформацію зразка у будь-який момент випробування;

– *динамічні* випробування, які характеризують різкою зміною сил, що діють на зразок, великою швидкістю деформації зразка і виникненням значних сил інерції в частинах зразка і випробувальної машини, передавальних навантаження на зразок; динамічні випробування слугують для визначення в'язкості або крихкості матеріалу;

– випробування *на твердість*, які набули дуже широкого поширення і полягають в тому, що в поверхню випробовуваного матеріалу впроваджується твердіше тіло;

– випробування *на втому*, які характеризуються багатократними повторними або знакозмінними навантаженнями, що прикладають до випробовуваного зразка; метал під дією таких навантажень руйнується при напруженнях нижчих, ніж ті, які він може витримати без руйнування при статичному навантаженні.

Коли необхідно встановити придатність матеріалу для технологічного процесу, визначити деякі властивості матеріалу, наприклад пластичність, проводять технологічні випробування.

При руйнівних випробуваннях деталі машин піддаються руйнуванню під дією механічних навантажень або розрізають, щоб можна було досліджувати матеріал деталі всередині. Частіше при руйнівних методах контролю випробуванням піддається частина деталі. У таких випадках з деталей вирізають зразки.

Перевага руйнівних методів контролю – можливість одержати кількісні характеристики. Правда, при кожному випробуванні одержують тільки одну характеристику (наприклад, межа витривалості, твердість і т.д.) і лише однієї деталі: тієї, з якої вирізаний і випробуваний зразок, або тієї, яка і була зруйнована при випробуваннях. Для отримання достовірних даних про партію деталей певного обсягу (обсяг партії – кількість продукції, виготовленої за єдиною технологією і оформленої одним документом про якість) необхідно, щоб властивості контрольованих деталей не мали істотних

відмінностей. Цього можна досягти застосуванням стабільної і надійної технології, високою якістю роботи. При нестабільній технології і значних відмінностях за якістю деталей усередині партії руйнуючий контроль малоефективний. Випробування проводять за єдиною методикою, регламентованою державним стандартом для кожного методу випробувань.

2.2. Виготовлення зразків для визначення механічних властивостей покриттів

Випробування на вигин, розтягнення, визначення модуля нормальної пружності покриттів проводять на зразках прямокутного перетину. Виготовлення зразків є найбільш складною і трудомісткою операцією. Застосовують в основному дві технологічні схеми отримання зразків для випробувань механічних властивостей покриттів. За першою схемою, висушений шлікер відповідного покриття поміщають в спеціальні прес-форми, пресують, а потім піддають термічній обробці за режимом випалення покриття. За другою схемою, покриття наносять на пластини, сушать і обпалюють відповідно до прийнятої для цього покриття технології. Вирізають зразки певного розміру, наприклад $10 \times 20 \times 100$ мм, а потім механічно відокремлюють підкладку від покриття.

Для випробувань на розтягнення, до зразків покриття розміром $0,5 \times 20 \times 100$ мм приклеюють накладки з м'якої деревини або текстоліту, що дозволяє уникнути прямої дії на матеріал покриття затискачів випробувальної машини, усунути небезпечні перекося і концентрацію напружень в місцях затиску. У цій конструкції зразків, міцність з'єднання накладок з матеріалом покриття, більше міцності покриття, що забезпечує розрив по робочій частині зразка.

Дослідження механічних властивостей необпалених покриттів на деталях і заготовках представляє інтерес для запобігання і врахування їх можливих ушкоджень при транспортуванні чи завантаженні в піч. Після гарячої обробки, дані про механічні властивості дозволяють правильніше вибрати метод видалення покриття з деталей. Зразки випробовують на стандартних машинах, які забезпечують реєстрацію руйнівних навантажень з точністю до 1 %.

Визначення твердості покриттів. Зі всіх механічних випробувань металів найбільш простим на практиці є визначення їх твердості. Під твердістю металів розуміється опір, який чиниться мета-

лами впровадженню в їх поверхню іншого, твердішого тіла певної форми і розміру.

Широке розповсюдження випробувань на твердість пояснюється низкою їх переваг перед іншими методами випробувань: простота вимірювань, які не вимагають спеціального зразка і можуть бути виконані безпосередньо на деталях, що перевіряються; висока продуктивність; вимірювання твердості не спричиняє за собою руйнування деталі (після вимірювання її можна використовувати за призначенням); можливість орієнтовно оцінювати за твердістю інші характеристики покриття (наприклад, межу міцності).

Проте для випробування твердості покриття придатні не всі існуючі способи, оскільки покриття часто не однорідні за структурою і, крім того, вимірювання проводять на тонкошарових покриттях, нанесених на основу, що має відмінну від покриття твердість. З широко вживаних для визначення твердості металів способів Брінелля, Роквелла і Віккерса найбільш придатний останній. При цьому рекомендується застосовувати наступні навантаження: для сталі і латуні – 30 кг, для інших кольорових металів – 20 кг. Крім того, час випробування слід збільшити (30 с). Твердість окремих складових шару визначають вимірюванням мікротвердості на приладі ПМТ-3.

Хоча мікротвердість не є фізичною константою, проте вона характеризує опір пружно-пластичним деформаціям при контактному стисненні і дуже чутлива до різних чинників, пов'язаних з енергією кристалічної ґратки. Метод мікротвердості вдало поєднується з вивченням мікроскопічної будови речовини. В результаті випробування на мікротвердість може бути визначена як твердість окремих кристалів (якщо вони достатньо великі), так і агрегатна твердість (при дрібнокристалічній структурі). Мікротвердість визначають шляхом втискування алмазної піраміди стандартної форми і розмірів при навантаженнях 2–200 г. Число твердості H_{μ} виходить від ділення величини навантаження P на поверхню S відбитку. Поверхня відбитку, яка що має форму піраміди, обчислюється з величини його діагоналі d . Якщо P виразити в грамах, а d в мікрометрах, то мікротвердість дорівнюватиме:

$$H_{\mu} = \frac{1854P}{d^2}, \text{ кг/мм}^2. \quad (1.6)$$

Для прискорення обчислень користуються спеціальними таблицями. Слід зазначити, що результати визначення мікротвердості і визначення твердості за Віккерсом не можуть бути безпосе-

редньо зіставлені. Ефективність покриттів для захисту від знеуглецювання сталі оцінюють по підвищенню твердості поверхні загартованих зразків порівняно із зразками, загартованими без покриття.

Мікротвердість поверхневих шарів зразків титанових, тугоплавких і деяких інших сплавів визначають за допомогою приладів типу ПМТ-3, а потім побудови кривих залежності «мікротвердість – відстань від поверхні» зразка визначають вплив покриття на мікротвердість сплаву. При визначенні твердості досить часто змішують поняття: вимірювання твердості і контроль твердості. Їх необхідно чітко розмежовувати.

При *вимірюванні* твердості порівнюють твердість випробовуваного зразка з твердістю зразка з аналогічного матеріалу. Результатом вимірювання є число, яке показує, скільки разів одиниця твердості міститься в числі, що показує твердість випробовуваного зразка.

При *контролі* твердості встановлюють відповідність між твердістю випробовуваного матеріалу та її значенням за стандартами та технічними умовами.

Вимірювання твердості *дряпанням* застосовують як якісний метод. При цьому методі твердість визначають за шкалою Мооса. Метод вимірювання твердості дряпанням застосовують при порівнянні твердості зразків. Як індентор при визначенні твердості дряпанням використовують алмазний конус з кутом при вершині 90 або 120°. Цим конусом, що знаходиться під навантаженням, проводять подряпину на ретельно відшліфованій або відполірованій поверхні зразка. За шириною цієї подряпини при певному навантаженні (а іноді за навантаженням при заданій ширині подряпини) аналізують про твердість матеріалу. Ширину подряпини виміряють з похибкою до 0,001 мм.

Один з нових методів вимірювання твердості – екво-метод, який заснований на вимірюванні швидкості падіння і відскоку спеціального ударного пристрою з наконечником з карбїду вольфраму. Метод характеризується порівняно високою точністю і простотою.

Ударний пристрій з випробувальним наконечником під дією пружини вдаряється об поверхню зразка, а потім відскакує. Вимірюють швидкості наконечника до удару і після відскоку за допомогою постійного магніту, вбудованого в наконечник, який пролітає через нерухому індукційну котушку при русі вперед-назад. Постійний магніт індуктує електричну напругу в котушці, пропорційну швидкості його прольоту.

Твердість визначають як відношення швидкості до удару пристрою до швидкості після відскоку, помножене на 1000. Кожна ділянка зразка повинна бути випробувана 2–3 ударами. Для цього необхідна площа контролю 10×10 мм.

2.3. Міцність при розтягненні

Визначення міцності при розтягненні покриття з основою має лише умовне значення і може бути використано для додаткового контролю технології процесу (спільно з випробуваннями на твердість, металографічними і корозійними випробуваннями). Такі випробування можна проводити на звичайних розривних машинах або на машинах для випробування мікрозразків.

Міцнісні та пластичні характеристики зразків металів і сплавів при їх одноосному розтягненні визначають за стандартами. Зразки випробовують при нормальній, високих, а у ряді випадків і при низьких температурах. Для оцінювання ефективності захисної дії покриттів вказані характеристики показові, якщо в результаті окиснення при нагріванні поверхневі шари зразків чинять значний вплив на зміну міцності та пластичності сплавів. Зокрема, випробування міцності і пластичності при одноосному розтягненні зразків сталей типу 30ХГСН2А, титанових сплавів дозволяють виявити ефект захисної дії покриттів, тоді як випробування жароміцних нікелевих сплавів виявляються звичайно недостатньо показовими.

Ефективність покриттів оцінюють за наслідками порівняння значень міцності, межі текучості, відносного подовження, звуження зразків сплаву (після їх нагрівання, пластичної деформації із захисним технологічним покриттям і подальшого піскоструминного очищення).

Для вимірювання розтягувального напруження (і зчеплення плівки з підкладкою) використовується також метод *високошвидкісного ротора*, який обертається у вакуумі. Передбачається, що відцентрові сили при обертанні врівноважуються круговими напруженнями в плівці і зчепленням плівки з ротором.

Метод *«випинання»* – полягає в тому, що досліджувана плівка осідає на пластик, приєднаний до кінця трубки. Деформація здійснюється тиском повітря, що поступає по цій трубці. Підкладка – пластик розчиняється у відповідній рідині. Недолік методу полягає у тому, що випадкові нерівності в підкладці можуть сильно впливати на значення розривного напруження.

Для створення одноосного розтягнення застосовують *магнітне поле*. Плівка встановлюється в затиски, один з яких нерухомий, а другий сполучений з осердя соленоїда. Осердя втягується в соленоїд і внаслідок цього діє на зразок з силою, пропорційною струму, який проходить через соленоїд.

Ментер і Пашлі запропонували інший варіант для розтягнення плівки. Розривна машина має плоскі захоплення, до яких приклеюється плівка. Одне із захоплень нерухоме, друге встановлюється на візку, що рухається на шарнірах у V-подібних пазах. До візка за допомогою нитки, перекинутої через блок, приєднана чашка, яка може навантажуватися дробом для розтягнення плівки.

У розривній машині Одінга та Алексаняна плівку затискають у тримачах, один з яких нерухомий, а другий закріплений на візку, що переміщається плитою у V-подібних пазах. Нахил плити може змінюватися, при цьому ковзний контакт плити, під дією своєї ваги розтягує плівку. За кутом нахилу плити, вагою візка і початковим перерізом зразка визначають величину напруження.

Ударна в'язкість. Випробуванням піддають три серії зразків однієї плавки. Першу серію зразків випробовують після нагрівання із застосуванням захисного технологічного покриття, другу – після ідентичної гарячої обробки без захисного покриття. Третю серію зразків виготовляють механічною обробкою заготовок, які мають припуск і пройшли гарячу обробку разом із зразками першої і другої серій.

Випробування на втому. Руйнуючі випробування зразків матеріалів деталей машин і конструкцій *на втому (витривалість)* застосовують для з'ясування межі витривалості металів.

Стандартні зразки, вирізані з тіла контрольованих деталей або конструкцій, піддають циклічній деформації певними навантаженнями за встановленими схемами. Найчастіше застосовують схему навантаження, коли зразок, який поволі обертається, згинається при симетричному циклі навантаження. Застосовують й інші схеми, при яких зразки, що обертаються, піддають циклічну розтягненню та стисненню, вигину і крученню.

Зразки для випробувань на втому, можуть бути круглого і прямокутного перетину. У ряді випадків застосовують зразки із спеціально ослабленим перетином (нарізають невелику канавку на циліндричному зразку, свердлять отвір або роблять зарубку на плоскому зразку). Якщо під втомою розуміють процес руйнування металів та їх сплавів під дією багатократного повторно-змінного навантаження, то здатність металу протистояти такому руйнуванню

називають опором втоми. Число циклів навантаження, які зразок витримує до руйнування, називають довговічністю.

В результаті руйнівних випробувань зразків матеріалів на втому одержують криві втоми металу. Типова крива втоми металевого зразка наведена на рис. 2.1.

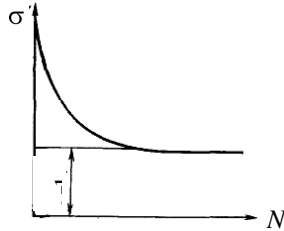


Рис. 2.1 – Втомна крива для металевого зразка

На осі ординат відкладають напруження σ , по осі абсцис – число циклів повторних навантажень N , до руйнування зразка, тобто його довговічність. З одержаної кривої виходить, що для кожного матеріалу існує таке напруження σ_{-1} , при якому зразки «доживають» до заданого числа циклів N_3 , але при продовженні випробувань негайно руйнуються. Це і є межа витривалості матеріалу.

Для побудови кривої втоми і визначення межі витривалості випробовують не менше десяти зразків, кожен до руйнування або до базового числа циклів.

2.3.1. Багатоциклова витривалість

Вплив захисних покриттів на опір сплавів втомному руйнуванню під дією сотень тисяч, мільйонів циклів навантажень оцінюють випробуваннями зразків у вигляді пластин $4 \times 11 \times 130$ мм, що мають в робочій частині небезпечний перетин (звуження) шириною 5 мм і радіусом 10 мм. Випробування зразків на витривалість при нормальній температурі проводять на установках типу ВЭДС-ЮОБ, ТУРБО-4. Зразки навантажуються в одній площині при консольному вигині з частотою 280–300 Гц. При постійній деформації амплітуду коливань вільного кінця зразка визначають провішуванням зосередженою силою (вантажем).

Для визначення впливу тугоплавких емалей на витривалість сплавів зразки виготовляють із заготовок (листів) механічною обробкою, а потім наносять емаль і проводять випробування. Вплив

на витривалість сплавів технологічних покриттів, призначених для захисту від окиснення поверхні деталей в процесі їх термічної обробки, визначають на зразках, які пройшли термічну обробку, з покриттям, без покриття і з припуском (не менше 3 мм на сторону) на механічну обробку.

Враховуючи, що захисні технологічні покриття наносяться при виготовленні штамповок, випробуванням на витривалість піддають також штамповані зразки. Необхідність цих випробувань обумовлена тим, що застосування технологічних покриттів є важливим елементом технологічних процесів отримання заготовок і деталей із зменшеними припусками і без припусків на механічну обробку точним, ізотермічним, високошвидкісним штампуванням та іншими прогресивними методами гарячої обробки тиском. Зразки для випробувань на витривалість виготовляють з пластин і прутків методом гарячого штампування як із застосуванням захисних покриттів, так і без них. Крім того, штамповані зразки з метою підвищення якості поверхні можуть піддаватися хімічній обробці в розчинах кислот і лугів, вакуумному відпалу (600°C, 2 год) і об'ємному віброшліфуванню. При випробуваннях покриттів на багатоциклову втому, частота циклів навантаження – понад 50 Гц. Умовною межею між мало- та багатоцикловою втомою є число циклів вантаження $5 \cdot 10^4$. Це значення для пластичних сталей і сплавів характеризує середнє число циклів для зони пружно-пластичної деформації.

2.3.2. Малоциклова витривалість

При випробуваннях на малоциклову втому прикладають навантажувальні сили і моменти з частотою від 0,5 до 50 разів в секунду (з частотою 0,5–50 Гц). При таких випробуваннях проводять безперервне вимірювання деформації, а також безперервну (допускається і періодичну) реєстрацію процесу деформації робочої частини зразка.

Ефективність захисної дії покриттів оцінюють на стандартних зразках, які пройшли термічну обробку, гарячу пластичну деформацію із застосуванням покриття і без нього. Рівень напружень при цьому складає до $0,9 \sigma_c$.

2.4. Класифікація видів і методів неруйнівного контролю

У виробництві застосовують неруйнівний контроль (НК), який дозволяє перевірити якість продукції без порушення її придат-

ності до використання за призначенням. Існуючі засоби НК згідно з стандартами призначеними для:

- виявлення дефектів типу порушення суцільності матеріалу виробів;
- оцінювання структури матеріалу виробів;
- контролю геометричних параметрів виробів;
- оцінювання фізико-хімічних властивостей матеріалу виробів.

Контроль із застосуванням дефектоскопів (приладів) заснований на отриманні інформації у вигляді електричних, світлових, звукових та інших сигналів про якість об'єктів, що перевіряються, при взаємодії їх з фізичними полями (електричним, магнітним, акустичним тощо) і (або) речовинами.

Згідно зі стандартом, в основу класифікації методів неруйнівного контролю покладені фізичні процеси взаємодії фізичного поля або речовини з об'єктом контролю. З погляду фізичних явищ, на яких вони засновані, виділяють дев'ять видів неруйнівного контролю: візуально-оптичний; радіохвильовий; тепловий; вихорострумовий (електромагнітний); радіаційний; магнітний; електричний; акустичний; проникаючими речовинами (капілярний, течешуканням).

Кожний з видів контролю підрозділяють на методи за ознаками, що розглядаються подалі.

Характер взаємодії поля або речовини з об'єктом. Взаємодія повинна бути такою, щоб контрольована ознака об'єкта викликала певні зміни поля або стан речовини. Наприклад, наявність несцільності викликала зміну випромінювання, яке пройшло через неї або проникнення в неї пробної речовини. В деяких випадках використовуване для контролю фізичне поле виникає під дією інших фізичних ефектів, пов'язаних з контрольованою ознакою. Наприклад, електрорушійна сила, яка виникає при нагріванні різнорідних матеріалів, дозволяє контролювати хімічний склад матеріалів (термоелектричний ефект).

Первинний інформативний параметр – конкретний параметр поля або речовини (амплітуда поля, час його розповсюдження, кількість речовини і т.д.), зміну якої використовують для характеристики контрольованого об'єкта. Наприклад, наявність несцільності збільшує або зменшує амплітуду випромінювання, яке пройшло через неї.

Спосіб отримання первинної інформації – конкретний тип датчика або речовини, які використовують для вимірювання і фіксації згаданого інформаційного параметра.

Тільки суцільний контроль, а не вибірковий, дає гарантію високої якості всіх виробів, що випускаються. Перераховані методи в більшості випадків дозволяють автоматизувати процес контролю, завдяки чому досягається його висока продуктивність. У рухомих виробках або у виробках, нагрітих до високих температур, дефекти виявляються шляхом безконтактного контролю.

2.4.1. Вимоги до неруйнівного контролю та задачі, які він розв'язує

До НК пред'являються наступні основні загальні вимоги:

- чутливість і вирішувальна здатність методу;
- можливість здійснення ефективного контролю на різних стадіях виготовлення, в експлуатації і при ремонті виробів;
- можливість контролю якості продукції за більшістю заданих параметрів;
- узгодженість часу, що витрачається на контроль, з часом роботи іншого технологічного устаткування;
- висока достовірність результатів контролю;
- можливість механізації та автоматизації контролю технологічних процесів, а також управління ними з використанням сигналів, що видаються засобами НК;
- висока надійність дефектоскопічної апаратури і можливість використання її в різних умовах;
- простота методики контролю, технічна доступність засобів контролю в умовах виробництва, ремонту та експлуатації.
- достовірності результатів контролю, надійність апаратури і простота технологічного процесу контролю, продуктивність контролю, вимоги з техніки безпеки з проведення контролю.

Чутливість методу визначається найменшими розмірами дефектів, що виявляються:

- а) у поверхневих – шириною розкриття біля виходу на поверхню, протяжністю в глиб металу і по поверхні деталі;
- б) у глибинних – розмірами дефекту з вказівкою глибини залягання.

Чутливість залежить в основному від особливостей методу НК, технічних даних вживаної апаратури і дефектоскопічних матеріалів, чистоти обробки поверхні контрольованої деталі, її матеріалу, умов контролю та інших чинників. Порівняльні дані по чутливості деяких методів НК наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Чутливість методів дефектоскопічного контролю

Метод НК	Мінімальний розмір поверхневих тріщин, що виявляються*, мм		
	Ширина розкриття	Глибина	Протяжність
Візуально-оптичний	0,005–0,1	–	0,1
Кольоровий	0,001–0,002	0,01–0,03	0,1–0,3
Люмінесцентно-фарбовий	0,001–0,002	0,01–0,03	0,1–0,3
Люмінесцентно-порошковий	0,01–0,03	0,1–0,3	2–3
Магнітопорошковий	0,001	0,1–0,5	0,3
Вихорострумний	0,0005–0,01	1,15–0,2	0,6–2
Ультразвуковий імпульсний	0,001–0,3	0,1–0,3	–

* Нижня межа мінімальних розмірів поверхневих тріщин, що виявляються, відноситься до контролю деталей і зразків в оптимальних лабораторних умовах

2.4.2. Рекомендації з вибору методів неруйнівного контролю

Для вибору методу або комплексу методів НК повинні бути визначені вид дефектів, які підлягають виявленню, об'єкти (зони) контролю, їх характеристики та умови контролю, а також повинні бути задані критерії на відбракування. За цими даними визначають можливі методи, які дозволяють вирішити поставлене завдання. Потім, беручи до уваги критерії на відбракування, чутливість і специфіку методів, вибирають методи і засоби НК для застосування. При рівній чутливості перевага віддається тому методу, який простіший і доступніший в конкретних умовах застосування, у якого вище достовірність результатів контролю і продуктивність.

2.5. Візуально-оптичний метод неруйнівного контролю

Візуально-оптичний контроль покриттів – один з основних існуючих на сьогодні методів неруйнівного контролю якості захисних і технологічних покриттів. Саме за наслідками візуально-оптичного контролю ухвалюється рішення про придатність або непридатність покриття до роботи в експлуатаційних умовах. Основними критеріями оцінювання при візуально-оптичному контролі

покріттів є наявність і кількість на одиницю площі типових дефектів, зовнішній вигляд (колір, блиск, різнотонність), відповідність затвердженому еталону (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Контрольовані ознаки, методи і засоби контролю покриттів

Метод і засіб контролю	Область застосування
<p>Візуальний контроль при нормальному денному або штучному освітленні. Освітленість повинна бути не менше 300 лк при застосуванні ламп розжарювання, не менше 500 лк при застосуванні люмінесцентних ламп.</p> <p>Оптичні прилади застосовуються за необхідності</p>	<p>Вироби відносять до однієї з наступних груп: придатні, дефектні, брак.</p> <p>Брак: перетруєні вироби; вироби, які мають механічні пошкодження; вироби, які мають точки корозії, пори і т.п.; вироби, які не допускають переробки із зняттям недоброякісного покриття.</p> <p>Дефектні: вироби, які вимагають зняття недоброякісного покриття і його повторного нанесення; вироби, які вимагають доопрацювання без зняття покриття.</p> <p>Результати оформляються документом</p>

Візуально-оптичний метод НК заснований на спостереженні або реєстрації параметрів оптичного випромінювання, яке взаємодіє з контрольованим об'єктом. За характером взаємодії розрізняють методи проникаючого, відбитого, розсіяного та індукованого випромінювання. Останнім терміном визначають оптичне випромінювання об'єкта під дією зовнішньої дії, наприклад люмінесценцію. Первинними інформативними параметрами є амплітуда, фаза, ступінь поляризації, частота або частотний спектр, час проходження світла через об'єкт, геометрія заломлення і віддзеркалення променів.

Оптичні методи мають дуже широке застосування завдяки великій різноманітності способів отримання первинної інформації. Можливість їх застосування для зовнішнього контролю не залежить від матеріалу об'єкта. Найпростішим методом є органолептичний візуальний контроль, за допомогою якого знаходять видимі дефекти, відхилення від заданих форми, кольори і т.д. Застосування інструментів (візуально-оптичний контроль) типу луп, мікроскопів, ендоскопів для огляду внутрішніх порожнин, проєкційних пристроїв для контролю форми виробів, спроектованих в збільшеному вигляді на екран, значно розширює можливості оптичного методу. Використання інтерференції дозволяє з точністю до 0,1 довжини хвилі контролювати сферичність, площинність, шорсткість, товщину виробів. Дифракцію застосовують для контролю діаметрів тонких волокон, товщини стрічок, форм гострих кромки.

Оптичні методи широко застосовують для контролю прозорих об'єктів. У них виявляють макро- і мікродефекти, структурні неоднорідності, внутрішні напруження (за обертанням площини поляризації). Використання гнучких світловодів, лазерів, оптичної голографії, телевізійної техніки різко розширило область застосування оптичних методів, підвищило точність вимірювання.

За допомогою методів оптичної мікроскопії одержують відомості про мікроструктуру, макроструктуру і мінералогічний склад поверхневих, проміжних і внутрішніх шарів матеріалів і покриттів. Сюди відносяться дані про наявність і розподіл тих або інших фаз, якісне і кількісне оцінювання пористості, зміна останньої в результаті теплових та інших дій на покриття в процесах його отримання, випробувань, після експлуатації у виробках, а також виявлення тріщин, несучільностей, товщини покриття, особливостей топографії його поверхні залежно від складу, способу нанесення, режиму випалення, властивостей, способу підготовки поверхні підкладки.

Візуальні оптичні прилади, використовувані при НК для пошуку дефектів в деталях і конструкціях, за призначенням розділяють на три групи приладів для контролю:

- дрібних близько розташованих об'єктів, тобто деталей і виробів, розташованих від ока контролера в межах відстані якнайкращого зору – 250 мм (лупи, мікроскопи);
- віддалених об'єктів, тобто розташованих на відстані, більшій 250 мм (телескопічні лупи, зорові труби, біноклі);
- прихованих об'єктів – внутрішніх поверхонь отворів, порожнистих деталей і конструкцій (ендоскопи, бороскопи, перископні дефектоскопи тощо).

Лупи і мікроскопи дозволяють виявляти тріщини різного походження, поверхневі корозійні та ерозійні пошкодження, забоїни, відкриті раковини, виразки, пори, викришування матеріалу деталей, риски, надири третьових поверхонь та інші поверхневі дефекти деталей, а також різні дефекти лакофарбувальних і гальванічних покриттів. При аналізі характеру дефектів ці прилади дозволяють відрізнити втомні тріщини від крихких, тріщини – від рисок, прим'ятих задирок, сколів окисної плівки, ниткоподібних забруднень тощо.

Лупи і мікроскопи, що використовуються при капілярному і магнітопорошковому контролі, дозволяють виявляти дрібніші, ніж без застосування оптичних засобів, тріщини, непровари, розшарування та інші дефекти. Огляд деталей проводять за допомогою луп з фокусною відстанню від 125 до 12,5 мм. Через істотне зниження

поля зору глибини різкості при великих збільшеннях для огляду деталей в цехових умовах в основному застосовують мікроскопи.

Збільшення мікроскопів, використовуваних для огляду деталей, не набагато перевищує збільшення луп. Проте навіть при використанні мікроскопа із збільшенням, яке дорівнює збільшенню лупи, ефективність застосування мікроскопа через високу якість зображення і надійне виявлення дефектів вище. Вживані для контролю деталей мікроскопи дають пряме стереоскопічне зображення контрольованої поверхні, що полегшує пошук дефектів.

Перевагою мікроскопів є їх відносно велика робоча відстань. Це дозволяє використовувати їх для огляду різних поглиблень, пазів на деталях. Наприклад, робоча відстань лупи складає 10 мм, а мікроскопа МБС-2 – 64 мм при будь-якому збільшенні.

Як оглядові, використовують бінокулярні наlobні лупи БЛ-1 і БЛ-2. Бінокулярні лупи призначені для огляду об'єктів двома очима. Завдяки стереоскопічності ці лупи дозволяють розглядати об'єкти об'ємно, що неможливо при спостереженні в монокулярну лупу.

Мікроскопи з малим збільшенням знаходять широке застосування в лабораторних умовах при виконанні різних дослідницьких робіт, при оцінці якості дефектоскопічних матеріалів, при аналізі характеру дефектів і руйнувань деталей і в інших випадках.

У цехових умовах мікроскопи використовують в основному для визначення характеру дефектів, виявлених раніше яким-небудь методом дефектоскопії. Проте іноді їх застосовують також для пошуку дефектів при візуально-оптичному, кольоровому, люмінесцентному і магнітопорошковому контролі у тих випадках, коли потрібна висока чутливість контролю, коли зона контролю дуже мала, при контролі деталей особливого призначення та в інших випадках.

Для контролю віддалених об'єктів застосовують телескопічні прилади прямого зору: телескопічні лупи, зорові труби, біноклі тощо. Після проходження через ці прилади промені світла не змінюють свого первинного напрямку. Такі прилади застосовують для контролю деталей складної форми (з глибокими виїмками, отворами, пазами), деталей і силових елементів конструкцій, які знаходяться в межах прямої видимості, але розташованих від очей контролера на відстані, що перевищує відстань якнайкращого зору.

Телескопічні прилади застосовують для виявлення руйнувань прихованих або видалених деталей, крупних тріщин, поверхневої пористості, надривів і задирів, що виникли при деформації

металу на внутрішній поверхні порожнистих деталей, залишкової вигинистої деформації силових елементів конструкцій, течі місткостей і трубопровідних систем (слідами рідин на поверхнях, що оглядаються), місць перегріву електромереж і елементів конструкцій (за зміною кольору і потемнінням лакофарбувальних покриттів), поверхневої корозії, забруднень, а також різних сторонніх предметів усередині закритих конструкцій. Ці прилади дозволяють також визначити візуально якість обробки та обробки внутрішньої поверхні різних порожнистих деталей і виробів.

При візуально-оптичному контролі покриттів доцільно використовувати направлене джерело світла, набір луп, бінокулярний мікроскоп, а при дослідженні якості покриття на внутрішніх поверхнях деталей (у лабіринтах, кишнях і т. п.) виявляється ефективним застосування світловода і дзеркала з укріпленою на його утримувачі переносною лампою. Для огляду внутрішньої поверхні відносно коротких порожнистих деталей і закритих конструкцій застосовують ендоскопи, в конструкції яких використані оптичні трубки приладів спеціального призначення (цистоскопів, бронхоскопів та ін.).

Відеоскоп – одночасне використання візуального і НК;

Томографічний сканер – визначення еквівалентної площі, оцінювання конфігурації та розмірів дефектів.

Ендоскопи з жорсткою робочою частиною (жорсткі ендоскопи або бороскопи) – оптичні прилади, робоча частина яких має вид жорсткої трубки. Ендоскопи складаються з системи передачі зображення і системи передачі світла. Система передачі зображення складається з об'єктиву, обертаючих систем і окуляра, лінз, що є набором, розташованих у внутрішній трубці. Освітлювальна система складається з світлопередавального оптичного волокна, розмішеного між внутрішньою і зовнішньою трубками.

Жорсткі ендоскопи забезпечують найбільш високу якість зображення. Для вибору ендоскопа основними параметрами є: діаметр робочої частини; довжина робочої частини; кут напряму спостереження; кут поля зору. Діаметр робочої частини повинен бути менше вхідного отвору обстежуваного об'єкта на 1 мм. Довжина робочої частини жорстких ендоскопів повинна бути достатньою для доступу до контрольованої ділянки і забезпечувати зручність роботи оператора.

Ендоскопи з гнучкою робочою частиною (гнучкі ендоскопи або фіброскопи) – волоконно-оптичні прилади, робоча частина яких може змінювати свою форму. Система передачі зображення склада-

ється з об'єктива, гнучкого оптоволоконного джгута і окуляра. Освітлювальна система складається з світлопередавального оптичного волокна. Гнучкі телевізійні ендоскопи (відеоскопи) – оптико-електронні прилади, ідентичні за конструкцією гнучким ендоскопам окрім системи передачі зображення. Система передачі зображення складається з об'єктива, ПЗС-матриці, кабелю передачі сигналу, блока перетворення сигналу, відеомонітора.

Невід'ємною частиною освітлювальної системи ендоскопа є освітлювачі (джерела світла). Освітлювач генерує світловий потік і через кабель передачі світла (світловод, світловодний кабель, вбудований або роз'ємний), передає його до об'єктива на кінці робочої частини ендоскопа і забезпечує підсвічування робочої зони.

Для документування результатів огляду через жорсткі і гнучкі ендоскопи, виведення зображення на екран монітора, запису можуть використовуватися як цифрові фотоапарати, так і спеціальні ендоскопічні малогабаритні відеокамери.

2.5.1. Петрографічний і металографічний методи

Дослідження проводяться за допомогою металографічного мікроскопа на полірованих шліфах або аншліфах або безпосередньо на поверхні покриття і за допомогою петрографічного мікроскопа в поляризованому прохідному світлі – на прозорих шліфах (оптично прозорих матеріалів покриттів) та імерсійних препаратах.

Для виготовлення шліфів найбільш складним завданням є отримання початкових зразків покриттів. Це відноситься не тільки до покриттів, які самовільно руйнуються і обсипаються з поверхні металу при охолодженні до нормальної температури, але до багатьох інших на металевих і неметалічних підкладках. Петрографічний аналіз зразків в аншліфах, вимірювання розмірів пор, товщину шарів покриттів на металографічному мікроскопі МІМ-8М проводять, поступово підвищуючи ступінь збільшення. Практика підтверджує доцільність початку роботи з об'єктивами $F = 13,9$ або $15,7$.

Металографічний аналіз поверхневих шарів металів і сплавів за допомогою мікроскопів типу МІМ-8М і вимірювання мікротвердості цих шарів на приладі ПМТ-3 дозволяють скласти уявлення про вплив на ефективність захисної дії покриттів, їх складів, режимів нагрівання, складів і властивостей сплавів і інших чинників.

Імерсійний метод. Це мікроскопічний метод дослідження дрібнозернистих порошків або осколків покриттів, занурених в

спеціальні імерсійні середовища з відомим показником заломлення. Порошок висушеного шлікера, покриття в імерсійній рідині досліджують під мікроскопом шляхом порівняння показників заломлення речовини порошку та імерсійної рідини. Дослідження засноване або на використанні так званої світлової смужки Бекке, що виникає на межі двох середовищ з різними показниками заломлення і зникає при їх рівності, або на виявленні кольорового дисперсійного ефекту, що виявляється при близьких значеннях показників заломлення імерсійного середовища і аналізованої речовини. Порівнюючи показники заломлення імерсійного середовища і речовини, підбирають середовище, показник заломлення якої рівний показнику заломлення речовини. Точність визначення показника заломлення імерсійним методом від +0,002 до -0,001.

Для дослідження використовують спеціальні рефрактометри, стандартний набір імерсійних рідин з показником заломлення 1,408–1,780 і подрібнений в агатовій ступці матеріал покриття (розмір зерен 0,05–0,1 мм).

2.5.2. Гранулометричний аналіз

Оцінка розподілу за розміром частинок порошку шлікера під мікроскопом відноситься до прямих методів визначення гранулометричного складу. Гранулометричний склад шлікерів можна визначати також імерсійним методом. Проте цей метод вельми трудомісткий і дає надійну відтворюваність результатів тільки при ретельному вивченні великого числа частинок і певному навику роботи з тими чи іншими порошками. Шлікер з розміром частинок більше 1–2 мкм аналізують за допомогою мікроскопів із звичайною світловою оптикою. Розподіл частинок менших розмірів виявляють при застосуванні електронного мікроскопа.

Визначення гранулометричного складу порошку полягає в підрахунку числа частинок в заданому інтервалі їх розмірів візуально або по мікрофотографіях препарату. Метод утомливий і дає надійні результати тільки при ретельному вимірюванні великого числа частинок. Цим методом можна оцінити відносний вміст частинок даного розміру, виражений у процентах.

Для отримання надійних даних про гранулометричний склад порошку імерсійним методом показник заломлення імерсійної рідини повинен відрізнитися від показника заломлення досліджуваної речовини на декілька порядків. Приготування препарату необхідно проводити методом усереднювання. Точність аналізу зале-

жить від числа аналізованих частинок (не менше 500), їх розміру, форми, рівномірності розподілу. Для отримання однопроцентної точності аналізу емалевих шлікерів потрібно число частинок шлікера, не менше 1000.

Імерсійний метод включає три етапи робіт: приготування препарату, підрахунок частинок за допомогою мікроскопа і розрахунок гранулометричного складу порошку. Приготування препарату включає операції сушіння шлікера, відбору проби, вибору імерсійної рідини. Готовий імерсійний препарат між наочним і покривним стеклами ставиться на столик мікроскопа. По лінійці окуляра підраховується число частинок в заданому інтервалі розмірів: менше одної поділки, до двох поділок, від двох до трьох поділок і т.д. Підрахунок частинок роблять на 5–10 ділянках препарату, причому сумарне число частинок повинне бути не менше 300. Для одного порошку шлікера досліджують від трьох до п'яти імерсійних препаратів.

Результати підрахунку числа частинок заданого розміру на кожній з ділянок препарату зводять в таблицю, а потім з урахуванням ціни ділення шкали окуляра, сумарного числа частинок і числа частинок в діленнях шкали розраховують процентний вміст у шлікері частинок певного розміру.

2.6. Радіохвильовий метод неруйнівного контролю

Радіохвильовий метод неруйнівного контролю заснований на реєстрації змін параметрів електромагнітних хвиль радіодіапазону, які взаємодіють з контрольованим об'єктом. Використовують хвилі надвисокочастотного діапазону довжиною 1–100 мм і контролюють виробу з матеріалів, де радіохвилі незначно згасають: діелектрики (пластмаси, кераміка, скловолокно), магнітодіелектрики (ферити), напівпровідники, тонкостінні металеві об'єкти. За характером взаємодії з об'єктом контролю розрізняють методи випромінювання: проникаючого; відбитого; розсіяного та резонансного.

Первинними інформативними параметрами є амплітуда, фаза, поляризація, частота, геометрія розповсюдження вторинних хвиль, час їх проходження та ін.

За первинним інформативним параметром розрізняють наступні НВЧ-методи: амплітудний, фазовий, амплітудно-фазовий, геометричний, часовий, спектральний, поляризаційний, голографічний. Методи цього контролю дозволяють визначати товщину і виявити

внутрішні та поверхневі дефекти у виробках переважно з неметалічних матеріалів. Радіохвильова дефектоскопія дає можливість з високою точністю і продуктивністю вимірювати товщину діелектричних покриттів на металевій підкладці. В цьому випадку амплітуда зондувального сигналу є основним інформаційним параметром. Амплітуда випромінювання, яке проходить через матеріал, зменшується через багато причин, зокрема через наявність дефектів. Окрім цього, змінюються довжина хвилі та її фаза.

Контрольні питання

1. Від чого залежать механічні властивості покриттів при електроосадженні?
2. За якими ознаками проводять класифікацію механічних випробувань?
3. Як характеризуються випробування на втому?
4. Які переваги руйнівних методів контролю покриттів?
5. Які випробування проводять на зразках прямокутного перетину?
6. Що розуміється під твердістю металів?
7. Який зі способів найбільш придатний для визначення твердості покриттів?
8. Що характеризує мікротвердість?
9. Яку розмірність має мікротвердість?
10. За якою шкалою проводять вимірювання твердості?
11. Що розуміють під втомою?
12. З якою частотою прикладають навантажувальні сили і моменти при випробуваннях на малоциклово втому?
13. Для чого призначені існуючі засоби неруйнівного контролю?
14. Чим визначається чутливість неруйнівних методів контролю поверхонь покриттів?
15. Що є основними критеріями оцінювання при візуально-оптичному контролі покриттів?
16. Що дозволяють виявляти лупи і мікроскопи?
17. Для чого призначені бінокулярні лупи?
18. Що включає імерсійний метод неруйнівного контролю покриттів?
19. На чому заснований тепловий метод неруйнівного контролю покриттів?

Література: [1–5; 13]

3.1. Вихорострумний метод неруйнівного контролю

Метод найбільш ефективний при виявленні дефектів, розташованих близько до поверхні деталі.

Цей метод контролю є «близьким родичем» магнітного неруйнівного контролю. Спорідненість методів магнітного і вихорострумного контролю полягає в схожості діючих полів – магнітного і вихорового електричного. Магнітне і електричне поля, які виникають під дією змінного струму, мають однакову структуру. Їх лінії напруженості є замкнутими системами, і реакція магнітного та вихорострумного наведених полів на порушення суцільності, неметалічні включення та інші дефекти багато в чому схожа.

При вихорострумному контролі контрольований виріб поміщають в електромагнітне поле котушки – вихорострумного перетворювача. Виріб при цьому можна розглядати як короткозамкнену котушку. У ньому індукується струм, який протікає за замкнутими круговими лініями (названий вихровим).

У якості виникнення вихрового електричного поля, наводять як приклад, трансформатор – дві котушки, надіті на осердя. Включивши первинну обмотку в мережу змінного струму, одержують струм у вторинній обмотці, якщо вона замкнута. Ця фундаментальна властивість електромагнітного поля – змінюючись в часі (у первинній обмотці), породжує вихрове електричне поле (у вторинній короткозамкненій обмотці), її вперше зрозумів англійський фізик Дж. К. Максвелл. Саме ця властивість і використовується при вихорострумному НК. Тільки замість вторинної котушки трансформатора встановлюється виріб, що перевіряється.

Схема збудження вихрових струмів у контрольованому електропровідному матеріалі наведена на рис. 3.1.

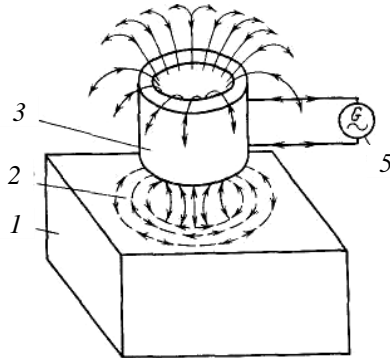


Рис. 3.1 – Схема збудження вихрових струмів в електропровідному тілі

Від генератора змінного струму 5 живиться збуджувальна котушка (вихорострумівий перетворювач) 3. Змінне магнітне поле 3, створюване при цьому навколо котушки, наводить вихрові струми 2 в контрольованій електропровідній деталі 1.

Суть методу в наступному: при піднесенні до поверхні виробу котушки, по якій проходить змінний електричний струм, в металі наводяться вихрові струми.

Сила вихрових струмів залежить від сили і частоти змінного струму, електричної провідності, магнітної проникності та форми виробу, відносного розташування котушки і виробу, а також від наявності у виробі неоднорідностей або пустот.

Електрична провідність залежить від механічної або термічної обробки виробу.

Будь-яке відхилення у структурі та різні дефекти у виробі впливають на розподіл і силу наведених вихрових струмів, а отже, і на характер магнітного поля. Ці зміни магнітного поля можна виявити по їх впливу на первинну обмотку котушки, поміщеної в безпосередній близькості від виробу.

Вихрові струми порушують в об'єкті за допомогою перетворювача у вигляді котушки індуктивності, яка живиться змінним або імпульсним струмом. Приймальним перетворювачем (вимірником) слугує та ж або інша котушка. Збуджувальну і приймальну котушки розташовують або з одного боку, або по різні сторони від контрольованого об'єкта (метод проходження).

Інтенсивність і розподіл вихрових струмів в об'єкті залежать від його геометричних розмірів, електричних і магнітних влас-

тивостей матеріалу, від наявності в матеріалі порушень суцільності, взаємного розташування перетворювача і об'єкта, тобто від багатьох параметрів. Це визначає великі можливості методу як засобу контролю різних властивостей об'єкта, але в той самий час утруднює його застосування, оскільки при контролі одного параметра інші є такими, що заважають. Для розділення параметрів використовують роздільне або сумісне вимірювання фази, частоти та амплітуди сигналу вимірювального перетворювача, підмагнічування виробу постійним магнітним полем, ведуть контроль одночасно на декількох частотах, застосовують спектральний аналіз.

За взаємним розташуванням перетворювача і об'єкта, виділяють прохідні, заглиблювальні, накладні та екранні схеми (рис. 3.2).

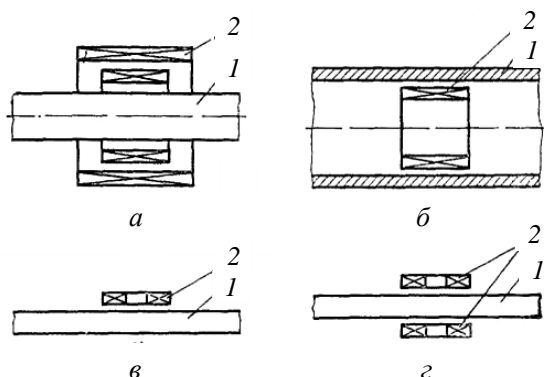


Рис. 3.2 – Деякі типи вихорострумівих перетворювачів:
a, б – прохідні зовнішній і внутрішній; *в* – накладний; *з* – екранний
 (1 – контрольований об'єкт, 2 – перетворювачі)

Останні призначені для роботи за методом проходження. Контроль вихровими струмами виконують без безпосереднього контакту перетворювачів з об'єктом, що дозволяє вести його при взаємному переміщенні перетворювача і об'єкта з великою швидкістю, полегшуючи тим самим автоматизацію контролю.

Розвиток вихорострумівого методу контролю йде в напрямках дослідження шляхів контролю виробів складної конфігурації і багат шарових об'єктів, удосконалення способів налаштування від впливу перешкод, розробки багатодатчикових і багаточастотних систем для комплексного контролю властивостей об'єкта.

Методи, засновані на збудженні і вимірюванні вихрових струмів, використовуються для безконтактного вимірювання елект-

ричної провідності при підвищених температурах, а також для визначення міжкристалічної корозії.

За допомогою цього методу можна визначити зміни електричної провідності і діаметра виробу, викликані пружною і пластичною деформацією.

Методи вихрових струмів можна автоматизувати і застосувати для контролю виробів у масовому виробництві.

На силу вихрових струмів, збуджених в контрольованому виробі, впливають практично всі дефекти типу несучільностей та різних включень, які створюють додатковий опір і перешкоджають протіканню вихрових струмів. Наведені у виробі вихрові струми в свою чергу створюють вторинне змінне електромагнітне поле, напрям якого, згідно із законом Ленца, протилежно напрямку збуджуючого поля (рис. 3.3).

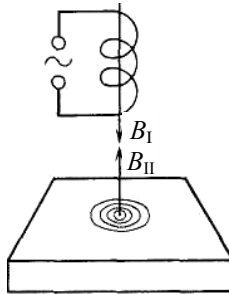


Рис. 3.3 – Схема взаємодії збуджуючого магнітного поля і магнітного поля вихрових струмів

На схемі взаємодії збуджувального магнітного поля і магнітного поля вихрових струмів (рис. 3.3) B_I і B_{II} – відповідно вектори магнітної індукції магнітного поля збуджуючої котушки і магнітного (наведеного) поля вихрових струмів. Напруженість результуючого магнітного поля дорівнює різниці напруженості збуджуючого і вторинного магнітних полів.

Наведемо точніше формулювання загального правила визначення напрямку індукційного струму, який застосовується у всіх випадках. Це правило встановлене російським фізиком Е. Ленцем: «Виникаючий в замкнутому контурі індукційний струм має такий напрям, що створений ним магнітний потік через площу, обмежену контуром, прагне компенсувати ту зміну магнітного потоку, яка викликає даний струм».

Електромагнітне поле вихрових струмів при незмінній ЕРС в збуджувальній котушці сприяє збільшенню її повного опору і зменшенню сили струму, що протікає в збуджувальній котушці. Отже, повний опір котушки залежить від величини і характеру розподілу вихрових струмів в контрольованому виробі.

На рис. 3.4, *а*, *б* наведені схеми збудження вихрових струмів у виробі без дефекту та з дефектом.

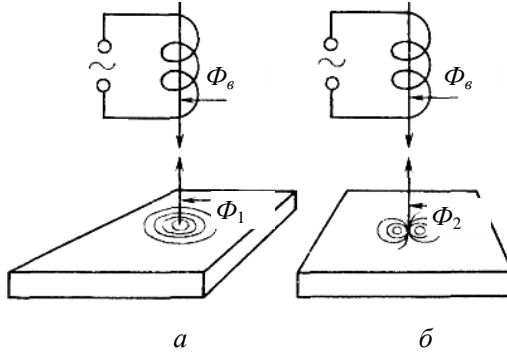


Рис. 3.4 – Схема збудження вихрових струмів у виробках: *а* – без дефекту; *б* – з дефектом

Вихрові струми у виробі без дефекту створюють магнітний потік (або потік магнітної індукції Φ_g), який більше магнітного потоку наведеного поля вихрових струмів Φ_2 у виробі з дефектом, оскільки місцеве (локальне) зменшення електропровідності через наявність дефекту знижує щільність вихрових струмів. Результуючий магнітний потік у першому випадку $\Phi_{p1} = \Phi_g - \Phi_1$ менше, ніж в другому $\Phi_{p2} = \Phi_g - \Phi_2$ де Φ_g – магнітний потік збудження, тому в котушці збудження протікатиме струм $I_1 < I_2$. Ця зміна струму в котушці збудження за наявності дефекту в порівнянні із струмом в котушці збудження при контролі зразка, що не має дефектів, реєструється вимірювальним приладом.

Зміна струму в котушці збудження є первинним інформаційним параметром, за яким визначають стан контрольованого зразка. Причому з розвитком вихорострумового методу НК одержали розвиток і методи використання різних параметрів струму як ознаки, що містять інформацію про наявність або відсутність дефектів. Широко використовуються амплітудні, фазові, частотні та спектральні характеристики струму вихорострумових перетворювачів (котушок).

Методами вихорострумового неруйнівного контролю виявляють відхилення від заданого хімічного складу електропровідних матеріалів і виробів з них, сортують сплави за марками; контролюють режими термічної і хіміко-термічної обробки (ХТО) металів; перевіряють структуру металу, ступінь її однорідності; визначають твердість металу і відхилення її від заданої; визначають електропровідність і контролюють фізичні властивості металів, пов'язані з цією характеристикою. Вихорострумний контроль використовують також для вимірювання різних геометричних параметрів деталей машин і виробів при неможливості проведення вимірювань іншими способами без руйнування; наприклад, товщину гальванічних, лакофарбувальних та інших захисних покриттів, неелектропровідних плівок, товщину одного з шарів біметалів (у випадку, якщо електропровідність або магнітна проникність шарів різна), визначають відхилення від заданої форми і розмірів виробів тощо.

Вихорострумний контроль застосовують для виявлення поверхневих і підповерхневих тріщин, неметалічних включень, міжкристалічної корозії та інших дефектів, типових при обробці металів тиском, механічними способами, литвом.

До особливостей методу вихрових струмів (МВС) відносять:

- можливість перевірки великого числа параметрів виробу;
- перевірку шарів матеріалу невеликої товщини;
- велику швидкість і незначну трудомісткість контролю;
- порівняльну простоту реалізації дистанційного контролю деталей, встановлених в малодоступних місцях машин;
- можливість вимірювання товщини листа, стінки труб і деталей при односторонньому доступі;
- електричну природу сигналу, швидкодію, яка дозволяє легко автоматизувати контроль;
- можливість контролю швидко рухомих виробів.

3.1.1. Визначення фізико-механічних властивостей і складу покриттів

Фізико-механічні властивості металів (статична і втомна міцність, в'язкість, пластичність, твердість, теплоємність тощо) залежать від хімічного складу, структури, стану, а деякі – і від умов застосування. Всі ці показники функціонально пов'язані з електропровідністю, яка є важливою узагальненою характеристикою немагнітного матеріалу, що безпосередньо впливає на вихровий струм (ВС),

сигнал датчика, покази приладу. Це дозволяє шляхом вимірювання електропровідності визначати хімічний склад, структуру, режими термообробки, напружений стан, твердість, міцність і т.д. Тому закономірності впливу електропровідності на сигнал різних типів датчиків є основними при контролі МВС немагнітних матеріалів.

3.1.2. Контроль кількості домішок і хімічного складу

За наявності навіть незначної кількості домішок змінюються електропровідність і технологічні властивості металу, що може з'явитися причиною утворення дефектів.

Прилади дозволяють встановити залежність міцності металів від наявності різних домішок і вирішити зворотнє завдання – за електропровідністю і складом домішок визначати їх кількість.

3.1.3. Сортування матеріалів за марками

На більшості заводів матеріали сортують за марками за допомогою стилоскопа. Проте стопроцентний контроль цим способом є трудомістким, а визначення марки матеріалу деталі безпосередньо в конструкції – неможливо.

При сортуванні сплавів ВС порівнюють результати вимірювань електропровідності з відомими її значеннями для цих сплавів або з показами приладів, одержаними на контрольних зразках цієї партії, плавки, садки.

Сортовані вироби партії повинні бути в однаковому стані (незагартованими або загартованими, відпаленими, плакованими тощо). Якщо вироби мають покриття, то його матеріал і товщина повинні бути однаковими для всієї партії.

Щоб розсортувати матеріали за марками, потрібно заздалегідь статистично визначити межі значень електропровідності кожного сплаву в різних станах. Зміна значень міцності для однієї марки сплаву може відрізнятись від плавки до плавки через допустимі відхилення хімічного складу. У межах однієї плавки також спостерігається розкид значень електропровідності, але значно менший. Це відбувається під впливом допустимих відхилень у режимах обробки.

3.1.4. Контроль якості термообробки

У ряді випадків МВС дозволяє виключити металографічний аналіз і механічні випробування при визначенні вигляду та якості

термообробки, а також механічних характеристик матеріалів. З цією метою необхідно заздалегідь досліджувати зразки, піддавши їх термообробці за різними режимами і провівши контроль.

Найкраще вивчений МВС для контролю якості термообробки алюмінієвих сплавів. Проте і для нього немає повних відомостей про вплив різних режимів обробки на σ сплави всіх типів і залежності σ від механічних властивостей металів.

МВС виявляє так звані м'які плями – зони меншої твердості, які виникають при гартуванні великогабаритних деталей з алюмінієвих сплавів. Ці дефекти є наслідком недостатнього прогрівання або неінтенсивного охолодження деталі при зануренні у ванну. М'які плями зустрічаються на кінцях довгих деталей, що гартуються направленим струменем. Електропровідність м'яких плям дещо більша, ніж решти частини деталі. Істотний вплив на механічні властивості і корозійну стійкість має швидкість охолодження нагрітих деталей при перенесенні їх з печі в гартівне середовище. Вона впливає і на електропровідність матеріалу. Вимірюючи електропровідність, можна стежити за процесом старіння сплаву і розрізнати матеріали після штучного і природного старіння.

МВС використовують для визначення механічних властивостей, якими володітимуть деталі після тривалого природного старіння. При контролі МВС матеріалів на твердість також потрібно мати контрольні зразки або графіки залежності твердості від електропровідності. При їх побудові необхідно враховувати можливі зміни міцності через відхилення хімічного складу плавок, наявності плакovanого шару та інших чинників. Для багатьох матеріалів є графіки залежності між електропровідністю і твердістю, які дають можливість оцінювати твердість без їх пошкодження.

3.1.5. Контроль якості хіміко-термічної обробки сталі

Заводський контроль якості ХТО зводиться до перевірки твердості поверхні і встановлення глибини і структури цементованого, азотованого або борованого шару. Масова перевірка якості ХТО проводиться в основному шляхом вимірювання твердості. Проте цей спосіб не завжди дає задовільні результати. Він не дозволяє оцінювати вміст і розподіл по глибині насичуючої речовини – вуглецю, азоту, алюмінію, бору.

МВС розширює можливості контролю якості ХТО. Так, при роботі на декількох частотах МВС дозволяє проводити пошарове ви-

мірювання кількості насичуючої речовини. Одне з основних джерел помилок при визначенні МВС якості ХТО – коливання концентрації насичуючої речовини в шарі.

3.1.6. Контроль розмірів листів і труб та властивостей їх матеріалів

При контролі тонких листів і тонкостінних труб на сигнал датчика чинить вплив як електропровідність, так і товщина матеріалу. Завадою є коливання зазору між виробом і датчиком, що при контролі в прохідному датчику пов'язано із зміною зовнішнього діаметра труби. МВС можна контролювати фізико-механічні властивості матеріалу, марку, якість термообробки, товщину листа і розміри труби (товщину стінки, різностінність, зовнішній і внутрішній діаметри).

3.1.7. Контроль товщини покриттів

При розробці приладів і методик вимірювання товщини покриттів слід вибирати частоту збудження МВС, діаметр датчика, узагальнений параметр, при якому забезпечується достатня чутливість до зміни товщини і зменшується до мінімуму вплив властивостей основи. Цю задачу вирішують шляхом аналізу відповідних годографів. Товщину покриттів, як правило, вимірюють за допомогою накладного датчика. МВС дозволяє контролювати не тільки товщину, але й електропровідність покриття.

Струмовихрові товщиноміри застосовують для контролю тонких лакофарбувальних, оксидних покриттів і клейових плівок, нанесених на немагнітні метали; склопластикових, емалевих, керамічних та інших теплозахисних покриттів на будь-якому металі; гальванічних покриттів на магнітних і немагнітних металах.

3.2. Радіаційний метод неруйнівного контролю

Радіаційний метод НК заснований на реєстрації та аналізі проникаючого іонізуючого випромінювання після взаємодії його з контрольованим об'єктом. Останнім часом знаходять застосування навіть потоки позитронів, за ступенем поглинання яких визначають ділянки об'єкта, збіднені або збагачені електронами.

Найширше використовують для контролю рентгенівське і γ -випромінювання. Їх можна використовувати для контролю виробів

з різних матеріалів, підбираючи сприятливий частотний діапазон. Нагадаємо, що ці методи випромінювання є електромагнітними хвилями.

Всі розглянуті раніше методи контролю засновані на застосуванні електромагнітного випромінювання. Частота коливань підвищувалася від методу до методу. При контролі магнітними і електричними методами використовувалися постійні або повільно змінні поля. У вихорострумовому контролі частоти досягали мегагерцевого діапазону. Далі частота збільшувалася при використанні НВЧ, інфрачервоного, оптичного випромінювання. Рентгенівське і гамма-випромінювання є найбільш короткохвильовими з усіх розглянутих раніше: γ -випромінювання має довжину хвилі $\sim 10^{10} - 10^{13}$ м (частоту $3 \cdot 10^{18} - 13 \cdot 10^{21}$ Гц).

За характером взаємодії з контрольованим об'єктом основним способом радіаційного (рентгенівського і гамма-контролю) є метод проходження. Він заснований на різному поглинанні випромінювання матеріалом виробу і дефектом. Таким чином, інформативним параметром тут є щільність потоку випромінювання. У місцях стоншувань і дефектів, щільність проникного потоку зростає. Чим більша товщина виробу, тим більше високочастотне (жорсткіше) випромінювання застосовують для контролю: рентгенівське, гамма (від розпаду ядер атомів), жорстке гальмівне (від прискорювача електронів: бетатрона, мікротрону, лінійного прискорювача). Граничне значення товщини сталі, контрольоване за допомогою випромінювання останнього типу, близько 600 мм. Таким чином, суть методу радіографії полягає у тому, що інтенсивність випромінювання (рентгенівського та γ -випромінювання) змінюється за наявності у контрольованому виробі внутрішнього дефекту (рис. 3.5).

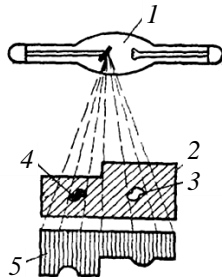


Рис. 3.5 – Схема просвічування рентгенівським або γ -випромінюванням:
1 – джерело випромінювання; 2 – контрольований об'єкт; 3 – раковина;
4 – щільне включення; 5 – епюра інтенсивності випромінювання

На знімках виявляють наступні дефекти зварних з'єднань: тріщини подовжні і поперечні; непровари; пори, газові включення; шлакові включення, а також зовнішні дефекти – пропалення, підрізи, втягнення. Способи реєстрації радіаційних зображень розділяють на три групи: радіографічні; радіоскопічні (способи радіаційної інтроскопії); радіометричні.

Приймачем випромінювання слугує, наприклад:

- рентгеноплівка (радіографічний метод);
- скануючий скінтіляційний лічильник частинок і фотонів (радіометричний метод);
- флуоресціюючий екран з подальшим перетворенням зображення в телевізійне (радіоскопічний метод) і т.д.

3.2.1. Устаткування для контролю просвічуванням

У рентгенівських апаратах застосовують різні за конструкцією рентгенівські трубки: двоелектродні, з винесеними анодами, що обертаються, секційні, імпульсні та двофокусні. Найбільш поширені – двоелектродні трубки.

Двоелектродні трубки використовують при напругах до 200–300 кВ. Вони мають електричне фокусування електронів, за якого розмір фокусної плями не змінюється у всьому діапазоні регулювання анодного струму і напруги. Трубки з винесеним анодом, використовувани для панорамного просвічування, мають додаткове магнітне фокусування. При напругах від 300 кВ до 2 МВ застосовують секційні (каскадні) трубки, у яких є проміжні кільцеві електроди з примусово заданими потенціалами, які забезпечують вирівнювання електричного поля по довжині трубки. Для запобігання відхиленню електронів убік застосовують магнітне фокусування електронного пучка, що дозволяє регулювати розмір фокусної плями.

Рентгенівські апарати (стаціонарні, пересувні і переносні) за конструкцією ділять на кабельні і моноблочні (блок-трансформаторні). У кабельних апаратах генератор високої напруги і рентгенівська трубка виконані як окремі блоки, з'єднані між собою високовольтним кабелем, а в моноблочних – вони розміщені в одному блоці. Моноблочні апарати легші і компактніші кабельних.

3.2.2. Спектральний аналіз

Неможливо представити сучасне виробництво і науку без методів аналізу, які дозволяють швидко і точно встановити склад

речовини. Останніми роками вимоги до методів аналізу зросли. Наприклад, одним з найважливіших завдань аналітичної хімії є визначення малого вмісту, слідів елементів (тобто 10^{-7} – 10^{-8} %) у чистих і надчистих речовинах: напівпровідниках, матеріалах атомної і електронної промисловості. Можливості виявлення малих кількостей речовин потребують космохімія, біохімія, геохімія та багато інших галузей науки. Без методів аналізу, які дозволяють визначати незначні концентрації елементів, неможливо вирішити завдання охорони природи і навколишнього середовища.

Висока продуктивність праці на виробництві вимагає швидких і точних методів контролю сировини, напівпродуктів і готової продукції. Наприклад, швидкісну плавку в крупних конвертерах, де весь процес закінчується за 30 хв., вдалося упровадити тільки після того, як навчилися швидко аналізувати сталь по ходу плавки.

Пошаровий якісний спектральний аналіз проводиться з метою виявлення наявності в поверхневому шарі сталей і сплавів кремнію, бору, кальцію, магнію та ін. елементів, які входять до складу покриттів. Крім того, визначається глибина шару на поверхні зразків сталей і сплавів, збідненого легуючими елементами в результаті окиснення, дифузії останніх в процесі високотемпературного нагрівання без захисту та із захистом покриттям. Нарешті, визначається вміст в поверхневих шарах і в серцевині зразків кисню, водню, азоту.

Виникнення спектрів випускання і спектрів поглинання речовини завжди пов'язане із зміною внутрішньої енергії його атомів або молекул. Частинки (атоми, молекули), які володіють мінімальним запасом внутрішньої енергії, називають незбудженими, а стан, в якому вони знаходяться, – нормальним або основним. Шляхом зовнішньої дії частинкам речовини можна надати додаткову енергію, поглинувши яку, вони з нормального стану перейдуть в збуджений.

Внутрішня енергія атомів і молекул не може змінюватися безперервно, а змінюється стрибкоподібно, дискретно. Для атомів кожного елемента, молекул кожної речовини існує свій переривчастий ряд можливих енергетичних станів. Тому вони можуть випускати і поглинати енергію тільки строго певними порціями. Поглинаючи або випускаючи порцію енергії, частинка з одного можливого енергетичного стану переходить в інший.

Спектральний аналіз об'єднує різні методи аналізу, які можна класифікувати за декількома ознаками.

1. Аналіз може бути атомним і молекулярним. Виконуючи якісний атомний аналіз, встановлюють, які елементи входять до

складу аналізованої проби. Виконуючи кількісний атомний аналіз, визначають концентрацію елементу в пробі.

Методами якісного молекулярного аналізу можна встановити природу індивідуальної сполуки, розшифрувати структуру її молекул, визначити, які чисті речовини входять до складу аналізованої суміші. Концентрацію чистих речовин в їх суміші визначають методами кількісного молекулярного аналізу.

2. Залежно від методу електромагнітного випромінювання, що поглинає або випромінює речовина, розрізняють рентгеноспектральні, радіоспектральні та оптичні методи спектрального аналізу.

Рентгеноспектральні методи засновані на вивченні спектрів поглинання і спектрів випускання речовини, які знаходяться в рентгенівській області електромагнітного випромінювання.

Радіоспектральні методи аналізу вивчають спектри молекул радіохвильового діапазону довжин хвиль.

До оптичних відносять всі методи спектрального аналізу, в яких досліджують спектри, що знаходяться в ультрафіолетовій, видимій та інфрачервоній областях.

3. Атомний і молекулярний аналіз можна проводити за спектрами випускання і спектрами поглинання.

Аналіз за спектрами випускання ділиться ще на два методи: емісійний і флуоресцентний, які відрізняються один від одного тільки способом збудження речовини.

В емісійному аналізі частинки речовини збуджуються в джерелі світла (полум'я, газовому розряді тощо), куди вводиться аналізована проба.

У флуоресцентному аналізі частинки речовини, збуджуються квантами електромагнітного випромінювання, які направляють на аналізовану пробу від зовнішнього джерела. Аналіз за спектрами поглинання часто називають абсорбцією.

1. Схема аналізу за оптичними спектрами. Аналіз за спектрами випускання атомів і молекул в різних областях спектра (видимої, УФ, ІЧ) проводять за єдиною схемою, застосовуючи для кожного методу відповідну апаратуру. Спочатку для отримання спектра випускання частинки речовини потрібно збурити, надавши їм додаткову енергію. В емісійному аналізі з цією метою пробу вносять у джерело світла (полум'я або газовий розряд), де відбувається нагрівання, випаровування проби, дисоціація молекул більшості речовин на атоми (атомізація) і збудження окремих атомів та іонів. Тому емісійний аналіз у більшості випадків – атомний.

У флуоресцентному аналізі збудження атомів і молекул здійснюють, опромінюючи пробу відповідним електромагнітним випромінюванням. Для атомного флуоресцентного аналізу пробу заздалегідь випаровують і атомізують. Найчастіше для цієї мети використовують низькотемпературне полум'я, куди пробу вводять у вигляді розчину або тонкоподрібненого порошку.

У збудженому стані частинки речовини знаходяться дуже короткий час (10^{-7} – 10^{-8} с). Самовільно повертаючись у нормальний стан, вони випускають надмірну енергію у вигляді квантів світла, які і складають спектр випускання проби. Якщо вдається одночасно збудити атоми (молекули) всіх речовин, присутніх в пробі, то в спектрі опиняться і відповідні всім їм частоти (довжини хвиль).

Щоб зробити можливим вивчення і аналіз спектра проби, треба кванти різних частот відокремити один від одного в просторі, інакше кажучи, розкласти випромінювання за частотами (довжиною хвиль). Цей процес прийнято називати розкладанням світла в спектр. Здійснюють його на приладах, які мають загальну назву – спектральні прилади. Видиме світло, УФ та ІЧ випромінювання розкладають в спектр оптичними спектральними приладами, основною деталлю яких є призма або дифракційні ґратки. Більшість оптичних спектральних приладів влаштована так, що випромінювання кожної довжини хвилі збирається ним в тонку лінію – спектральну лінію. Відповідно до довжини хвилі кожна лінія займає певне положення у спектрі. Чим більше відрізняються лінії за довжиною хвилі, тим далі одна від одної розташовані вони в спектрі. Дуже близькі лінії можуть зливатися, утворюючи широку смугу. Розрізняють спектри лінійчаті, смугові та суцільні (рис. 3.6).

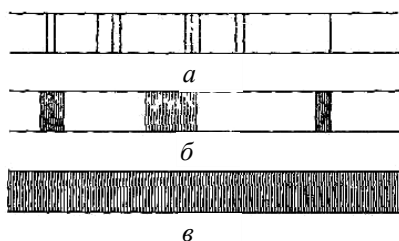


Рис. 3.6 – Типи спектрів:
а – лінійчатий; б – смуговий; в – безперервний або суцільний

Лінійчаті спектри складаються з окремих ліній, які знаходяться на деяких відстанях одна від одної. Вони виникають у тому

випадку, якщо випускають світло окремі атоми, не зв'язані в молекулу і не взаємодіючі один з одним. Тому, застосовуючи як джерело світла полум'я, дугу або іскру, одержують лінійчаті атомні спектри.

Смугові спектри складаються з широких смуг, кожна з яких є сукупністю деякого числа близько розташованих, а іноді й ліній, що збіглися. Смуговий спектр характерний для молекул.

Безперервний (суцільний) спектр є безліччю ліній, які збіглися одна з одною у вигляді суцільної широкої смуги. У широкому інтервалі довжин хвиль такий спектр містить фотони всіх частот (довжин хвиль). Отримують суцільний спектр при розкладанні за довжинами хвиль випромінювання розжареного твердого або рідкого тіла.

Розкладене за довжинами хвиль випромінювання повинне бути яким-небудь чином зафіксовано. Для цього використовують різні способи реєстрації світла, найбільш поширені з яких фотографічний і фотоелектричний. Пристрій реєстрування є частиною спектрального приладу.

Фотографічна реєстрація заснована на тому, що світло, потрапляючи на фотографічну пластинку або плівку, викликає її почорніння. Спектр випускання при цьому виходить на пластинці у вигляді чорних ліній (лінійчатий спектр) або смуг (смуговий спектр) на світлому фоні.

У фотоелектричному методі реєстрації використовуються процеси, в яких енергія світла перетворюється в електричний сигнал (електричний струм, різниця потенціалів). Пристрої, в яких відбувається це перетворення, називають фотоелектричними приймачами світла. Найбільшого поширення набули як приймачі світла фотоелементи і фотопомножувачі, в яких використовується явище фотоелектричного ефекту. Величина виникаючого в приймачі електричного сигналу залежить від падаючого на нього світлового потоку, який пов'язаний з випромінюванням проби. Оцінити величину електричного сигналу можна чутливим гальванометром, мікроамперметром або самописним потенціометром.

Щоб зареєструвати спектр речовини у деякому діапазоні довжин хвиль, треба послідовно вивести на приймач всі довжини хвиль і зміряти електричний сигнал, який відповідає кожній довжині хвилі окремо. Найзручніше в цьому випадку застосування самописного потенціометра, який відразу виписує криву в координатах довжина хвилі – електричний сигнал. Кожна лінія на цій кривій виражається максимумом. При використанні гальванометра або мікроамперметра цю криву доводиться будувати по окремих точках. У

деяких випадках, наприклад, для кількісного аналізу, необхідно реєструвати світло тільки однієї лінії, не записуючи всього спектра.

Спектр в інтервалі довжин хвиль 400–750 нм (видиме світло) можна спостерігати візуально, тобто розглядати неозброєним оком. При цьому в спектрі випускання видно яскраві різноколірні лінії на темному фоні. Одержаний і зареєстрований спектр проби треба розшифрувати. Кожен елемент і речовина мають свій характеристичний спектр, який складається з ліній або смуг певних довжин хвиль.

Тому розшифрування спектра для якісного аналізу полягає у визначенні довжин хвиль ліній (смуг) і встановленні за допомогою довідкової літератури їх приналежності певним елементам або чистим речовинам.

Кількісний аналіз заснований на тому, що інтенсивність спектральних ліній (смуг) елемента (речовини) залежить від його концентрації в пробі. Оскільки із збільшенням концентрації підвищується інтенсивність всіх ліній (смуг) визначуваного елемента в спектрі проби, цілком достатньо для кількісного аналізу зміряти інтенсивність однієї, найбільш чутливої до зміни концентрації лінії або смуги.

Кількісний емісійний аналіз ускладнюється тим, що інтенсивність спектральних ліній у значній мірі залежить від умов отримання спектра, врахувати які в більшості випадків не вдається. Тому необхідно експериментально встановлювати залежність інтенсивності лінії від концентрації за даних умов. Для цієї мети використовують стандартні зразки, або зразки порівняння, тобто зразки, подібні аналізованому, але з точно відомою концентрацією елемента, що визначається.

Спектри стандартних зразків одержують в тих же умовах, що і спектр аналізованого зразка, і у всіх спектрах вимірюють інтенсивність лінії однієї і тієї ж довжини хвилі.

До особливостей і переваг спектрального аналізу можна віднести наступні:

- універсальність методу, тобто спільність схем проведення аналізу будь-якого об'єкта;
- швидкість визначень і можливість їх автоматизації;
- висока вибірковість, що дозволяє одні елементи визначати у присутності інших без попереднього розділення;
- можливість виявлення і визначення дуже малого вмісту (слідів) елементів в різних речовинах.

2. Класифікація спектральних приладів. Вибравши умови атомізації і збудження спектра досліджуваного матеріалу, необхідно

поклопотатися про те, щоб одержане в джерелі світла випромінювання було якомога ефективніше використано для аналізу. Це досягається правильним вибором спектрального приладу і способу установки джерела світла відносно його. Спектральні прилади прийнято класифікувати за способом розкладання випромінювання джерела світла в спектр. Найбільшого поширення набули дисперсійні спектральні прилади, в яких випромінювання розкладається в спектр призмою або дифракційними ґратками. В окремих випадках, коли досліджуються простіші спектри, застосовують фільтрові прилади.

На сьогодні ведуться роботи із створення спектральних приладів, в основу яких покладений абсолютно інший спосіб отримання спектра – спосіб селективної модуляції. Випромінювання кожної довжини хвилі перетворюється приладом в електричний сигнал певної частоти. Перетворені сигнали всіх довжин хвиль одночасно потрапляють на приймач, в якому виробляється складний електричний сигнал, який несе інформацію про оптичний спектр. Для розшифрування цього сигналу в більшості випадків потрібна ЕОМ. Прилади з селективною модуляцією не знаходять широкого застосування в емісійному аналізі, але в перспективі їх використання можливо, оскільки вони володіють поряд переваг перед дисперсійними приладами.

Дисперсійні прилади прийнято класифікувати за областю спектра, в якій вони працюють: ультрафіолетової, видимої або інфрачервоної. Залежно від диспергуючого елемента розрізняють призматичні та дифракційні прилади. За способом реєстрації спектра прилади підрозділяють на візуальні, фотографічні і фотоелектричні. Прилади з візуальною реєстрацією спектра носять загальну назву спектроскопи, які діляться, у свою чергу, на стилоскопи і стилосметри. Прилади з фотографічною реєстрацією спектра називаються спектрографами. Прилади з фотоелектричною реєстрацією спектра називають спектрометрами і спектрофотометрами (останні застосовуються в аналізі, абсорбції).

Спектрометри, як правило, укомплектовані джерелом світла, системою освітлення щілини і фотоелектричним приймачем. Дисперсійним приладом у спектрометрі може бути монохроматор або поліхроматор. Монохроматор дозволяє виділити на приймач світло дуже вузького діапазону довжин хвиль. Поліхроматор одночасно виділяє світло на декілька фотоелектричних приймачів, причому на кожен – світло певного вузького інтервалу довжин хвиль.

Спектрометр на основі монохроматора є одноканальним приладом. Спектрометри на базі поліхроматора називають квантометрами. Квантометри – багатоканальні прилади.

3.2.3. Мікрорентгеноспектральний аналіз

Поверхні зразків досліджують із застосуванням мікроаналізаторів типу МАРИ-1, а також імпортними приладами. Аналіз сплавів доцільно проводити по елементах, збагачення якими якісно виявилося мікроспектральним або спектральним аналізом. Розподіл елементів по глибині зміненого шару визначають за звичайною методикою на поперечних шліфах. Ступінь збагачення оцінюють відношенням інтенсивності ліній даного елемента в даній точці дифузійного шару і в центрі зразка, де цей елемент присутній як легуюча добавка або як технічна домішка.

До переваг багатоканальних приладів для рентгеноспектрального мікроаналізу неорганічних неметалічних матеріалів, меж покриттів і сплавів відноситься, зокрема, можливість одночасного аналізу декількох елементів. Для забезпечення аналізу елементів, з атомними номерами до дев'яносто другого потрібна достатньо широка область довжин хвиль. Багатоканальні рентгеноспектральні аналізатори дозволяють аналізувати зразки на різних довжинах хвиль характеристичного випромінювання, причому окремі канали забезпечуються змінними кристалами – монохроматорами.

Чутливість залежить від виду спектра характеристичного випромінювання даного елемента і міняється в широких межах, як і діаметр електронного зонда (пучка).

Мікроаналізатор дозволяє одержати картину поверхні шліфа у відбитих, поглинених і вторинних електронах в режимі сканування при збільшенні від 80 до 20 500 з реєстрацією на плівку. Крім того, виявляють розподіл компонентів в X -променях в режимі сканування і з реєстрацією на плівці. Нарешті, реєструється на діаграмі спектр характеристичного рентгенівського випромінювання цього елемента.

3.2.4. Рентгеноструктурний і рентгенофазовий аналізи

Визначення параметрів кристалічної ґратки, аналіз структурного стану і фазового складу початкових матеріалів, шлікерів, термооброблених покриттів і матеріалів, що захищаються, проводяться в порошок або на зразку.

Рентгеноструктурний аналіз використовують для виявлення наявності кристалічних фаз в покриттях, глибини дефектного (окисненого, забрудненого елементами впровадження і т. п.) шару сплавів і змін, що відбуваються в дефектному шарі, в результаті нагрі-

вання до високої температури, взаємодії з покриттям. Стосовно титанових, цирконієвих, ніобієвих сплавів рентгеноструктурний аналіз дозволяє проводити пошарові вимірювання періодів кристалічної ґратки сплавів і визначення протяжності зони (альфа- і бета-фазі т.д.), в якій їх величина відрізняється від періодів ґраток основного матеріалу.

Якісний і кількісний рентгенофазові аналізи проводять на порошку, на шматочках покриттів відокремлених від підкладки, на зразках сплавів і неметалічних матеріалів з покриттям. Рентгенограми порошоків ідентифікують за допомогою картотеки ASTM, а зразків – за задалегідь виготовленими еталонами.

Для рентгеноструктурного і рентгенофазового аналізів застосовують іонізаційні рентгенівські установки типу ДРОН-1.5.

3.2.5. Електронна мікроскопія

При дослідженні покриттів за допомогою електронних мікроскопів типу EM-7 або скануючого типу готують вугільно-платинові, целюлозно-вугільні репліки шляхом розпилювання і осадження на покриття вугілля. Після короткочасного (5 с) травлення в слабкому розчині фтористоводневої кислоти і промивки у воді, репліки відокремлюють від зразків з допомогою желатини. Застосовують одно- і двоступінчаті репліки. Для дослідження мікроструктури внутрішніх і проміжних шарів використовують зріз покриття, сплаву, композиції «покриття – сплав». Для оцінювання впливу режиму випалення, випробувань при високій температурі на мікроструктуру і топографію поверхні покриттів аналізують безпосередньо поверхню покриттів.

Контрольні питання

1. Куди при вихорострумовому контролі покриттів поміщають контрольований виріб?
2. Для визначення яких властивостей використовують метод вихрових струмів?
3. Від чого залежить сила вихрових струмів?
4. Які характеристики струму вихорострумових перетворювачів використовуються?
5. До чого зводиться заводський контроль якості хіміко-термічної обробки деталей?

6. Яке випромінювання використовують для контролю виробів з різних матеріалів?
7. Які трубки застосовують у рентгенівських апаратах?
8. З чого складаються лінійчаті, смугасті та суцільні спектри?
9. Що відносять до переваг спектрального аналізу покриттів?
10. Для чого використовують рентгеноструктурний аналіз покриттів?
11. Для чого слугують методи вихорострумового неруйнівного контролю?
12. Що дозволяє контролювати метод вихрових струмів?
13. За якими спектрами можна проводити атомний і молекулярний спектральні аналізи покриттів?
14. Які спектри розрізняють при спектральному аналізі покриттів?
15. Для чого використовують рентгеноструктурний аналіз покриттів?
16. До чого зводиться заводський контроль якості хіміко-термічної обробки деталей?
17. Яке випромінювання використовують для контролю виробів з різних матеріалів?
18. Які трубки застосовують у рентгенівських апаратах?
19. З чого складаються лінійчаті, смугасті та суцільні спектри?
20. Що відносять до переваг спектрального аналізу покриттів?
21. Для чого використовують рентгеноструктурний аналіз покриттів?
22. Для чого служать методи вихорострумового неруйнівного контролю?
23. Що дозволяє контролювати метод вихрових струмів?
24. За якими спектрами можна проводити атомний і молекулярний спектральні аналізи покриттів?
25. Які спектри розрізняють при спектральному аналізі покриттів?
26. Для чого використовують рентгеноструктурний аналіз покриттів?

Література: [4; 5; 12; 13]

4.1. Магнітний метод неруйнівного контролю

4.1.1. Класифікація та області застосування магнітних методів контролю

Цей метод контролю заснований на аналізі взаємодії магнітного поля з контрольованим об'єктом (реєстрація магнітних полів розсіювання, що виникають над дефектами, або визначення магнітних властивостей контрольованих виробів). Його, як правило, застосовують для контролю об'єктів з феромагнітних матеріалів.

При використанні методів магнітного контролю вимірюють параметри магнітних полів, які створюються в контрольованих об'єктах шляхом їх намагнічування. У різних методах магнітного контролю використовують як параметри магнітного поля, що несуть інформацію про наявність або відсутність дефектів, наступні: коерцитивну силу об'єкта контролю; його магнітну проникність; намагніченість; напруженість магнітного поля; залишкову індукцію матеріалу контрольованого об'єкта після зняття магнітного поля та ін.

Магнітні методи застосовують для вимірювання товщини неферомагнітного покриття на феромагнітній підкладці. Як первинний інформативний параметр в цьому випадку використовують потік магнітного поля. П-подібний магніт поміщають на поверхню об'єкта контролю з покриттям. Чим менша товщина покриття, тим більше потік магнітного поля через феромагнітну основу і менше розсіяний потік над об'єктом контролю. Цей потік вимірюють за напруженістю поля під виробом.

У процесі магнітного контролю реєструються магнітні поля розсіювання дефектів. Одержані дані використовують для виявлення порушень суцільності матеріалу деталей, розташованих на поверхні

і в підповерхневих шарах, а в окремих випадках і усередині тіла деталі. Якщо на поверхні намагніченої деталі виявлено магнітне поле розсіювання, то це означає, що в даному місці деталі є дефект (на рис. 4.1, *a*, *б* наведені схеми виникнення над дефектом магнітного поля розсіювання).

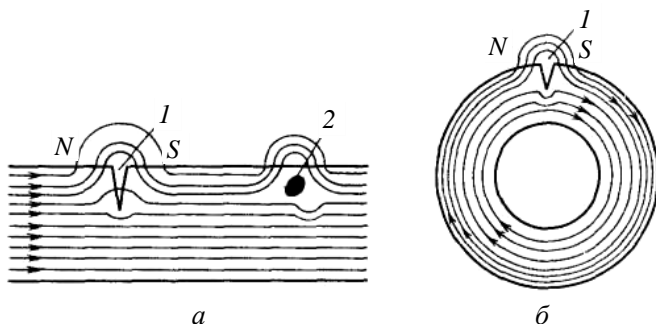


Рис. 4.1 – Схеми виникнення магнітних полів розсіювання

Магнітні лінії зосереджуються в основному в магнітному матеріалі (ферромагнетик). При проходженні через бездефектну частину деталі магнітний потік не змінює свого напрямку, але якщо на його шляху зустрічається тріщина *1* або неметалічне включення *2* (рис. 4.1, *a*), тобто перешкода з малою магнітною проникністю, то магнітний потік змінить свій напрям, частина потоку вийде за межі деталі – виникне магнітне поле розсіювання дефекту. Це поле на поверхні деталі існує як під час знаходження деталі у зовнішньому намагнічувальному полі, так і після його зняття, оскільки деталь залишається намагніченою за рахунок залишкової індукції.

Інший спосіб оцінювання потоків заснований на вимірюванні сили, необхідної для того, щоб відірвати деякий пробний магніт від об'єкта контролю. Тобто залишкове намагнічування, коерцитивну силу і магнітний потік часто оцінюють за пондеромоторною взаємодією (притягнення) пробного магніту і контрольованого об'єкта. Інформацію про магнітну проникність та її зміну залежно від напруженості магнітного поля одержують за допомогою котушки індуктивності (індуктивний метод).

Магнітні методи контролю відповідно до стандартів класифікують за способами реєстрації магнітних полів розсіювання або визначення магнітних властивостей контрольованих виробів (рис. 4.2).

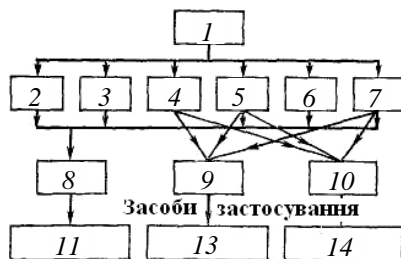


Рис. 4.2 – Класифікація магнітних методів контролю та їх області застосування

На рис. 4.2 позначено наступні позиції: 1 – магнітні методи контролю; 2 – магнітопорошковий; 3 – магнітографічний; 4 – ферозондовий; 5 – перетворювача Холла; 6 – індукційний; 7 – пондеромоторний; 8 – дефектоскопія; 9 – вимірювання товщини; 10 – контроль структури і механічних властивостей; 11 – визначення поверхневих і підповерхневих дефектів типу порушення суцільності металу у феромагнітних виробках; 12 – визначення товщини немагнітних і слабомагнітних покриттів на феромагнітних виробках, товщини азотованого і цементованого шарів, шару поверхневого гартування; 13 – визначення якості термообробки, кількості магнітної фази в немагнітних сплавах, механічних характеристик феромагнітних сталей, залишкового аустеніту, магнітної анізотропії

Диференціацію магнітного методу НК на різні методи за способом отримання первинної інформації розглянемо на прикладі застосування різних типів датчиків і речовин для виявлення градієнта магнітного поля поблизу пустот.

4.1.2. Магнітопорошковий метод контролю

Магнітопорошковий метод (у прикладеному магнітному полі і на залишкового намагнічування) є одним з найпоширеніших методів виявлення дефектів типу порушення суцільності металу. Метод має наступні переваги: високу чутливість; простоту контролю і можливість перевірки різних за формою і розмірам деталей на одному і тому самому дефектоскопі; можливість контролю деталей, які знаходяться в конструкції; порівняно високу продуктивність контролю.

Напруженість магнітного поля розсіювання дефекту та його характер визначаються багатьма чинниками: напруженістю магнітного поля (поля намагнічування); магнітною проникністю матеріалу

деталі; розміром і формою деталі; формою, розміром, місцеположенням дефекту і його орієнтацією.

Магнітопорошковим методом контролюють деталі з великою магнітною проникністю. Цим методом можливо виявляти поверхневі дефекти типу несучільностей з шириною розкриття ≥ 1 мкм, завглибшки $\geq 0,01$ мм. Чутливість методу дещо підвищується при використанні люмінесцентного магнітного порошку. У цьому випадку мінімальна ширина розкриття тріщини у поверхні дефекту, що виявляється, може бути до 0,5 мкм, а протяжність вглиб виробу до 0,005 мм. При намагнічуванні постійним магнітним полем виявляють дефекти, розташовані на глибині не більше 2–3 мм від поверхні. При намагнічуванні змінним полем максимальна глибина дефектів, що виявляються, зменшується.

При контролі магнітопорошковим методом магнітні поля розсіювання виявляють за допомогою феромагнітного порошку. Оскільки магнітне поле розсіювання дефекту неоднорідне, то на феромагнітні частинки, що потрапили в це поле, діятиме сила, яка прагне перемістити феромагнітні частинки в місце найбільшої напруженості поля, тобто в те місце поверхні виробу, під яким знаходяться пустоти матеріалу. Таким чином, над місцем несучільності накопичуватимуться феромагнітні частинки. Ширина смуги порошку, що осів, буде значно більшою, чим розкриття дефекту, що дає можливість виявляти і дуже малі дефекти.

Магнітопорошковий метод контролю при перевірці способом залишкового намагнічування складається з наступних технологічних операцій: підготовка поверхні до контролю; намагнічування об'єкта контролю; нанесення магнітного порошку на об'єкт контролю; огляд контрольованої поверхні і реєстрація індикаторних рисунків дефектів; оцінювання результатів контролю; розмагнічування (рис. 4.3).

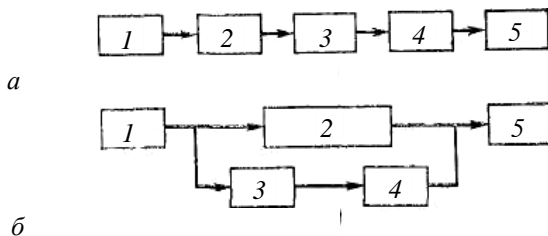


Рис. 4.3 – Послідовність технологічних операцій контролю:
а – на залишковому намагнічуванні; *б* – в прикладеному полі

На рис. 4.3 позначено наступні позиції: 1 – підготовка виробу до контролю, 2 – намагнічування, 3 – нанесення суспензії; 4 – огляд, визначення відповідності виробу ТУ; 5 – розмагнічування, контроль розмагніченості.

Чутливість і надійність магнітопорошкового методу значною мірою залежать від стану поверхні контрольованого виробу. Вона повинна бути сухою, очищеною від іржі, окалини, нагару, від змащувального матеріалу та інших забруднень. При недостатньо ретельному знежиренні водна магнітна суспензія погано змочує контрольовану поверхню. При використанні масляної суспензії залишки води на деталі після промивки істотно спотворять картину магнітного контролю.

Намагнічування виробів – одна з основних операцій магнітного контролю. Застосовують чотири види: подовжнє (полосне); циркулярне; комбіноване; намагнічування в магнітному полі, що обертається, і 14 стандартизованих способів намагнічування деталей.

Вигляд і спосіб намагнічування вибирають залежно від розмірів, форми об'єкта контролю, матеріалу, товщини покриття, а також від характеру та орієнтації дефектів, що підлягають виявленню. При цьому якнайкраща умова виявлення дефектів – перпендикулярний напрям намагнічувального поля по відношенню до напрямку дефектів. При необхідності виявлення дефектів різної орієнтації застосовують намагнічування в двох або трьох взаємно пересічних напрямках, комбіноване намагнічування, а також намагнічування в магнітному полі, що обертається.

При подовжньому намагнічуванні контрольований виріб поміщають між полюсами електромагніта (рис. 4.4, *a*), в магнітне поле соленоїда (рис. 4.4, *б*), або пропускаючи струм через кабель, навитий на виріб (рис. 4.6, *в*). Намагнічування гнучким кабелем широко застосовується для контролю великогабаритних деталей, які не поміщаються у стандартному соленоїді.

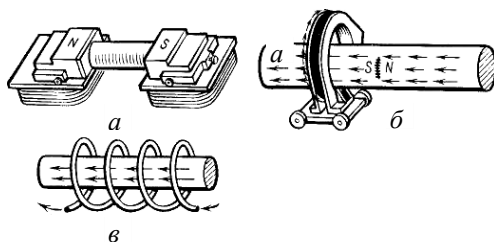


Рис. 4.4 – Схеми подовжнього намагнічування деталей

Поздовжнє намагнічування застосовують для виявлення у виробках дефектів, розташованих упоперек подовжньої осі деталі або під кутом до неї, що перевищує 20–25°.

Циркулярне намагнічування застосовують для виявлення поздовжніх дефектів (тріщин, волосовин) і радіальних тріщин на торцевих поверхнях. Комбіноване намагнічування (одночасно в декількох взаємно перпендикулярних напрямках) значно розширює можливості магнітного контролю, дозволяючи виявляти як поздовжньо-, так і поперечно-орієнтовані дефекти деталей машин.

Після намагнічування (або під час намагнічування при контролі в прикладеному магнітному полі) на виріб наносять феромагнітний порошок – сухий або у вигляді суспензії. Більше застосування одержали суспензії, але підповерхневі дефекти легше виявляються при використанні сухого порошку. Його наносять за допомогою розпилювача або зануренням виробу у порошок. Магнітна суспензія наноситься на контрольований виріб розпилювачем або зануренням у ванну. Огляд контрольованої поверхні проводять неозброєним оком або із застосуванням різних оптичних пристроїв (лупи, мікроскопи, ендоскопи). При використанні люмінесцентних магнітних порошоків контроль поверхні проводять, як і при контролі проникаючими речовинами, ультрафіолетовим опромінюванням.

Кожну деталь, яка піддається магнітному контролю, слід розмагнітити, оскільки при подальшій експлуатації може негативно позначитися вплив її залишкового намагнічування. Поверхні деталей (шестерні, вали, підшипники), що труться, притягатимуть сталеві металеві частинки, наприклад продукти зносу, і тим самим збільшувати власний знос. Нерозмагнічені деталі спотворюють показання електромагнітних і навігаційних приладів. Розмагнічують деталі, впливаючи на них змінним магнітним полем, напруженість якого зменшується від максимального значення до нульового. Ступінь розмагніченої деталей перевіряють приладами для контролю розмагніченості. Градієнт часто виявляють за допомогою магнітного порошку або магнітної суспензії. Їх частинки розташовуються уздовж ліній магнітної індукції поля розсіювання. Це магнітопорошковий метод, широко вживаний для дефектоскопії поверхневих і підповерхневих шарів феромагнітних матеріалів.

Для відображення полів розсіювання на дефектах і вимірювання магнітних характеристик матеріалів використовують датчики типу ферозондів, перетворювачів Холла, магнінорезисторів (які змінюють електроопір при внесенні в магнітне поле).

1. Намагнічування феромагнітних матеріалів при магнітному контролі. Для намагнічування виробів при магнітному контролі використовується магнітне поле, яке виникає у просторі:

- навколо провідника зі струмом (рис. 4.5);
- між полюсами постійного магніту або електромагніта (рис. 4.6, *a*) або соленоїда (рис. 4.6, *б*), в обмотках 1 і 2 яких протікає електричний струм.

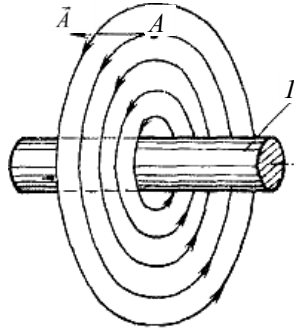


Рис. 4.5 – Магнітне поле навколо провідника зі струмом (схема магнітних ліній поля) \vec{A} – вектор магнітної індукції у точці *A*

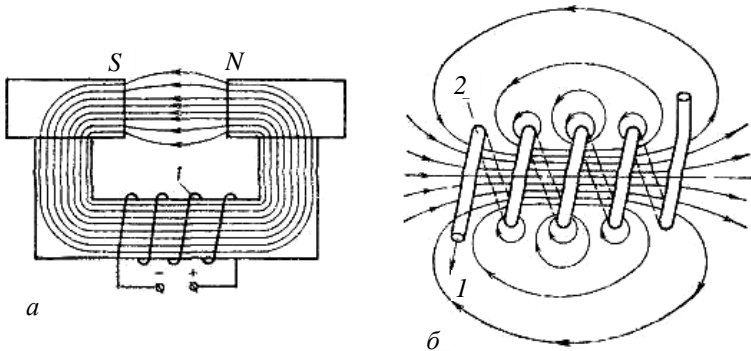


Рис. 4.6 – Спектри магнітних полів: *a* – електромагніта; *б* – соленоїда

Магнітопорошковий контроль проводиться способом прикладеного магнітного поля або способом залишкового намагнічування. При перевірці способом прикладеного магнітного поля операції намагнічування, нанесення суспензії і основну частину огляду виконують одночасно. Способом прикладеного магнітного поля контроль проводять у тих випадках, коли:

– деталь виконана з магнітом'якого матеріалу, наприклад із сталей Ст. 3, 10, 20 тощо;

– деталь має складну форму або мале подовження (відношення довжини деталі до її діаметра), унаслідок чого її не вдається намагнітити до необхідного значення індукції, щоб перевірити на залишкового намагнічування;

– деталь контролюють для виявлення підповерхневих дефектів, розташованих під поверхнею на глибині більше 0,01 мм, або дефектів, прихованих під шаром немагнітного покриття (наприклад, шару хрому) товщиною більше 30–50 мкм;

– потужність дефектоскопа (джерела живлення) не дозволяє намагнітити всю деталь унаслідок її великих розмірів; наприклад, для залишкового намагнічування деталі до індукції необхідна напруженість магнітного поля 16 000 А/м (200 Е), а в прикладеному магнітному полі ця ж індукція досягається при 4160 А/м (52 Е), тобто майже в чотири рази меншої напруженості;

– проводять контроль невеликих ділянок великогабаритної деталі за допомогою переносних електромагнітів або електроконтактів («олівців»).

Контроль в прикладеному магнітному полі не завжди забезпечує вищу чутливість, ніж контроль на залишковому намагнічуванні. Це пояснюється тим, що при контролі в прикладеному магнітному полі деталей, виготовлених із сталей з вираженою текстурою, порошок осідає по волокнах металу, в місцях структурної неоднорідності, а також у місцях зі слідами грубої обробки поверхні. Це знижує чутливість методу.

2. Контроль хромованих деталей в магнітному полі соленоїда.

Для виявлення шліфувальних тріщин і припалів на деталях, покритих шаром хрому товщиною до 120 мкм, застосовують контроль у прикладеному магнітному полі соленоїда, що живиться постійним струмом. Контроль проводять двома способами.

1) на хромовану поверхню деталі наносять магнітну суспензію, деталь вставляють в соленоїд і включають струм в його обмотках. Поволі витягують деталь з соленоїда і спостерігають за розподілом магнітного порошку на деталі біля вихідного вікна котушки. Над тріщинами порошок накопичується у вигляді чітких ліній, валиків, а над припалами – з дещо розпливчатими межами;

2) на хромовану поверхню деталі наносять магнітну суспензію, вставляють деталь в соленоїд і включають струм в його обмотках на 3–5 с. Під дією магнітного поля частинки магнітного

порошку, які входять до складу суспензії, концентруються в місцях, де розташовані дефекти, утворюючи на поверхні контрольованої деталі малюнок. Для приготування суспензії застосовують трансформаторне масло і магнітний порошок з концентрацією 45–50 г на 1 л масла. Напруженість магнітного поля в соленоїді при контролі цими способами повинна бути порядку $(16 \cdot 10^4 - 18 \cdot 10^4)$ А/м.

3. Контроль на залишковому намагнічуванні. При контролі на залишкове намагнічування, деталь заздалегідь намагнічують, а потім, після зняття намагнічувального поля, на її поверхню наносять магнітну суспензію або напилують магнітний порошок. Контроль на залишкове намагнічування можливий при достатньо великому залишковому намагнічуванні деталей. Тому цей спосіб магнітного контролю застосовують для перевірки деталей з магнітожорстких матеріалів $H_c > 800$ А/м (10 Е). Якщо деталь виконана з матеріалу з коерцитивною силою $H_c < 800$ А/м (10 Е), то перевіряти її на залишковому намагнічуванні не можна, оскільки над дефектами утворюються слабкі магнітні поля.

Контроль на залишковому намагнічуванні має наступні переваги перед контролем в прикладеному магнітному полі:

- можливість установки деталі в будь-яке необхідне положення для якісного освітлення поверхні і огляду неозброєним оком або із застосуванням луп, мікроскопів та інших оптичних приладів;
- можливість нанесення суспензії як шляхом поливу, так і шляхом занурення одночасно декількох деталей у ванну з суспензією;
- простоту розшифрування результатів контролю, оскільки при контролі на залишковому намагнічуванні порошок у меншій мірі осідає по рисках, наклепу, місцях грубої обробки поверхні і т.п.;
- меншу можливість припалу деталей в місцях їх контакту з контактними головками дефектоскопа, оскільки для залишкового намагнічування струм пропускають по деталі короткочасно (0,01–1 с).

4. Стабільність залишкового намагнічування при намагнічуванні змінним струмом. Суть намагнічування змінним струмом полягає в наступному. Деталь, поміщена в магнітне поле (наприклад в соленоїд, який живиться змінним струмом), перемагнічується з частотою 50 Гц. Із зростанням останньої півхвилі струму спочатку відбувається розмагнічування деталі, намагніченою попередньою півхвилею струму, а потім вектор намагнічування міняє напрям на протилежний, величина залишкового намагнічування деталі залежить від величини амплітуди останньої півхвилі струму. Отже, якщо

останні півхвилі струму будуть менше попередніх, то і залишкове намагнічування деталі відповідно буде менша.

5. Підготовка деталі до контролю. Для магнітопорошкового контролю деталей на проміжних стадіях виготовлення або готових виробів виконують підготовчі роботи. Місця контактів виробу з контактними головками дефектоскопа або електроолівцями знежирюють розчинниками (бензином, ацетоном) або зачищають дрібним наждачним полотном, щоб запобігти пригоранню деталі при намагнічуванні шляхом пропускання струму. Вологу з виробу видаляють, обдуваючи його струменем сухого повітря. Видалення вологи необхідне, якщо виріб перевірятиметься із застосуванням газової або масляної суспензій або сухого магнітного порошку.

Емалеве покриття деталей часто мимоволі електризується. При контролі способом суспензії у місцях виникнення електростатичних зарядів відбувається осадження магнітного порошку, що часто робить неможливим розшифрування результатів контролю. Тому перед контролем з поверхні виробів електростатичні заряди необхідно знімати. Для цього досить протерти емалеву поверхню деталі злегка вологим чистим дрантям.

Для контролю деталей з темною поверхнею рекомендується застосовувати кольорові порошки, але якщо використовують чорний магнітний порошок, то для збільшення контрасту на контрольовану темну поверхню з фарборозпилювача наносять шар білої нітрофарби (або білої фарби, призначеної для кольорової дефектоскопії) товщиною 3–5 мкм (при такій товщині поверхня деталі «просвічується» через нанесений шар), що полегшує також контроль деталей з грубо обробленою поверхнею.

Для очищення контрольованих деталей в ремонті рекомендується застосовувати піскоструминну обробку поверхні, якщо вона допускається технологією ремонту.

Лакофарбове покриття товщиною більше 30 мкм зменшує чутливість магнітопорошкового контролю. Тому якщо перевіряють деталь на граничній чутливості методу, то лакофарбове покриття товщиною більше 30 мкм рекомендується видаляти.

6. Автоматичні і напівавтоматичні установки магнітопорошкового контролю. Необхідність автоматизації окремих технологічних операцій магнітопорошкового контролю викликається зростанням продуктивності агрегатів в потоковому виробництві та збільшенням швидкостей виготовлення (обробки) виробів при автоматизації ТП, що викликають необхідність включення магнітопорошкового конт-

ролю в єдиний виробничий потік. На сьогодні залежно від задач контролю і вимог ТУ на деталь можлива або повна, або часткова автоматизація магнітопорошкового контролю.

У більшості випадків при контролі однотипних деталей проводять лише часткову автоматизацію, при якій автоматизують подачу деталі на контроль, її затиск в контактному пристрої, пропускання струму, нанесення суспензії або сухого порошку, розмагнічування, звільнення деталі з контактної пристрою. При цьому огляд і відбракування проводить контролер при безпосередньому огляді.

При перевірці різнотипних деталей складної форми застосовують системи автоматичного встановлення заданої напруженості магнітного поля біля поверхні деталі або заданого намагнічування в контрольованому місці деталі.

4.1.3. Магнітографічний метод контролю

Метод контролю полягає в записі магнітних полів розсіювання над дефектом на магнітну стрічку шляхом намагнічування контрольованої ділянки деталі разом з притиснутою до її поверхні магнітною стрічкою (рис. 4.7), і подальшому відтворенні та розшифруванні одержаного запису.

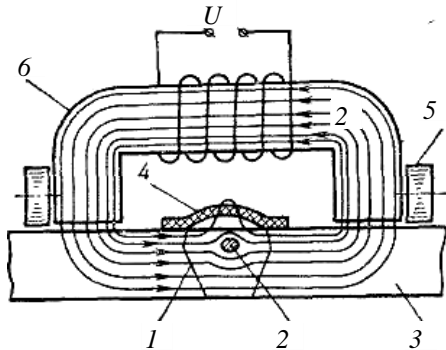


Рис. 4.7 – Схема намагнічування зварного шва разом з магнітною стрічкою:
1 – контрольований зварний шов; 2 – дефект; 3 – деталь;
4 – магнітна стрічка; 5 – ролики; 6 – електромагніт

Читання сигналів з плівки проводиться подібно до відтворення магнітофонного запису музики. Магнітну стрічку протягують в стрічкопротяжному механізмі дефектоскопа відносно магнітної головки блоку відтворення і посилений сигнал прочитують

з екрана осцилографа. Про наявність дефекту, його місцеположення і характер судять за тривалістю, величиною та формою імпульсів. Магнітну стрічку використовують багато разів.

Для запису полів дефектів магнітну стрічку 4 (див. рис. 4.7) розмагнічують і укладають з невеликим натягом на контрольований зварний шов 1 деталі 3 і притискають її до поверхні шва гумовим поясом або за допомогою прокладки з м'якої губчастої гуми, яка приклеюється до нижньої сторони електромагніта. Намагнічування проводять переміщенням електромагніта 6 уздовж зварного шва. Для переміщення електромагніта передбачені ролики 5. Магнітна стрічка, яка знаходиться між полюсами електромагніта, піддається дії намагнічувального поля. Магнітні поля дефектів 2 створюють додаткове місцеве підмагнічування відповідних ділянок стрічки і фіксуються на ній у вигляді місцевої залишкового намагнічування.

4.1.4. Ферозондовий метод контролю

Ферозонд – магніточутливий перетворювач градієнта або напруженості магнітного поля в електричний сигнал. Призначений для вимірювання напруженості магнітного поля або його градієнта.

Ферозонд (рис. 4.8) складається з однієї або двох частин – напівзондів. Кожен напівзонд має магнітом'яке (пермалоеве) осердя C_1 і C_2 та дві обмотки: одну, збуджувальну n'_1 і n''_1 змінне поле, яким намагнічується осердя, а іншу – індикаторну n'_2 і n''_2 . Величина ЕРС на виході індикаторних обмоток n'_2 і n''_2 пропорційна градієнта або напруженості вимірюваного постійного магнітного поля, в якому знаходиться ферозонд.

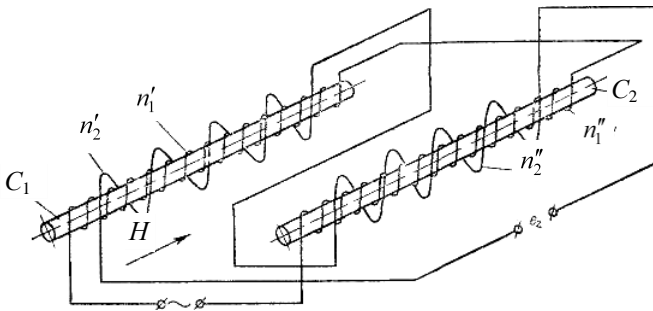


Рис. 4.8 – Схема ферозонду для вимірювання напруженості магнітного поля

У ферозонді-полімері збуджувальні первинні напівобмотки n'_1 і n''_1 сполучені назустріч, а індикаторні (вторинні) n'_2 і n''_2 – паралельно. Збуджуючі обмотки живляться змінним струмом частотою від десятків герц до сотень кілогерц. У ферозонді-градієнтометрі збуджуючі обмотки сполучені паралельно, а індикаторні – назустріч.

У осердях C_1 і C_2 ферозонду-полімеру магнітні потоки направлені назустріч. Якщо зовнішнє магнітне поле рівне нулю, то сумарна індукція $B_1 + B_2$ (де B_1, B_2 – відповідно індукція в осердях C_1 і C_2) у будь-який момент часу буде рівна нулю. На виході індикаторних обмоток ферозонду ЕРС не виникає.

Якщо на осердя разом із змінним полем збудження діятиме постійне магнітне поле, то криві намагнічування осердь змістяться на величину, пропорційну напруженості цього поля. Сумарна індукція не буде дорівнювати нулю $B_1 + B_2 = f(H)$. Отже, на виході індикаторних обмоток виникає ЕРС якої буде у два рази більше частоти збуджуючого струму.

За допомогою магнітометра можна визначити ступінь намагніченості феромагнітного тіла за створюваним ним в просторі магнітним полем. Ферозондові дефектоскопи дозволяють знаходити і вимірювати дуже слабкі магнітні поля невеликого об'єму. Ферозондовим методом можна виявляти не тільки поверхневі порушення суцільності феромагнітних матеріалів, але й порушення суцільності на глибині 10–15 мм.

Застосування ферозондів дозволяє організувати автоматизоване і автоматичне сортування сталевих деталей за твердістю. Вони дають якісну і кількісну характеристику магнітних властивостей матеріалу виробів, по яких можна судити про структуру і механічні властивості при магнітоструктурному аналізі. Цей метод дозволяє виміряти товщину стінок складних виливок і листів великої площі з неферомагнітних матеріалів.

Ферозондовий метод застосовують також для визначення ступеня розмагніченості виробів, підданих магнітному контролю.

4.1.5. Перетворювач Холла, індукційний і пондеромоторний методи контролю

Метод, заснований на ефекті Холла, використовують для виявлення дефектів і в приладах вимірювання товщини, контролю структури і механічних властивостей. Ефект Холла полягає в наступному. Якщо прямокутну пластину, виготовлену з деяких напів-

провідникових матеріалів (наприклад, германію, антимоніду або арсеніду індію), помістити в магнітне поле перпендикулярно до вектора напруженості і пропускати по ній струм у напрямі граней a – b (рис. 4.9), то на гранях c – d виникне ЕРС Холла:

$$E_x = K_x - i, \quad (4.1)$$

де E – вектор напруженості поля, перпендикулярний найбільшій площині пластини, А/см; K_x – постійна Холла, Ом·см²/А; d – товщина пластини, см; i – струм в датчику (пластині), А.

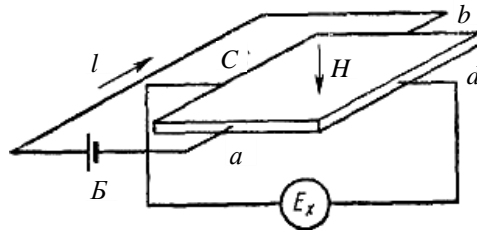


Рис. 4.9 – Схема роботи датчика Холла: a, b, c, d – грані датчика; E_x – ЕРС Холла; H – вектор напруженості поля; B – батарея

Вимірювання напруженості магнітного поля за допомогою датчиків Холла має наступні переваги:

1) можливість вимірювання у вузьких зазорах, отворах невеликого діаметра, унаслідок невеликих розмірів датчиків (мінімальні розміри кристалічних датчиків Холла: площа $0,7 \times 0,7$ мм², товщина близько 1 мкм, тоді як товщина плівкових датчиків з підкладкою – 0,1 мм);

2) можливість вимірювання екстремального значення напруженості, оскільки вихідна напруга датчика Холла пропорційна напруженості поля, нормальної до його площини;

3) датчик Холла – статичний елемент, на відміну, наприклад, від перетворювачів індукційного типу;

4) лінійна залежність вихідної напруги від напруженості поля в широких межах.

Індукційний метод знайшов застосування для виявлення дефектів в залізничних рейках, укладених у колію.

Пондеромоторний метод, заснований на пондеромоторній взаємодії вимірюваного магнітного поля і магнітного поля струму в рамці приладу або магніту, знайшов застосування в дефектоскопах контролю залізничних рейок, коерцитиметрах.

Окрім виявлення дефектів типу несучільностей матеріалу, магнітні методи дозволяють:

- вирішувати задачі дослідження структури;
- визначати якість термообробки деталей;
- визначати наявність і кількість залишкового аустеніту;
- визначати магнітну анізотропію;
- контролювати процес розпаду твердого розчину і дисперсійного твердіння;
- визначати механічні характеристики феромагнітних сталей і чавунів за зміною їх магнітних характеристик;
- контролювати товщину цементованого або азотованого шарів і товщину шару поверхневого гартування виробів.

4.1.6. Магнітний контроль структури, фізико-механічних властивостей, вимірювання товщини покриттів

1. Способи визначення структури та фізико-механічних властивостей. Коерцитивна сила є однією з найбільш структурно-чутливих характеристик магнітних властивостей феромагнетиків, тому її використовують для контролю якості термообробки різних сталевих і чавунних виробів. За значенням коерцитивної сили можуть бути визначені твердість, глибина цементованого шару, вміст легуючих елементів, глибина активного загартованого шару деталей, які гартуються струмами високої частоти. Для застосування цього способу необхідно заздалегідь встановити зв'язок між коерцитивною силою і механічними характеристиками. За значенням коерцитивної сили проводять автоматичну розбраковку готових виробів.

Коерцитиметр, призначений для застосування в процесі виробництва виробів, складається з автотрансформатора 1, випрямляча з фільтром 2, намагнічуючої котушки 5, пристрою 7 для вимірювання напруженості магнітного поля з датчиками 6 та індикатора 8 (див. рис. 4.10). При вимірюванні коерцитивної сили струм в котушці, що намагнічується, спочатку доводиться до максимального значення, а потім зменшується до нуля.

При цьому досліджуваний виріб 4 практично намагнічується до насичення, а після виключення струму намагніченість виробу зменшується до величини залишкової індукції. Потім перемикачем 3 змінюють напрям струму в намагнічуючій котушці і збільшують його до моменту повної компенсації розсіяного поля виробу магнітним полем струму в котушці.

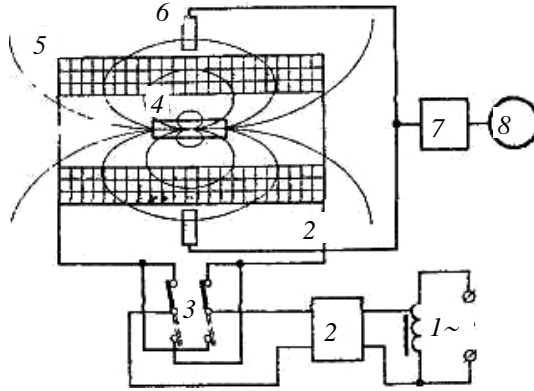


Рис. 4.10 – Принципова схема коерцитиметра:

- 1 – автотрансформатор; 2 – випрямляч з фільтром; 3 – перемикач;
 4 – досліджуваний виріб; 5 – намагнічуюча котушка; 6 – датчик;
 7 – пристрій вимірювання напруженості магнітного поля; 8 – індикатор

Величина струму в котушці, при якій відбувається повна компенсація розсіяного магнітного поля виробу, пропорційна коерцитивній силі. Для визначення моменту повної компенсації розсіяного магнітного потоку виробу застосовують ферозондові перетворювачі.

2. Контроль деталей за величиною магнітної проникності. Для більшості термічно оброблених сталей спостерігається однозначна залежність між твердістю і магнітною проникністю. Іноді спосіб магнітної проникності виявляється придатним там, де коерцитивна сила неоднозначно характеризує структуру і твердість (наприклад, в загартованих деталях зі сталей У7, У8, У10, ШХ15, ШХ9 та ін.).

У приладах відбувається порівняння магнітної проникності контрольованої та еталонної деталей.

Твердість останньої визначається механічним способом. Різниця магнітної проникності випробовуваної та еталонної деталей перетворюється в електричну величину в датчику, який є двома диференційно включеними трансформаторами (рис. 4.11).

Осердям трансформатора є: в одному – деталь 1 для контролю, а в другому – еталонна деталь 2. Залежно від того, більша або менша твердість випробовуваної деталі за твердість еталонної, на виході датчика виникає ЕРС певної величини і фази. Ця ЕРС подається на вхід підсилювача 3, на виході якого включений сортувальний механізм автомата 4, який сортує деталі за твердістю.

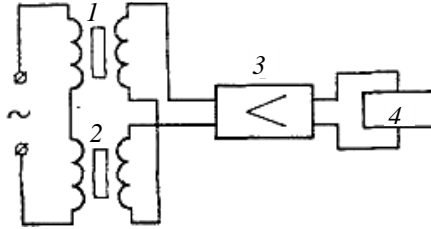


Рис. 4.11 – Принципова схема приладу для визначення твердості, заснованого на порівнянні магнітної проникності деталей:

**1 – деталь для контролю; 2 – еталонна деталь;
3 – підсилювач; 4 – сортувальний механізм автомата**

3. Магнітні товщино міри, розроблені на магнітному методі

вимірювання товщини покриттів, передбачають прилади:

- з постійними магнітами, силу відриву від деталі (або тяжіння до неї) вимірюють за допомогою пружинних динамометрів;
- з електромагнітами, сила відриву від деталі яких вимірюється за вимірюванням струму намагнічування;
- дія яких заснована на реєстрації зміни магнітного опору контрольованої ділянки, викликаних зміною відстані між датчиком і поверхнею деталі.

Магнітний метод застосовний для визначення товщини немагнітних покриттів на феромагнітній основі або у разі різкої відмінності магнітних властивостей матеріалу основи і покриття. Наприклад, магнітний метод для вимірювання товщини нікелевого покриття. При цьому чутливість приладу знижується приблизно удвічі, але все ж таки залишається цілком достатньою для вимірювання покриттів товщиною до 100–150 мкм.

Точність вимірювання товщини покриттів залежить від різних технологічних і конструктивних чинників: кривизни і неплоскостності контрольованої поверхні, шорсткості поверхні, товщини, стану і властивостей матеріалу основи і т.д. Практично при роботі з магнітними товщиномірами похибка може досягати величини $\pm 10\%$ від верхньої межі шкали. При великій шорсткості збільшується відстань між магнітом і феромагнітною основою виробу, разом з тим зменшується ефективна поверхня взаємодії, що обумовлює велику похибку вимірювання товщини покриття.

Хімічний склад і структура основного металу виробу істотного впливу на точність вимірювання магнітним методом не мають.

У багатосерійному і масовому виробництвах, коли наносять покриття на однотипні деталі з однорідними властивостями і технологічною підготовкою, прилади, дію яких засновано на магнітному методі, можна рекомендувати для контролю товщини покриттів безпосередньо в цеху, оскільки у порівнянні з іншими вони компактніші.

Принцип дії магнітних товщиномірів МТ-2, В-22, В-166, ИПТ-1, МТА-1, МТА-2 заснований на визначенні сили тяжіння постійного магніту до деталі. Як основний елемент їх конструкції застосовані постійні магніти. У всіх приладів є шкали, за якими визначають зміну подовження пружин при відриві магніту від контрольованої поверхні.

Принципи дії магнітних товщиномірів ИПТ-5, МТ-ДА3 заснований на визначенні сили тяжіння рухомого осердя електромагніта залежно від товщини покриття. Сили тяжіння осердя залежать від сили струму, який протікає по обмотці електромагніта датчика у момент відриву осердя електромагніта від контрольованої деталі.

Принципи дії магнітних товщиномірів МТ-10Н, МТ-20Н заснований на реєстрації змін магнітного опору до контрольованої ділянки, викликаних варіацією відстані між датчиком і поверхнею деталі.

Таблиця 4.1 – Контрольовані параметри, методи і засоби контролю товщини покриттів

Метод і засіб контролю	Область застосування
Магнітостатичний метод (магнітного потоку). Відносна похибка методу $\pm 10\%$.	Для контролю товщини феромагнітних металевих покриттів, неметалічних і гальванічних нікелевих покриттів на феромагнітних металах
Магнітоіндукційний метод. Відносна похибка методу $\pm 4\%$. Прилади: ТПО, ТС-1, МИП-10, МТ-10М, МТ-30М, МТ31Н, М-40МУ	Для контролю феромагнітних металевих і неметалічних покриттів на феромагнітних металах. Контроль різноманітних деталей, зокрема з труднодоступними уступами, отворами

4.2. Електричний метод неруйнівного контролю

Електричний метод НК заснований на реєстрації параметрів електричного поля, яке взаємодіє з контрольованим об'єктом (власне електричний метод), або поля, яке виникає в контрольованому

об'єкті в результаті зовнішньої дії (термоелектричний і трибоелектричний методи). Первинними інформативними параметрами є електрична місткість або потенціал.

Місткісний метод застосовують для контролю діелектричних або напівпровідникових матеріалів. За зміною діелектричної проникності, зокрема її реактивної частини (діелектричним втратам), контролюють хімічний склад пластмас, напівпровідників, наявність у них несущільностей, вологість сипких матеріалів та інші властивості.

Метод електричного потенціалу застосовують для контролю провідників. Вимірюючи падіння потенціалу на деякій ділянці, контролюють товщину провідного шару, наявність несущільностей поблизу поверхні провідника. Електричний струм огинає поверхневий дефект, по збільшенню падіння потенціалу на ділянці з дефектом визначають глибину несущільностей з похибкою в декілька процентів.

Термоелектричний метод застосовують для контролю хімічного складу матеріалів. Наприклад, нагрітий до постійної температури мідний електрод при 160 тис. тисують до поверхні виробу і за виникаючою контактною різницею потенціалів визначають марку сталі, титану, алюмінію або іншого матеріалу, з якого зроблено виріб.

Інші електричні методи:

- екзоелектронної емісії (емісія іонів з поверхні виробу під впливом внутрішніх напружень);
- електроіскровий (вимірювання характеристик середовища за параметрами електричного пробою в ній);
- електростатичного порошку (визначення дефектів в діелектриках з використанням як індикатору наелектризованого порошку).

Ці методи поки знаходять порівняно вузьке практичне застосування, але інтенсивно вивчаються.

4.2.1. Метод вимірювання електричного опору

Суть методу полягає в тому, що при пропусканні електричного струму через металевий виріб між двома його точками виникає різниця потенціалів; наявність дефекту змінює цю різницю. За зміною різниці потенціалів судять про внутрішній стан виробу.

При вимірюванні електричного опору на результати випробувань значно впливає поверхневий контактний опір. Для виключення цього впливу розроблені спеціальні електроди.

При випробуваннях питомий електричний опір металів і

сплавів не визначають, а порівнюють опір зразків, що відрізняються складом або обробкою, або стежать за зміною електричного опору на ході обробки або фазових перетворень металів і сплавів. Зміна опору зразків невелика, тому застосовують чутливі прилади. В основному вимірюють опір і розміри зразків і по цих параметрах розраховують питомий електричний опір. Опір зразка вимірюють з використанням постійного або змінного струму. Частіше використовують вимірювальні прилади постійного струму, які мають велику точність і чутливість, а вихідний сигнал вимірювальної схеми на змінному струмі завжди можна перетворити в постійний струм.

Вольтметри і амперметри є простими приладами для вимірювання електричного опору, але вони мають недостатню чутливість. Добрі результати одержують при використанні компенсаційних елементів, таких як потенціометри та електричні мости.

4.2.2. Електропотенційний метод

Заснований на вимірюванні різниці потенціалів на певній ділянці (порівнянні напруги на еталонному резисторі з напругою на зразку). Порівняння проводиться нульовим методом, при якому у момент включення компенсаційних елементів через нуль-індикатор електричний струм не проходить. Метод забезпечує високу точність вимірювань при випробуваннях металів і сплавів.

Для лабораторних випробувань застосовують потенціометри типів ППТВ-1 і ППТН-1, призначені для вимірювання різниць потенціалів 10 мВ–1,2 В. При використанні дільника напруги типу ДН-1 верхню межу можна розширити до 600 В.

4.2.3. Трибоелектричний метод

Два різнорідні метали під навантаженням переміщують один відносно іншого, внаслідок чого з'являється деяка напруга. Ця напруга змінюється від часток мікрвольт до декількох мілівольт залежно від складу металів. Це явище відоме під назвою «трибоелектричного ефекту» і викликане перерозподілом електронів різнорідних металів пари тертя. Такий ефект з'являється також при терті однорідних металів, один з яких є термообробленим. Напруга, що виникає при механічному терті, незалежить від швидкості і напрямку руху пристрою тертя із зразком. Шорсткість поверхонь зразків майже не впливає на трибоелектричний потенціал, однак поверхні контак-

туючих металів мають бути очищені від окалини і забруднень.

Випробування трибоелектричним методом дозволяють встановити зміну вмісту у вуглецевих сталях домішок (фосфору, сірки, кремнію). Цим методом визначають наявність добавок міді в сплавах. Метод дозволяє відрізнити аустенітні корозійностійкі сталі від сталей інших марок, а також проводити сортування мідних сплавів залежно від вмісту в них сурми.

Контрольні питання

1. На чому заснований магнітний метод неруйнівного контролю покриттів?
2. Що вимірюють при використанні методів магнітного контролю?
3. Які параметри магнітного поля використовують у методах магнітного контролю, що несуть інформацію про наявність або відсутність дефектів?
4. Який первинний інформативний параметр використовують для вимірювання товщини покриття при магнітному методі контролю?
5. Як залежить потік магнітного поля від товщини покриття?
6. За рахунок чого деталь залишається намагніченою після зняття зовнішнього намагнічуваного поля?
7. Що вимірюють при оцінці магнітних потоків, заснований на тому, щоб відірвати деякий пробний магніт від об'єкта контролю?
8. Що оцінюють за пондеромоторною взаємодією пробного магніту і контрольованого об'єкта в процесі магнітного контролю?
9. Для чого слугують магнітні методи контролю покриттів?
10. Якими чинниками визначається напруженість магнітного поля розсіювання дефекту?
11. Яка технологічна операція не виконується магнітопорошковим методом контролю в прикладеному полі?
12. Яке намагнічування застосовують для виявлення у виробках дефектів, розташованих уперек подовжньої осі деталі або під кутом до неї?
13. Яке намагнічування застосовують для виявлення подовжніх дефектів і радіальних тріщин на торцевих поверхнях?
14. Який метод намагнічування значно розширює можливості магнітного контролю, дозволяючи виявляти як подовжньо, так і поперечно орієнтовані дефекти покриттів?
15. У якому вигляді наносять феромагнітний порошок на виріб під час намагнічування?
16. Яким чином на виріб наносять порошок під час намагнічу-

вання при контролі в прикладеному магнітному полі?

17. Яким чином на виріб наносять магнітну суспензію під час намагнічування при контролі в прикладеному магнітному полі?

18. Яким чином проводять огляд контрольованої поверхні після намагнічування?

19. Яким чином проводять огляд контрольованої поверхні після намагнічування при використанні люмінесцентних магнітних порошоків?

20. Яким способом проводиться магнітопорошковий контроль?

21. У яких випадках проводять контроль способом прикладеного магнітного поля?

22. Що при магнітному контролі створює додаткове місцеве підмагнічування відповідних ділянок магнітної стрічки?

23. Що обумовлює велику похибку вимірювання товщини покриття магнітними товщиномірами?

24. Де використовують механічні товщиноміри покриттів?

25. Суть якого методу контролю якості полягає в тому, що при пропусканні електричного струму через металевий виріб між двома його точками виникає різниця потенціалів?

26. Який метод заснований на вимірюванні різниці потенціалів на певній ділянці?

27. Як впливає шорсткість поверхонь зразків на трибоелектричний потенціал?

Література: [4; 5; 7; 10; 11]

5.1. Класифікація акустичних методів контролю покриттів

Акустичний метод НК заснований на реєстрації параметрів пружних хвиль, які виникають або збуджуються в об'єкті. На відміну від всіх раніше розглянутих методів тут застосовують і реєструють не електромагнітні, а пружні хвилі, параметри яких тісно пов'язані з такими властивостями матеріалів, як пружність, щільність, анізотропія (нерівномірність властивостей по різних напрямках) та ін. Акустичні властивості твердих матеріалів і повітря настільки сильно відрізняються, що акустичні хвилі відбиваються від якнайтонших зазорів (тріщин, непроварів) шириною 10^{-6} – 10^{-4} мм. Цей метод контролю застосовний до всіх матеріалів, які достатньо добре проводять акустичні хвилі: металів, пластмасам, кераміки, бетону і т.д.

Головна особливість ультразвукових хвиль полягає у тому, що їх можна зробити гостронаправленими, тобто такими, які розповсюджуються за чітким напрямом від джерела. Ця їх особливість знаходить широке застосування у техніці. Всім відомі ультразвукові ехолоти, які дозволяють визначати місцезнаходження тіл за відбитими від них ультразвуковими сигналами. Так, за допомогою ехолотів визначають місцезнаходження косяків риби в морі, положення підводних човнів, а з підводних човнів – положення судів. Ехолот складається з джерела, випромінюючого ультразвукові сигнали, та їх приймача. Крім того, ехолот містить пристрій, який визначає час запізнювання відбитого сигналу. Зрозуміло, що це необхідно для визначення відстані до предмету, що відбиває сигнал.

За характером взаємодії з об'єктом розрізняють пасивний і активний методи. *Пасивний* акустичний метод передбачає реєстрацію пружних хвиль, які виникають у самому об'єкті. Шуми працю-

ючого механізму (особливо, якщо забезпечити реєстрацію таких інформативних параметрів, як місце їх виникнення і амплітудно-частотна характеристика) дозволяють аналізувати про справність або несправність механізму і навіть про характер несправності. Цей пасивний метод акустичного контролю називають шумовібраційним. Багато машин забезпечують датчиками, які реєструють рівень вібрації певних вузлів і прогнозуючими їх працездатність. Це вібраційний метод контролю або діагностики.

Перебудова структури матеріалу, яка викликається рухом груп дислокацій, виникненням і розвитком тріщин, алотропічними перетвореннями в кристалічній ґратці, супроводжується появою пружних хвиль ультразвукового (рідше звукового) діапазону. На використанні цих хвиль заснований *метод акустичної емісії*. Використовуючи такі інформативні параметри, як кількість сигналів за одиницю часу, їх частоту, амплітудний розподіл, локацію місця виникнення пружних хвиль, аналізують стан матеріалу, зміни, що відбуваються в ньому, прогнозують працездатність конструкції.

Активні ультразвукові методи мають різноманітне застосування і набули набагато ширшого поширення. Для контролю використовують стоячі хвилі (вимушені або вільні коливання об'єкта контролю або його частини), біжучі хвилі, за схемами проходження і віддзеркалення. Методи коливань використовують для вимірювання товщини при односторонньому доступі та контролю властивостей матеріалів (модуля пружності, коефіцієнта загасання). Інформативним параметром є частоти вільних або вимушених коливань та їх амплітуди. Використовують також метод, заснований на вимірюванні режиму коливань перетворювача, який торкається об'єкта (*імпедансний метод*). За амплітудами і резонансними частотами такого перетворювача (який часто має вигляд стрижня) аналізують про твердість матеріалу виробу, податливість (пружний імпеданс) його поверхні. Податливість, зокрема, поліпшується під впливом дефектів, близьких до поверхні виробу.

З численних напрямів розвитку акустичних методів контролю назвемо розробку безконтактних перетворювачів: лазерних збудників і приймачів, електромагнітно-акустичних перетворювачів, заснованих на збудженні коливань поверхні об'єкта зовнішнім електромагнітним полем. Це відкриває можливість підвищення продуктивності при автоматичному контролі.

Ряд робіт, направлений на налаштування від шумів, головним чином пов'язаних з віддзеркаленням пружних хвиль від струк-

турних неоднорідностей, наприклад меж кристалів в полікристалічному матеріалі. Освоюється застосування специфічних типів пружних хвиль у твердому тілі: поверхневих, хвиль у пластинах і стрижнях. Це істотно розширює область виробів, доступних контролю. Розробка засобів високоточного вимірювання швидкості ультразвукових хвиль (за зміною або загасанням їх швидкості) відкриває можливість вимірювання внутрішніх напружень у твердих тілах.

Розробляють нові способи обробки інформації, де дуже перспективна обчислювальна ультразвукова голографія. Наприклад, використовуючи п'єзоперетворювачі, сканують велику ділянку (близько 200×200 мм) поверхні об'єкта контролю. Одержувану при цьому інформацію направляють в пам'ять ЕОМ. Подальшу обробку всієї інформації, одержаної на великій ділянці сканування, виконують на ЕОМ, використовуючи ті ж алгоритми, які реалізуються в оптичній голографії при накладенні світлових пучків. Завдяки цьому вдається значно точніше представити форму і розміри виявлених дефектів і більш обґрунтовано говорити про їх вплив на працездатність виробу.

Акустичні хвилі розповсюджуються в однорідному середовищі направлено і без істотних згасань, а на межі розділу двох середовищ (наприклад, «метал – повітря») повністю відображаються. Залежно від частоти пружні коливання розділяються на інфразвукові; звукові; ультразвукові; гіперзвукові.

Для НК використовують коливання в основному ультразвукового діапазону (частота коливань вище 20 кГц).

Розрізняють наступні методи акустичного контролю: тіньовий, дзеркально-тіньовий, резонансний, луна-імпульсний (луна-метод), акустико-емісійний, велосиметричний, імпедансний, метод вільних коливань. За допомогою цих методів виявляються порушення суцільності та однорідності металів і сплавів, контролюються фізико-механічні властивості матеріалів.

Переваги ультразвукових методів полягають у можливості:

- виявлення дефектів у різних зонах деталі – на поверхні, поблизу від поверхні, в глибині, причому успішно виявляються дефекти типу раковин у товщі металу або бетону, які не мають виходу назовні;

- автоматизації контролю.

Ультразвуковому контролю можна піддавати і великогабаритні деталі, оскільки глибина проникнення ультразвуку в метал може досягати 8–10 м. За допомогою ультразвуку контролюють великогабаритні виливки, поковки, штамповки.

5.1.1. Тіньовий метод

Тіньовий метод акустичного контролю (метод наскрізного просочування) заснований на посилення в контрольований виріб пружних коливань і реєстрації зміни їх інтенсивності після одноразового проходження через метал.

Він заснований на ослабленні акустичних хвиль під впливом дефектів. Такий метод передбачає застосування двох перетворювачів, один з яких випромінює ультразвукові коливання, інший приймає їх. Ослаблення сигналу залежить від площі перетину потоку ультразвукових випромінювань, площі відзеркалювальної поверхні дефекту та його розташуванню по товщині виробу.

Для тіньового методу ультразвукового контролю необхідний доступ до виробу з обох боків, оскільки ультразвукові коливання вводяться з одного боку виробу, а приймаються з іншої.

Пружні коливання задають у виробі випромінюючою пошуковою головкою з одного його боку, а приймають з іншого боку приймальною головкою, розташованою співвісно з випромінюючою (див. рис. 5.1, а, б). Таку схему випромінювання застосовують при використанні подовжніх та зсувних хвиль.

При контролі нормальними і поверхневими хвилями випромінюючу і приймальну головки встановлюють на одній (доступній) стороні виробу співвісно і назустріч одна одній (див. рис. 5.1, в, г). За відсутності порушень суцільності матеріалу приймальна головка реєструє проходження пружних хвиль через виріб. Інтенсивність хвиль, які пройшли через метал, менше інтенсивності хвиль, введених в метал, оскільки при розповсюдженні їх в товщі контрольованого об'єкта спостерігаються втрати енергії ультразвукового коливання (УЗК) за рахунок віддзеркалення, загасання і геометричної розбіжності пучка. При постійній товщині виробу, однорідному матеріалі і паралельних плоских верхній і нижній поверхнях, рівень інтенсивності пружних хвиль майже постійний. Амплітуда імпульсу 7 на екрані електронно-променевої трубки (ЕПТ), відповідна коливанням, які пройшли через метал, трохи відрізняється від деякого постійного значення, прийнятого за початкове (див. рис. 5.1, д).

Якщо на шляху пружних хвиль є дефект, то залежно від площі перетину пучка променів, площі відзеркалювальної поверхні дефекту і його місцеположення по товщині виробу покази індикатора міняються, оскільки за дефектом утворюється акустична тінь.

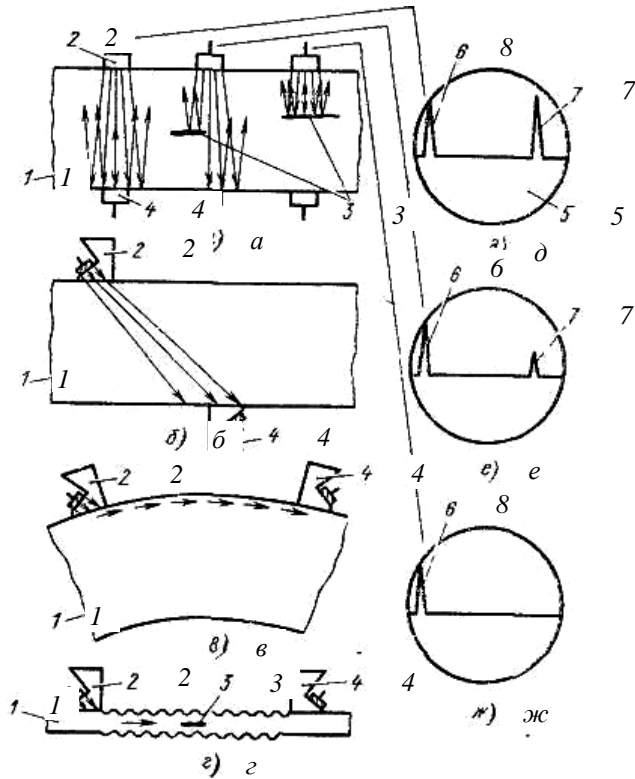


Рис. 5.1 – Схеми опромінення виробів тінювим методом:
a – подовжніми хвилями; *б* – зсувними хвилями; *в* – поверхневими хвилями; *г* – нормальними хвилями; *д, е, ж* – осцилограми;
1 – контрольований виріб; *2* – випромінююча шукаюча головка;
3 – дефект; *4* – приймальна пошукова головка; *5* – екран ЕПТ;
6 – початковий (зондувальний) імпульс;
7 – імпульс, який свідчить про наявність або відсутність дефекту

Наприклад, розшарування металу на шляху розповсюдження хвиль відобразить частину променів, падаючих на приймальну головку. Імпульс *7* на екрані приладу, відповідний інтенсивності хвиль, що пройшли ультразвуковий контроль (УЗК), при цьому зменшиться або зникне (рис. 5.1, *е, ж*). Тінювий метод застосовується головним чином для контролю якості листового прокату, підшипників ковзання, багат шарових дисків, оболонок кабелів, гумових багат шарових виробів, пластмас, клеєних з'єднань та ін.

5.1.2. Дзеркально-тіньовий метод

Дзеркально-тіньовий метод (контроль одноразово заломленим променем) є різновидом тіньового. При контролі приймальну і випромінюючу головки встановлюють з одного боку виробу. Реєстрація зміни інтенсивності пружних коливань здійснюється після їх віддзеркалення від протилежної поверхні (рис. 5.2).

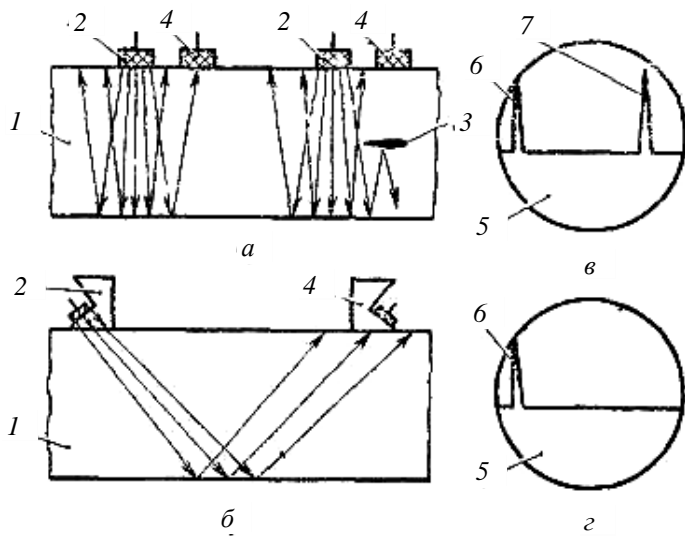


Рис. 5.2 – Схеми опромінення виробів дзеркально-тіньовим методом:
a – подовжніми; *б* – зсувними хвилями; *в, з* – осцилограми;
1 – контрольований виріб; *2* – випромінююча пошукова головка;
3 – дефект; *4* – приймальна пошукова головка; *5* – екран ЕПТ;
6 – початковий (зондувальний) імпульс;
7 – імпульс, який свідчить про наявність або відсутність дефекту

Протилежну поверхню, що дзеркально відображає пружні хвилі, називають донною поверхнею, а відбитий від неї імпульс – донним імпульсом.

Критерієм наявності дефекту при контролі дзеркально-тіньовим методом є зменшення донного імпульсу відлуння у певне число разів. Чим більший дефект, тим більше ослаблення донного імпульсу відлуння.

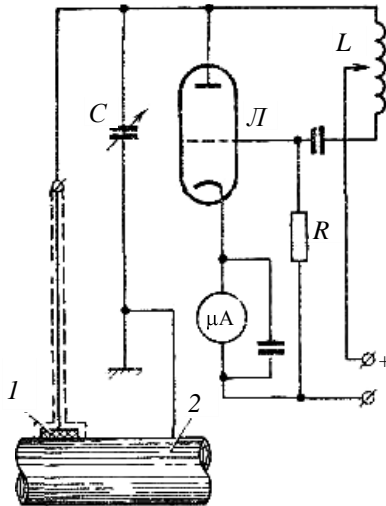
Дзеркально-тіньовий метод застосовують в основному для контролю якості зварних з'єднань та рейок.

Схему опромінення двома пошуковими головками, з яких одна є випромінюючою, а інша – приймальною, називають *роздільною*. У практиці застосовують і суміщену схему опромінення, коли пошукова головка виконує по чергову функції випромінювача і приймача, та роздільно-суміщену (дві суміщені головки з'єднані паралельно).

5.1.3. Резонансний метод

Заснований на збудженні у виробх постійної товщини (листах, трубах, резервуарах та ін.) незгасаючих УЗК і визначенні частот, на яких мають місце резонанси цих коливань.

Частота, при якій виникають стоячі хвилі, тобто настає резонанс, залежить від товщини деталі та швидкості розповсюдження у ній акустичних хвиль. За фіксацією моменту встановлення резонансу визначають товщину контрольованої деталі. Принцип вимірювання товщини цим методом наведений на рис. 5.3.



**Рис. 5.3 – Схема вимірювання товщини резонансним методом:
1 – пошукова головка; 2 – вимірюваний виріб**

Шукаюча головка 1, притиснута з одного боку вимірюваного виробу 2, посилає в матеріал безперервно УЗК через тонкий шар мінерального масла. П'єзоелемент головки збуджується електричними коливаннями генератора частоти L , в контур якого він включений як місткість. Коли коливання п'єзоелемента відбуваються на

частоті, яка дорівнює власній частоті вимірюваного виробу, що коливається, настає резонанс.

Внаслідок зростання амплітуд УЗК у матеріалі виробу збільшується споживана п'єзоелементом електрична потужність; у момент резонансу генератор працює на більше навантаження, ніж за відсутності резонансу. При збільшенні навантаження збільшується анодний струм генератора.

Оскільки частота генератора змінюється в часі, то у момент резонансу на анодному опорі генератора з'являється пік напруги, який фіксує момент встановлення резонансу на всіх гармоніках у матеріалі контрольованої деталі. Основна умова резонансу – паралельність обох віддзеркалюваних поверхонь стінки. За наявності в металі дефектів, паралельних стінці (наприклад, розшарувань), на цій ділянці відбувається зсув резонансних частот. Якщо дефект орієнтований не паралельно поверхням виробу, то він викликає ослаблення або навіть зникнення резонансних явищ.

Ультразвуковий резонансний метод використовують для виявлення дефектів у вигляді корозії або несущільностей матеріалу і вимірювання товщини листів, стінок труб, резервуарів і т.д.

При методі вільних коливань з'являються коливання декількох власних частот, внаслідок чого одержати звучання чистого тону за цим методом важко. Розроблені методи збудження коливань за допомогою допоміжних вібраторів, таких, як п'єзоелектричний перетворювач, магнітострикційний генератор коливань або електромагнітний вібратор. Під'єднання допоміжного вібратора змінює власну частоту коливань контрольованого виробу.

Для збудження малих коливань використовують електромагнітні методи для магнітних матеріалів і методи наведених струмів для немагнітних матеріалів з хорошою провідністю. У цьому випадку не вимагається безпосереднього контакту між виробом і системою збудження коливань, а коливання виробу відбуваються з власною частотою. Для магнітних матеріалів область максимальних амплітуд коливань знаходиться між полюсами електромагнітної котушки, по якій протікає змінний струм.

Резонансну частоту можна визначити шляхом вимірювання частоти змінного струму, як відповідній максимальній амплітуді коливань. У немагнітних матеріалах з хорошою провідністю коливання можна збудити пропусканням змінного струму по котушці, розташованій поблизу виробу. В результаті взаємодії магнітного поля котушки з магнітним полем вихрових струмів, наведених у

виробі, з'являється змінна у часі електромагнітна сила, яка викликає вібрацію виробу. Максимальна змінна електромагнітна сила з'являється у тому випадку, коли магнітне поле перпендикулярне напрямку вихрового струму.

5.1.4. Луна-імпульсний акустичний метод

Найбільш широкого поширення набув метод віддзеркалення, або луна-метод (рис. 5.4), заснований на подачу до контрольованого виробу коротких імпульсів ультразвукових коливань і прийомі відбитих луна-сигналів від дефектів або межі поділу двох середовищ «метал–повітря».

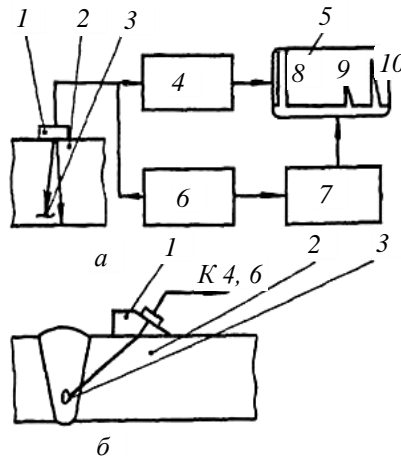


Рис. 5.4 – Схема імпульсного ультразвукового дефектоскопа:

а – контроль заготовки прямим перетворювачем;

б – контроль зварного шва похилим перетворювачем;

1 – перетворювач; **2** – об'єкт контролю; **3** – дефект;

4, 6 – генератори електричних імпульсів;

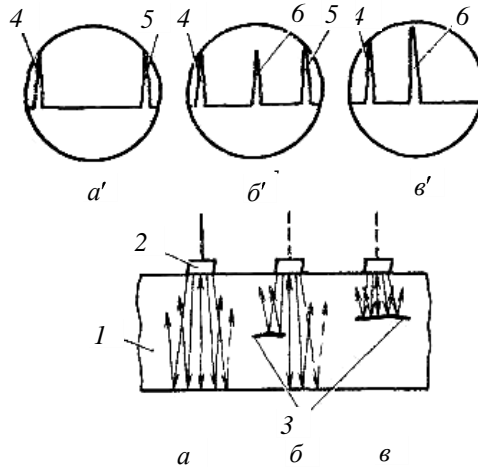
5 – електронно-променевої трубки; **7** – генератор розгортки;

8 – вихідний сигнал; **9** – луна-сигнал від дефекту; **10** – донний сигнал

Перетворювач *1* порушує в об'єкті контролю *2* ультразвуковий імпульс. Він відображається від нижньої поверхні об'єкта або дефекту *3* і приймається тим самим (або іншим) перетворювачем. Генератор електричних імпульсів *4, 6* синхронізований з генератором розгортки *7* електронно-променевої трубки *5*. Відбиті сигнали посилюються і викликають появу на лінії розгортки піків. На

рис. 5.4, *a* наведені вихідний сигнал 8, луна-сигнал від дефекту 9 та донний сигнал 10. Інформативними параметрами у цьому випадку є амплітуда і час приходу імпульсів.

Пружні коливання вводять у виріб 1, як правило, з одного боку суміщеною пошуковою головкою 2 (рис. 5.5).



**Рис. 5.5 – Схема опромінення виробу луна-імпульсним методом поздовжнього ультразвукового контролю:
a–в – положення пошукової головки при контролі виробу;
a'–в' – відповідні їм осцилограми
 (1 – виріб; 2 – пошукова головка; 3 – дефект;
 імпульси: 4 – початковий; 5 – донний; 6 – проміжний)**

Випромінювані імпульси пружних хвиль називають зондувальними. Їх посилають в контрольований виріб один за іншим через певні проміжки часу – паузи або інтервали. Періодом імпульсів називають час, який пройшов від початку дії одного імпульсу до початку дії наступного. Зондувальний імпульс УЗК, пройшовши крізь товщу матеріалу, відображається від протилежної (донної) поверхні виробу і, повертаючись, частково потрапляє на п'єзоелемент пошукової головки. На екрані ЕПТ виникає донний імпульс 5.

За наявності дефекту 3 імпульс УЗК відобразиться від нього раніше, ніж від протилежної поверхні деталі. Між початковим 4 і донним імпульсами виникає проміжний імпульс 6. Якщо дефект повністю перекриває шлях ультразвуковому пучку, то на екрані ЕПТ

спостерігатимуться тільки початковий імпульс та імпульс від дефекту (див. рис. 5.5, *в*). Основні показники луна-методу, які визначають область його застосування: точність визначення координат виявленого дефекту, чутливість, роздільна здатність, мертва зона тощо. Чутливість луна-методу визначається мінімальною площею дефекту, яка чітко виявляється і реєструється ультразвуковим дефектоскопом. При цьому необхідно враховувати акустичні характеристики матеріалу випробовуваного виробу, глибину залягання дефекту, а також матеріал і розміри перетворювачів, частоту ультразвукових коливань.

Роздільна здатність – це мінімальна відстань між двома дефектами, розташованими у напрямі подачі ультразвукових коливань. Луна-сигнали від дефектів реєструються роздільно індикатором дефектоскопу.

Мертва зона визначається мінімальною відстанню між дефектом і точкою введення ультразвукових коливань. Луна-сигнали від дефекту і від поверхні виробу у вигляді ультразвукових випромінювань (зондувальний імпульс) роздільно реєструються індикатором луна-дефектоскопу. Величина тимчасової мертвої зони залежить в основному від тривалості збуджуючого імпульсу і швидкості розповсюдження ультразвуку в матеріалі контрольованого виробу.

Луна-метод дуже широко застосовують для дефектоскопії металевих заготовок і зварних з'єднань (див. рис. 5.4, *б*), контролю структури металів, вимірювання товщини труб і судин. Значно рідше використовують метод проходження. Ним проводять дефектоскопіювання виробів простої форми (листи), оцінюють міцність бетону, дерева та інших матеріалів, в яких міцність корелює зі швидкістю ультразвуку.

Засобом збудження і прийому ультразвукових хвиль, як правило, є п'єзоперетворювачі. Враховуючи сильніше віддзеркалення ультразвуку від якнайтонших повітряних зазорів, для передачі хвиль від п'єзоперетворювача до виробу використовують рідинний контакт. Для збудження хвиль звукового діапазону окрім п'єзоперетворювачів застосовують ударну дію, а для прийому – мікрофони.

5.1.5. Акустико-емісійний метод

За цим методом ультразвукова хвиля проходить через виріб і фокусується на детекторній камері, де і формується зображення. Камера заповнена рідиною великої в'язкості, в якій є завислі алюмі-

нієві частинки розміром 5–25 мкм. Якщо ультразвукове випромінювання відсутнє, то частинки знаходяться в неоднорідному, хаотичному стані, що є результатом теплових переміщень. Орієнтація частинок залежить від інтенсивності ультразвукового випромінювання в даній точці тіньового зображення. Тому зміна інтенсивності відбитого випромінювання визначає кількість ультразвукової енергії, що пройшла через випробовуваний виріб. Дефектам відповідають темні ділянки зображення. Акустико-емісійним методом визначають розшарування, усадкові раковини, пористість, тріщини, порожнечі, ліквації та інші дефекти складних виробів і зварних конструкцій.

5.1.6. Велосиметричний метод

Метод використовує вплив дефекту на швидкість розповсюдження огинаючих хвиль і реєстрації зміни цієї швидкості за фазою хвилі у точці прийому.

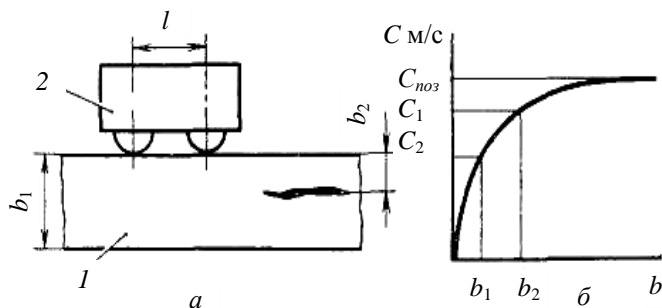


Рис. 5.6 – Схема дії одностороннього велосиметричного методу:
1 – контрольований виріб, 2 – пошукова головка

Суть методу полягає в наступному. На поверхню виробу встановлюють шукаючу головку, яка має випромінюючий і приймальний п'єзоелементи зі сферичними наконечниками (рис. 5.6, а). Відстань між осями п'єзоелементів (вібраторів) постійна. Від випромінювача на всі боки розповсюджуються пружні вигинисті хвилі. Залежність швидкості їх розповсюдження від товщини b має вид кривої, яка виходить з початку координат (рис. 5.6, б) і при збільшенні b асимптотично наближається до значення швидкості C_{noz} поверхневої хвилі.

При розташуванні головки над дефектом, що залягає на глибині b_2 , пружна хвиля розповсюджується в шарі $b_2 < b_1$ із швид-

кістю C_2 . Зменшення швидкості призводить до зміни фази хвилі у точці прийому, яка фіксується електронною апаратурою і слугує критерієм наявності дефекту. Тут огинаюча хвиля є окремим випадком нормальної хвилі і називається асиметричною хвилею нульового порядку.

Велосиметричний метод застосовують для контролю шаруватих виробів з неметалічних і комбінованих (неметал–метал) матеріалів завтовшки до 50 мм. При цьому виявляються дефекти (розшарування і зони порушення з'єднань між шарами конструкції) з площею від 1,5 до 15 см².

5.1.7. Імпедансний метод

Метод заснований на реєстрації величини акустичного імпедансу ділянки контрольованого виробу. Зміна входного імпедансу механічної системи може бути виявлена за зміною амплітуди або фази сили реакції, що діє на датчик, який збуджує у виробі пружні коливання.

На рис. 5.7 наведена принципова схема вимірювання імпедансу за зміною амплітуди Датчиком тут є стрижень, який здійснює поздовжні коливання. Якщо цей стрижень контактує з ділянкою, наприклад, обшивки, жорстко склеєної із заповнювачем, то вся конструкція коливається як єдине ціле, й імпеданс системи заповнювач – клей – обшивка – датчик визначається жорсткістю всієї конструкції. При цьому сила реакції виробу на стрижень буде значною.

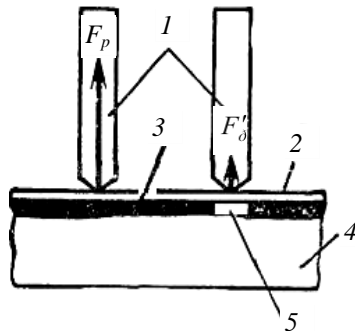


Рис. 5.7 – Схема амплітудного акустичного імпедансного методу:

- 1 – стрижень (датчик) поздовжнього коливання;
- 2 – зовнішній лист (обшивка); 3 – клеєве або паяне з'єднання;
- 4 – внутрішній елемент конструкції (заповнювач); 5 – пустота

Якщо ж стрижень розташувати над дефектною зоною, то непоклеєна ділянка обшивки коліватиметься, як затиснутий по

контурі диск, незалежно від всієї конструкції. Оскільки жорсткість обшивки набагато менша жорсткості всієї конструкції, сила реакції F'_p різко зменшиться. Дефект викликає також значне фазове зміщення. Вимірюючи фазове зміщення між прийнятим сигналом і напругою збуджуючого випромінювача генератора, можна виявити дефекти за зміною фаз, що викликаються ними.

Імпедансний метод дозволяє виявляти зони порушення жорсткого зв'язку між елементами шаруватих конструкцій, пустоти, непропаї, розшарування, слабку адгезію, неповну полімеризацію тощо. Методом можна контролювати вироби як з плоскими, так і з криволінійними поверхнями.

5.1.8. Метод вільних коливань

Заснований на аналізі частотного спектра вільних коливань, збуджених у контрольованій деталі. Суть методу полягає в наступному: якщо тверде тіло, яке володіє певною масою, гнучкістю і механічним опором, порушити різким ударом, то в ньому виникнуть вільні (або власні) затухаючі коливання. При заданих розмірах і формі виробу, однорідності матеріалу, з якого воно виготовлене, частота власних коливань виробу є величиною визначеною. За наявності у виробі дефекту (розшарування, раковини тощо) параметри коливальної системи (гнучкість, маса) міняються, що веде до зміни частоти власних коливань і логарифмічного декременту їх загасання. На рис. 5.8 наведена схема контролю якості склеювання методом вільних коливань.

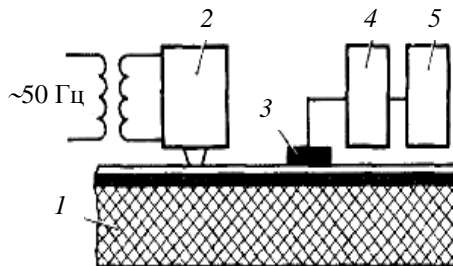


Рис. 5.8 – Схема контролю якості склеювання методом вільних коливань:

1 – контрольований виріб; 2 – електромагніт з бойком,

укріплений на якорі; 3 – мікрофон (п'єзоелемент);

4 – підсилювач, на виході якого включене реле;

5 – індикатор із сигнальною лампою

Бойок датчика, укріплений на якорі електромагніта 2, ударає поверхню контрольованого виробу 1 з частотою живлячого електромагніт змінного струму, порушуючи у виробі вільні коливання. Мікрофон 3 (п'єзоелемент), встановлений на поверхні виробу, сприймає ці коливання і передає їх у вигляді електричних сигналів на підсилювач 4, на виході якого включено реле, що управляє сигнальною лампою індикатора 5. Якщо датчик потрапляє на ділянку непроклеювання, амплітуда порушуваних у виробі коливань падає, сигнал на виході підсилювача зменшується, реле спрацьовує, і спалахує сигнальна лампа.

Цей метод дозволяє виявляти порушення жорсткого зв'язку між шарами в шаруватих конструкціях, а також внутрішні дефекти в масивних виробках.

5.2. Области застосування акустичних методів контролю

За допомогою акустичних методів в заготовках і виробках, виготовлених практично з будь-яких матеріалів, можна виявляти:

– поверхневі та внутрішні дефекти, що є порушенням суцільності;

– неоднорідність структури;

– зони ураження міжкристалічною корозією;

– дефекти склеювання, паяння, зварювання тощо.

Акустичні методи дозволяють вимірювати:

– геометричні параметри (наприклад товщину при односторонньому доступі до виробу);

– фізико-механічні властивості матеріалів без їх руйнування.

Останнім часом ці методи з успіхом використовують для вивчення кінетики початкової стадії руйнування зразків і виробів при втомних випробуваннях.

Важливою перевагою акустичних методів є можливість їх застосування для контролю елементів машин і конструкцій в умовах експлуатації.

5.2.1. Вимірювання товщини поверхнево-зміцнених шарів і захисних покриттів металів

Вимірювання товщини шарів (покриттів) металів ультразвуковим методом засноване на відмінності в поглинанні УЗК поверхнево-зміцненим шаром (покриттям) і основою.

Так, до прикладу, при поверхневому гартуванні структура металу по глибині рiзниться. У верхнiх шарах метал має дрiбно-кристалiчну структуру; у мiру переходу до глибших шарiв структура його укрупнюється. Незагартований метал, як правило, має грубозернисту структуру з чiтко вiдособленими структурними складовими. Обидва шари мають рiзні акустичні характеристики. При опромiненнi металу частина енергiї УЗК може вiдображатися вiд межi мiж загартованим i незагартованим металом i фiксуватися на екранi ЕПТ у виглядi iмпульсу. Ступiнь вiдмiнностi структур загартованого i незагартованого металу визначає рiвень вiдбитого iмпульсу, за яким i вiдмiчається глибина гартування.

Метод вiддзеркалення ультразвуку вiд межi мiж шарами застосовують для вимiрювання шарiв великої товщини, використовуючи зсувні УЗК. Введення i прийом УЗК здiйснюють за роздiльною схемою, встановлюючи випромiнюючу i приймальну шукаючi головки на поверхнi деталi спiввiсно та одну напроти iншої (рис. 5.9). Подовжнi УЗК, пройшовши через призму випромiнюючої головки, падають на межу «призма – метал» пiд кутом α_1 заломлюються i входять в загартований шар пiд кутом α_2 . Далi УЗК розповсюджуються в загартованому шарi у виглядi зсувних хвиль до межi $K-K$ з незагартованим металом.

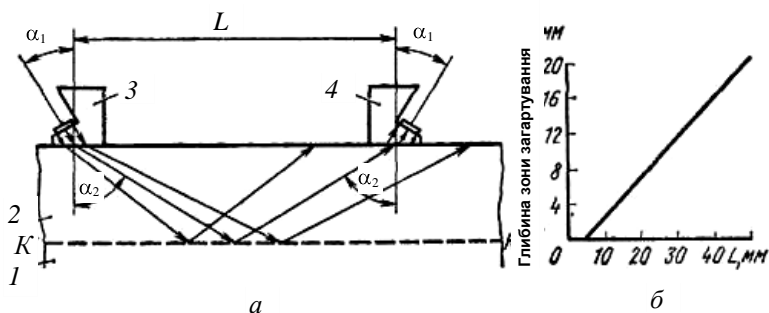


Рис. 5.9 – Схема вимiрювання:

- a* – товщини загартованого шару (*1* – вирiб; *2* – загартований шар; *3, 4* – випромiнююча i приймальна головки подовжнього УЗК);**
- б* – тарувальний графiк приладу контролю глибини гартування**

Тут частина енергiї УЗК вiдображається вiд межi, а iнша частина проходить вглиб незагартованого металу i втрачається. УЗК, вiдбитi вiд межi $K-K$, приймаються приймальною рухомою головою i спостерiгаються на екранi ЕПТ у виглядi iмпульсу. Амплiтуда

цього імпульсу буде максимальною, якщо осі головок співпадають, а відстань між ними дорівнює L .

Для оцінювання глибини поверхневого гартування заздалегідь будують тарувальний графік, який встановлює зв'язок між показаннями приладу і глибиною перекристалізованої зони при поверхневому гартуванні. Потім головки встановлюють на контрольовану деталь і, переміщаючи одну головку відносно іншої, добиваються найбільшої амплітуди на екрані ЕПТ. Змірявши відстань між головками, за тарувальним графіком знаходять значення вимірюваної глибини гартування.

Недоліком методу є наявність мертвої зони. Внаслідок цього неможливо вимірювати товщину менше 2,5 мм.

Для вимірювання шарів малої товщини застосовують метод, заснований на вимірюванні загасання поверхневих хвиль, які розповсюджуються уздовж верхньої межі шару. У цьому випадку, вибравши довжину хвилі $\lambda > h$ (h – товщина шару), можна одержати залежність загасання поверхневих хвиль від товщини шару, оскільки частина енергії УЗК йде по шару, а частина – під шаром по металу.

Товщину шарів вимірюють таким чином: з партії серійних виробів вибирають декілька штук (як контрольні зразки), які прозвучують за описаною методикою, стежачи за тим, щоб вибрана відстань L залишалася постійною. Одночасно вимірюють амплітуди імпульсів на екрані ЕПТ для кожного зразка. Потім металографічним методом, який забезпечує необхідну точність, вимірюють товщину шарів. За одержаними вимірюваннями будують криву залежності товщини шару від амплітуди відбитого імпульсу. Знаючи її можна визначити товщину шару будь-якої деталі з даної серії однотипних виробів.

Для вимірювання шарів за першим методом розроблений прилад ИГЦ-1, а за другим – ЯРМУ-2 і УЗИТС-3А.

За допомогою УЗИТС-3А, наприклад, можна визначити товщину поверхнево-зміцнених шарів (загартованих, цементованих, азотованих, наклепаних) і покриттів на металах (лакофарбних, асфальтобітумних, поліамідних тощо).

Переваги ультразвукового методу вимірювання товщини поверхнево-зміцнених шарів і захисних покриттів:

- висока продуктивність;
- достатня для практики точність (середня похибка вимірювання складає 8–10 %);
- контроль без порушення суцільності шарів і покриттів.

5.3. Неруйнівні методи та прилади для вимірювання твердості покриттів

Для контролю твердості покриттів застосовують всі основні методи НК – акустичні, магнітні, електромагнітні і рентгенівські. В їх основу покладено вимірювання певних фізичних констант:

- модуля пружності, щільності і питомого хвильового опору (для акустичних методів);

- магнітної проникності, коерцитивної сили і залишкової індукції (для магнітних методів);

- магнітної проникності і питомої електричної провідності (для електромагнітних методів);

- лінійного коефіцієнта ослаблення, коефіцієнта розсіяного випромінювання і щільності матеріалу (для рентгенівських і гамма-методів).

Ці фізичні константи знаходяться у функціональній залежності від твердості матеріалу. Найширше, на сьогодні, розвинений **акустичний імпедансний** метод – вимірювання відносних змін механічного імпедансу коливальної системи перетворювача залежно від механічних властивостей поверхні.

Переваги акустичного імпедансного методу вимірювання твердості є портативність вживаної апаратури, що допускає можливість вимірювання твердості деталей без розбирання машин.

Недолік методу – порівняно великий розкид значень, обумовлений малою площею контакту перетворювача з контрольованим виробом, при контролі поверхонь з підвищеною шорсткістю.

Магнітні методи вимірювання твердості засновані на визначенні магнітних характеристик феромагнітних матеріалів, які кореляційно пов'язані з твердістю.

Завдання про кореляцію магнітних і механічних властивостей сталей тісно пов'язана зі встановленням залежності між магнітними властивостями сталей і режимом термічної обробки. Оскільки режим термічної обробки одночасно впливає і на магнітні, і на механічні властивості сталей, то практично у всіх випадках, коли магнітні властивості корелюють з твердістю, вони також однозначно пов'язані з режимом термічної обробки.

У даний час широке застосування одержали магнітні коерцитиметри з приставними електромагнітами. Вони дозволяють вимірювати коерцитивну силу матеріалів на локальній ділянці феромагнітного виробу.

Для контролю твердості починають застосовувати нові магнітні методи – *вищих гармонік* та *магнітних шумів*. Метод вищих гармонік заснований на нелінійності магнітних характеристик матеріалу контрольованого виробу в змінному магнітному полі та аналізі вищих гармонік сигналів датчиків Метод магнітних шумів заснований на аналізі спектра, амплітуд та тривалості магнітного шуму (стрибків Барггаузена) у функції досліджуваних механічних властивостей феромагнітного матеріалу.

Контрольні питання

1. На чому заснований акустичний метод неруйнівного контролю покриттів?
2. Якої ширини дефекти можливо виявити при використанні акустичного методу неруйнівного контролю?
3. З чого складається ехолот?
4. Які методи розрізняють за характером взаємодії з об'єктом при акустичному методі неруйнівного контролю?
5. Який акустичний метод передбачає реєстрацію пружних хвиль, що виникають у самому об'єкті?
6. Як розповсюджуються акустичні хвилі в однорідному середовищі?
7. Які переваги ультразвукових методів?
8. Який метод акустичного контролю заснований на посиленні в контрольованій виріб пружних коливань і реєстрації зміни їх інтенсивності після одноразового проходження через метал?
9. За рахунок чого при розповсюдженні хвиль ультразвукового коливання в контрольованому об'єкті спостерігаються втрати енергії?
10. При яких умовах тіньового методу ультразвукового контролю рівень інтенсивності пружних хвиль майже постійний?
11. Як при контролі дзеркально-тіньовим методом називається схема опромінення двома пошуковими головками, з яких одна є випромінюючою, а інша – приймальною?
12. Як при контролі дзеркально-тіньовим методом називається схема опромінення, при якій одна шукаюча головка виконує почергово функції випромінювача і приймача?
13. Як при контролі дзеркально-тіньовим методом називається схема опромінення, коли дві суміщені головки з'єднані паралельно?
14. Від чого залежить частота резонансного методу акустичного контролю, при якій виникають стоячі хвилі?

15. Як при резонансному методі акустичного контролю визначають товщину контрольованої деталі?

16. Як при луна-імпульсному акустичному методі контролю називають випромінювані імпульси пружних хвиль?

17. За яким методом ультразвукова хвиля проходить через виріб і фокусується на детекторній камері, де і формується зображення?

18. Який метод заснований на впливі дефекту на швидкість розповсюдження вигинистих хвиль і реєстрації зміни цієї швидкості по фазі хвилі у точці прийому?

19. Як у велосиметричному методі акустичного контролю називається вигиниста хвиля, яка є окремим випадком нормальної хвилі?

20. Який метод заснований на реєстрації величини акустичного імпедансу ділянки контрольованого виробу?

21. Який метод заснований на аналізі частотного спектра вільних коливань, збуджених у контрольованій деталі?

22. Що виявляють за допомогою акустичних методів контролю в заготовках і виробах?

23. Які області застосування акустичних методів контролю?

24. Що дозволяють вимірювати акустичні методи контролю?

25. Яку структуру у верхніх шарах має метал при поверхневому гартуванні?

26. У вигляді яких хвиль розповсюджуються УЗК в загартованому шарі?

27. Які переваги ультразвукового методу вимірювання товщини поверхнево-зміцнених шарів і захисних покриттів?

Література: [4; 5; 9; 21]

Неруйнівний контроль проникаючими речовинами заснований на проникненні пробних речовин у порожнину дефектів контрольованого об'єкта. Його ділять на методи: капілярні, течошукання.

Капілярні методи засновані на капілярному проникненні в порожнину дефекту індикаторної рідини (гасу, скипидару), яка добре змочує матеріал виробу. Їх застосовують для виявлення слабо видимих неозброєним оком поверхневих дефектів (типу тріщин, пор, рихлості, неспаїв, волосовин) на поверхнях деталей з жароміцних неферромагнітних сплавів, алюмінієвих, магнієвих, мідних сплавів, а також виробів з кераміки, скла, пластичних і синтетичних матеріалів. Можливий контроль деталей дуже складної конфігурації, невідатливих контролю іншими методами).

Може виникнути питання: для чого потрібні спеціальні методи контролю, якщо дефект розташований на поверхні деталі? Адже його можна виявити, якщо уважно розглянути деталь, у крайньому випадку застосувавши лупу або інший оптичний прилад. Спробуємо відповісти на питання. Уявіть собі плоску деталь великої площі або довгий вал, відшліфовані до дзеркального блиску. Скільки їх не оглядай – ні тріщин, ні шорсткості не відмітиш (чиста поверхня). Але дефектувальник застосував метод капілярного контролю і виявив, що поверхня, яка здавалася ідеальною, суцільно покрита мережею дрібних тріщин, або метал містить міжкристалічну корозію, або інші дефекти, тоді нашу «ідеальну» деталь відправляють в ізолятор браку, а технологи коректують технологічний процес обробки цих деталей, щоб знову не одержати брак.

Методами капілярного НК виявляють тріщини з шириною розкриття 0,001 мм і завглибшки 0,01 мм.

Дефекти такого типу, поширені по всій поверхні деталей, практично невидимі без мікроскопа, різко знижують довговічність

деталей, їх зносостійкість і міцність. Дуже важко у багатьох випадках розпізнати і крупніші дефекти. Колір деталей і заготовок, їх конфігурація часто заважають побачити і розпізнати серйозні дефекти, визначити їх число, протяжність і орієнтацію на деталі. Всі ці труднощі легко переборні, якщо застосовувати методи капілярного контролю. З їх допомогою можна визначити будь-який дефект, що має навіть незначний вихід на поверхню контрольованої деталі. Контроль можливий як при виготовленні деталей, так і при їх експлуатації, ремонті і відновленні.

Методи течошукання використовують для виявлення тільки наскрізних дефектів у перегородках. У порожнину дефекту пробна речовина проникає або під дією різниці тиску, або під дією капілярних сил, проте в останньому випадку нанесення в індикацію пробних речовин виконують по різні сторони перегородки.

6.1. Методи капілярного контролю

З багатьох методів капілярного контролю найбільш поширені кольоровий, люмінесцентний і люмінесцентно-кольоровий. Вони засновані на капілярних явищах.

Капіляр, що виходить на поверхню об'єкта контролю тільки з одного боку, називають поверхневою несущільністю, а наскрізний капіляр, що з'єднує протилежні стінки об'єкта контролю, – наскрізною несущільністю. При капілярному контролі індикаторні рідини заповнюють порожнини поверхневих і наскрізних несущільностей. Індикаторні сліди, що утворюються, реєструються візуально або за допомогою перетворювача. Індикаторний слід з'являється при нанесенні на поверхню деталі проявника, призначеного для витягання індикаторної рідини з порожнини несущільності. Крім того, при цьому створюється фон для кращої контрастності рисунка.

Індикаторний рисунок і виявляє розташування, форму, довжину несущільності.

Капілярні методи підрозділяються за способом виявлення індикаторного рисунка.

При **кольоровому** методі індикатором слугують проникаюча рідина, яка утворює індикаторний малюнок на тлі поверхні об'єкта контролю. При **люмінесцентному** методі використовують проникаючі рідини, здатні люмінесціювати під впливом ультрафіолетового випромінювання на тлі поверхні об'єкта контролю.

Люмінесцентно-кольоровий метод включає елементи люмінесцентного і кольорового методів. Проникаюча рідина може люмінесцювати в ультрафіолетових променях, а також має видиме при звичайному освітленні забарвлення. Деталей можна оглядати як при звичайному освітленні, так і при ультрафіолетовому випромінюванні. Основні операції капілярного контролю:

– поверхню контрольованої деталі очищають від масел, забруднень;

– на деталь наноситься проникаюча рідина (у такому положенні деталь витримують якийсь час, щоб проникаюча рідина потрапила в порожнини відкритих дефектів – рис. 6.1, *a* та *б*).

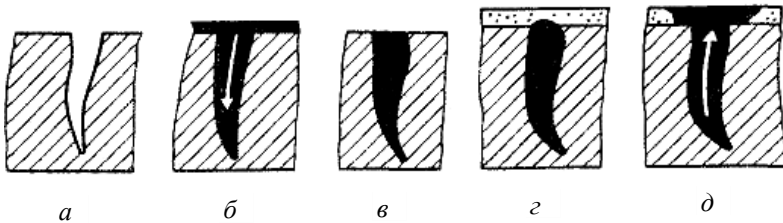


Рис. 6.1 – Операції капілярного НК

Потім з поверхні деталі видаляють надлишок проникаючої рідини (рис. 6.1, *в*). Найчастіше проникаюча рідина заповнює мікротріщини та інші дефекти поверхні саме завдяки капілярному ефекту, у момент змочування. Проте існують і примусові способи заповнення порожнин дефектів із застосуванням тиску, ультразвуку і навантаження. Далі на контрольовану поверхню наносять тонкий шар проявника. Адсорбція – поглинання, у даному випадку проникаючої рідини шаром проявника. Цей процес показаний на рис. 6.1, *г* і *д*. Проявник сприяє виходу проникаючої рідини з порожнини дефекту на поверхню виробу. Індикаторні сліди дефектів, що утворюються при цьому, значно ширші за самі дефекти. Проявники, як правило, забезпечують видимий контраст дефектів на тлі контрольованої поверхні. Завдяки проявляючим речовинам місця виходу проникаючої рідини з порожнин дефектів стають темними на світлому фоні, забарвленими на контрастуючому фоні або люмінесціюючими на темному фоні поверхні деталі.

Після прояву дефектів деталь оглядають при денному (штучному) або при ультрафіолетовому освітленні. Це залежить від застосованого пенетранта – проникаючої рідини. Якщо вона містить

фарбник, то при денному світлі добре розрізняємо яскравий колір фарбника над місцем розташування дефекту. Якщо пенетрант містить люмінесцентну добавку, то при опромінюванні ультрафіолетовими променями він флуоресцює.

Тобто, індикаторні рисунки, які утворюються при контролі, або володіють здатністю люмінесціювати в ультрафіолетових променях, або мають забарвлення, що викликається виборчим поглинанням (віддзеркаленням) частини падаючих на них світлових променів. Лінії індикаторного рисунка мають ширину від 0,05 до 0,3 мм (що на відстані якнайкращого зору – 250 мм відповідає кутовій ширині від 15" до 1'30") і контраст яскравості 30–60 % і більше, а також високий колірний контраст. Це значно вище відповідних параметрів поверхневих дефектів (кутовий розмір від 1 до 10", контраст яскравості, 0–5 %, колірний контраст відсутній). Тому рисунок виявити легше, ніж сам дефект, і тим легше, чим ширше індикаторна лінія і вище її контраст з фоном. Наявність рисунка не тільки свідчить про існування дефекту, але також вказує місце його знаходження, форму або протяжність по поверхні деталі.

Методи капілярної дефектоскопії (КД), що базуються на описаних принципах, відносять до основних методів дефектоскопії.

Таблиця 6.1 – Характер індикаторного рисунка дефектів для основних методів капілярної дефектоскопії

Метод капілярної дефектоскопії (клас)	Характеристика рисунка дефекту
Яскравість (ахроматичний)	Ахроматичний, чорний або сірий, має тільки контраст, яскравості, з фоном і видно при денному світлі
Кольоровий (хроматичний)	Має колірний і яскравість контраст з фоном і видно при денному світлі
Люмінесцентний	Має колірний і яскравість контраст в ультрафіолетових променях
Люмінесцентно-кольоровий	Має колірний і яскравість контраст при денному світлі і в ультрафіолетових променях
Частинок, що фільтруються	Має колірний і яскравість контраст при денному світлі або в ультрафіолетових променях. У місці дефекту накопичується відкладення забарвлених або люмінесціюючих частинок (змінюється мікрорельєф спостережуваної поверхні)

Разом з ними знаходять застосування комбіновані методи КД, в яких використовується поєднання двох і більше різних за фізичною суттю методів контролю: капілярного і некапілярного (струмовихрового, магнітопорошкового, радіаційного та ін.). Основні методи КД класифікують за характером індикаторного малюнка, за оптичними і геометричними властивостями, що визначають його видимість. Комбіновані методи прийнято класифікувати відповідно до некапілярних методів дефектоскопії (див. табл. 6.1).

Чутливість методів капілярного НК залежить від правильного вибору фарбників або люмінофора для проникаючої рідини, яка змочує здібності основного компоненту, властивостей адсорбуючої речовини – проявника і якості підготовки поверхні до контролю.

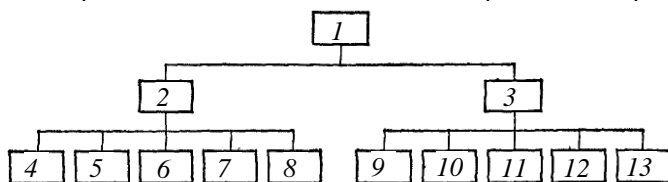


Рис. 6.2 – Класифікація капілярної дефектоскопії:

1 – методи капілярної дефектоскопії; **2** – основні; **3** – комбіновані;

4 – яскравість (ахроматичний); **5** – кольоровий (хроматичний);

6 – люмінесцентний; **7** – люмінесцентно-кольоровий;

8 – частинок, що фільтруються; **9** – капілярно-електростатичний;

10 – капілярно-електроіндуктивний; **11** – капілярно-магнітопорошковий;

12 – капілярно-радіаційного випромінювання;

13 – капілярно-радіаційного поглинання

Капілярну дефектоскопію (рис. 6.2) ділять на підкласи (варіанти). Варіанти методів, що класифікуються залежно від типу використовуваного проявника, наведені у таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – Методи капілярної дефектоскопії залежно від типу проявляючого матеріалу

Метод	Матеріал для проявлення
Самопроявний	Відсутній
Порошковий	Порошок для проявлення: окисел магнію, тальк, силікагель, крейда, аморфний кремнезем (аеросил, біла сажа), каолін тощо
Суспензійний	Суспензія порошку для проявлення у воді або органічних розчинниках
Барвистий (лаковий)	Фарба (лак) для проявлення
Плівковий	Липка стрічка, плівка

6.1.1. Підготовка деталей до контролю

Поверхня контрольованої деталі і порожнини несучільностей перед контролем повинні бути ретельно очищені. Різні покриття (гальванічні, лакофарбові і т.д.) знижують ефективність контролю.

Рідини (бензин, гас, органічні розчинники, вода і т.д.), які потрапили в порожнини несучільностей, перешкоджають проникненню в них індикаторних рідин і тим самим знижують інтенсивність забарвлення або люмінесценцію рисунка.

Застосовують паровий, механічний, хімічний та електрохімічний способи очищення, а також сушку, промивку водою, органічними розчинниками і т.д. При виборі способу підготовки деталей до контролю необхідно враховувати: матеріал виробу, характер забруднення, вид покриття, вид обробки, що передував контролю.

6.1.2. Метод яскравої КД

Простим методом яскравої капілярної дефектоскопії (ЯКД) є метод газової або газово-масляної проби. Як проникаючу рідину використовують гас, нев'язке масло або їх суміш, а як проявник – крейду, яку застосовують у вигляді сухого порошку, водної суспензії (з добавками поверхнево-активних речовин) або суспензії на основі органічних розчинників. Проникаюча рідина, просочуючись в шар крейди, викликає його потемніння, яке виявляють оглядом при денному світлі. Цей метод має малу чутливість і рідко застосовується для виявлення поверхневих дефектів. Він широко використовується для пошуку течі в ємностях і трубопроводах гідравлічних і паливних систем. До ЯКД відносяться також методи контролю, в яких як проникаючі рідини застосовують розчини дубильної або галової кислоти. Ці рідини утворюють індикаторний малюнок чорного кольору, добре помітний на світлому фоні полірованого металу.

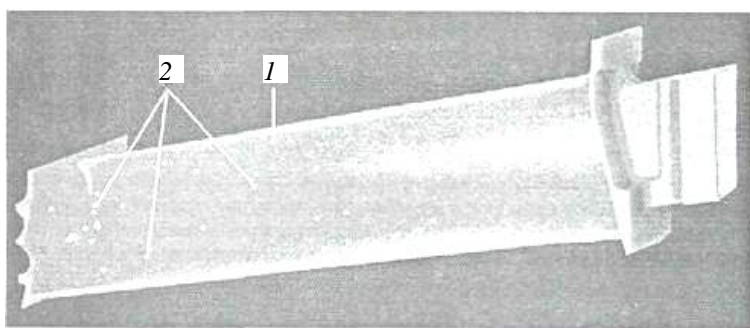
6.1.3. Метод кольорової КД

При кольоровій капілярній дефектоскопії (ККД) застосовують проникаючі рідини або реактиви, які після нанесення проявника утворюють червоний індикаторний малюнок, добре видимий на білому фоні проявника. Червоний колір унаслідок особливостей його сприйняття оком забезпечує велику вірогідність виявлення індикаторних малюнків. Цей колір в порівнянні з іншими володіє найбільшою кількістю кольору, надає сильну збуджувальну дію,

забезпечує найбільш швидко виникнення зорового відчуття і швидко реакцію. Об'єкти червоного кольору мають вищий колірний контраст, що не тільки сприяє хорошій видимості малюнка, але і дозволяє легко відрізнити малюнок тріщин від малюнка, що виникає від рисок, подряпин, задирок та інших зовні схожих на тріщини пошкоджень. Видимість дрібних індикаторних малюнків червоного кольору мало (в порівнянні з малюнком будь-якого іншого кольору) залежить від їх розміру, від наявності відблисків, нерівномірної освітленості поверхні (при огляді деталей складної форми), що оглядається, та від інших чинників.

6.1.4. Метод люмінесцентної капілярної дефектоскопії

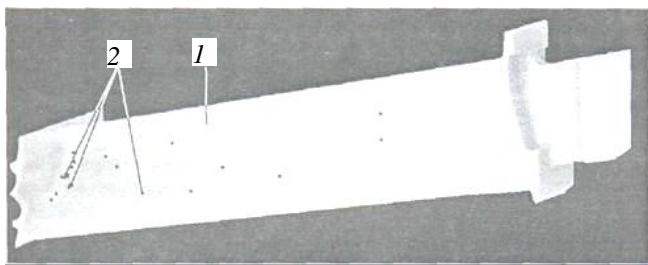
Методи люмінесцентної капілярної дефектоскопії (ЛКД) засновані на властивості проникаючої рідини люмінесцювати під впливом ультрафіолетових променів. Унаслідок великої яскравості і високої збуджувальної дії на зір індикаторного малюнка вимоги до кольору цих рідин менш жорсткі, чим при ККД. При ЛКД індикаторний малюнок розглядається на темному фоні. Найбільший і колірний контраст яскравості забезпечується при білому (біло-жовтому), червоному або оранжевому кольорах люмінесценції. Використовуються також проникаючі рідини, колір люмінесценції яких відповідає денній або смерковій максимальній чутливості зору – зеленувато-жовтий або блакитно-зелений в ультрафіолетових променях (рис. 6.3).



**Рис. 6.3 – Вид поверхневих дефектів на турбінній лопатці, виявлених методом люмінесцентної дефектоскопії:
1 – виливка; 2 – поверхневі дефекти**

6.1.5. Метод люмінесцентно-кольорової капілярної дефектоскопії

Методи люмінесцентно-кольорової капілярної дефектоскопії (ЛЦКД) відрізняються тим, що індикаторні малюнки, які утворюються при цьому, не тільки люмінесціюють в ультрафіолетових променях, але і мають забарвлення, що викликається виборчим поглинанням частини світлових променів. Малюнки виявляються і в ультрафіолетових променях, і при денному світлі. Вітчизняні матеріали для ЛЦКД утворюють індикаторні малюнки оранжево-червоного кольору в ультрафіолетових і видимих променях (рис. 6.4).



**Рис. 6.4 – Вид поверхневих дефектів на турбінній лопатці, виявлених методом кольорової дефектоскопії:
1 – виливка; 2 – поверхневі дефекти**

6.1.6. Метод частинок, що фільтруються

Методи частинок, що фільтруються (ФКД), відрізняються тим, що при цьому використовуються проникаючі рідини, які містять забарвлені або люмінесціюючі зважені частинки розміром від декількох мікрон до сотих часток міліметра. Методи ФКД застосовують для виявлення тріщин та інших дефектів у поверхневому шарі пористих матеріалів. При нанесенні на контрольовану поверхню проникаючої рідини вона поглинається пористим матеріалом, причому в зоні розташування дефекту рідина поглинається швидше і в більшому об'ємі. Зважені частинки, розмір яких перевищує розмір отвору дефекту, фільтруються і відкладаються на поверхні над дефектом. Відкладення цих частинок легко виявляється оком.

6.1.7. Комбіновані методи дефектоскопії

Капілярно-електростатичний метод – електростатичний порошковий метод дефектоскопії з попереднім заповненням поро-

жнин дефектів іонно-генною проникаючою рідиною, тобто рідиною, що легко дисоціює на іони. Цей метод застосовують для контролю виробів з неелектропровідних матеріалів: пластмаси, кераміки, скла.

При **капілярно-електроіндуктивному** контролі деталей порожнини дефектів заповнюють електропровідною проникаючою рідиною або органічним розчинником (паливом) з присадками, що додають йому властивість електропровідності. Дефекти виявляють за допомогою струмовихорезового приладу з прохідним або накладним датчиком. Цей спосіб застосовують для контролю якості пластмас та інших неметалічних матеріалів.

Капілярно-магнітопорошковий метод є комбінацією капілярного (люмінесцентного або кольорового) і магнітопорошкового методів. Деталі обробляють проникаючою рідиною, намагнічують і виявляють дефекти складом, який включає феромагнітний порошок і білий проявник для капілярної дефектоскопії (КД). Цей склад виявляє тріщини проникаючою рідиною і магнітним порошком, утворюючи двобарвну картину, що дозволяє безпомилково відрізнити малюнок тріщин від інших дефектів.

При **капілярно-радіаційному** контролі випромінюванням дефекти виявляються завдяки радіоактивності індикаторної рідини. Капілярно-радіаційний метод поглинання заснований на попередньому заповненні порожнин дефектів оптично щільною проникаючою рідиною і подальшим рентгенографіюванням деталі. Такому контролю піддають, наприклад, легкі метали, які володіють високою прозорістю для рентгенівських променів, після їх просочення чотирехлористим вуглецем. Велика різноманітність методів КД викликана відповідними потребами виробництва і експлуатації. Методи не є повністю взаємозамінними, а відрізняються технічними можливостями, чутливістю, продуктивністю та іншими показниками.

6.1.8. Області застосування капілярної дефектоскопії

Капілярна дефектоскопія – дуже простий спосіб, який має високу чутливість до поверхневих дефектів. Переваги методів КД наступні:

- висока чутливість;
- висока роздільна здатність;
- відносно висока достовірність контролю;
- наочність результатів контролю;
- можливість контролю деталей різного ступеня складності;
- можливість контролю в один прийом широких зон деталей;

– велика номенклатура матеріалів деталей, що перевіряються (аустенітні сталі, нікелеві, титанові, магнієві, алюмінієві та інші металеві сплави, кераміка, скло, бетон і т.д);

– універсальність основних технологічних операцій при контролі об'єктів з різних матеріалів;

– можливість точно встановлювати місце дефекту, напрям, протяжність й іноді його характер;

– простота технологічних операцій контролю;

– можливість швидкої підготовки кадрів контролерів;

– низька вартість використовуваних матеріалів.

Таким чином, методи КД поєднують в собі цінні для виробничого і експлуатаційного контролю якості: наочність результатів з великою універсальністю технологічних операцій при перевірці поверхні деталей з різних матеріалів, наскільки б складна не була форма цих деталей.

Недоліки методів КД наступні:

– висока трудомісткість контролю за відсутності механізації;

– можливість виявлення тільки поверхневих дефектів;

– велика тривалість процесу (до 0,5–1,5 год.);

– зниження достовірності контролю при негативних температурах;

– необхідність видалення лакофарбувальних покриттів і ретельного попереднього очищення контрольованих деталей;

– низька вірогідність виявлення дефектів, перекритих окисними плівками, тонким шаром деформованого матеріалу (після механічної обробки) або стиснутих значними залишковими або робочими напруженнями в деталі;

– складність механізації та автоматизації контролю;

– громіздкість стаціонарного устаткування;

– шкідливість деяких дефектоскопічних матеріалів для персоналу і необхідність використання захисних пристосувань і вентиляції;

– суб'єктивність контролю, залежність достовірності результатів від уміння і стану контролера;

– обмежений термін зберігання дефектоскопічних матеріалів, залежність їх властивостей від тривалості зберігання і температури середовища.

Проте, не дивлячись на недоліки, ці методи знаходять широке застосування.

Методи КД використовують при операційному і приймальному контролі напівфабрикатів, деталей і виробів на машинобудів-

них і ремонтних заводах, а також при періодичних перевірках в процесі експлуатації механізмів і машин. Їх застосовують в лабораторних, цехових і польових умовах, при позитивній і негативній температурі. Ці методи дозволяють виявляти різні відкриті поверхневі дефекти виробничо-технологічного та експлуатаційного характеру: тріщини (шліфувальні, термічні, втомні); розтріскування; пористість; волосовини; закови; різні види корозії і т.п. на деталях простої та складної форми, виготовлених з чорних і кольорових металів і сплавів, пластмас та інших матеріалів.

Висока чутливість цих методів дає можливість знаходити тріщини шириною розкриття біля виходу на поверхню більше 0,001 мм, завглибшки більше 0,01 мм і завдовжки більше 0,1 мм. Завдяки високій чутливості, простоті контролю і наочності результатів методи КД знаходять застосування не тільки для первинного виявлення, але і для підтвердження поверхневих дефектів, виявлених струмовихровим, ультразвуковим та іншими методами неруйнівного контролю.

За достовірністю одержуваних результатів контролю методи КД, як правило, декілька поступаються магнітопорошковому, результати якого не залежать від якості очищення порожнин дефектів. Тому деталі з феромагнітних сплавів в основному перевіряють магнітопорошковим методом, а КД використовують для контролю деталей з немагнітних сплавів: алюмінієвих, титанових, магнієвих, нікелевих і т.д. Проте у ряді випадків магнітопорошковий метод для контролю феромагнітних деталей може бути недостатньо ефективний. Не завжди можна перевірити магнітним методом деякі об'єкти, наприклад, торцеві поверхні валів, різців, виступаючі грані шліцьових з'єднань, вершини зубів зубчастих коліс, кінцеві ділянки деталей (при поздовжньому намагнічуванні). У всіх цих випадках для контролю феромагнітних деталей ефективніше застосування методів КД. Іноді їх застосовують також для контролю феромагнітних деталей, де використання магнітопорошкового методу можливе, але утруднене або недоцільне (через попадання магнітного порошку в зазори деталей, що труться).

При використанні методів КД у виробничих умовах заздалегідь проводять ретельний аналіз технології виготовлення деталей і виробів, визначають операції, при виконанні яких можливо утворення поверхневих дефектів. У технологічному маршруті встановлюють операції, після яких повинен проводитися контроль. Після цього проводять аналіз всіх технологічних операцій, передуючих контролю, і визначають можливі причини зниження ефективності КД.

При використанні в процесі виготовлення деталей різних масел, мастил, захисних обмазок, реактивів, охолоджуючих рідин і води, які можуть проникати в порожнині поверхневих дефектів, розробляють способи очищення деталей від цих речовин і підбирають режими, які гарантують очищення порожнин дефектів перед контролем. Якщо деталі проходять теплову обробку з нагріванням, витримкою або охолодженням на повітрі або в іншому окиснювальному середовищі, технологію коректують: вводять додаткову операцію з очищення порожнин дефектів від оксидів або передбачають теплову обробку у вакуумі або у середовищі інертних газів.

При використанні методів КД для періодичної перевірки виробів в експлуатації і в процесі ремонту проводять аналіз умов роботи об'єктів, що перевіряються, встановлюють можливість попадання в порожнині дефектів масел, мастил, палива, вологи та інших речовин і розробляють способи очищення порожнин дефектів від вказаних матеріалів перед контролем.

6.1.9. Основні технологічні операції КД

При контролі очищених детальний методами ККД, ЛКД і ЛЦКД послідовно виконують наступні технологічні операції:

- нанесення проникаючої рідини на деталі;
- видалення проникаючої рідини з поверхні деталей, що перевіряються;
- нанесення проявника;
- огляд деталей;
- видалення проявника та слідів інших дефектоскопічних матеріалів з поверхні придатних деталей.

Проникаючу рідину наносять на поверхню деталей, щоб заповнити порожнини можливих поверхневих дефектів. Тривалість контакту рідини з поверхнею деталі залежить від фізичних властивостей рідини, характеру дефектів, що виявляються, і способу заповнення рідиною порожнин дефектів.

Проникаючу рідину видаляють з поверхні так, щоб вона збереглася в порожнинах дефектів. В деяких випадках рідину не видаляють з поверхні, а нейтралізують яким-небудь чином, що запобігає появі фону після нанесення проявника. Проявник наносять на поверхню деталей для виявлення проникаючої рідини, що залишилася в порожнинах дефектів, а також для отримання відповідною фону і для виявлення таким чином самих дефектів. Проявник наносять відразу ж після видалення проникаючої рідини.

Проявники видаляють за допомогою води, розчинників або іншими способами з поверхні всіх деталей, визнаних придатними до експлуатації. На шар проявника не допускається наносити лакофарбувальні покриття і мастила, консервації, оскільки проявник погіршує їх захисні властивості. Операції з нанесення і видалення проникаючої рідини і нанесення проявника повинні проводитися безпосередньо одна за одною з мінімальним інтервалом часу.

Розрізняють п'ять способів заповнення порожнин дефектів проникаючою рідиною (табл. 6.3).

Таблиця 6.3 – Способи заповнення порожнин дефектів рідиною

Спосіб	Технологічна характеристика
Капілярний	Самовільне заповнення порожнин дефектів проникаючою рідиною, яка наноситься на контрольовану поверхню змочуванням, зануренням, струменем, розпилюванням за допомогою стислого повітря, фреону або інертного газу
Вакуумний	Заповнення порожнин дефектів проникаючою рідиною при зниженому тиску в порожнинах
Компресійний	Заповнення порожнин дефектів проникаючою рідиною при дії на неї підвищеного тиску
Ультразвуковий	Заповнення порожнин дефектів проникаючою рідиною при дії на неї ультразвукових коливань
Деформаційний	Заповнення порожнин дефектів проникаючою рідиною при дії на об'єкт контролю пружних коливань звукової частоти або статичного навантаження, збільшувального ширину розкриття тріщин

Огляд для виявлення індикаторного малюнка, що утворився над дефектами, проводять після витримки деталей, достатньої для якнайповнішого і чіткішого прояву дефектів. Тривалість витримки залежить від властивостей дефектоскопічних матеріалів, типу дефектів, матеріалу деталей, умов їх експлуатації, температури і тиску середовища в процесі прояву.

За характерними ознаками індикаторного рисунка визначають характер дефекту:

- тріщини мають вид суцільних, іноді переривчастих ліній різної конфігурації;
- міжкристалічна корозія виявляється у вигляді плям, розмитих смуг;
- пори – у вигляді окремих точок.

Чутливість методів капілярного контролю залежить від якості проведення кожної операції контролю, від якості дефектоскопічних матеріалів, освітлення, температури навколишнього середовища і т.д. Під чутливістю розуміють розкриття несущільностей типу одиначної тріщини певної довжини, виявлене із заданою вірогідністю за заданими геометричними або оптичними параметрами сліду.

Чутливість люмінесцентного методу складає по ширині несущільностей 10 мкм і по глибині 30–40 мкм, кольорового – по ширині несущільностей 1–2 мкм і по глибині 10–30 мкм.

6.1.10. Основне устаткування ділянки КД

Класифікація устаткування: загального призначення; спеціалізоване. Устаткування загального призначення: ванни, столи, розпилювальні камери, сушильні пристрої і т. д. Класифікація спеціалізованого устаткування: переносне; пересувне; стаціонарне.

Переносне устаткування застосовують для контролю одиначних деталей в конструкції установок, механізмів і машин в сталельних, цехових і польових умовах. Пересувне устаткування призначене для періодичного контролю деталей в механізмах і машинах в цехових умовах, а стаціонарне – для потокового контролю деталей і вузлів безпосередньо на ділянках КД.

При контролі деталей використовують серійне устаткування чи виготовляють спеціальне устаткування для даного типу виробництва. Тип устаткування вибирають з урахуванням габаритів і маси деталей, що перевіряються, об'єму робіт, необхідної продуктивності і типу використовуваних дефектоскопічних матеріалів (наприклад, переносні дефектоскопи ДМК-4 і У-ДМК-5 призначені для контролю методом ККД деталей, виготовлених з різних матеріалів, в польових і цехових умовах при невеликому об'ємі робіт).

Як джерела ультрафіолетових випромінювань застосовуються газорозрядні ртутні лампи високого і надвисокого тиску.

6.2. Методи течешування

Течешування – метод НК, який забезпечує виявлення наскрізних дефектів у виробках. Методи течешування засновані на застосуванні пробних речовин, проникаючих через течу і реєстрованих засобами течешування. Пробні речовини: рідини; гази; пари легколетких рідин.

Класифікація методів (залежно від пробної речовини): рідинні; газові (забезпечують вищу чутливість).

Теча – канал або пориста ділянка виробу, що порушують його герметичність. Під *герметичністю* розуміють властивість виробів перешкоджати проникненню через їх стінки рідини, газу або пари.

Окрім наскрізних дефектів, якими є раніше вказані канали, пробні речовини можуть проникати через перегородки в результаті дифузії, наприклад, скло або гума проникні для гелію.

Розрізняють схеми з внутрішнім і зовнішнім надмірним тиском. У першому випадку тиск усередині об'єкта контролю більший, чим зовні, а в другому – навпаки. Якщо надмірний тиск вищий за атмосферний, то такий спосіб називають опресовуванням або компресійним способом. Якщо для створення різниці тиску з об'єкта контролю або камери, в яку він поміщений, видаляють повітряне середовище, то спосіб контролю називають вакуумним. Якщо вакуум в камері – це спосіб вакуумної камери; якщо в камері пробний газ, наприклад гелій – спосіб гелієвої камери. Класифікація найбільш поширених методів течешукування: мас-спектрометричний; галогенний; бульбашковий; манометричний; рідинний.

6.2.1. Мас-спектрометричний метод контролю

Гелієвий течешукач, в якому як пробний газ застосовується гелій, володіє високою чутливістю при проведенні випробувань на герметичність. Промисловий гелієвий течешукач може виявити присутність однієї частини гелію в 10 мільйонах часток повітря. Це відповідає витоку гелію менше 1 см³ газу в рік при нормальних температурі і тиску. Гелієвий течешукач є портативним приладом, спроектованим з розрахунку на максимальну чутливість до гелію. Молекули газу, які входять в прилад, бомбардуються електронами, що випускаються нагрітою ниткою. Іони, які утворилися в результаті цього бомбардування, прискорюються і фокусуються електричним полем. Потім іони проходять між полюсами постійного магніту, магнітне поле якого відхиляє іони і примушує їх рухатися по кругових орбітах. Іони, які мають рівні маси, після виходу з магнітного поля збираються в одній точці.

Гелієвий течешукач влаштований таким чином, що в ньому накопичуються тільки іони гелію. Потік іонів гелію утворює слабкий електричний струм, який може бути посилений і застосований для того, щоб привести в дію електричний пристрій, що реєструє рівень звукового сигналу.

Гелій використовують для виявлення витоків тому, що він є інертним газом і не реагує з іншими газами, а також з матеріалом випробовуваного виробу. Гелій має малу атомну вагу, вільно проникає через невеликі щілини.

Класифікація способів випробувань на герметичність з використанням гелієвого течешукача: обдуву; гелієвих чохлів і камер; вакуумних камер; випробувань накопиченням пробної речовини у вакуумі; з використанням вакуумних присосків; з накопиченням в чохлах пробного газу.

6.2.2. Галогенний метод

Дія галогенного течешукача заснована на різкому збільшенні емісії позитивних іонів лужних металів у чутливому елементі при появі в пробному газі галогенів (речовин, до складу яких входять елементи групи галбидів: фтор, хлор, бром і йод). Найчастіше як пробні речовини використовують пари з'єднань, які містять фтор-фреони (хладони) різних марок. Хладони – легколеткі рідини, тиск їх насиченої пари при кімнатній температурі дорівнює (6–30) 10^5 Па. Ці речовини не мають запаху, нешкідливі, неагресивні.

Простий галогенний течешукач є галоїдним пальником, який складається з ємності для газу і латунної пластинки. Газ запалюється і нагріває латунну пластинку. У присутності газоподібного галоїду колір полум'я міняється, що указує на утворення галоїду міді.

Галогенний метод заснований на тому, що емісія позитивних іонів з розжареної металевої поверхні збільшується при попаданні на неї галогенів. Для того, щоб пробний газ постійно протікав над поверхнею нагрітого 800 °С галогеночутливого елемента, в прилад вбудований всмоктувальний вентилятор. У промисловості випускають галогенні течешукачі типів БГТИ-7 та ГТІ-6.

6.2.3. Бульбашковий метод

Метод полягає в реєстрації бульбашок пробного газу, проникаючого через течу у виробі, зануреному в рідину або покритому мильною або іншою плівкою, яка здатна утворювати пухирі.

Чутливість цього методу може бути достатньо високою при використанні високого тиску. Встановлено, що добрі результати випробувань одержують при використанні як наповнювач судин суміші водню і ефіру, оскільки ефір має мале поверхневе натягнення, а водень характеризується високою проникністю. Обидві речовини вибухонебезпечні, їх можна замінити гелієм.

Створювати тиск у випробовуваному виробі потрібно до його занурення в рідину, оскільки для виявлення невеликих отворів, заповнених рідиною, потрібен значний тиск. Для огляду виробу слід застосовувати лупу з двох-трикратним збільшенням, поміщену на відстані 100–150 мм від виробу.

Переваги бульбашкових випробувань наступні: не потрібні дорогі прилади, швидкість випробувань, можливість точного визначення знаходження дефекту, а також випробування всього виробу одночасно. Рідина для бульбашкових випробувань повинна мати мале поверхневе натягнення і малу в'язкість.

При використанні бульбашкового методу можливий контроль у повітряному середовищі. Першим етапом при випробуванні зварних посудин у повітряному середовищі є повітряне опресовування. У посудині створюється певний тиск повітря і місця витоку виявляють за допомогою мильного розчину, який наноситься на поверхню зварних швів. Застосовують також хімічні індикатори для виявлення витоку газів, які вводяться у внутрішні порожнини посудин. Поверхню зварного шва зачищають і покривають білим фенолфталеїновим індикатором. Після цього у суху посудину вводять аміачно-повітряну суміш. При витоку газу через зварний шов біле забарвлення індикатора змінюється на яскраво-рожеве. Індикатор складається із суміші п'яти частин двопроцентного розчину фенолфталеїну в спирті, двох частин дистильованої води, десяти частин гліцерину та до п'яти частин порошку окислу титану. Окрім цього, застосовують суміш аміаку та двоокису сірки.

6.2.4. Манометричний метод

Заснований на реєстрації зміни повного тиску в системі випробувань у результаті перетікання проникаючих речовин через течу. Існують абсолютний і диференціальний методи. Абсолютним методом герметичність оцінюють за показами одного або декількох манометрів, які вимірюють тиск в одному і тому ж об'ємі газу. При диференціальному методі вимірюють різницю показів двох манометрів, на один з яких пробний газ не діє. Найбільш простий варіант реалізації манометричного методу – вимірювання тиску опресовування в об'єкті контролю або в камері, в яку поміщений об'єкт контролю. При цьому об'єкт або камера відсічені (відключені) від насоса. Поріг чутливості вакуумного манометричного методу не перевищує значень 10^{-3} – 10^{-4} Вт.

Манометричним методом в основному контролюють міцність зварних виробів. Для контролю зміни тиску застосовуються гідростатичні, диференціальні та електричні манометри, напороміри, тягоміри, а також мембранні елементи і сигналізатори тиску.

6.2.5. Рідинний метод

При рідинному випробуванні, дефекти знаходять за рідиною, що проникла у порожнини дефектів і через них. Найбільш простий метод – гідростатичне опресовування. Усередині випробовуваного виробу створюється тиск, який перевищує зовнішній. Для створення різниці тиску у виробі використовують воду, масло, повітря і т.п. Тиск при опресовуванні повинен підвищуватися поступово. Місця витоків можна виявити по фільтрації води або газу. Наявність витоків визначають також за зміною тиску рідини або газу.

Рідинний метод випробувань застосовується для контролю працюючих під тиском зварних судин, трубопроводів або трубної арматури, відкриті кінці яких можуть бути заглушені. Судини піддають гідравлічному опресовуванню, при цьому тиск випробувань в 1,5–2 рази перевищує робочий тиск. Витік може бути виявлений протягом 24 год після проведення випробувань.

6.3. Зіставлення методів неруйнівного контролю

Проводити зіставлення методів неруйнівного контролю між собою потрібно з урахуванням наступних обставин:

- радіохвильовий і електроємнісний – для неметалічних матеріалів, та таких, що погано проводять струм;
- вихорострумний, електропотенційний – для хороших електропровідників;
- магнітний – для феромагнетиків;
- акустичний – для матеріалів, які мають невелике згасання звуку відповідної частоти.

Слід мати на увазі різну область застосування модифікацій методів – вимірювання геометричних розмірів, дослідження хімічного складу і структури, пошук неоднорідностей і пустот. Тому зіставлення різних методів контролю можна проводити тільки в тих умовах, коли можливо застосування декількох методів.

Контроль суцільності. Тріщини, пори, раковини в покриттях виявляють методами фарб, люмінесцентним, магнітним, ультра-

звуковим, а на феромагнітних підкладках суцільність контролюють також за електропровідністю покриття. Існуючі методики і прилади для контролю суцільності покриттів ще недостатньо здійснені і тому не знайшли належного застосування у промисловості. Вимагають удосконалення і норми бракування покриттів за наслідками їх випробувань методами неруйнівного контролю. З відмічених методів контролю суцільності покриттів практично використовується, по суті, тільки люмінесцентний контроль пористості поверхні емалевих покриттів на точно-литих деталях з жароміцних нікелевих сплавів. На покриття наносять тонкий шар світлочутливої фарби, при опромінюванні якої ультрафіолетовим світлом чітко виявляються навіть найдрібніші пори, раковини, сколювання емалі. Проте суцільності, які залягають у внутрішніх шарах покриття, цим методом виявити не вдається. Проведемо зіставлення для дефектоскопічного контролю металевих феромагнітних матеріалів типу сталі, коли можна застосувати більшість з розглянутих методів. Порівняння можна проводити за глибиною розташування дефектів, які цими методами виявляються.

Контроль *течущуканням* розрахований на виявлення тільки наскрізних дефектів.

Візуальні і *капілярні* методи контролю дозволяють виявляти тільки дефекти, які виходять на поверхню (зокрема не наскрізні).

Магнітні і *вихореструмові* методи дозволяють виявляти як поверхові, так і підповерхневі (що залягають на глибині в декілька міліметрів) дефекти.

Радіаційні та *акустичні* методи у принципі можуть виявляти дефекти як поверхневі, так і внутрішні, але переважно їх використовують для виявлення внутрішніх.

З погляду небезпеки для обслуговуючого персоналу виділяються радіаційні методи. Певну токсичність мають методи капілярні і течущукання при використанні деяких типів пробних речовин і ультрафіолетових освітлювачів. Для решти методів помітного впливу на здоров'я обслуговуючого персоналу не встановлено.

З погляду можливостей автоматизації контролю найбільш сприятливими є вихореструмовий метод контролю, магнітні методи з ферозондовими, індукційними та іншими типами перетворювачів, радіаційний радіометричний методи і деякі види теплових методів. Головні їх переваги полягають у відсутності прямого контакту перетворювача з виробом і подачі інформації щодо дефектів у вигляді показів приладів. Цим методам поступається ультразвуковий ме-

тод, для якого необхідний акустичний контакт перетворювачів з виробом, наприклад, через шар води. Складність автоматизації інших методів полягає в необхідності візуальної обробки інформації щодо дефектів, які вони виявляють.

За вартістю виконання контролю до найбільш дорогих відносять методи радіографічні і течошукання. Це пов'язано з тривалістю операцій контролю, а також необхідністю капітальних витрат на устаткування і приміщення. Низька продуктивність також у капілярного контролю. Якщо порівнювати, наприклад, витрати на проведення радіаційного і ультразвукового контролю зварних з'єднань завтовшки 10–20 мм, то для ультразвукового контролю вони будуть в 3–5 разів менші. Перевага зростатиме із збільшенням товщини зварних з'єднань.

Специфічні особливості кожного методу роблять необхідним застосування всіх розглянутих видів контролю для вирішення певного кола завдань. Крім того, для контролю відповідальної продукції виникає необхідність у використанні декількох взаємодоповнювальних і дублюючих методів. Наприклад, тонкостінні труби для електростанцій проходять вихорострумний, ультразвуковий і візуальний контроль.

6.4. Устаткування неруйнівного контролю та його автоматизація

На рис. 6.5 наведена достатньо загальна схема пристрою, яка відповідає більшості засобів і методів контролю. Об'єкт контролю 4 сканують (послідовно обстежують) двома перетворювачами: який впливає на об'єкт контролю 3 і який знімає інформацію 5.

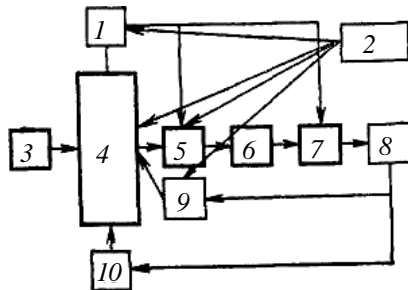


Рис. 6.5 – Схема автоматичного пристрою неруйнівного контролю

Блок сканування 1 управляє взаємним переміщенням об'єкта і перетворювачів. Блок 6 здійснює вторинну переробку інформації. Інформація обробляється і зберігається в блоці 7. Сюди також поступають дані від блоку сканування для прив'язки інформації до контрольованої ділянки об'єкта. Тут здійснюється оцінювання допустимості виявлених дефектів.

Блок 8 дає команду на відмітку дефектного місця дефекто-відмітником 9, на механізм 10, що направляє об'єкт контролю в бункери придатних або бракованих виробів, а також на систему управління технологічним процесом виробництва продукції з метою усунення подальшого браку.

Для різних методів контролю представлена схема може зазнавати істотні зміни. Наприклад, перетворювачі 3 і 5 можуть розташовуватися з одного боку об'єкта або навіть поєднуватися в одному вузлі. Роль перетворювача 3 може виконувати поле намагнічування в магнітних методах контролю, вакуум або підвищений тиск пробного газу при контролі методами течошукування, нанесення пенетранта і проявника на поверхню об'єкта при контролі капілярними методами і т.д.

Представлена схема відповідає пристрою з високим рівнем автоматизації. При меншому ступені автоматизації ряд функцій вказаної схеми виконує контролер 2. Проте позиції 3–7, виділені на рис. 6.3 жирними лініями, присутні практично в кожному пристрої НК незалежно від ступеня його автоматизації.

У приладах для ручного контролю контролер уручну здійснює сканування, сприймає і обробляє інформацію від блоку 7, відзначає дефекти на об'єкті контролю або на його кресленні, ухвалює рішення про придатність виробу. У механізованих установках здійснюється механічне сканування, тобто крім позицій 3–7 є блок 1.

Контролер управляє скануванням і обробляє інформацію. У напівавтоматичних установках здійснюється автоматичне сканування і часткова або повна автоматична обробка інформації.

У автоматичних установках, подібних показаною на схемі рис. 6.3, крім показаних вузлів часто є ряд додаткових блоків. Наприклад, вводять систему автоматичної перевірки справності роботи установки, передбачають засоби захисту найбільш швидкозношуваних і ненадійних вузлів і т.д. Для підвищення продуктивності механізованих і автоматичних установок застосовують багатоканальні системи, тобто з великою кількістю паралельно діючих перетворювачів і відповідних приладових блоків.

Перевага автоматизованих установок перед приладами ручного контролю полягає не тільки в підвищенні продуктивності контролю, але також у підвищенні його надійності. Великий недолік ручного контролю – залежність його результатів від суб'єктивних якостей контролера. Автоматизація усуває цей негативний чинник.

Механізовані та автоматичні установки успішно застосовують для потокового контролю продукції простої форми: листів, труб, протяжних зварних швів і т.п. Застосування таких установок для перевірки виробів складної форми, які виготовляються індивідуально, викликає серйозні труднощі не тільки технічного, але й організаційного порядку. Іноді час, необхідний для доставки об'єкта контролю до дефектоскопічної установки (або установки до об'єкта), налаштування апаратури, перекидає вигоду від скорочення часу сканування. У перспективі створення автоматів-роботів, які володіють здатністю самонастроювання з урахуванням конфігурації і властивостей об'єкта контролю. На сьогодні автоматичні системи сканування для індивідуальних виробів складної форми широко застосовують тільки у тих випадках, коли участь контролера неможлива з причин техніки безпеки, наприклад при контролі атомних реакторів в процесі зупинок атомної електростанції.

У пристроях контролю знаходять застосування різні способи представлення інформації:

- аналогові, непрямі у вигляді показів приладів або кривих на екрані електронно-променевої трубки, які вимагають додаткового розшифрування;
- аналогові із зображенням конфігурації дефектів на екрані трубки або твердому носії (плівці, папері, самому виробі);
- цифрові з прямою вказівкою даних про дефект;
- аналого-цифрові (зображення конфігурації і місцезнаходження дефекту з цифровою вказівкою його найважливіших параметрів).

Для вирішення багатьох завдань автоматизації контролю, обробки і представлення інформації знаходить широке застосування обчислювальна техніка. Відзначимо найбільш перспективні області її застосування.

Оптимальний вибір параметрів контролю виробу з урахуванням його індивідуальних особливостей (при ультразвуковому контролі – облік нерівності поверхні виробу, швидкості і загасання ультразвукових хвиль в його матеріалі). Автоматичний облік цих параметрів при представленні результатів контролю (при оціню-

ванні координат і величини дефектів, що виявляються ультразвуковим луно-методом).

Застосування обчислювальної томографії в радіаційному контролі відкрило можливість пошарового аналізу об'єктів контролю за глибиною. Ультразвукова обчислювальна голографія на порядок підвищила азимутну роздільну здатність і дала можливість багатовимірного зображення виробу з дефектами.

Обчислювальна техніка:

– дозволяє виконувати аналіз характеру і розмірів дефектів при обмеженій кількості непрямих даних про дефект;

– виконує загальне управління роботою автоматичної системи НК, включаючи завантаження і вивантаження, сканування, перевірку працездатності, оцінювання результатів.

Контрольні питання

1. На чому заснований неруйнівний контроль покриттів проникаючими речовинами?

2. На чому засновані капілярні методи неруйнівного контролю покриттів проникаючими речовинами?

3. Для чого застосовують капілярні методи неруйнівного контролю покриттів проникаючими речовинами?

4. Для чого використовують дефектоскопію при неруйнівному контролі покриттів проникаючими речовинами?

5. Що заважає побачити дефекти при неруйнівному контролі покриттів проникаючими речовинами?

6. Які дефекти можна визначити за допомогою капілярного контролю покриттів проникаючими речовинами?

7. Для виявлення яких дефектів при неруйнівному контролі покриттів проникаючими речовинами використовують методи течошукання?

8. Який метод при капілярному контролі покриттів найбільш поширений?

9. Які методи застосовують для проявлення дефектів при неруйнівному контролі покриттів проникаючими речовинами?

10. Яка тривалість процесу капілярної дефектоскопії?

11. Які способи заповнення порожнин дефектів використовуються при неруйнівному контролі покриттів проникаючими речовинами?

12. Що виявляє течошукання при неруйнівному контролі покриттів проникаючими речовинами?

13. Які способи випробувань на герметичність використовують з використанням гелієвого течешукача?

14. Який запах мають хладони при неруйнівному контролі покриттів проникаючими речовинами?

15. Для чого застосовують магнітний та акустичний методи неруйнівного контролю покриттів?

16. На які методи ділять неруйнівний контроль покриттів проникаючими речовинами?

17. З якою глибиною виявляють тріщини методами капілярного неруйнівного контролю покриттів проникаючими речовинами?

18. На чому засновані методи капілярного контролю покриттів?

19. Як називається капіляр, що виходить на поверхню об'єкта контролю тільки з одного боку при неруйнівному контролі покриттів проникаючими речовинами?

20. Для чого призначений проявник при неруйнівному контролі покриттів проникаючими речовинами?

21. Що утворює проникаюча рідина, яка слугує індикатором при кольоровому методі контролю покриттів проникаючими речовинами?

22. Яку ширину мають лінії індикаторного малюнка при неруйнівному контролі покриттів проникаючими речовинами?

23. Як класифікують методи капілярної дефектоскопії?

24. Які методи застосовують для проявлення дефектів при неруйнівному контролі покриттів проникаючими речовинами?

Література: [4; 5; 8; 9; 15; 16]

У міру вдосконалення металообробки, впровадження нових матеріалів і технологічних методів розроблені та введені у практику машинобудування різні методи і засоби технологічних випробувань покриттів. Мета технологічних випробувань – в найкоротший термін дати відповідь про можливість застосування того або іншого матеріалу у виробництві без точного визначення показників якості цього матеріалу. Ця інформація украй важлива для оцінювання кожної партії металу, наприклад, листової сталі, перед штампуванням з цього листа деталей автомобілів або інших виробів.

7.1. Випробування на вигин (згин, загин, перегин)

Це одна з показових характеристик, яка дозволяє оперативно виявляти вплив захисних покриттів на зміну пластичності поверхневих шарів сплавів, схильних до окиснення, знеуглецювання, забруднення киснем при їх технологічних нагріваннях в звичайній окиснювальній атмосфері, наводнення у відновному газовому середовищі, продуктах згорання природного газу.

Здійснюють в холодному або гарячому стані. При цих випробуваннях перевіряють здатність матеріалу без появи дефектів витримувати задану пластичну деформацію (наприклад, багатократний перегин). Випробування проводять:

- до певного кута вигину (контролюють максимальний кут, при якому на поверхні зразка не з'являється тріщина);
- навколо оправки (металевого циліндричного стрижня);
- до паралельності сторін;
- до зіткнення сторін (згин з перегином).

Випробування проводять на пресах; спеціальних машинах; лещатах із закругленими губками і т.п. при плавному збільшенні навантаження на зразок (рис. 7.1).

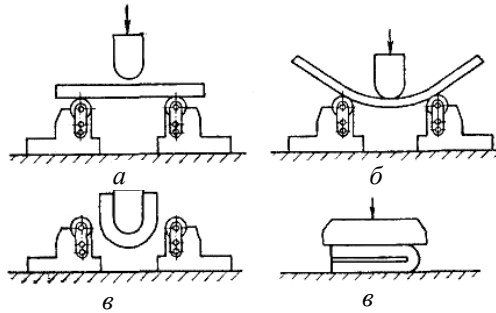


Рис. 7.1 – Схеми технологічних випробувань на загин:
a – встановлення зразка; ***б*** – загин до певного кута;
в – загин до паралельності сторін; ***г*** – загин впритул

Ознакою того, що зразок витримав випробування, є відсутність зламу, тріщин, надривів, розшарувань.

На оправках з радіусом закруглення 2, 5, 10 мм в спеціальному пристосуванні з силовимірювальним пристроєм випробовують при постійній швидкості вантаження зразки товщиною від 1 до 10 мм, шириною 10–20 мм і завдовжки 100–150 мм.

7.1.1. Випробування на витягання

Цей найбільш вживаний на практиці спосіб якісного оцінювання міцності зчеплення та інших властивостей покриттів полягає у втискуванні сталеві кульки в поверхню плоского зразка зі сторони, протилежної покриттю, з подальшим візуальним оглядом деформованої поверхні покриття.

Дозволяє визначити якість листів і стрічок в частині властивостей матеріалу витримувати без тріщин утворення опуклостей спеціальним штампом за заданих умов. Випробування на витягання полягають в тому, що зразок затискається між матрицею і притискним кільцем до появи на витиснутій лунці наскрізної тріщини. Якщо покриття має хороше зчеплення з основою і хороші пластичні якості, то сталь і покриття руйнуються одночасно.

Пристрій для глибокої витяжки типу Еріксена, на якому проводять випробування на витягання (рис. 7.2), складається з трьох частин: притискного кільця 1, матриці 2 і пуансона 3. Під тиском

преса, на якому встановлено випробувальний пристрій, пуансон 3 тисне на затиснуту між притискним кільцем 1 і очком матриці 2 заготовку до тих пір, поки не відбувається розрив матеріалу. Величина робочого ходу пуансона і є характеристика придатності матеріалу з покриттям до холодного штампування (нормальної чи глибокої витяжки).

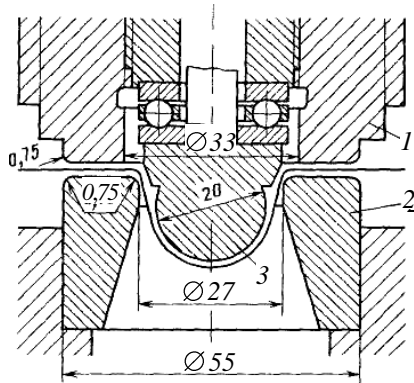


Рис. 7.2 – Пристрій для випробувань на витягання (витяжку)

Пуансон, виготовлений із загартованої сталі, має кулясту форму. Його діаметр 20 мм, поверхня ретельно відполірована. Матриці та притискне кільце також сталеві, добре відполіровані деталі. Товщина листового матеріалу, призначеного для випробувань, не повинна перевищувати 2 мм, ширина матеріалу не менше 70 мм.

Для випробувань методом глибокої витяжки партії листового матеріалу відрізують смужки листа в кількості, вказаній в технічних умовах або визначеній дослідним шляхом, видавлюють в цих смугах на описаному пристрої лунки по довжині смуги з кроком (відстанню) між відтисненнями не менше 70 мм. Далі оцінюють якість листового матеріалу залежно від глибини лунки, якості її поверхні, наявності або відсутності тріщин та інших дефектів. Бажана гладка поверхня лунки, шорстка ж указує на знижену якість матеріалу з погляду його придатності для глибокої витяжки. Поверхня лунки може нагадувати за своєю текстурою шкіру апельсина, що вказує на грубозернисту структуру листового матеріалу і його повну непридатність для глибокого витягування. Якщо розрив пройшов по лінії, що огинає лунку, то це сприятлива ознака. У тому випадку, коли лінія розриву проходить через поглиблення, можна припустити наявність шаруватості, неоднорідності матеріалу.

Випробування матеріалу на витягання – складний процес, в якому матеріал працює на розрив, причому розтягувальні навантаження в матеріалі діють у різних напрямках.

7.1.2. Штампованість в холодному стані

Визначають витяжкою із заготовки діаметром 110 мм циліндричного стакана діаметром 60 мм і завтовшки 1,5 мм. Розраховують коефіцієнт штампованості за формулою $K_{шт} = D_3/D_c$, де D_3 – діаметр заготовки; D_c – діаметр стакана, витягнутого без стоншування по радіусу R в основі пуансона (R дорівнює трьом товщинам початкової заготовки). Штампованість в холодному стані визначають на зразках після їх нагрівання із захисним технологічним покриттям і без покриття за стандартною технологією.

1. Випробування на навивання дроту. Випробування полягає в навиванні дроту щільно прилеглими витками по гвинтовій лінії на циліндричну оправку, діаметр якої вказується в стандартах на виготовлення дроту.

Дріт діаметром менше 4 мм навивають на стрижень діаметром, рівним діаметру зразка; дріт діаметром 4–6 мм – на стрижень діаметром, рівним подвійному діаметру зразка; дріт діаметром більше 6 мм – на стрижень діаметром, рівним потрійному діаметру зразка.

Результат випробування є позитивним за відсутності розшарувань, тріщин, надривів, зламу або руйнування як в основному матеріалі зразка, так і в його покритті.

2. Випробування дряпанням. Використовують для оцінювання міцності зчеплення покриттів з металів з низькою твердістю (покриття з цинку, алюмінію, свинцю тощо). На покритті спеціальним різцем, перпендикулярно розташованим до поверхні основи, наносять дві паралельні подряпини так, щоб повністю прорізати покриття. Міцність зчеплення характеризується відстанню між цими канавками, при якій покриття відділятиметься від основи.

7.2. Жаростійкість і термостійкість покриттів (термомасометрія)

Багато деталей машин працюють за підвищених температур. Це деталі енергетичних машин, металургійних агрегатів, космічних апаратів, двигунів і т.п. Матеріали для них повинні мати специфічні властивості, що дозволяють витримувати не тільки механі-

чні, але і теплові навантаження. **Жаростійкість** (тривала міцність при високих температурах) – властивість захисних покриттів чинити опір розвитку пластичної (залишкової) деформації і руйнуванню під дією високих температур і окиснювального газового середовища.

Жаростійкість визначають або по відношенню приросту (спаду) маси зразка до площі його поверхні, або за швидкістю приросту (спаду) маси на одиницю площі. Застосовують два методи термомасометричного контролю покриттів – безперервне зважування зразків і періодичне зважування охолоджених зразків в алундових тиглях з кришкою після їх витримки в печі при певній температурі протягом, наприклад, 25 год багато разів. Перевагою першого методу є усунення пошкоджень покриттів (тріщини, сколювання), обумовлених багатократним охолодженням і нагріванням зразків, а також помилок через поступове руйнування тиглів. Приріст маси зразків за рахунок окиснення визначають на аналітичних вагах з точністю до 1×10^{-7} кг.

Випробуваннями на жароміцність виявляється вплив покриттів на підвищення опірності сплавів руйнуванню і повзучості при високих температурах, яка може знижуватися унаслідок високої температурної газової корозії, обезлегування поверхневих шарів. Ці випробування є одним з основних методів оцінювання ефективності захисної дії покриттів стосовно жароміцних нікелевих, високохромистих, тугоплавких сплавів і композиційних матеріалів.

Випробування на жаростійкість показали (рис. 7.3), що окиснення покриттів, сформованих з різних композиційних матеріалів, носить затухаючий характер, причому хід кінетичних кривих підкоряється параболічному закону.

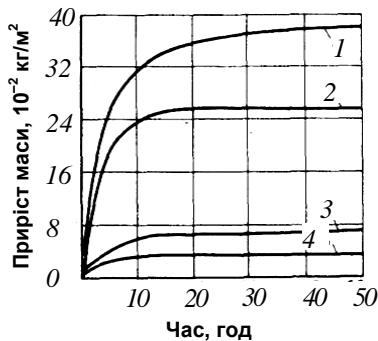


Рис. 7.3 – Кінетика окиснення при $t = 973$ К напилених покриттів:
1 – (TiC) 25 % Ni; 2 – (TiC) 35 % Ni; 3 – (TiC) 30 % Ni; 4 – (TiC) 50 % Ni

На поверхні зразків при випробуваннях утворюється плівка оксидів, міцно пов'язана з поверхнею покриття.

Із збільшенням температури нагрівання відбувається зниження жаростійкості покриття і збільшення шару окалини. Здатність покриттів витримувати без руйнування різкі перепади температури умовно розділяється на термостійкість і термічну втому.

Термостійкість – максимальний температурний перепад, який може витримати покриття без утворення сколів і тріщин.

Термічна втома – максимальне число циклів (теплозмін), що витримує покриття до появи першого неприпустимого дефекту (тріщина, сколювання, пора, прогар, усадка тощо). Для випробувань використовують лабораторні зразки – плоскі, 50×50 мм і товщиною 3–5 мм; циліндри $d = 10\text{--}20$ мм і висотою 20 мм, або натурні зразки.

При випробуваннях на **термостійкість** зразки нагрівають протягом 5 хв у печі до температури, рівної або більшої, ніж передбачувана робоча температура покриття, а потім охолоджують. Охолодження може застосовуватися природне, протягом 20 хв на повітрі або обдуванням вентилятором, стислим повітрям (0,5 МПа), або у воді, рідкому азоті тощо. Поверхню покриття контролюють на наявність тріщин і сколів візуально або під мікроскопом типу МБС. Для випробувань потрібно не менше п'яти ідентичних зразків.

Випробування на **термічну втому** включають нагрівання зразків в печі до робочої температури, витримку при цій температурі 1–10 хв і подальше охолодження на повітрі 20–30 хв. Ці операції багато разів повторюють, контролюючи візуально або під мікроскопом стан поверхні покриттів, а також зміну маси зразків після набору заданого числа циклів «нагрівання – охолодження». Покриття контролюють після 1, 5, 10 і 25 циклів. Надалі контроль стану покриття проводять через кожні 25 циклів. Покриття вважається таким, що витримало випробування, якщо число циклів або сумарний час його перебування в печі при робочій температурі на 10–20 % перевищує передбачуване число теплозмін, тривалість роботи в експлуатаційних умовах і якщо на поверхні покриття відсутні тріщини, сколювання, пори, прогари та інші неприпустимі дефекти.

Термостійкість і термічну втому покриттів визначають також в умовах одностороннього нагрівання кварцовими лампами, графітовими нагрівачами, плазмовим пальником. Одностороннє нагрівання дозволяє підвищити температуру випробувань 1500 °С і вище, забезпечує високі швидкості нагрівання і, певною мірою, наближення до реальних умов експлуатації покриттів.

Термічна втома покриттів є наслідком ряду складних високо-температурних процесів, що протікають в матеріалах покриття, підкладки і на межах їх контакту і розділу з газовим середовищем. Руйнування покриттів відбувається під дією термічних напружень в пружній області, а накопичення залишкових деформацій і змін має місце не тільки в покритті, але і в підкладці. При випробуваннях на термічну втому тугоплавких емалей перепад температур досягає 80 % від температури плавлення підкладки. При цьому мають місце перерозподіл і виникнення значних залишкових напружень в системі «покриття – сплав», накопичення змін фізико-хімічних властивостей покриття і зниження фізико-механічних властивостей, а перш за все пластичності металів і сплавів, накопичення залишкових деформацій, а також локальні зміни форми і розмірів зразків підкладок з неметалічних матеріалів.

Температуру зразків з покриттям і температуру печі вимірюють хромель-алюмелевими термопарами за допомогою автоматичних потенціометрів. Термостійкість покриттів в значній мірі залежить від складу напилюваного матеріалу і режимів напилення.

7.3. Теплоізоляційний ефект покриттів

Теплоізоляційні та жаростійкі покриття мають різні структури. Для підвищення жаростійкості необхідно напилювати щільні покриття, які мають хорошу теплопровідність для відведення теплового потоку, що впливає на поверхню покриття. Навколишня атмосфера не повинна проникати всередину покриття. Тим часом, для отримання хороших теплоізоляційних властивостей необхідно напилювати пористі покриття, які володіють низькою теплопровідністю. Через деякі покриття вказаного типу навколишня атмосфера може проникнути до поверхні основного металу. В результаті відбувається окиснення або корозія основи і може порушитися зв'язок покриття з основою, що приведе до його відшаровування. Перед напиленням жаростійких або теплоізоляційних покриттів для підвищення їх якості на основний метал (гальванічним методом або напиленням) наносять підшар з матеріалів, які володіють хорошою адгезією до основи і корозійною стійкістю. Для підвищення жаростійкості та теплоізоляційних характеристик покриття потрібні тугоплавкі матеріали, які мають хімічну стабільність при високій температурі.

Для роботи в умовах, що характеризуються частими тепловими ударами, підходять пористі покриття. Разом з тим при роботі в умовах газообразивного або ерозійного зносу задача збільшення зносостійкості покриття вимагає підвищення його щільності. Для поліпшення теплоізоляційних характеристик можна збільшувати товщину покриття. Проте необхідно враховувати, що збільшення товщини покриття супроводжується підвищенням у ньому залишкових напружень, які знижують міцність зчеплення покриття з основним металом. Крім того, збільшення товщини покриття підвищує небезпеку відшаровування його від основи під дією термічних деформацій, які виникають при нагріванні через різне теплове розширення основи і покриття. Дані покриття мають товщину в межах 0,1–1 мм. У випадках, коли деталі з напиленими покриттями використовують в умовах, при яких необхідно враховувати випромінювання і поглинання теплоти, важливим чинником стає ступінь їх чорноти, особливо в області інфрачервоного випромінювання.

Щоб перешкодити проникненню газів навколишнього середовища в покриття, жаростійкі покриття, що працюють при порівняно низьких температурах, піддають просоченню для блокування пор. Відсутність аналогічних засобів для просочення покриттів, що працюють при високій температурі, вимагає застосування необхідних технологічних прийомів для підвищення щільності покриття.

Теплоізоляційні властивості покриттів перш за все визначаються теплопровідністю самого напилюваного матеріалу, а також вмістом пор і оксидів, розсіяних за об'ємом покриття, їх розміром і формою, товщиною покриття, структурою граничного шару між ним і основним матеріалом. Пористість покриття підвищує його теплоізоляційні властивості, проте на шкоду жаростійкості і корозійної стійкості. При збільшенні товщини покриття теплоізоляційні властивості поліпшуються, але при цьому знижується міцність зчеплення з основним металом. Питання про шляхи підвищення теплоізоляційних властивостей покриттів в умовах вказаних суперечливих тенденцій необхідно вирішувати індивідуально у кожному конкретному випадку. Теплоізоляційні властивості покриттів оцінюють методом вимірювання швидкості охолодження заготовок з покриттям і без нього. У заготівці просвердлюють отвори на глибину не менше ніж на 1/2 її довжини, в які закарбовують термометри. Заготовки з покриттям і без нього поміщають в піч. Фіксують температуру, час нагрівання і охолодження заготовок на повітрі, у воді, а потім розраховують швидкість зміни температури заготовок.

7.4. Ерозійна стійкість

Стійкість покриттів у високошвидкісному газовому потоці при високих температурах оцінюють по зменшенню маси покриття. Ерозійну стійкість визначають також по опору покриттів зменшенню їх маси під дією потоку пилю, піску при цехових або підвищених температурах.

Ерозійне зменшення маси покриттів може відбуватися шляхом крихкого руйнування під дією механічних ударів частинок абразиву, термічних ударів. При дуже високих температурах, коли в'язкість покриттів знижується до $10-10^2$ Па·с, зменшення маси може мати абляційний характер. Стандартних приладів для випробувань ерозійної стійкості покриттів при високих температурах не використовують. Випробування проводять на установках, які забезпечують можливість моделювання швидкісного газового потоку і робочої температури покриття або швидкості і концентрації абразивних частинок в потоці повітря. Високу температуру і швидкість потоку газу одержують, наприклад, за допомогою реактивного сопла при спалюванні рідкого палива.

7.4.1. Зносостійкість і припрацювання покриттів

Зносостійкість і припрацювання є основними вихідними параметрами, які визначають працездатність покриттів в реальних умовах. Специфічна структура напилених шарів, зокрема їх пористість, покращує працездатність покриттів в умовах тертя ковзання у присутності мастила. Зносостійкість покриттів визначається також припрацюванням (процес зміни геометрії і фізико-механічних властивостей поверхневих шарів матеріалу в початковий період тертя). При цьому в незмінних умовах зовнішніх дій зменшується робота тертя, стабілізується температура, знижується інтенсивність зносу. Час припрацювання визначають експериментально і для більшості покриттів він складає не більше 90 хв. Причому після припрацювання і восьмигодинних випробувань, шорсткість зменшується в порівнянні з початковою від $Ra = 1,25$ до $Ra = 0,63$, що свідчить про сталу оптимальну рівноважну шорсткість третьових пар.

Випробування на *знос* полягають у визначенні змін механічних властивостей поверхні матеріалів після тривалої дії сил тертя, а також у встановленні втрати маси зразків. Складність процесів, які відбуваються при контактних взаємодіях твердих тіл в умовах зовнішнього тертя і поверхонь тертя, що приводять до руйнування,

зумовила численні методики для оцінювання властивостей матеріалів вузлів тертя. Це привело до створення великого класу випробувальних машин і стендів.

7.4.2. Питомий тиск і коефіцієнти контактного тертя

Ефективність захисних покриттів як високотемпературних технологічних мастил оцінюють методом вимірювання питомого тиску при осадці циліндричних зразків діаметром 15 мм і довжиною 20 мм на гідропресі потужністю 25 т із швидкістю 80 м/с, а також методом виміру коефіцієнта контактного тертя. Зразки з покриттям і без нього нагрівають за режимом, що імітує нагрівання заготовок під штампування. Визначення коефіцієнта контактного тертя проводиться шляхом деформації зразка плоскими бойками. В процесі деформації кут 2α між бойками безперервно змінюється. Коли він стає рівним подвійному куту тертя $2\alpha_{mp}$, зразок виштовхується деформуючими площинами. На деформованому зразку заміряють величину подвійного кута тертя і визначають величину коефіцієнта контактного тертя за формулою $\mu = \operatorname{tg} \alpha$.

Цей спосіб визначення коефіцієнта контактного тертя дозволяє досліджувати зміну контактного тертя залежно від складу покриття, температури, швидкості та ступеня деформації.

Ефективність застосування покриттів як мастил оцінюють також за осіданням циліндричних зразків $d = 15$ і висотою 20 мм між плоскими плитами. У виробничих умовах працездатність покриттів як технологічних мастил оцінюють по стійкості штампів, виміром штампівок у певних перетинах і шляхом порівняння числа ударів молота при штампуванні заготовок з покриттям і без нього.

7.5. Залишкові напруження в покриттях

Залишкові напруження, які виникають в покриттях, значно впливають на всі основні експлуатаційні характеристики напильних деталей. Вони можуть бути причиною появи тріщин і відшарувань, впливають на адгезійну і когезійну статичну і багатоциклову міцність, зносостійкість, термостійкість і т.д.

Багатофакторність залишкових напружень полягає в тому, що на експлуатаційні характеристики деталей з покриттями впливають не тільки значення і знак напружень, але і вид їх розподілу

по перетину деталі, глибина залягання максимальних напружень, градієнт напружень і т.д.

Таким чином, при напиленні покриттів в них формується напружений стан, що характеризується температурними, кристалізаційними та іншими початковими напруженнями. Після закінчення процесу напилення в системі виникають залишкові напруження. Залишкові напруження є самоврівноваженою системою. Отже, в матеріалі завжди присутні області як стискуючих, так і розтягувальних напружень.

Розтягувальні напруження призводять до зниження міцності матеріалу на розтяг і можуть викликати тріщини, перпендикулярні до поверхні. Після виникнення тріщин рівень напружень в покритті знижується. У зоні крайового ефекту в шарах, де діють розтягувальні основні напруження, формуються нормальні напруження стиснення. Основні залишкові напруження розтягування роблять в цілому негативний вплив на експлуатаційні характеристики покриття. В той же час основні залишкові напруження стиснення роблять позитивний вплив на експлуатаційні характеристики деталей. Проте стискуючі напруження можуть приводити до виникнення втрати стійкості шару, в якому вони діють, і, крім того, в зоні крайового ефекту вони приводять до виникнення розшарувальних напружень. Отже, значення стискуючих напружень повинні бути обмежені найменшим значенням міцності в системі на розтягування. Звичайно найменше значення має міцність зчеплення покриття з основою. Тому значення стискуючих залишкових напружень не повинні перевищувати міцності зчеплення покриття з поверхнею основи.

У процесі напилення розплавлені частинки з великою швидкістю ударяються об поверхню основи, деформуються і закріплюються на ній за рахунок сил зчеплення. При кристалізації такої окремо взятої частинки виникають залишкові напруження другого роду, які врівноважуються в об'ємі однієї частинки. Проте, як показують дослідження, міцність покриття в більшій степені визначається не міцністю матеріалу окремих частинок, а силами зчеплення між цими частинками.

Розглянемо механізм формування залишкових напружень при нарощуванні покриття. Відомо, що в процесі нанесення покриття поверхня конденсації або кристалізації переміщується по нормалі до основи. Зміна температури, що відбувається при цьому, призводить до теплового розширення системи. Проте через наявність основи, безперервного збільшення і можливого градієнта температури,

по перетину теплове розширення проходить обмежено, тобто виникають напруження. Утворення напружень також обумовлене домішками, чужорідними включеннями, межами блоків, відмінністю коефіцієнтів термічного розширення і параметрів кристалічних ґраток, фазовими і структурними перетвореннями.

7.6. Корозійна стійкість покриттів

Корозією називають процес руйнування металу під хімічною або електрохімічною дією на нього навколишнього середовища. Іншими словами, корозія – це процес перетворення металу в оксид або інші з'єднання за допомогою захоплення валентних електронів, що створюють металевий зв'язок. Цей процес називають також окисненням або анодною реакцією.

У водному розчині завжди є іони H^+ і OH^- як продукти часткового розпаду води, а також міститься та або інша кількість кисню. При зануренні в такий розчин заліза його корозія протікає в умовах утворення мікрогальванічного елемента.

Для утворення гальванічного елемента необхідне одночасне протікання катодної і анодної реакцій; у разі припинення яка-небудь з цих реакцій припиняється і розвиток корозії. Однією з причин припинення вказаних реакцій є перехід металу в пасивний стан через утворення поверхневої плівки, яка запобігає подальшому окисненню (анодна поляризація). У міру підвищення окиснювальних властивостей розчину корозія металу досягає максимальної активності, після чого відбувається різке зниження активності аж до майже повного припинення корозії.

Випробування корозійної стійкості покриттів в природних умовах вимагають багато часу. Короткочасні випробування дають інформацію лише наближеного характеру. Часто прагнуть провести такі лабораторні випробування, які можливо точніше відтворюють виробничі умови.

Після нагрівання з покриттям зразки сплаву, що захищається, витримують в тропічній камері, у вологій камері, в камері сольового туману, піддають циклічним нагріванням до 200–350 °C і охолодженням на повітрі, повторюючи вказані операції в певній послідовності. Тривалість і режим витримки зразків в кожній з камер визначають залежно від умов експлуатації деталей, що захищаються покриттям. Відмічають час появи продуктів корозії на поверхні

зразків, контролюють мікроструктуру поверхневих шарів, випробовують механічні властивості зразків.

Для прискорення корозійних випробувань зразки з покриттями піддають дії жорсткіших умов, ніж умови при експлуатації. Існують спеціальні установки, відтворюючі дію морського туману, тепла і вологи (камера типу ТВК-2 та Г-4), повітряної атмосфери з домішкою SO_2 , світла і т.д.

Корозію класифікують за різними принципами, зокрема за механізмом процесу, виду агресивного середовища і т.п. Розглянемо наступну класифікацію:

- 1) міжкристалічна корозія (МКК);
- 2) корозійне розтріскування під напруженням;
- 3) точкова корозія;
- 4) щілинна корозія;
- 5) корозійна втома;
- 6) високотемпературна корозія.

Розглянемо окремі види корозії за цією класифікацією.

1. Випробування на стійкість до МКК виконують електролізом і зануренням в гарячу кислоту.

2. Випробування на стійкість до корозійного розтріскування під напруженням здійснюють в агресивних рідких середовищах при постійному навантаженні, що забезпечує в зразках постійний напружений стан.

3. Випробування на стійкість до точкової корозії здійснюють різними способами, зокрема випробування зразків металу у водному розчині хлориду тривалентного заліза або розчині кухонної солі з додаванням окиснювача, спосіб вимірювання потенціалу точкової корозії та ін.

4. Випробування в хлориді тривалентного заліза здійснюють шляхом занурення зразків в розчин, що містить 2–10 % FeCl_3 з додаванням 1/20 NH_4Cl з витримкою їх протягом 4–48 год при постійній температурі в інтервалі 20–60° С. Стійкість до точкової корозії оцінюють зважуванням зразків до і після випробувань. Простота проведення випробувань і хороша зіставність даних складають перевагу даного способу, проте залежність результатів від способу розміщення зразків знижує надійність одержуваних результатів.

5. Випробування здійснюють в розчині кухонної солі, морській воді або штучній морській воді, насиченій киснем, з додаванням належного окиснювача. Стійкість до точкової корозії оцінюють зважуванням або за кількістю утворених виразок та їх глибині.

6. Критичний потенціал точкової корозії визначають по діаграмі анодної поляризації, побудованої для водного розчину кухонної солі або розчину сірчаної кислоти в потенціодинамічному режимі.

7. Випробування на стійкість до щілинної корозії не включене в стандарт, і кожен дослідник вибирає спосіб випробувань на свій розсуд. Пристрій для випробування на стійкість до щілинної корозії, що є електрозамкнутою системою з двох куль, наведений на рис. 7.4.

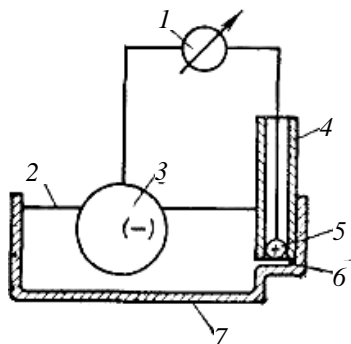


Рис. 7.4 – Схема пристрою для випробування на стійкість до щілинної корозії:

- 1 – амперметр; 2 – водний розчин куховарської солі;
3 – куля великого діаметра; 4 – тefлонова трубка;
5 – куля малого діаметра; 6 – щілина; 7 – скляна ємність**

Куля малого діаметра у цьому пристрої – зразок з випробовуваного матеріалу, куля великого діаметра виготовлена зі сталі, яка відрізняється від сталі зразка. Агресивне середовище – розчин кухонної солі з різними інгібіторами окиснення, що додаються з метою вивчення їх ефективності. Про стійкість до щілинної корозії аналізують за показаннями амперметра. Випробування на стійкість до загальної корозії проводять для оцінювання корозійної стійкості шляхом шестигодинної витримки випробовуваних зразків в киплячому п'ятипроцентному розчині сірчаної кислоти.

Розглянуті нами властивості покриттів в основному з погляду ефективності захисту чорних металів від корозії. Якщо покриття щільне і повністю закриває основний метал від проникнення до нього агресивного середовища, то корозійна стійкість виробу визначається рівнем корозійної стійкості самого матеріалу покриття до дії конкретного середовища. У разі пористого покриття або за

наявності в ньому виниклих в процесі експлуатації дефектів, агресивні компоненти середовища безперешкодно проникають до поверхні основного металу. При вивченні корозійної стійкості покриттів, перш за все слід розглядати електрохімічні взаємодії покриття з основним металом у цьому агресивному середовищі.

У разі проникнення агресивного середовища до основного металу можливі два варіанти взаємодії покриття з основним металом. Якщо потенціал покриття по відношенню до сталі є негативним, то при проникненні агресивного середовища через покриття до поверхні основи, остання стане анодом, забезпечуючи електрохімічний захист основного металу. Інакше відбувається прискорена корозія основи. Отже, для захисту сталі бажано вибирати такий матеріал покриття, який по відношенню до неї слугує катодом.

Електрохімічна корозія характеризується постійною величиною корозії за одиницю часу, тому термін дії покриття визначається його товщиною.

7.6.1. Спеціальні методи дослідження окиснення металів

Оптичний поляризаційний метод заснований на вивченні параметрів еліптичної поляризації світла, відбитого від металевої поверхні. Ці параметри змінюються при окисненні і залежать від оптичних властивостей металу і товщини окисної плівки на його поверхні.

Фотографічний метод. Фотографічна активність металів обумовлена перекисом водню, що виділяється при атмосферній корозії металів. Перекис водню є продуктом катодного процесу відновлення кисню на окиснюваній поверхні у присутності адсорбційної плівки вологи. Велика частина молекул H_2O_2 , що утворюються, розкладається, інші виділяються і викликають почорніння фотопластини.

Розробка методу визначення абсолютної кількості H_2O_2 , що виділяється металами при атмосферній корозії, перетворила фотографічний метод на кількісний метод вивчення атмосферної корозії металів. Визначення абсолютної кількості H_2O_2 засноване на порівнянні оптичної щільності почорнінь, що виникають при дії на фотошар свіжоочищеної поверхні металів і пари водного розчину H_2O_2 певної концентрації.

Порівняння фотографічного методу з оптичним поляризаційним і ваговим показало, що перекис водню, що виділяється при окисненні, може слугувати критерієм корозійної поведінки металів на порівняно ранніх стадіях окиснення.

Слід відмітити, що фотографічний метод може бути застосований до вивчення атмосферної корозії таких металів, як Al, Zn, Cd, Mg, Bi. При подальшому збільшенні чутливості фотоемульсії до дії H₂O₂ перелік металів, доступних для дослідження цим методом, може бути значно розширений.

Корозія під напруженням. Випробування на корозію під напруженням дозволяють виявити ефективність застосування покриттів при термічній обробці, гарячій пластичній деформації високоміцних мартенситних, середньолегованих некорозійностійких, а також аустенітних корозійностійких сталей. Випробовують стандартні зразки, які пройшли нагрівання за режимом термічної обробки сталевих деталей з покриттям і без покриття, при відповідних для даної сталі, сплаву умовах корозійної дії середовища.

7.7. Ступінь чорноти та глянцею (блиску) покриттів

Ступінь чорноти нормального випромінювання тугоплавких емалей та інших силікатних покриттів значно вище за випромінювальну здатність металів і перевищує 0,5–0,6. Найважливішою перевагою вказаних покриттів є можливість підвищення ступеня чорноти повного нормального випромінювання їх до значень 0,85–0,95 за рахунок коректування складу покриттів. Іншою перевагою є можливість збереження високих значень ступеня чорноти при температурах вище 1000 °C і незначні коливання її при високих температурах.

Існуючі різні методики, установки і вимірвальне устаткування для визначення ступеня чорноти покриттів можуть давати різні величини цієї характеристики. У зв'язку з цим порівняльні випробування покриттів різного складу, температурну залежність ступеня чорноти покриттів визнано доцільною визначати в ідентичних методологічних умовах. Ступінь чорноти повного випромінювання є визначають за формулою:

$$\varepsilon = \frac{c_m (\Delta t / \Delta \tau) - Q_T}{F \sigma (t_c^4 - t_{\text{нб}}^4)}, \quad (7.1)$$

де c_m – масова теплоємність, Дж/°C; $\Delta t/\Delta \tau$ – швидкість зміни температури зразка °C/c; Q_T – втрати теплоти унаслідок теплопровідності дротів, Вт; F – повна поверхня зразка, см²; σ – постійна Стефана–Больцмана; t_c^4 та $t_{\text{нб}}^4$ – температура зразка і стінки, °C.

Технічні умови і стандарти вимагають фізичного оцінювання блиску поверхонь. Це вимірювання необхідне для контролю рівномірності, сумісності або можливого погіршення стану будь-якого захисного покриття. Глянець (блиск) покриттів контролюють фотоелектричним блискоміром НГШ. Прилад дозволяє порівняти глянець випробовуваного покриття з глянцем еталону з увіюлового скла, для якого ця характеристика прийнята рівною 65 %.

7.7.1. Електричні (діелектричні) властивості покриттів

Визначення електричних властивостей (діелектричних характеристик) покриттів обумовлене, як правило, деякими специфічними особливостями їх застосування. Електричні властивості тугоплавких емалей випробовують у зв'язку з можливістю їх використання як електроізоляцію при високих температурах. В деяких випадках електричні властивості покриттів визначають з метою виявлення їх можливого впливу на проходження радіохвиль через стінки конструкцій, а також при дефектоскопії покриттів на наявність тріщин, несущільностей електростатичними методами. Визначають діелектричну проникність, тангенс кута діелектричних втрат, питомий поверхневий електричний опір, напругу пробою, стійкість до блискавок, деякі інші електричні характеристики.

Випробовують як матеріали покриттів, так і покриття на металевих і неметалічних підкладках. Електричні властивості тугоплавких емалей визначаються їх хімічним складом. Велике значення мають також товщина і якість нанесення емалі. Різновчщинність емалевого шару, наявність наскрізних пор, тріщин може призводити до різкого зниження електроізоляційних властивостей цих покриттів. Для випробувань потрібні зразки у вигляді пластин або дисків діаметром до 100 і завтовшки 3–40 мм.

Діелектричну проникність і тангенс кута діелектричних втрат визначають тестовими методиками на зразках товщиною 3...5 мм. Випробування проводять на частотах до 10^3 – 10^{10} Гц. Питомий електричний опір визначають за допомогою мегомметрів і тераомметрів або з використанням нестандартних схем електроємностей у діапазоні опору до 10^{16} Ом і за температур до 800–1000 °С.

Напруга пробою і блискавкостійкість покриттів характеризують їх електричну міцність. Напругу пробою визначають при постійній і змінній напругах, задаючи різницю потенціалів на контакти електродів, щільно притиснутих до покриття і підкладки точно

один проти іншого. Блискавкостійкість оцінюють при імпульсному розряді. Напилені покриття, які володіють високою пробивною напругою, електричним опором і діелектричною проникністю, широко використовують в електротехніці.

Вплив високої температури на зміну електричних властивостей покриттів визначають, поміщаючи випробовувані зразки в розігріту піч, нагріваючи зразки пропусканням струму через металеву підкладку.

Електроопір напилених покриттів залежить від вмісту в них оксидів, що в свою чергу визначається режимом напилення.

Пробій неоднорідних керамічних діелектриків за нормальних умов відбувається шляхом пробою газу, що заповнює одну з пор. При цьому ефективна товщина покриття зменшується і розвивається різко неоднорідне поле, що призводить до пробою покриття; електрична міцність пор різко збільшується при зменшенні розміру пор.

При дослідженні електричної міцності під голку потрапляє багато різних пор. Розряд, який викликає пробій зразка, розвивається в найбільшій з пор, тобто електрична міцність матеріалу в основному визначається розміром найбільших пор. Вимірювання необхідно проводити з ретельно висушеними зразками. Для забезпечення умов хорошого контакту електроду з шаром бажано використовувати як один з електродів підкладку, а як другий шар покриття, наприклад з мідного, нанесеного поверх шару, діелектрика.

Електроізоляційні покриття знаходять достатньо широке розповсюдження в різних областях. Найбільш важливими характеристиками вказаних покриттів є їх електрична міцність, електропровідність, тангенс кута діелектричних втрат, зміна вказаних характеристик при тривалому накладенні поля (електричне старіння).

7.8. Водопроникність покриттів

Водопроникність покриттів на пористих підкладках оцінюють краплинорідким методом збільшення маси зразків. На поверхню трьох зразків відомої маси поміщають серію крапель дистильованої води. Схему і послідовність приміщення крапель вибирають залежно від розмірів і форми зразків. Відстань між контрольованими краплями (крок висадки крапель) приймають рівним або кратним 10–20 мм. Після витримки протягом заданого часу (15–30 хв) краплини видаляють з поверхні зразків фільтрувальним

папером і зразки повторно зважують. Виражене у процентах збільшення маси зразків за рахунок водопроникності слугує характеристикою вологозахисних властивостей покриття.

Одна з причин передчасного руйнування виробу, яка найбільш часто зустрічається – це нанесення покриття на вологу поверхню. Багато підкладок, на які наносяться покриття, мають пористу структуру і можуть абсорбувати вологу. Тому необхідно визначати вміст вологи в основному матеріалі.

7.8.1. Викривлення (короблення) і усадка

Викривлення (короблення) металевих зразків, усадку неметалічних матеріалів після випалення і випробувань покриттів визначають за різницею розмірів зразків в початковому стані і після високотемпературних нагрівань за допомогою штангенциркуля, мікрометра, індикаторної головки або вимірювального мікроскопа з точністю 0,01 мм. Для вимірювання зразки закріплюють в спеціальні нестандартні пристрої. Базою відліку слугують початкові розміри зразків (до нагрівання) або розміри, задані в кресленнях.

7.8.2. Вакуумні випробування

До і після витримки у вакуумній камері при розрідженні 133,3–13,3 МПа і температурі 250–1400 °С визначають контрольні характеристики покриття – ступінь чорноти, термічний коефіцієнт лінійного розширення, коефіцієнт віддзеркалення сонячної радіації, колір, блиск, суцільність тощо. За наслідками визначення контрольних характеристик до і після вакуумних випробувань вибирають перспективні склади і режими отримання покриттів.

7.8.3. Радіаційні випробування

В енергетичних установках тугоплавкі емалі і сплави, що захищаються, можуть піддаватися дії електромагнітного випромінювання високих енергій. В результаті радіаційних дій можуть знижуватися міцність зчеплення та електроізоляційні властивості покриттів. Крім того, в покриттях не рекомендується використовувати деякі елементи, оксиди яких традиційно вводяться в емалі, через небажані ефекти ядерної взаємодії. Зразки випробовують при заданих типах і рівнях опромінювання, а потім визначають міцність зчеплення, електричні властивості, контролюють зміни зовнішнього вигляду, складу і структури покриття.

7.8.4. Кліматичні випробування

До них відносять випробування покриттів на стійкість в різних кліматичних зонах. Крім тривалих випробувань зразків в природних умовах тієї або іншої кліматичної зони проводять також прискорені випробування покриттів в спеціальних камерах, які імітують умови низької і високої відносної вологості (від 5 до 98 %), температури (від -50 до $+60$ °C), температурних перепадів, інтенсивної сонячної радіації.

Критеріями оцінювання кліматичної стійкості покриттів можуть слугувати зміни їх кольору, блиску, зовнішнього вигляду, сколювання, тріщини, корозійні пошкодження поверхні (вилуговування, вимивання, ерозія), жаростійкість, результати випробувань механічних властивостей зразків.

7.8.5. Випробування на стійкість до палива

Випробування матеріалів, зокрема тугоплавких емалей, у різних видах палива проводять двома основними способами:

- 1) виявляючи їх стійкість при обливанні паливом;
- 2) розміщуючи їх у продуктах його згорання.

У першому випадку зразки покриттів обливають паливом або поміщають в паливо, а потім після певної витримки контролюють стан поверхні покриття, зміну його зовнішнього вигляду, кольору, блиску, виявляють наявність тріщин, сколів. У другому випадку, як правило, порівнюється ефективність захисної дії покриття в звичайному окиснювальному середовищі і в продуктах згорання різних палив (без домішок і з домішками, присадками). Як паливо використовують гас, сірчистий мазут, природний газ, спеціальні висококалорійні палива. Оцінювання стійкості покриттів в продуктах згорання палива проводять дослідженням стану поверхні покриттів, дослідженням корозійної стійкості, жаростійкості, жароміцності, термічної втоми зразків сплавів з покриттями.

7.8.6. Випробування на біологічну стійкість

На поверхню покриттів висаджують нижчі рослинні організми (гриби, бактерії), витримують протягом декількох десятків діб, а потім видаляють біологічну посадку і визначають її вплив на якість покриття по зміні його кольору, блиску, коефіцієнта віддзеркалення світла тощо.

7.8.7. Змочувальна здатність

Змочування металів, сплавів, неметалічних матеріалів розплавами емалей визначають за крайовими кутами розтікання і відтоку. Краєві кути заміряють на спеціальних тінювих приладах. Зразок у вигляді пігулки діаметром 5×5 мм, одержаний пресуванням порошку, висушеного шлікера емалі на пластинці із змочуваного матеріалу підкладки нагрівають в печі із швидкістю 5 °C/хв до певної температури, при якій фотографують контур зразка. Можна зразок поміщати в піч, розігріту до заданої температури і після ізотермічної витримки (не менше 20–60 с) проводити фотографування. Крайовий кут змочування заміряють, збільшуючи на екрані в 10–15 разів тінюве зображення зразка, методом побудови дотичної.

7.8.8. Голографічний контроль

Цей найбільш перспективний метод неруйнівного контролю покриттів і шарів підкладки, прилеглих до покриття, дозволяє виявити дефекти і несучільності в об'ємі покриття, в проміжних шарах, які забезпечують зчеплення з підкладкою. Особлива цінність методу полягає в можливості контролю змін, що виникли в системі покриття – підкладка після високотемпературних нагрівань, випробувань в лабораторних умовах, на стендах, у складі виробів.

7.7. Методи визначення розмірів частинок покриттів

7.7.1. Дисперсійний аналіз

Вживані методи дисперсійного аналізу різні, що пояснюється великою різноманітністю аналізованих порошоків. Останні можуть розрізнятися за своєю природою, ступенем дисперсності, особливостям застосування. Універсального методу дисперсійного аналізу порошоків не існує. В зв'язку з цим виникає необхідність вибору найбільш прийняттого методу визначення дисперсності з урахуванням конкретних фізико-хімічних властивостей, способу отримання, чистоти матеріалів і області використання порошку.

Розрізняють *прямі* і *непрямі* методи дисперсійного аналізу. До прямих відносяться методи безпосереднього вимірювання розмірів частинок за допомогою деякого масштабу (шкали мікроскопа, осередку сита). До непрямих відносяться методи визначення розмі-

рів частинок за якою-небудь ознакою: швидкості осідання частинок у в'язкому середовищі (метод седиментації), швидкості розчинення, адсорбційній здатності, віддзеркаленню світла суспензією.

Дисперсність як характеристика крупної частинки, визначають за наслідками дослідження розподілу частинок залежно від їх об'єму, площі поверхні або одного з лінійних розмірів (умовного діаметра), питомої поверхні (відношення сумарної поверхні частинок до їх маси).

7.7.2. Метод седиментації

Аналіз розподілу частинок за розмірами, заснований на законах седиментації, проводять за допомогою приладів типу «Седіграф 5000». Прилад забезпечує можливість автоматичного контролю розмірів частинок. Результати аналізу видаються у вигляді процентного розподілу в інтегральній формі, залежно від еквівалентних діаметрів частинок.

Ступінь осадження суспендованих частинок і їх концентрація, що знаходяться в суспензії, визначають за допомогою тонкого рентгенівського пучка. Тривалість аналізу пропорційний різниці щільності частинок і рідини. Аналіз заснований на вимірюванні рівноважної швидкості осадження частинок у в'язкому середовищі під дією гравітаційних сил. Відповідно до закону Стокса діаметр частинок описується формулою:

$$D = k \left(\frac{h}{t} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (7.2)$$

$$\text{де } k = \left[\frac{18\eta}{(p - p_0) \cdot g} \right]^{\frac{1}{2}}; \eta - \text{в'язкість рідини; } p - \text{густина ма-}$$

теріалу частинок; p_0 – щільність рідини; g – прискорення вільного падіння.

За час t всі частинки діаметром більше D осядуть нижче заданої відстані h від поверхні суспензії. При початковій концентрації матеріалу k і концентрації C_0 (г/мл) через час t_1 на відстані h вміст матеріалу P_i з розміром частинок менше D_i визначатиметься

$$\text{формулою } D_i = 100 \left(\frac{\tilde{N}_1}{\tilde{N}_0} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Концентрацію частинок в суспензії визначають, порівнюючи пропускання рентгенівського випромінювання суспензією і суспендуючою рідиною. Пропускання рентгенівського випромінювання є функцією концентрації частинок. Відношення I пропускання рентгенівського випромінювання коміркою з суспензією до пропускання комірки з суспендуючою рідиною визначається формулою:

$$I = \exp[-P_2(a_2 - a_1)H_1], \quad \ln I = -AP_2, \quad (7.3)$$

де P_2 – частка маси твердої фази в суспензії; a_1, a_2 – коефіцієнти поглинання рентгенівських променів суспендуючою рідиною і твердою фазою; H_2 – відстань між внутрішніми стінками осередку; A – постійна приладу і компонентів суспензії. Розподіл p частинок за розмірами визначається за формулою:

$$p = 100 \frac{\ln I_1}{\ln I_0}, \quad (7.4)$$

де I_1 – пропускання суспензії при осадженні частинок за час t на відстань h , I_0 – пропускання початкової суспензії.

Для забезпечення високої точності і надійності результатів аналізу потрібні висока точність визначення щільності речовини порошку і рідини, в'язкості рідини, а також ретельне диспергування порошку в рідині. Контроль диспергування можна здійснювати шляхом огляду комірки з суспензією під мікроскопом.

Певні труднощі зустрічаються при контролі щільності суспензій тонкодисперсних порошоків особливо чистих матеріалів, зокрема, одержуваних сушкою шлікерів на основі кварцових гідросуспензій. Труднощі пов'язані з утворенням гелю кремнієвої кислоти, міхурів повітря. Для усунення цих утруднень перспективно використовувати неполярні рідини, спеціальні поверхнево-активні добавки або необхідно знижувати концентрацію твердої фази в суспензії і одночасно підвищувати інтенсивність перемішування, використовуючи магнітну мішалку.

Розглянуті методи руйнівних випробувань машинобудівних матеріалів і деталей машин далеко не вичерпують весь арсенал засобів контролю і випробувань. На кожному машинобудівному підприємстві є заводська лабораторія або лабораторія вимірювань і випробувань ВТК. На великих підприємствах окрім такої лабораторії діє лабораторія механічних випробувань. У ливарних і термічних цехах зосереджені прилади і установки для контролю цілої

гамми механічних властивостей матеріалів і деталей машин. Вся вимірювальна і випробувальна техніка підприємств знаходиться під керівництвом центральної заводської лабораторії (ЦЗЛ). Залежно від специфіки виробництва підприємство і його випробувальна база спеціалізуються у проведенні і вдосконаленні необхідних саме для нього випробувань, наприклад випробування зварних з'єднань, металографічні дослідження металів та їх сплавів, без яких не працює жодне ливарне виробництво. Щоб дізнатися структуру металу виливок з чавуну, сталі, кольорових металів, визначити наявність і склад неметалічних включення, необхідно вирізувати зразки з металу виливок, підготувати їх відповідним чином і вивчити під спеціальними мікроскопами. Для цього необхідні спеціальні знання і навички.

Контрольні питання

1. Як проводять випробування на згинання?
2. Який прилад використовують для випробування на вигин на конічній оправці?
3. Який прилад використовують для визначення еластичності, адгезії і розтріскування сухої фарби на плоских зразках?
4. З якої сталі виготовлений пуансон пристрою для випробувань на витягання?
5. За якою формулою розраховують коефіцієнт штампованості?
6. На яких вагах визначають приріст маси зразків за рахунок окиснення?
7. За якою формулою визначають величину коефіцієнта контактного тертя?
8. Які установки відтворюють дію морського туману, тепла і вологи?
9. Яка з відповідей не вірна в класифікації корозії?
10. Який з металів не належить до фотографічного метода вивчення атмосферної корозії?
11. Які з контрольних характеристик покриття не визначають при вакуумних випробуваннях?
12. Який з методів є найбільш перспективним для неруйнівного контролю покриттів і шарів підкладки?

Література: [1; 2; 5; 13; 14]

ЛІТЕРАТУРА

1. Боженко Л. І. Стандартизація, метрологія та кваліметрія у машинобудуванні / Л. І. Боженко. – Львів : Світ, 2003. – 328 с.
2. Єфіменко М. Г. Металознавство і термічна обробка зварних з'єднань : підручник / М. Г. Єфіменко, Л. І. Боженко, Н. О. Радзівілова. – Харків, 2003. – 488 с.
3. Гасило Ю. А. Контроль якості зварювання. У 2 т. Т. 2. Руйнівні методи контролю : навч. посіб. / Ю. А. Гасило. – Кам'янське : ДДТУ, 2018. – 154 с.
4. Неразрушающий контроль. Справочник : у 8 т. / под общ. ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 2006. – 736 с.
5. Контроль параметрів якості функціональних покриттів : монографія / В. С. Антонюк [та ін.]. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 396 с.
6. Александер Майкл. Microsoft Excel 2019. Библия пользователя / Майкл Александер, Ричард Куслейка. – М. ; СПб : Диалектика, 2019. – 1134 с.
7. Герасимов В. А. Неразрушающий контроль качества электромагнитными методами / В. А. Герасимов, Ю. Я. Останин, А. Д. Покровский. – М. : Энергия, 2008, – 215 с.
8. Глоба С. Н. Особенности поведения капиллярного метода неразрушающего контроля / С. Н. Глоба, Б. М. Горкунов. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2005. – 72 с.
9. Середюк О. Є. Електричний, магнітний та електромагнітний види контролю : конспект лекцій / О. Є. Середюк. – Івано-Франківськ : Факел, 2001. – 170 с.
10. Мікроелектронні сенсорні пристрої магнітного поля : монографія / за ред. З. Ю. Готри. – Львів : Львівська політехніка, 2001. – 412 с.

11. Білокур І. П. Основи дефектоскопії : підручник / І. П. Білокур. – Київ : «Азимут-Україна», 2004. – 496 с.
12. Левченко Г. В. Технологія якості і сертифікація : навч. посіб. / Г. В. Левченко, В. М. Самохвал. – Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2009. – 117 с.
13. НК и диагностика : справочник / под ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 2003. – 226 с.
14. Капустян О. Є. Методичні вказівки до самостійної роботи з дисципліни «Відновлення та підвищення зносостійкості деталей і конструкцій» усіх форм навчання / О. Є. Капустян, М. І. Андрущенко. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2016. – 42 с.
15. Глоба С. Н. Капиллярный неразрушающий контроль. Чувствительность и оценка результатов контроля : пособие / С. Н. Глоба, Б. М. Горкунов. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2005. – 72 с.
16. Глоба С. Н. Особенности проведения капиллярного метода неразрушающего контроля / С. Н. Глоба, Н. Ф. Хорло, С. В. Стороженко. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2010. – № 12. – С. 122–127.
17. Трофименко О. Г. Офісні технології : навч. посіб. / О. Г. Трофименко, Ю. В. Прокоп, Н. І. Логінова, Р. І. Чанишев. – Одеса : Фенікс, 2019. – 207 с.
18. Уокенбах Дж. Microsoft Excel 2013. Библия пользователя / Дж. Уокенбах. – М. : Вильямс, 2015. – 928 с.
19. Фомичев С. К. Основы управления качеством / С. К. Фомичев, А. А. Старостина, Н. И. Скрябина. – Київ : МАУП, 2002. – 192 с.
20. Стандартизация и управление качеством продукции / под ред. В. А. Шандра. – М. : ЮНИТИ-ДАНА, 2001. – 487 с.
21. Методичні вказівки до лабораторних робіт з курсу «Діагностика і дефектоскопія матеріалів та виробів» для студентів напряму підготовки 0901 «Інженерне матеріалознавство» інженерно-фізичного факультету / уклад.: Т. А. Роїк, Ю. В. Черкашанко. – Київ : НТУУ «КПІ», 2005. – 66 с.

Вступ	3
1. Дефекти і фізико-хімічні властивості покриттів	
1.1. Методи дослідження покриттів	5
1.2. Класифікація дефектів покриттів	7
1.3. Групи дефектів залежно від етапу виникнення	10
1.4. Методи і вплив зовнішніх дій на покриття	11
1.5. Фізико-хімічні властивості покриттів	14
Контрольні питання	31
2. Оцінювання механічних властивостей покриттів.	
Класифікація методів	
2.1. Класифікація механічних руйнівних випробувань	33
2.2. Виготовлення зразків для визначення механічних властивостей покриттів	35
2.3. Міцність при розтягненні	38
2.4. Класифікація видів і методів неруйнівного контролю	41
2.5. Візуально-оптичний метод неруйнівного контролю	44
2.6. Радіохвильовий метод неруйнівного контролю	51
Контрольні питання	52
3. Вихорострумний і радіаційний методи неруйнівного контролю покриттів	
3.1. Вихорострумний метод неруйнівного контролю	53
3.2. Радіаційний метод неруйнівного контролю	61
Контрольні питання	71
4. Магнітний та електричний методи неруйнівного контролю покриттів	
4.1. Магнітний метод неруйнівного контролю	73
4.2. Електричний метод неруйнівного контролю	90
Контрольні питання	93

5. Акустичний метод неруйнівного контролю покриттів	
5.1. Класифікація акустичних методів контролю покриттів	95
5.2. Області застосування акустичних методів контролю	109
5.3. Неруйнівні методи та прилади для вимірювання твердості покриттів	112
Контрольні питання	113
6. Неруйнівний контроль покриттів проникаючими речовинами	
6.1. Методи капілярного контролю	116
6.2. Методи течошукання	128
6.3. Зіставлення методів неруйнівного контролю	132
6.4. Устаткування неруйнівного контролю та його автоматизація	134
Контрольні питання	137
7. Технологічні випробування покриттів	
7.1. Випробування на вигин (згин, загин, перегин)	139
7.2. Жаростійкість і термостійкість покриттів (термомасометрія)	142
7.3. Теплоізоляційний ефект покриттів	145
7.4. Ерозійна стійкість	147
7.5. Залишкові напруження в покриттях	148
7.6. Корозійна стійкість покриттів	150
7.7. Ступінь чорноти та глянце (блиску) покриттів	154
7.8. Водопроникність покриттів	156
7.7. Методи визначення розмірів частинок покриттів	159
Контрольні питання	162
Література	163

Навчальне видання

*Диха Олександр Володимирович,
Рудик Олександр Юхимович*

КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ ПОКРИТТІВ

Навчальний посібник

Відповідальний за випуск: **В. С. Яремчук**

Технічне редагування, коректування і верстка: **В. П. Карпанасюк**

Художнє оформлення обкладинки: **О. В. Станіслаєва**

Підписано до друку 25.01.2021. Формат 30×42/4.

Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman.

Друк різнографією. Ум. друк. арк. – 9,80. Обл.-вид. арк. – 8,33.

Тираж 100. Зам. № 6/21

Віддруковано в редакційно-видавничому відділі ХНУ.

29016, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 7/1.

Свідоцтво про внесення в Державний реєстр, серія ДК № 4489 від 18.02.2013 р.