

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

Т. П. Набокiна, Р. В. Атаманчук

НЕРУЙНІВНІ МЕТОДИ ДІАГНОСТУВАННЯ
ЕЛЕМЕНТІВ АЕРОКОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ

Навчальний посiбник

Харків «ХАІ» 2018

УДК 658.562.002
Н 14

Р е ц е н з е н т и: канд. техн. наук, доц. С. В. Філіпковський,
канд. техн. наук І. Ю. Долженко

Набокiна, Т. П.

Н 14 Неруйнiвнi методи дiагностування елементiв аерокосмiчної
технiки [Текст] : навч. посiб. / Т. П. Набокiна, Р. В. Атаманчук. –
Харкiв : Нац. аерокосм. ун-т iм. М. Є. Жуковського «Харкiв. авiац.
iн-т», 2018. – 80 с.

ISBN 978-966-662-626-7

Описано суть i технологiчнi можливостi застосування неруйнiвних методiв дiагностування (капiлярних, магнiтних, акустичних, оптичних, радiацiйних, радiотехнiчних та iн.), роль яких у рiзних галузях промисловостi постiйно зростає з пiдвищенням технiчного рiвня. Особливу увагу придiлено оптичним методам (голографiчнiй iнтерферометрiї, поляризацiйно-оптичному методу, методу муару) i акустичним методам (ультразвуковому, методу акустичної емiсiї, ультразвукової голографiї, методу вiльних коливань, iмпедансному та iн.), якi в останнi роки знайшли широке застосування для контролю аерокосмiчної технiки.

Для студентiв, якi навчаються за спецiальнiстю «Авiацiйна та ракетно-космiчна технiка». Може бути використаний при курсовому й дипломному проектуваннi, а також при пiдвищеннi квалiфiкацiї.

Іл. 53. Табл. 2. Бібліогр.: 7 назв

УДК 658.562.002

© Набокiна Т. П., Атаманчук Р. В., 2018
© Нацiональний аерокосмiчний
унiверситет iм М. Є. Жуковського
«Харкiвський авiацiйний iнститут», 2018

ISBN 978-966-662-626-7

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1 Загальні відомості щодо неруйнівного контролю	6
1.1 Основні завдання і методи виявлення дефектів матеріалу	6
1.2 Основні види дефектів	8
1.3 Характеристики дефектів	9
1.3.1 Ливарні дефекти.....	9
1.3.2 Дефекти прокатоного і кованого металу	11
1.3.3 Дефекти зварних з'єднань	13
1.3.4 Дефекти, що виникають при різних видах оброблення деталей	14
1.3.5 Дефекти, що виникають у деталях при експлуатації.....	16
2 Капілярні методи	17
3 Магнітні методи.....	20
3.1 Магнітопорошковий метод	22
3.2 Магнітографічний метод.....	24
3.3 Ферозондовий метод	25
4 Електромагнітні методи (методи вихрових струмів).....	26
5 Акустичні методи	31
5.1 Ультразвукові методи.....	31
5.1.1 Метод проникного випромінювання (тіньовий метод, або наскрізного проникання)	33
5.1.2 Метод відбитого випромінювання (луна-метод)	34
5.1.3 Резонансний метод	36
5.2 Методи ультразвукової голографії	37
5.2.1 Метод поверхневого рельєфу рідини	38
5.2.2 Електронні методи	39
5.3 Метод акустичної емісії.....	41
5.4 Звукові методи	44
5.4.1 Імпедансний акустичний	44
5.4.2 Метод вільних коливань	44

6	Оптичні методи контролю	45
6.1	Візуально-оптичні методи контролю	46
6.2	Голографічні методи.....	46
6.2.1	Принцип роботи лазера	46
6.2.2	Основні принципи голографії	49
6.2.3	Деякі особливості голографічного процесу	51
6.2.4	Методи голографічної інтерферометрії.....	51
6.2.5	Основні схеми отримання голограм.....	53
6.3	Спекл-інтерферометричний метод.....	55
6.4	Інтерферометричний метод.....	57
6.5	Поляризаційно-оптичні методи	59
6.5.1	Метод прозорих об'єктів або моделей.....	59
6.5.2	Метод фотопружних покриттів	61
6.6	Метод ділильних сіток	61
6.7	Метод муарових смуг.....	63
6.8	Дзеркально-оптичний метод	65
7	Радіаційні методи	66
7.1	Радіографічний метод	67
7.2	Радіоскопічний метод	69
7.3	Радіометричний метод	70
8	Теплові методи неруйнівного контролю	70
9	Радіотехнічні НВЧ-методи	76
9.1	Метод «на проходження»	77
9.2	Метод «на відображення»	78
9.3	Метод «розсіювання»	78
	БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК.....	79

ВСТУП

Неруйнівний контроль – це прикладна наука про принципи, методи та засоби виявлення і вимірювання ознак дефектів виробу та їхніх параметрів, що впливають на його працездатність, без погіршення притаманних йому на момент контролю властивостей. Тобто в основу неруйнівного контролю покладено визначення фізичних властивостей контрольованого об'єкта як до початку виконання ним основних функцій, так і в періоді планового контролю, згідно з паспортом виробу.

Об'єктами неруйнівного контролю є матеріали, заготовки, деталі та їх конструктивні елементи, вузли машин, готові вироби.

Методи неруйнівного контролю створені та вдосконалюються внаслідок аналізу взаємодії фізичних полів (ультразвукового, магнітного, електромагнітного) або речовин з контрольованими об'єктами. Методи неруйнівного контролю призначені для виявлення дефектів, оцінювання їх структури і фізико-хімічних властивостей, контролю геометричних параметрів виробів.

Універсальних методів контролю не існує. В наш час використовується багато методів, кожен з яких призначено для певного типу завдань.

Переваги неруйнівних методів контролю треба відзначити такі:

- об'єкти контролю залишаються придатними до використання;
- порівняно велика швидкість контролю;
- достовірність контролю;
- можливість застосування при операційному контролі;
- можливість контролю деталей в умовах експлуатації.

Методи неруйнівного контролю, залежно від фізичних явищ, що покладено в їх основу, розділяють на такі основні групи:

- оптичні;
- теплові;
- акустичні;
- капілярні;
- магнітні;
- радіаційні;
- радіохвильові;
- електромагнітні;
- електричні.

В навчальному посібнику розглядаються всі ці методи з точки зору їхніх фізичних основ, можливостей застосування, переваг і недоліків з урахуванням геометричних особливостей об'єктів контролю, особливостей їх стану під час проведення контролю та з урахуванням різновиду матеріалу, з якого виготовлено виріб, який потрібно проконтролювати.

1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ЩОДО НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

1.1 Основні завдання і методи виявлення дефектів матеріалу

Технічний стан найбільш відповідальних деталей визначається методами неруйнівного контролю.

Вибір елементів аерокосмічної техніки АКТ, що підлягають систематичному контролю в процесі випробувань, та її доведення, здійснюється на основі досвіду випробувань і доведення раніше створених конструкцій та результатів об'єктивного аналізу причин відмови вузлів і агрегатів АКТ.

Технічний стан деталі характеризується відсутністю (наявністю) металургійних дефектів, пошкоджень, несучільностей, відповідністю технічним вимогам її геометричних розмірів, шорсткості поверхні, структурного стану і механічних властивостей матеріалу.

Частковими завданнями визначення технічного стану двигунів є:

1) аналіз технічного стану найбільш відповідальних елементів деталей, що безвідмовно працювали певний час при випробуваннях, доведенні або в процесі експлуатації;

2) вивчення причини зношування деталей пристрою, що вийшов з ладу, чим спричинив відмову агрегата або його вузла;

3) дослідження причин руйнування елемента АКТ.

Аналіз стану деталей засобами неруйнівного контролю працездатного двигуна дозволяє оцінити можливість безвідмовного випробування його на подальших етапах або своєчасного виявлення деталей, що знаходяться на стадії передруйнування або інтенсивного зношування.

Дослідження деталей агрегата, що відмовив, необхідно для вдосконалення його конструкції, технології виготовлення або умов експлуатації, а також для визначення причин відмови (руйнування або зносу) деталей і факторів, що впливають на її виникнення.

Практика показує, що причини руйнування і зношування деталей різноманітні. Однак усі вони можуть бути розділені на конструктивні, технологічні, виробничі, ремонтні та експлуатаційні, що дозволяє конкретизувати заходи щодо попередження досліджуваних відмов і усунення їх причин.

Конструктивні причини руйнування і неприпустимого зношування деталей зазвичай пов'язані з нераціональним вибором матеріалу деталі, недостатнім урахуванням фактично діючих навантажень і таких зовнішніх факторів, як температура, мастильне та корозійне середовище, вібраційне тертя зі сполученими деталями. Ці причини можуть спричиняти руйнування деталі через втому матеріалу.

Технологічні причини зумовлені недосконалістю прийнятої технології виготовлення і контролю якості продукції. Технологія виготовлення деталей може не забезпечувати стабільності їх опору втомі.

Виробничі причини, як правило, визначаються порушенням заданої технології виготовлення і контролю деталей. Наприклад, можливий недогляд металургійних дефектів у вигляді включень або несущільностей матеріалу в результаті низької кваліфікації контролера, несправності апаратури або застосування неякісних дефектоскопічних матеріалів.

Ремонтні причини є наслідком або недосконалості технології ремонту, або її порушення. Є випадки, коли через недосконалість технології контролю деталей при ремонті пропускають втомні тріщини, що утворилися в процесі випробування або експлуатації двигуна. Однією з поширених причин такої недосконалості є використання без відповідного коригування методики неруйнівного контролю, що використовується у виробництві при ремонті деталей.

Експлуатаційні причини пов'язані з перевищенням допустимих експлуатаційних навантажень, неякісним виконанням регламентних робіт, наприклад з порушенням їх встановленого порядку, заміною масел і мастильного матеріалу, неякісним виконанням дефектоскопічного контролю.

Найбільш поширені в умовах виробництва, експлуатації та ремонту авіаційної техніки магнітні, капілярні, вихрострумові, акустичні, радіаційні та оптичні методи контролю.

З магнітних методів широко використовують в авіації магніто-порошковий із застосуванням магнітної суспензії, повітряної суспензії феромагнітного порошку. З капілярних – кольоровий, люмінесцентний, люмінесцентно-кольоровий.

З електромагнітних найбільшого поширення на практиці має метод основної гармоніки вихрових струмів (вихрострумовий), хоча інші методи цього виду (наприклад імпульсний) також починають впроваджуватися.

Найпоширенішими з акустичних методів є ультразвуковий імпульсний лунометод (далі ультразвуковий) і акустичний імпедансний. Значно рідше застосовуються інші акустичні методи: тіньовий, резонансний, вільних коливань.

Серед радіаційних методів більшою мірою, ніж інші, використовують радіографічні: рентгенографічний і гаммаграфічний методи.

З оптичних найбільш широко поширений оптико-візуальний метод з використанням луп, жорстких і гнучких ендоскопів та інших приладів.

Як видно з рисунка 1.1, виявлення поверхневих і підповерхневих тріщин та інших дефектів типу несущільності матеріалу забезпечують практично всі методи, за винятком оптико-візуального та капілярних

(кольорового, люмінесцентного й ін.), що не дозволяють виявляти підповерхневі дефекти. У той же час можливості виявити дефекти у товщі матеріалу або на недоступній стороні деталі обмежені: тут прийнятими до розгляду є тільки ультразвуковий та радіаційні методи. Причому радіаційні методи, зокрема найпоширеніші радіографічні із застосуванням рентгенівського і гамма-випромінювань, не завжди можуть «конкурувати» з ультразвуковим методом, тому що вимагають доступу до об'єкта з двох сторін для встановлення касети з плівкою і джерела випромінювання, у той час як контроль деталей за допомогою ультразвуку можливий при односторонньому підході до них.

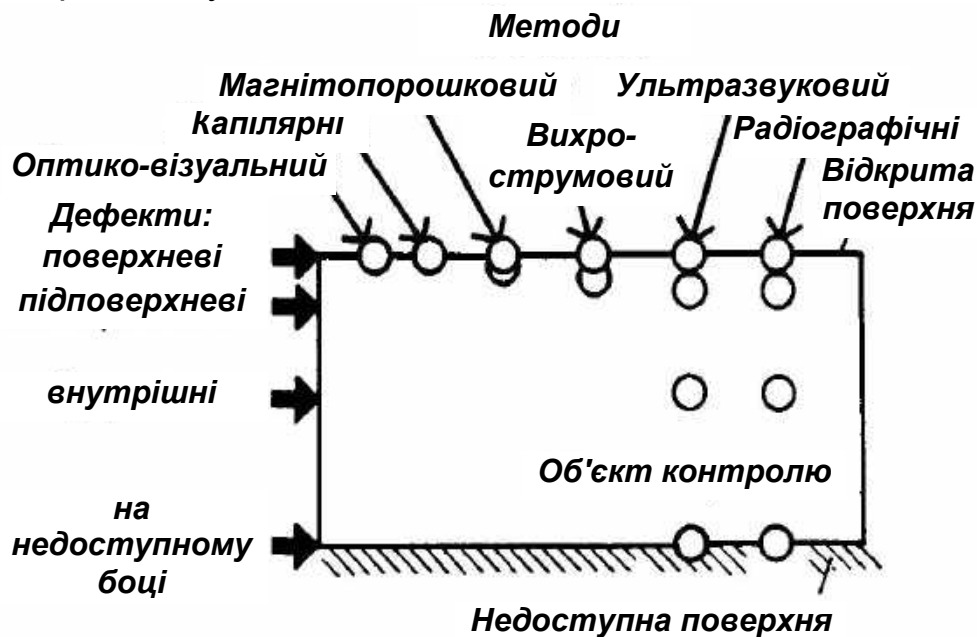


Рисунок 1.1 – Ілюстрація можливостей методів неруйнівного контролю

1.2 Основні види дефектів

Дефектом називається кожна окрема невідповідність продукції вимогам, що встановлені нормативною документацією [1].

Дефекти поділяють на явні, приховані, критичні, значні й малозначні, виправні та не виправні.

Явні поверхневі дефекти виявляють при візуальному огляді, а внутрішні, приховані й поверхневі – спеціальними засобами.

Виявлені дефекти, в залежності від можливого впливу їх на службові властивості деталі, можуть бути критичними, значними або малозначними. При класифікації враховують характер, розміри, розташування дефекту на деталі, особливості деталей і виробів, їх призначення, умови експлуатації.

Критичним називається дефект, за наявності якого використання продукції за призначенням неможливе або виключається через невідповідність вимогам безпеки або надійності; значним – дефект, який

істотно впливає на використання виробу за призначенням і (або) на його довговічність, але не є критичним; малозначним - дефект, який не робить такого впливу [2].

Усі дефекти деталей і вузлів, що підлягають виявленню під час неруйнівного контролю, можна розділити за походженням на дві основні групи: виробничо-технологічні (рисунок 1.2) та експлуатаційні. Виробничо-технологічні дефекти виникають при плавці, литті, прокаті, куванні, з'єднанні металів, тобто зварюванні, пайці, склеюванні, а також при термічній, електрохімічній, механічній обробці.

Експлуатаційні дефекти виникають після деякої нароби виробів. Їх можна розділити на дві основні підгрупи: тріщини різного походження (втомні, корозійно-втомні, термічної втоми, повзучості, термічні, від одноразового навантаження) і корозійні поразки (суцільні, точкові, виразкові, ножові, міжкристалітні, розшаровувані й ін.).

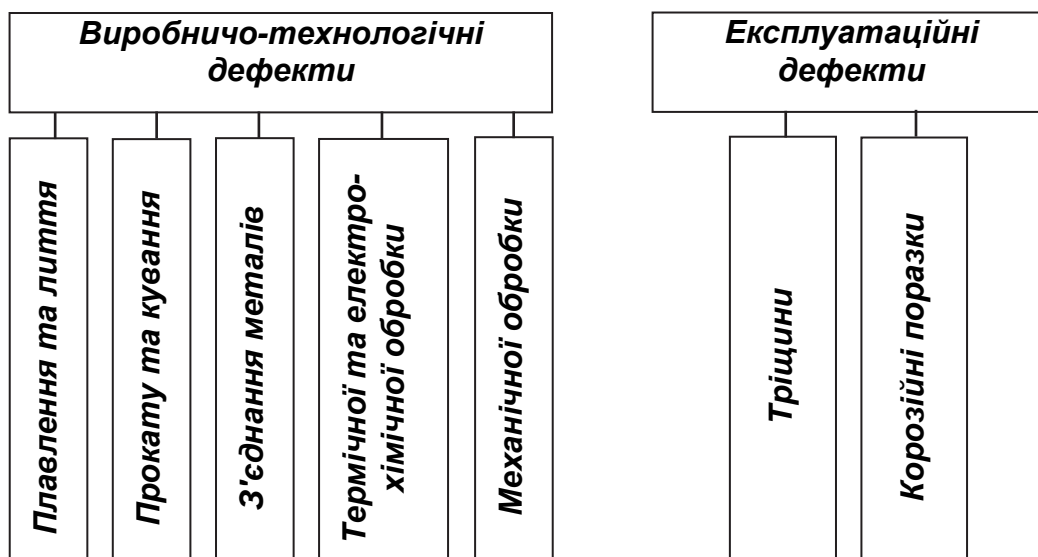


Рисунок 1.2 – Класифікація дефектів деталей

1.3 Характеристики дефектів

1.3.1 Ливарні дефекти

Гарячі тріщини – зазвичай добре помітні розриви поверхні виливки, що поширюються по межах кристалів і мають нерівну окислену поверхню, на якій при збільшенні видно дендрити. Утворюються внаслідок усадки при застиганні розплаву в формах. Характерними ознаками гарячих тріщин є їх нерівні (рвані) краї та значна ширина.

Холодні тріщини – дуже тонкі розриви поверхні відливок, які переважно мають чисту, світлу або з кольорами мінливості зернисту поверхню. Утворюються внаслідок внутрішньої напруги або механічного

впливу при температурі нижче температури світіння виливки. На відміну від гарячих тріщин, холодні поширюються по зернах, а не по їх межах. Розташовуються вони переважно в гострих кутах й інших місцях концентрації напружень.

Термічні тріщини – зазвичай добре помітні глибокі розриви поверхні виливки. Поверхня зламу розкритої тріщини – дрібнозерниста, окислена або з кольорами мінливості. Виявляються ці тріщини у виливках після термічної обробки. Причина їх виникнення – високі температурні розтягувальні напруження, що збігаються за знаком із залишковими напруженнями.

Газові раковини – закриті або відкриті порожнини округлої форми з чистою і гладкою, іноді окисленою поверхнею, що знаходяться в тілі виливки; утворюються при затвердінні металу навколо бульбашок газу. Причиною утворення газових раковин може бути швидке охолодження металу в ливарних формах, при якому розчинені гази (кисень, азот, водень, окис вуглецю і водяні пари) не встигають виділитися з виливки.

Усадкові раковини – відкриті або закриті порівняно великі порожнини довільної форми з грубою, шорсткою, іноді окисленою поверхнею, що знаходяться в тілі виливки. Утворюються внаслідок нерівномірної усадки металу при затвердінні зазвичай в потовщених місцях виливки, де метал твердне в останню чергу. Усадкові раковини розташовані між кіркою і серцевиною виливки.

Рихлоти – місцеве скупчення дрібних усадкових раковин в умовах крупнозернистої структури металу.

Поруватість – місцеве скупчення дрібних газових або усадкових раковин. Газова поруватість зазвичай спостерігається у великому об'ємі виливки або окремих її ділянках. Усадкова поруватість найчастіше розташовується під концентрованою усадковою раковиною, якби її продовження.

Піщана раковина – порожнина в тілі виливки, повністю або частково заповнена формувальним матеріалом.

Шлакова раковина – порожнина, заповнена шлаком.

Неметалеві включення бувають двоякого роду і походження:

– включення неметалевих частинок, які потрапили в метал ззовні; так, частки шлаку, графіту, піску та інше, можуть потрапити у форму разом із розплавом і утворити шлакові й піщані включення, які найчастіше розташовані у верхніх частинах виливок або на їхній поверхні;

– включення частинок оксидів, сульфідів, силікатів, нітридів, які виникають всередині металу внаслідок хімічної взаємодії компонентів при розплавленні та заливці сплаву; розташовуються у вигляді ланцюжків або сітки переважно по межах зерен, за формою бувають округлі або

видовжені (останні можуть сильно знижувати пластичність металу).

Металеві включення – сторонні металеві тіла в основному металі виливки. Такими тілами можуть бути нерасплавлений легувальний компонент, модифікатор, внутрішній холодильник та інше.

Утяжини – дефект у вигляді поглиблення з пологими краями на масивній частині виливки, що утворився внаслідок усадки металу при затвердінні. Під утяжиною можливі внутрішні дефекти.

Плени у виливках – плівки на поверхні або всередині виливок, що складаються з оксидів, часто зі включеннями формувального матеріалу. До утворення пленів схильні високолеговані спеціальні сплави. Плени у виливках виникають у результаті того, що при заповненні форми складові розплаву вступають у хімічну реакцію з атмосферою і матеріалом форми, а з продуктів реакції (окислів Cr, Al, Ti і нітридів, що не розчиняються в сплаві) на поверхні розплаву утворюється тугоплавка і щільна плівка. При механічному руйнуванні цієї плівки в процесі заливки форми окремі шматки її осідають у різних місцях форми.

Спаї – наскрізні або поверхневі із закругленими краями щілини або поглиблення в тілі виливки, утворені потоками передчасно застиглого металу. Під час переривчастої заливки й нерівномірного надходження металу в форму іноді виникають внутрішні спаї-незливи), однією з причин появи котрих можуть бути окисні плени, що створюють значний опір руху розплаву.

Різностінність – дефект, що виявляється в збільшенні або зменшенні товщини стінок виливки внаслідок зсуву, деформації або спливання стрижня.

Лікваційні зони – нерівномірність хімічного складу металу в тілі виливки (дендритна або зональна ізоляція).

1.3.2 Дефекти прокатаного і кованого металу

Рванини являють собою розриви або надриви металу різноманітного обрису з рваними краями; частіше розташовані на кромках листів, профілів. До утворення рванин при прокатці злитків особливо схильні високолеговані сталі з крупнозернистою структурою.

Закоти – вдавлені й заочені в металі, що прокочується, задирки або підвищення (горбки) на поверхні, отримані при попередньому пропуску злитка через калібр прокатного стану. При цьому метал задирки або підвищення не зварюється з основною масою прокату. Закот, що утворився від задирки, схожий на повздовжню тріщину, а з підвищення – на плени з криволінійним незамкнутим контуром. Іноді закот утворюється від залишків усадкової раковини після обрізування верхньої частини злитка з усадковою раковиною. При прокатці раковина не заварюється

через окисли на її стінках.

Волосовини – дрібні внутрішні або ті, що виходять на поверхню, тріщини, що утворилися з газових бульбашок або неметалічних включень при прокатці або куванні. Вони спрямовані уздовж волокон металу і в поперечному зламі видні як точки. Шлакові й піщані включення нездатні пластично деформуватися і при стисненні злитка розпадаються на велику кількість уламків з гострими кутами, утворюючи при витяжці ланцюжки вздовж волокон. Силікати Fe, Mn й інших елементів при температурі прокатки можуть бути пластичними, тому витягуються уздовж волокон прокатоного металу. Довжина волосовин 20 ... 30 мм, а іноді й 100 ... 150 мм. Зустрічаються волосовини у всіх конструкційних сталях.

Розшарування – порушення цілісності всередині прокатоного металу, що являють собою розкратані великі дефекти злитка (глибокі усадкові раковини, усадкова поруватість, скупчення бульбашок або неметалічних включень).

Характерним для розшарування є те, що поверхня порушення суцільності паралельна площині прокатки. Так, розкратані скупчення неметалічних включень дають внутрішній прошарок, що розділяє лист або профіль на дві, три і більше частин.

Флокени являють собою волосяні тріщини з кристалічною будовою поверхонь стінок, що утворюються всередині товстого прокату або поковок (діаметром більше 30 мм) зі сталей перлітного і мартенситного класів (хромистих, хромонікелевольфрамових, марганцевистих і деяких інших легованих сталей).

Флокени можна спостерігати на зламах у вигляді плям круглої або овальної форми, що мають срібристо-біле блискуче забарвлення і зветься пластівцями, а на макро- і мікрошліфах у вигляді прямих, іноді звивистих і зиг'ягоподібних ліній довжиною від декількох десятків часток міліметра до 5 ... 10 мм і більше.

У малих перетинах виробів з сильнопрокатоної сталі (діаметром менше 25 ... 30 мм) флокени ніколи не виявляються, як і в литій сталі. Флокени не зустрічаються в сталях аустенітного та ледебурітного класу (швидкорізальній і її заміниках, високохромистій X12, нержавіючій, жароміцній та високомарганцовистій).

Причина утворення флокенів – виникнення значних структурних напружень і окрихчування сталі в серцевині, викликане присутністю водню, який не встиг виділитися з металу при швидкому охолодженні.

Внутрішні розриви – порівняно великі порушення цілісності внутрішньої частини заготовки, що періодично повторюються по її довжині. Поверхня зламу по розриву – крупнокристалічна. Розриви виникають під впливом сил розтягування внаслідок неоднакової деформації зовнішніх і

внутрішніх шарів металу, що прокачується, з малою пластичністю, а також спостерігаються при прокатці високолегованих сталей. Розриви, що виникли в початковій стадії прокатки, при подальшій значній деформації можуть утворити розшарування.

Тріщини бувають поодинокі й групові, розташовані безладно або у певному напрямку. По довжині вони досягають декількох метрів, глибина тріщин залежно від розмірів прокату, причин і умов виникнення дефекту – 10 ... 15 мм.

Плени прокатоного металу являють собою порівняно тонкі плоскі відшарування на його поверхні. У більшості випадків плени мають вигляд язика, у якого уширений і потовщений кінець складає одне ціле з основною масою металу. Іноді зовнішній наружний контур пленів наближується до замкненого. За розмірами плени бувають від дрібних, ледь помітних лусок до 100 мм й більше по довжині й ширині (у товстих листах); товщина пленів коливається від десятих часток міліметра до 3 ... 5 мм і більше.

Причинами утворення пленів під час прокатки можуть бути незадовільна якість злитків (наявність на поверхні виливки пленів, погане розкислення і пухирчастість металу) і порушення режимів прокатування (незадовільне калібрування, неправильна насічка валків, утворення задирок і рванин на самому початку прокатування).

1.3.3 Дефекти зварних з'єднань

Завдання виявлення дефектів з'єднань металів зварюванням займають значне місце в практиці неруйнівного контролю. Основні види дефектів зварних швів наведені в роботі [3].

Виробничо-технологічні дефекти зварних з'єднань, що підлягають виявленню методами неруйнівного контролю, за природою їх утворення поділяються на металургійні, технологічні зварювальні й технологічні незварювальні.

До металургійних дефектів відносяться «гарячі» і «холодні» тріщини, пори, усадкові раковини і неметалеві включення. Гарячі тріщини зароджуються в зварних з'єднаннях при високих температурах (у сталях зазвичай при температурі 1100 ... 1300 °С), холодні – при охолодженні (зазвичай при температурі нижче 200 °С). Утворення цих дефектів залежить головним чином від структури зварюваних матеріалів, їх хімічного складу і товщини, виду і режиму зварювання. Металургійні дефекти можуть виникати внаслідок порушення технології зварювання.

Гарячі тріщини спостерігаються в матеріалі шва (уздовж або поперек його осі), рідше – в околшовній зоні. Вони можуть розвиватися з виходом або без виходу на поверхню металу. Поверхня порожнин тріщин, що виходять назовні шва, зазвичай покрита плівкою окислів. Часто тріщини

мають нерівні, ламані краї і значну ширину розкриття.

Холодні тріщини найчастіше з'являються в околшовній зоні (по лінії сплавлення або на деякому віддаленні від шва), рідше в металі шва і розвиваються уздовж або поперек нього. Вони можуть бути поверхневими або внутрішніми. Ці тріщини зазвичай розвиваються повільно, можуть з'являтися через декілька годин або днів після зварювання і відрізняються від гарячих меншою шириною розкриття і відсутністю окисних плівок на їхній поверхні.

До технологічних належать дефекти зварювання, які виникають внаслідок порушення режимів зварювання, несправності зварювального обладнання, поганої підготовки і складання під зварювання елементів конструкції, неточного розташування електрода по відношенню до зварюваних крайків й інших причин, пов'язаних з низькою культурою виробництва (пори, непровари та ін.).

До експлуатаційних дефектів зварних з'єднань відносяться: тріщини втоми; термічні тріщини; тріщини, утворені внаслідок напружень у місцях, схильних до корозії, а також внаслідок ножової, міжкристалітної, виразкової та інших видів корозії. Основна причина появи тріщин втоми в зварних з'єднаннях – дія високих змінних напружень. Термічні тріщини утворюються при різких змінах температури деталей і вузлів. Особливістю експлуатаційних дефектів типу несучільності металу зварних з'єднань елементів авіаційних конструкцій є забруднення їх порожнин окислами, гідратами окислів, нагаром, маслом, мастильними матеріалами та іншими речовинами.

1.3.4 Дефекти, що виникають при різних видах оброблення деталей

Гартівні тріщини – розриви металу, що виникають при охолодженні деталей переважно складної форми в процесі гартування через високі внутрішні напруження. Вони можуть з'явитися й після гартування на деталях, що тривалий час не піддавалися відпустці, яка зменшує внутрішні напруження.

Внутрішні напруження в загартованій деталі складаються з термічних напружень, що з'являються внаслідок термічних об'ємних змін при швидкому і нерівномірному охолодженні деталі, і напружень, що виникають внаслідок об'ємних змін при структурних перетвореннях. Внутрішні напруження в значній мірі залежать від вихідної структури деталі, зокрема від наявності карбідів у сталі, від ступеня неоднорідності складу (наявності зональної і дендритних лікваций) і неоднакової величини зерна сталі в різних місцях деталі.

Високі й нерівномірні внутрішні напруження при недостатній

жорсткості деталі викликають її викривлення. Якщо ж у деталі є ослаблені перетини, то можуть виникнути і тріщини. Найбільш ймовірні місця зародження гартівних тріщин – місця з різкою зміною перетину, гострі кути й підрізи.

Однак тріщини під час гартування нерідко можуть з'явитися і на деталях простої конфігурації (наприклад, гладких, циліндричної форми). У цьому випадку причиною утворення тріщин можуть бути дефекти матеріалу (волосовини, шлакові включення, флокени, кувальні тріщини) або недотримання режимів термічної обробки деталей.

Відмінними ознаками гартівних тріщин є невизначеність їх напрямку та звивиста форма. Гартівні тріщини зустрічаються групами, але здебільшого кількість їх на деталі невелика.

Шліфувальні тріщини – група дрібних і тонких розривів, як правило, у вигляді сітки на шліфованій поверхні металу. Виникають при шліфуванні сталей деяких марок, схильних до утворення тріщин, загартованих високовуглецевих і легованих, цементованих, азотованих і хромованих.

При шліфуванні тріщини виникають з двох причин:

а) через неправильні режими термообробки деталі, наприклад, дуже різкого охолодження, що призводить до значних внутрішніх напружень; в цьому випадку досить навіть невеликих додаткових напружень термічного і механічного походження, які утворюються у поверхневому шарі при шліфуванні абразивними колами, для того, щоб з'явилися поверхневі шліфувальні тріщини;

б) внаслідок місцевого перегріву металу при порушенні режимів шліфування – застосування невідповідного для певного матеріалу або «засаленого» кола, надмірному підвищенні подачі (тиску), швидкості шліфування (тривалої затримки каменю на одному місці) або недостатньому охолодженні; надмірні місцеві перегриви поверхневого шару загартованих сталей, що мають знижений коефіцієнт теплопровідності, спричиняють у ньому високі внутрішні напруження внаслідок нерівномірних об'ємних змін при чергуванні нагріву і охолодження (ці напруження призводять до утворення сітки тріщин).

У маловуглецевих сталей, що мають більш високий коефіцієнт теплопровідності й підвищені пластичні властивості, утворення тріщин при шліфуванні мало ймовірно.

Надриви – неглибокі тріщини, що виникають в деталях внаслідок холодної деформації металу, наприклад при свердлінні або розгортці отворів тупим свердлом або розверткою, накатці нарізі, виготовленні пружин, холодному штампуванні, особливо, коли матеріал має недостатньо високі пластичні властивості через дефекти структури. Крім того, надриви (рванини) можуть виникати при гарячій деформації (куванні,

штампуванні, протяжці з великим ступенем деформації).

1.3.5 Дефекти, що виникають у деталях при експлуатації

Тріщини втоми є найбільш поширеними та небезпечними дефектами, що виникають у різних деталях літальних апаратів при їх випробуваннях та експлуатації. Основна причина втомних руйнувань деталей – дія високих змінних напружень. Тріщини втоми виникають, як правило, при конструктивній недоробці деталей і вузлів у місцях концентрації напружень: по галтелях, у місцях з різкими переходами перетинів і наявністю підрізів, біля основи нарізи й зубів шестерень, у кутах шпоночних канавок, біля отворів для змащення або в місцях інших конструктивних або технологічних концентраторів напружень. Тріщини втоми з'являються також у місцях дефектів металургійного і технологічного походження або слідів грубої механічної обробки поверхні (глибоких рисок, слідів різців і т. п.).

Тріщини втоми розрізняються за зовнішнім виглядом. Найчастіше вони бувають двох типів:

а) поперечні або кільцеві тріщини, що розвиваються на циліндричних деталях по колу в перетині, перпендикулярному до осі деталі;

б) тріщини, розташовані під кутом до осі деталі.

У зоні втомного руйнування відсутні будь-які ознаки пластичної деформації навіть у самих пластичних матеріалів. Ширина розкриття втомної тріщини біля виходу її на поверхню в початковій стадії руйнування не перевищує декількох мікрон.

Корозійне ураження (осередкові, межкристалітні й ін.) є найбільш небезпечними дефектами літакових і двигунних конструкцій, для виявлення яких у експлуатації потрібно використовувати методи неруйнівного контролю. Їх поява і ступінь корозійного ураження залежать від наявності агресивних середовищ, якості захисних покриттів, несприятливого поєднання матеріалів деталей у вузлі, тривалості терміну служби ЛА та експлуатацій їх в умовах підвищеної вологості й т. д. Корозійні ураження впливають на функціональні властивості деталей і вузлів, призводять до зниження міцності силових елементів планера, шасі, системи управління, що в кінцевому підсумку при тривалій експлуатації (якщо поразка своєчасно не виявляється) веде до руйнування окремих високонавантажених елементів. В експлуатації корозією часто вражені закриті, внутрішні порожнини, важкодоступні для огляду.

Тріщини повзучості поширюються по межах зерен, зустрічаються на деталях з жароміцних матеріалів та інших сплавів, що працюють при високих температурах. Основні причини їх утворення – відносно високі статичні напруження при короткочасній дії навантаження, перегрів

матеріалу, тривала дія відносно низького статичного навантаження, наклеп на поверхні деталей з жароміцних сплавів й ін.

Термічні тріщини виникають при різких змінах температури, а також при недостатньому змащуванні або при заїданні (схопленні) поверхонь деталей, що труться, внаслідок чого поверхні останніх нагріваються до високих температур. Ці тріщини часто спостерігаються на поверхні азотованих, цементованих або поверхневозагартованих деталей, що працюють при високих питомих тисках.

Тріщини термічної втоми характерні для деталей з жароміцних сплавів, по зовнішньому вигляду схожі на термічні тріщини, виникають у результаті теплового стану, що циклічно змінюється (нагрівання та охолодження).

Тріщини-надриви у поверхневому шарі металу утворюються в результаті високих одноразово прикладених напружень (розтяг, вигин, крутіння), коли навантаження перевищує міцність деталі, наприклад при порушенні технології правки деталі, демонтажі або монтажі деталей з крихким поверхневим шаром або при перевантаженні деталі в процесі експлуатації (робота в нерозрахованому режимі).

Механічні пошкодження поверхні – забоїни, вм'ятини, надир, rischi, місцевий наклеп; причини їх можуть бути самими різноманітними.

2 КАПІЛЯРНІ МЕТОДИ

Капілярні методи контролю основані на капілярному проникненні індикаторних рідин у порожнини поверхневих і наскрізних несучільностей матеріалу контрольованих об'єктів, визначенні їх розташування, протяжності (для дефектів типу тріщин) і орієнтації по поверхні. Капілярні методи використовуються в заводських умовах, у лабораторіях для визначення поверхневих дефектів типу тріщин, пор, рихлоти, неспаїв, волосовин і інших порушень суцільності деталей. Зазвичай ці методи застосовують для контролю виробів з неферромагнітних матеріалів, алюмінієвих, магнієвих сплавів і сплавів на основі міді, а також з пластмас, що не піддаються контролю іншими методами.

До капілярних методів дефектоскопії відносяться методи неруйнівного контролю матеріалів, деталей і виробів, засновані на використанні капілярного проникнення рідини, що добре змочує матеріал виробу, в порожнині дефектів. Це можливо в тому випадку, якщо розміри порожнин поверхневих дефектів такі, що вони мають властивості капілярів.

Дефект буде чітко видно тільки в тому випадку, якщо між ним і неушкодженою ділянкою виробу буде значний оптичний (яркисний або кольоровий) контраст. При капілярних методах контролю контрастність штучно збільшують для того, щоб виявити поверхневі дефекти

неозброєним оком. Як рідини, що проникають до порожнини дефектів, застосовують кольорово– або світлоконтрастні рідини.

Класифікація капілярних методів контролю основана на світло-колеристичних особливостях індикаторних слідів. За цією ознакою вони поділяються на три основні методи: кольоровий, люмінесцентний і люмінесцентно-кольоровий.

При кольоровому методі дефекти виявляються по кольоровому індикаторному сліду над дефектом, оскільки барвник, що входить до складу проникної рідини, має вибіркове відбиття частини видимого світла. При люмінесцентному методі дефекти виявляються за світінням люмінісцювальної проникної рідини, що вийшла з порожнини дефекту, при освітленні деталі ультрафіолетовим світлом. Люмінесцентно-кольоровий є комбінацією кольорового і люмінесцентного методів. Чутливість цього методу велика при перегляді деталей в ультрафіолетовому світлі, менша – у видимому світлі.

Процес контролю за допомогою капілярних методів складається з простих операцій.

Нанесена на поверхню виробу проникна рідина (рисунок 2.1, а) протягом деякого часу витримується на ній для того, щоб рідина встигла проникнути у порожнину відкритих дефектів (рисунок 2.1, б). Потім поверхню виробу очищають від надлишків рідини, яка залишається тільки в порожнинах дефектів (рисунок 2.1, в). Останній етап – виявлення слідів дефектів за допомогою спеціальних проявлювальних матеріалів, що сприяють виходу проникної рідини з порожнини виробу на поверхню виробу (рисунок 2.1, г). Вихід проникної рідини з порожнини дефекту здійснюється внаслідок її адсорбції проявлювальною речовиною або дифузії в ній. Утворені при цьому індикаторні сліди дефектів значно ширше самих дефектів (рисунок 2.1, д). Проявлювальні речовини, як правило, забезпечують видимий контраст дефектів на тлі досліджуваної поверхні.

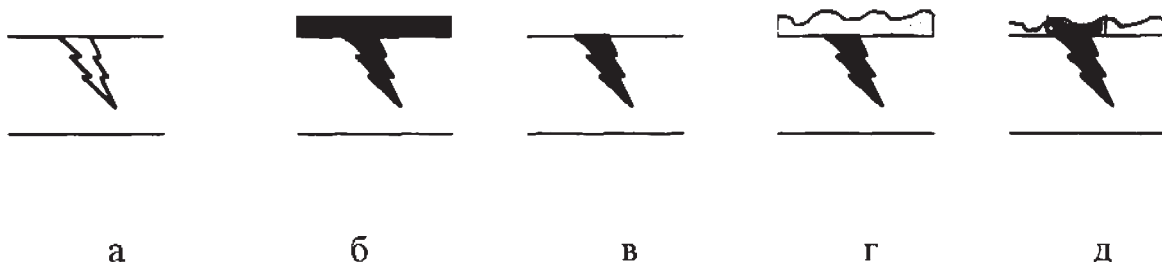


Рисунок 2.1 – Процеси капілярного методу контролю:
а – очищення поверхні; б – нанесення пенетранта; в – видалення надлишків пенетрантів з поверхні; г – нанесення проявника пенетранта; д – прояв індикаторного рисунка

Механізм утворення індикаторних рисунків зображено на рисунку 2.2.

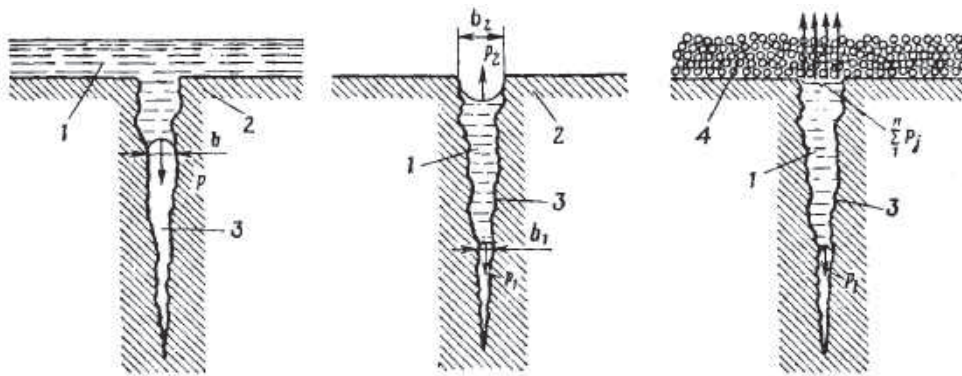


Рисунок 2.2 – Заповнення рідиною 1 порожнини тріщини 3 за наявності (а) і відсутності (б) змочувальної рідини та пористої речовини 4 (в) на поверхні деталі 2

Розглянемо характерні ознаки індикаторних рисунків різних дефектів.

1. *Індикаторні сліди у вигляді суцільних ліній.* Такий характер мають індикаторні сліди тріщин. Обсяг тріщин характеризується шириною і яскравістю люмінесцентної або кольорової індикаторної лінії, яка може бути прямою або криволінійною. У вигляді вузької безперервної лінії, рівної або злегка звивистої, буде проявлятися незлитина, волосовина, у вигляді безперервної лінії може проявлятися також заков.

2. *Індикаторні сліди у вигляді переривчастих ліній.* Такий характер мають індикаторні сліди тріщин. Обсяг тріщин характеризується шириною і яскравістю люмінесцентної або кольорової індикаторної лінії, яка може бути прямою або криволінійною. У вигляді вузької безперервної лінії, рівної або злегка звивистої, буде проявлятися незлитина, воло совина. У вигляді безперервної лінії може проявлятися також заков.

3. *Індикаторні сліди у вигляді заокруглених ділянок.* Газові включення, ливарна пористість будуть давати індикаторні сліди у вигляді заокруглених ділянок. Поява заокруглених ділянок індикаторних слідів пояснюється великим обсягом проникної рідини, що містяться у порожнинах дефектів. Дійсна форма дефекту при цьому може бути й неправильної форми. Великий обсяг порожнини свища у звареному шві також може призвести до появи індикаторного сліду у вигляді заокругленої плями.

4. *Індикаторні сліди у вигляді окремих точок.* Так проявляється пористість.

5. *Індикаторні сліди у вигляді групи окремих ліній або сітки* вказують на наявність міжкристалітної корозії або розтріскування матеріалу.

6. *Розсіяні індикаторні сліди.* Такий характер індикаторного рисунка може дати поширена по всій поверхні дрібна поруватість. Але погане очищення виробу перед контролем, недостатньо ретельне видалення з

поверхні виробу надлишків проникної рідини, нанесення виявляючої речовини надмірної товщини також можуть призвести до появи таких слідів.

Капілярні методи мають досить високу чутливість. У таблиці 2.1 наведено їх чутливість до поверхневих несучільностей матеріалу типу тріщин.

Таблиця 2.1 – Чутливість капілярних методів

Метод	Характеристика дефекту гранично малої величини, мкм		
	розкриття	глибина	протяжність
Кольоровий	~ 1	0,01	0,3
Люмінесцентний	~ 1	0,03	0,5
Люмінесцентно-кольоровий	~ 1	0,01	0,1

Перевагами капілярних методів є наочність результатів контролю; можливість точно встановити місце розташування дефекту, напрямок його поширення, протяжність; універсальність основних технологічних операцій при контролі об'єктів різної форми з різних матеріалів; можливість контролю в один прийом великих зон поверхні деталей; можливість виготовлення дефектограми або фотознімку з виявленими дефектами; простота технології контролю, що дозволяє швидко готувати фахівців.

До недоліків капілярних методів відносяться: необхідність видалення захисних покриттів будь-якої товщини; висока трудомісткість контролю (при відсутності механізації) і тривалість процесу контролю (1 ... 3 год); низька ймовірність виявлення дефекту, перекритих окисними плівками, тонким шаром деформованого матеріалу (після механічної обробки) або стислих значними залишковими або робочими напруженнями в деталі. Деякі дефектоскопічні матеріали шкідливі для обслуговуючого персоналу, що обумовлює необхідність застосування захисних пристосувань.

Слід зазначити, що для капілярних методів контролю існують граничні розміри виявлених дефектів. Нижня межа визначається шириною розкриття дефекту. Якщо вона дуже мала, то в порожнину дефекту не може потрапити проникаюча рідина. Верхня межа визначається тим, що при великих розмірах дефектів при видаленні надлишків проникаючої рідини з поверхні виробу, можливо її видалення і з порожнини дефектів.

3 МАГНІТНІ МЕТОДИ

В основу магнітних методів контролю покладено аналіз взаємодії магнітного поля з контрольованим об'єктом. Він полягає у вимірюванні

параметрів магнітних полів, створених в об'єкті шляхом його намагнічування. Розрізняють магнітопорошковий, магнітографічний, ферозондовий, індукційний, ефекту Холла, пондеромоторний і магніторезисторний методи. Найбільшого поширення набули перші три методи [4].

Магнітні методи застосовують для коригування окремих технологічних процесів виготовлення деталей (шліфування, термічної обробки, зварювання, кування та ін.). Фізичні основи методу показані на рисунку 3.1.

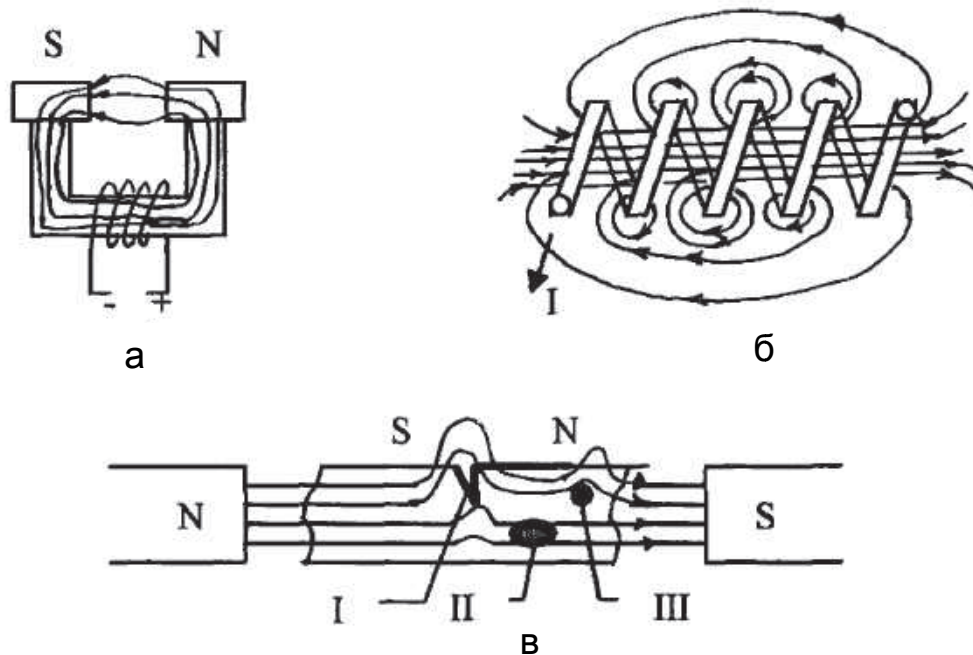


Рисунок 3.1 – Схема, яка пояснює фізичну суть магнітного контролю: а – спектр магнітних полів електромагніта; б – спектр магнітних полів соленоїда; в – магнітне поле розсіювання; I – дефект розташований поперек магнітних силових ліній (поле розсіювання велике); II – дефект, розташований уздовж магнітних силових ліній (поле розсіювання відсутнє); III – неметалеві вклучення

Магнітний потік, протікаючи по деталі, вміщеній між двома полюсами магніта, що має дефект у вигляді тріщини, змушений огинати перешкоду, в результаті чого відбувається часткове розсіювання в цьому місці магнітних силових ліній (створюється поле розсіювання). Поле розсіювання реєструється за допомогою магнітного порошку, магнітної стрічки та ін.

Магнітні методи застосовують лише для контролю виробів, виготовлених з феромагнітних матеріалів, які мають здатність сильно намагнічуватися під дією сильних магнітних полів і зберігати частково цю придбану ними намагніченість після видалення зовнішнього поля. Магнітні властивості контрольованих виробів характеризуються петлею гистерезиса. Значення магнітної індукції, що залишилася після зняття

зовнішнього поля, називається залишковою індукцією. Завдяки залишковій індукції стає можливим реалізувати багато магнітних методів контролю.

Методи магнітного контролю займають одне з чільних місць щодо використання у виробничих умовах. Ці методи застосовуються для виявлення місць порушення цілісності матеріалу деталі, розташованих на поверхні та у підповерхневих шарах: тріщин (втомних, шліфувальних, гартівних, зварювальних, кувальних, штампувальних), волосовин, закотів, розшарувань (розташованих не паралельно поверхні), флокенів, непроварів у стикових з'єднаннях, неметалевих включень. Вони можуть використовуватися і для виявлення феритних включень у деталях з аустенітних сплавів.

Розглянемо окремі методи магнітного контролю виробів.

3.1 Магнітопорошковий метод

В його основу покладено явище притягнення частинок магнітного порошку в місцях виходу на контрольовану поверхню виробу магнітного потоку, пов'язаного з порушенням суцільності матеріалу. У намагнічених виробах порушення цілісності (дефекти) викликають перерозподіл магнітного потоку і вихід частини його на поверхню (магнітний потік дефекту). На поверхні виробу створюються локальні магнітні полюси, що притягують частинки магнітного порошку, внаслідок чого місце дефекту стає видимим. Процеси магнітопорошкового методу контролю наведено на рисунку 3.2.

Метод є одним з найбільш вивчених і практично освоєних методів неруйнівного контролю. Він дозволяє виявляти дефекти типу тонких поверхневих і підповерхневих порушень суцільності, волосовин, тріщин, розшарувань та ін. Метод використовується для виявлення порушень суцільності з шириною розкриття біля поверхні 0,001 мм і більше, глибиною 0,01 мм і більше.

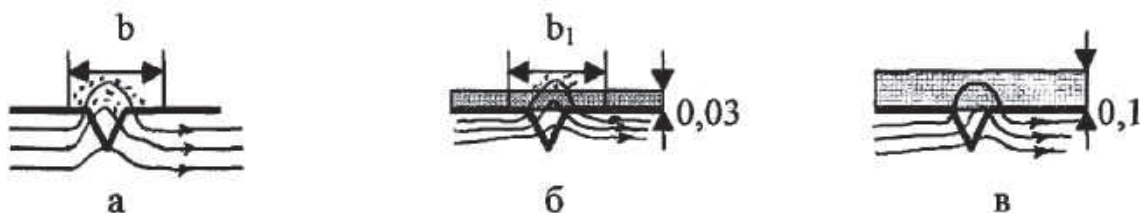


Рисунок 3.2 – Виявлення тріщин магнітопорошковим методом:

- а – відкритої тріщини; б – прихованої під шаром хрому товщиною 0,03 мм;
- в – прихованої під шаром хрому товщиною 0,1 мм

Магнітопорошковий метод є основним для виявлення дефектів матеріалу в деталях авіаційної техніки, виготовлених з магнітних сталей. В

експлуатації він використовується для контролю деталей, як знятих, так і безпосередньо на ЛА за наявності вільного доступу до них для розміщення намагнічувальних пристроїв, нанесення магнітної суспензії і огляду. Цим методом контролюють деталі, що мають деякий наробок, а також наново виготовлені або відновлені при ремонті. На рисунку 3.3 зображено принцип утворення магнітного рисунку.

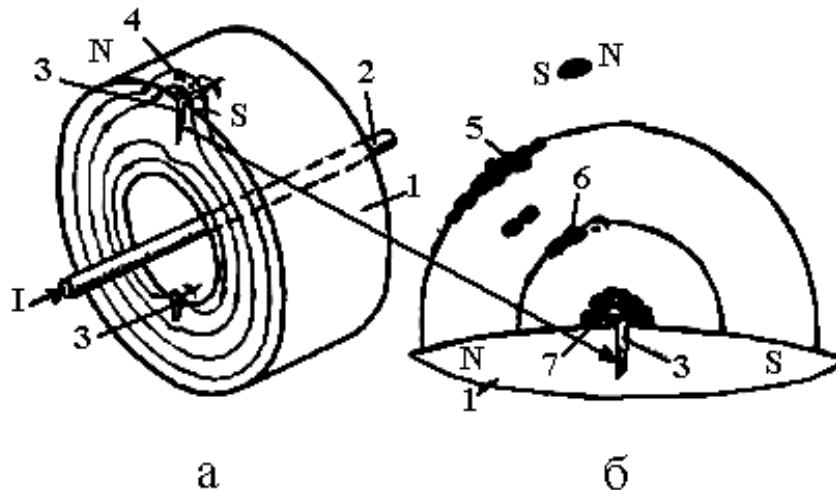


Рисунок 3.3 – Схема створювання магнітного поля розсіювання над тріщиною (а) і розподілення порошку в полі розсіювання тріщини (б):

- 1 – деталь; 2 – кабель з током; 3 – тріщини; 4 – поле розсіювання;
- 5 і 6 – ланцюжки з частинок порошку; 7 – порошок над тріщиною

Магнітопорошковий метод застосовують для виявлення дефектів металу, що виходять на поверхню деталі (у тому числі за наявності покриття товщиною до 30 мкм), і відносно великих дефектів, розташованих у поверхневому шарі на глибині до 1 мм. При контролі можуть бути виявлені тріщини різного походження, закоти, непровари й інші дефекти, що поширюються вглиб металу під кутом, більшим, ніж 20 ... 30°, до поверхні деталі.

Перевагами магнітопорошкового методу є висока чутливість, простота технології і можливість однотипної перевірки різних за формою і розмірами виробів, можливість контролю деталей без зняття з літального апарата (за наявності доступу для намагнічування і огляду контрольованої ділянки), малий час контролю, можливість точно встановити місце дефекту, напрямок поширення, протяжність і його характер.

До недоліків методу відносяться: необхідність видалення захисних лакофарбових покриттів товщиною більше 0,03 мм; можливість потрапляння магнітного порошку в підшипники, у прецизійні зчленування; складність розмагнічування деяких вузлів і в разі неповного розмагнічування деталей через помилки контролера можливість їх впливу

на курсові індикатори і на зношування сполучень; ускладненість у деяких випадках розшифрування результатів контролю у зв'язку з виявленням фальшивих дефектів.

3.2 Магнітографічний метод

В його основу покладено запис магнітних полів розсіювання над дефектом на магнітну стрічку шляхом намагнічування контрольованої ділянки деталі разом з притиснутою до її поверхні магнітною стрічкою і подальшому відтворенні та розшифруванні отриманого запису.

Зазвичай метод застосовують для контролю зварних швів для виявлення непроварів та інших дефектів зварних конструкцій, трубопроводів та інших виробів, виготовлених з феромагнітних сталей. Товщина стінки не повинна перевищувати 18 мм. Для проведення контролю зварений шов очищують від бруду, води, снігу, видаляють залишки шлаку та металеві бризки в зоні контролю.

Для реєстрації магнітних полів дефектів використовують схему контролю, наведену на рисунку 3.4.

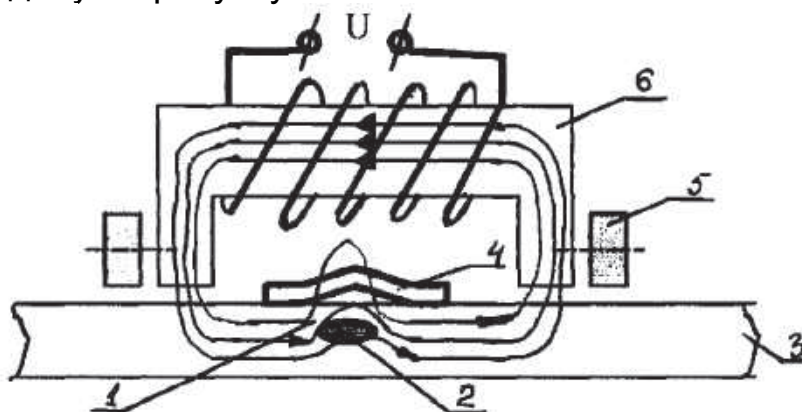


Рисунок 3.4 – Схема намагнічування зварного шва разом із магнітною стрічкою

Магнітну стрічку 4 розмагнічують, розміщують з натягом на контрольованій ділянці (зварений шов 1) деталі 3 і притискають гумовою стрічкою або іншим способом до поверхні. Переміщуючи електромагніт 6 уздовж зварного шва за допомогою роликів 5, намагнічують ділянку виробу разом з магнітною стрічкою. Якщо є дефекти 2, то магнітні поля дефектів створюють додаткове місцеве підмагнічування відповідних ділянок стрічки та реєструються на ній у вигляді місцевої залишкової намагніченості. Після зняття стрічки переходять до відтворення і розшифрування запису.

3.3 Ферозондовий метод

В його основу покладено виявлення ферозондовим перетворювачем магнітного поля розсіювання дефекту в намагнічених виробах і перетворення його в електричний сигнал. Метод дозволяє автоматизувати контроль. Суть методу полягає в тому, що локальне поле розсіювання магнітного потоку, що протікає по виробу і виникає внаслідок появи на його шляху будь-якого дефекту (тріщини, розшарування, раковини), реєструється ферозондовим датчиком. Датчики являють собою пермаллосві або феритові осердя довжиною 2 ... 6 мм з двома обмотками.

Ферозонди дозволяють виявляти порушення цілісності феромагнітних матеріалів як на поверхні, так і на глибині (до 15 мм), контролювати твердість сталевих деталей, наприклад, після термообробки, і глибину поверхнево зміцненого шару. Значного поширення отримує метод для контролю товщини стінок виливків і листових матеріалів з неферомагнітних сплавів. Особливий напрямок у розвитку феромагнітного неруйнівного контролю магнітоструктурний аналіз, що забезпечується якісною та кількісною характеристиками магнітних властивостей матеріалу виробу, що дозволяє судити про структуру і механічні властивості матеріалу, наявність феромагнітних домішок і їх розподіл у немагнітних матеріалах, а також вирішувати інші питання. Наприклад, цей метод дає можливість оцінити ступінь розмагніченості після магнітного контролю або шліфування на плоскошліфувальних верстатах з магнітними столами.

На рисунку 3.5 наведені схеми ферозондів, використовуваних в різних випадках контролю: при виявленні порушення цілісності матеріалу, наявності феромагнітних домішок, визначенні товщини стінок виробів з феромагнітних матеріалів.

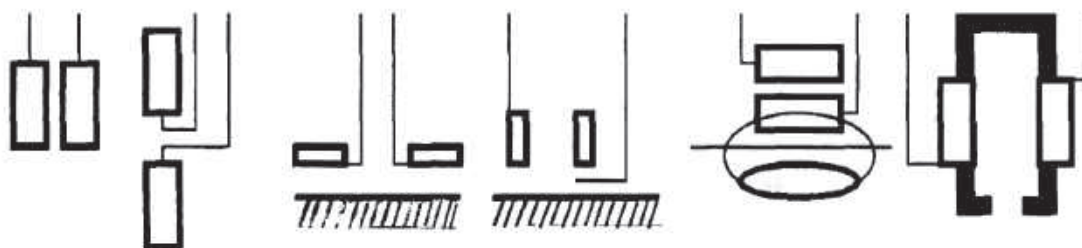


Рисунок 3.5 – Схеми ферозондів

Метод передбачає такі технологічні операції:

1. Підготовка виробу до контролю. Виріб повинен бути очищений від феромагнітних частинок та інших забруднень.
2. Намагнічування виробу.
3. Сканування і отримання сигналу від дефекту. Сканування здійснюється переміщенням ферозондного перетворювача по поверхні

виробу.

4. Розбраковування виконується візуально згідно з максимальним амплітудним значенням сигналу від дефекту або спеціальними пристроями.

5. Розмагнічування проходять придатні вироби.

4 ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ МЕТОДИ (МЕТОДИ ВИХРОВИХ СТРУМІВ)

Електромагнітні методи неруйнівного контролю або методи вихрострумowego контролю базуються на аналізі взаємодії зовнішнього електромагнітного поля з електромагнітним полем вихрових струмів, що наводяться в об'єкті контролю цим полем [5].

Методи вихрострумowego контролю застосовуються при:

1) виявленні поверхневих і підповерхневих тріщин, пустот, неметалевих включень та ін.;

2) визначенні фізико-механічних властивостей матеріалу, що дозволяє робити висновок про правильність режиму термічної і хіміко-термічної обробки, про структуру металу, виявляти її неоднорідність, відхилення твердості, ступінь поверхневого знеуглецювання, глибину знеуглецьованого шару і глибину поверхневої хіміко-термічної обробки, а також проводити сортування сплавів згідно з марками;

3) визначенні форми і розміру виробу, вимірюванні товщини магнітних і немагнітних захисних покриттів, товщини листових матеріалів і стінок труб, товщини електропровідних плівок і шарів біметалу і т. п.

Методи вихрострумowego контролю використовуються в потокових лініях для автоматичного або напівавтоматичного контролю, при проведенні суцільного контролю матеріалів, заготовок і деталей на багатьох металургійних і машинобудівних заводах.

Суть вихрострумowego контролю полягає у вимірюванні ступеню взаємодії електромагнітного поля, створеного перетворювачем, з контрольованим виробом.

Чутливими елементами (датчиками), які дозволяють отримати сигнал про суцільність та інші властивості деталі, що перевіряється, є котушки індуктивності (рисунок 4.1).

Контрольований виріб поміщають у електромагнітне поле збуджувальної обмотки перетворювача, яка живиться змінним електричним струмом. Виріб у цьому випадку можна розглядати як короткозамкнену обмотку, і в ній буде індукватися струм (рисунок 4.2).

Індукований струм протікає по замкнених кругових лініях (звідси назва – вихровий струм), а величина його гальмування залежить від фізичних властивостей виробу. Електроопір металу залежить від величини гальмування, а воно, у свою чергу, залежить від атомної структури. За

наявності, наприклад, у матеріалі внутрішніх дефектів, змін хімічного складу – змінюється електропровідність, що змінює величину збуджених вихрових струмів.

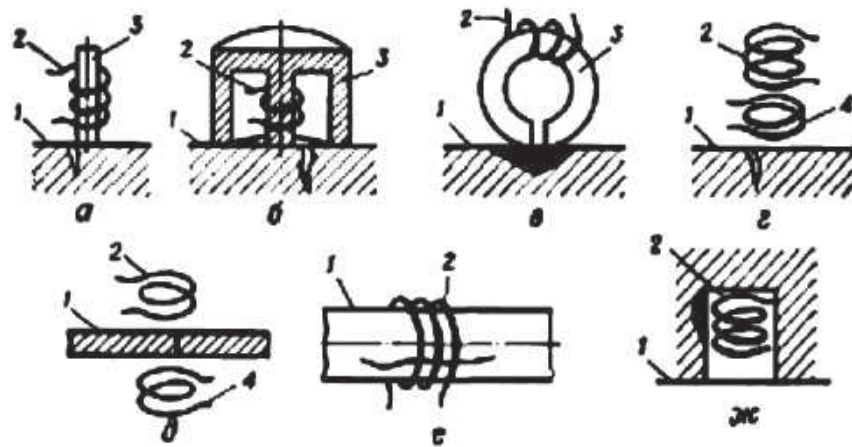


Рисунок 4.1 – Основні типи датчиків: а, б, в – накладні параметричні з осердями; г – накладний трансформаторний; д – екранний; е – прохідний зовнішній; ж – прохідний внутрішній; 1 – деталь, що перевіряється; 2 – збуджувальна обмотка; 3 – осердя; 4 – вторинна обмотка

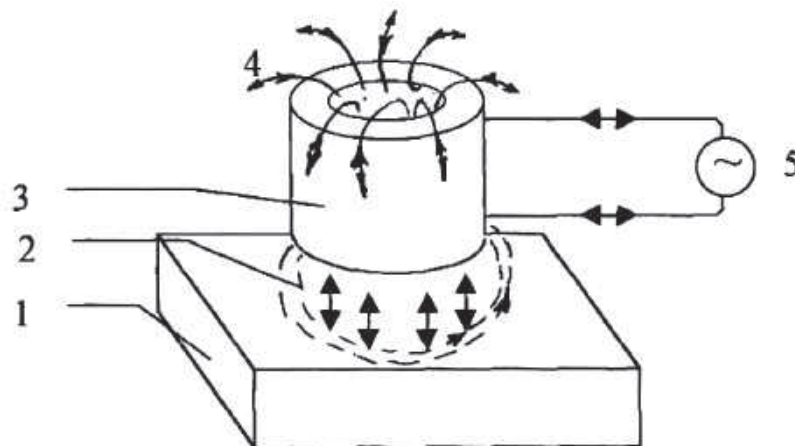


Рисунок 4.2 – Збудження вихрових струмів у електропровідному тілі за допомогою котушки, що живиться змінним струмом: 1 – електропровідне тіло; 2 – наведені вихрові струми; 3 – збуджувальна котушка; 4 – змінне магнітне поле; 5 – генератор змінного струму

Таким чином, величина вихрових струмів залежить від сили і частоти змінного струму, що живить обмотку збудження перетворювача, електропровідності, магнітної проникності та форми виробу, взаємного розташування обмоток перетворювача і виробу, відстані від перетворювача вихрового струму до контрольованої поверхні.

На електропровідність матеріалу виробу в свою чергу впливають хімічний склад, ступінь деформації, термічна і хіміко-термічна обробка, кількість вуглецю і легуючих елементів. Крім того, на величину порушень у виробі вихрових струмів будуть впливати порушення цілісності матеріалу, наявність у ньому включень, оскільки вони створюють додатковий опір, що перешкоджає протіканню вихрових струмів.

Вихрові струми, наведені у виробі, створюють вторинне змінне електромагнітне поле, напрямом якого, відповідно до закону Ленца, протилежний збуджувальному полю (рисунок 4.3).

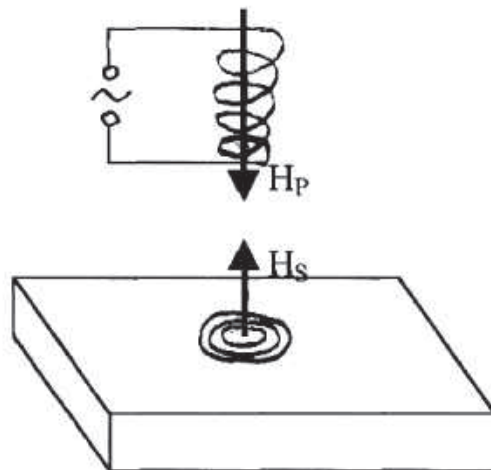


Рисунок 4.3 – Взаємодія магнітних полів збуджувального і поля вихрових струмів: H_p – вектор магнітного поля збуджувальної котушки; H_s – вектор магнітного (вторинного) поля вихрових струмів

Таким чином, напруженість вторинного магнітного поля буде дорівнювати різниці напруженостей збуджувального і вторинного магнітних полів.

Електромагнітне поле вихрових струмів при постійній ЕРС у збуджувальній обмотці перетворювача призведе до збільшення її повного опору, а, отже, до зменшення сили струму, що протікає в збуджувальній обмотці. Опір збуджувальної обмотки буде залежати від величини і характеру розподілу вихрових струмів у контрольованому виробі.

На рисунку 4.4 зображена схема збудження вихрових струмів у виробках без дефекту і з дефектом.

Вихрові струми у виробі без дефекту створюють електромагнітний потік Φ_1 , який більше електромагнітного потоку Φ_2 вихрових струмів у виробі з дефектом, оскільки внаслідок локального зменшення електропровідності зменшується щільність вихрових струмів. Сумарний потік $\Phi_{p1} = \Phi_v - \Phi_1$ менше, ніж $\Phi_{p2} = \Phi_v - \Phi_2$, тому в котушці збудження буде протікати струм $I_1 < I_2$.

Сигнал вихрового перетворювача несе інформацію про параметри

об'єкта контролю і зумовлений взаємодією електромагнітного поля перетворювача з об'єктом контролю.

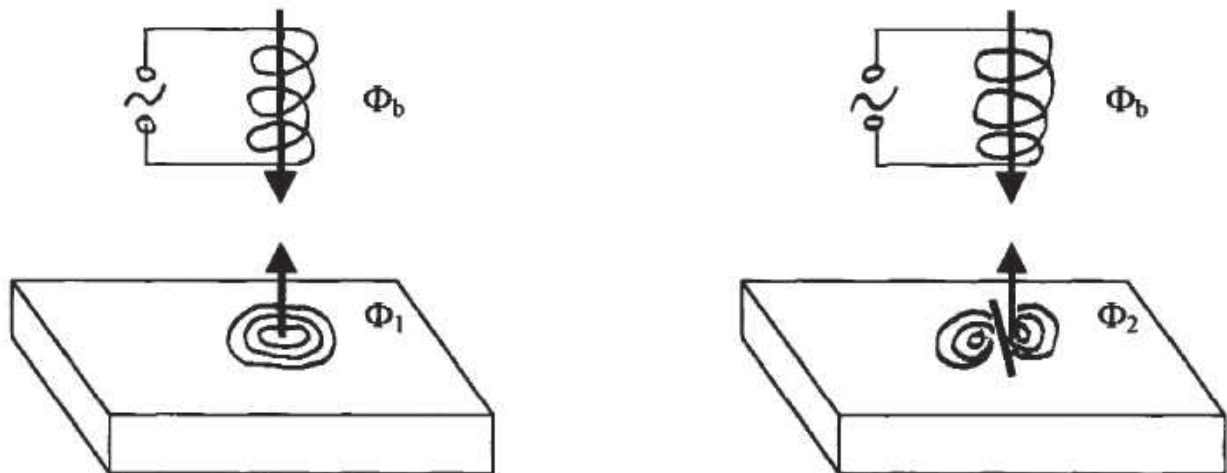


Рисунок 4.4 – Схема збудження вихрових струмів у виробах без дефекту і з дефектом

Сучасні засоби контролю дають змогу виконувати досить повний аналіз сигналів перетворювача, що визначає метод контролю:

- амплітудний, що базується на вимірюванні амплітуди сигналу перетворювача;
- фазовий, що базується на вимірюванні фази сигналу перетворювача;
- амплітудно-фазовий, оснований на вимірюванні проекції вектора напруги перетворювача;
- частотний, що базується на вимірюванні частоти сигналу вихрострумового перетворювача, включеного в коливальний контур автогенератора та ін.

При вихрострумовому методі контролю використовується поверхневий ефект. Глибина проникнення вихрових струмів і електромагнітних полів залежить, крім інших факторів, від частоти струму у збуджувальній обмотці. При відносно малій частоті електромагнітні поля і вихрові струми проникають глибше, ніж при великих частотах, коли вони поширюються поблизу поверхні виробу. Тому ефективна глибина контрольованого шару може визначатися вибором робочої частоти.

Наприклад, при $f = 104$ Гц глибина проникнення для міді буде 0,66 мм, для сталі – 0,093 мм, а при $f = 50$ Гц для міді – 9,4 мм, для сталі – 1,3 мм.

Інформація, що отримується від контрольованого виробу, залежить від схеми контролю і конструкції перетворювача.

Накладний вихрострумовий перетворювач розміщується поблизу контрольованої поверхні або на ній (зазвичай невеликого розміру).

Прохідний вихрострумовий перетворювач розташовується при

контролі з зовнішньої сторони виробу, охоплюючи його (зовнішній перетворювач) або з внутрішньої сторони (внутрішній перетворювач).

В *екранному вихрострумовому перетворювачі* збуджувальна й вимірювальна обмотки розділені контрольованим виробом.

Комбінований вихрострумовий перетворювач містить обмотки як накладного, так і прохідного типів.

Відповідно до прийнятої схеми контролю розрізняють методи пропущеного та відбитого випромінювань.

Переваги вихротокового методу виявляються в першу чергу при дефектоскопії деталей з захисними покриттями, невеликих за площею ділянок, деталей у важкодоступних місцях конструкцій, при пошуку малорозкритих тріщин (з шириною розкриття біля виходу на поверхню 0,5 мкм) і тріщин, перекритих «містком» з деформованого матеріалу. Більш того, не потрібна особлива підготовка поверхні перед контролем.

До недоліків методу слід віднести: відсутність наочності результатів контролю; складність визначення характеру дефекту і його розмірів за результатами контролю; велику трудомісткість ручного контролю накладним перетворювачем значних поверхонь; меншу, ніж, наприклад, у магнітопорошкового або кольорового методів, чутливість до поверхневих дефектів по їх глибині й протяжності. Проведення контролю вихрострумовим методом можливо за певних умов. Так, не повинно бути яскраво вираженої неоднорідності властивостей матеріалу по всій зоні контролю (практично, важко або взагалі неможливо здійснити контроль зварних швів сталевих вузлів, деталей з пропалами і ділянками наклепу, зон, що безпосередньо прилягають до сталевих кріпильних деталей), значних змін форми поверхні в межах зони, що перевіряється, а також істотних змін товщини деталі по цій зоні, якщо товщина порівняна з глибиною проникнення вихрових струмів.

У процесі контролю на сигнал датчика можуть впливати різні чинники. Два з них – це змінення електропровідності та наявність несучільності. Якщо контроль проводять з метою виявлення тріщин, а матеріал деталі має різко виражену структурну неоднорідність, то зумовлені нею коливання електропровідності від ділянки до ділянки деталі можуть призвести до таких значних змін сигналу датчика, що на їх фоні практично неможливо буде помітити сигнал від тріщини. Особливо сильно впливає на сигнал неоднорідність властивостей магнітних матеріалів. При виявленні дефектів структурна неоднорідність матеріалу деталі є чинником, що заважає проведенню контролю.

Очевидно, що при контролі деталі всі заважаючі чинники можуть проявитися і викликати сигнал, більший, ніж сигнал про несучільності. Якби не були розроблені способи зменшення впливу на показання

дефектоскопів чинників, що заважають, то практичне застосування вихрострумового методу було б неможливим.

Однак кожен заважаючий фактор по-своєму змінює повний вносний опір. Тому зменшити вплив усіх їх одним способом не вдається.

Закономірності зміни вносних опорів є загальними майже для всіх типів датчиків.

5 АКУСТИЧНІ МЕТОДИ

Акустичний метод неруйнівного контролю засновано на реєстрації параметрів пружних хвиль, збуджених і (або) виникаючих у контрольованому об'єкті.

Пружні коливання класифікуються на: інфразвукові – з частот коливань до 16 Гц; звукові – з діапазоном коливань від 16 до 20 000 Гц; ультразвукові – з частотою коливань більше 20 000 Гц; гіперзвукові – з частотою коливань понад 10^9 Гц.

У практиці неруйнівного контролю найбільшого поширення набули ультразвукові та звукові коливання [6].

5.1 Ультразвукові методи

Ультразвукові хвилі, які використовуються в дефектоскопії, являють собою пружні коливання, що збуджуються в матеріалі виробу. При цьому частинки матеріалу не пересуваються вздовж напрямку руху хвилі; кожна частинка, зробивши коливальний рух відносно своєї первинної орієнтації, знову займає початкове положення, і т. д. В однорідних тілах, особливо металах, ультразвукові хвилі поширюються як спрямовані промені, а на межі з повітрям практично дають 100 %-ве відбиття.

Ультразвук має здатність необмеженого проникнення в глибину і виявлення дефектів будь-яких розмірів і розташування. Поширення пружних високочастотних хвиль відбувається за аналогією із законами геометричної оптики. Пружна хвиля в напрямку поширення несе певну енергію і в міру віддалення від випромінювача інтенсивність хвиль падає, і амплітуда коливань частинок зменшується.

В металах збуджуються хвилі п'яти типів: поперечні, поздовжні, вигину, розтягування і поверхневі. Виникнення хвиль того чи іншого типу визначається пружними властивостями об'єкта і його формою. Якщо частинки здійснюють коливальні рухи, що збігаються з напрямком руху хвилі по об'єкту, то це поздовжні хвилі; коли напрямок коливання частинки перпендикулярний, то це поперечні (зсувні) хвилі. В об'єктах, товщина яких порівняна з довжиною хвилі (листовий матеріал), можуть виникати хвилі вигину (нормальні). Хвилі розтягування виникають в об'єктах типу стрижня, і частинки коливаються вздовж напрямку поширення хвиль і

перпендикулярно до нього. Поверхневі хвилі зумовлені коливанням частинок зі значною амплітудою на поверхні тіла і поступовим її зменшенням при видаленні частинок від поверхні.

Як джерела коливань в ультразвукових дефектоскопах використовують електронні генератори. Отримувані в них електричні коливання перетворюються в ультразвукові коливання середовища за допомогою перетворювачів, оснований на п'єзоелектричному ефекті.

Прямий п'єзоелектричний ефект – це виникнення електричних зарядів на гранях кварцової пластинки при її деформації. Якщо ж до такої кварцової пластівки підвести електричний заряд, вона змінить свої розміри, і ми отримаємо зворотний п'єзоелектричний ефект (рисунок 5.1)

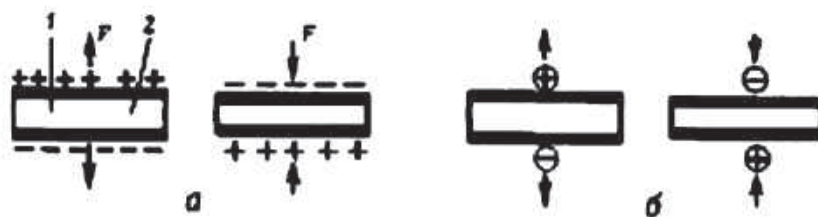


Рисунок 5.1 – Прямий (а) і зворотній (б) п'єзоелектричний ефект:
1 – п'єзопластина; 2 – шар срібла; F – сила стиснення або розтягнення

Для збудження ультразвукових хвиль використовують електроакустичні перетворювачі: п'єзоелектричні, магнітострикційні й ін. В акустичних дефектоскопах застосовують п'єзоелектричні перетворювачі з п'єзокерамічних матеріалів – цірконаттитанату свинцю (ЦТС) і титанату барію (ТБ). Дія їх базується на п'єзоелектричному ефекті, який полягає в тому, що при стисненні та розтягуванні перетворювачів на їхніх поверхнях виникають електричні заряди, знак яких визначається видом деформації (стиснення або розтягнення), а величина – прикладеною силою. П'єзоэффект оборотний: якщо прикласти до поверхонь перетворювача змінну електричну напругу, то перетворювач буде здійснювати механічні коливання (стискатися і розтягуватися) з частотою прикладеної напруги. Таким чином, п'єзоелектричний перетворювач дозволяє перетворювати електричні коливання в ультразвукові та, навпаки, ультразвукові в електричні.

П'єзоперетворювачі виготовляють у формі пластини, циліндра і т. п. На обидві їх поверхні наносять тонкий шар срібла. Експлуатаційний інтервал температур для пластин з ТБ становить від - 60 до + 60 °С, а для пластин з ЦТС – від - 60 до + 250 °С. При нагріванні ТБ понад 60 °С, а ЦТС понад 250 °С вони починають втрачати свої п'єзоелектричні властивості.

При неруйнівному контролі використовують кілька методів ультразвукового прозвучування контрольованих об'єктів і отримання

необхідної інформації: проникного випромінювання, відбитого випромінювання (луна-метод) і резонансного (рисунок 5.2).

Якщо випромінювальні п'єзопластини прикласти до поверхні деталі, то УЗК будуть збуджуватися у матеріалі деталі й поширюватися в ньому. Залежно від режиму роботи генератора електричної напруги УЗК можна випромінювати в контрольовану деталь безперервно або у вигляді високочастотних імпульсів заданої тривалості. Імпульси УЗК, що випромінюються в матеріал деталі, називають зондувальними імпульсами.

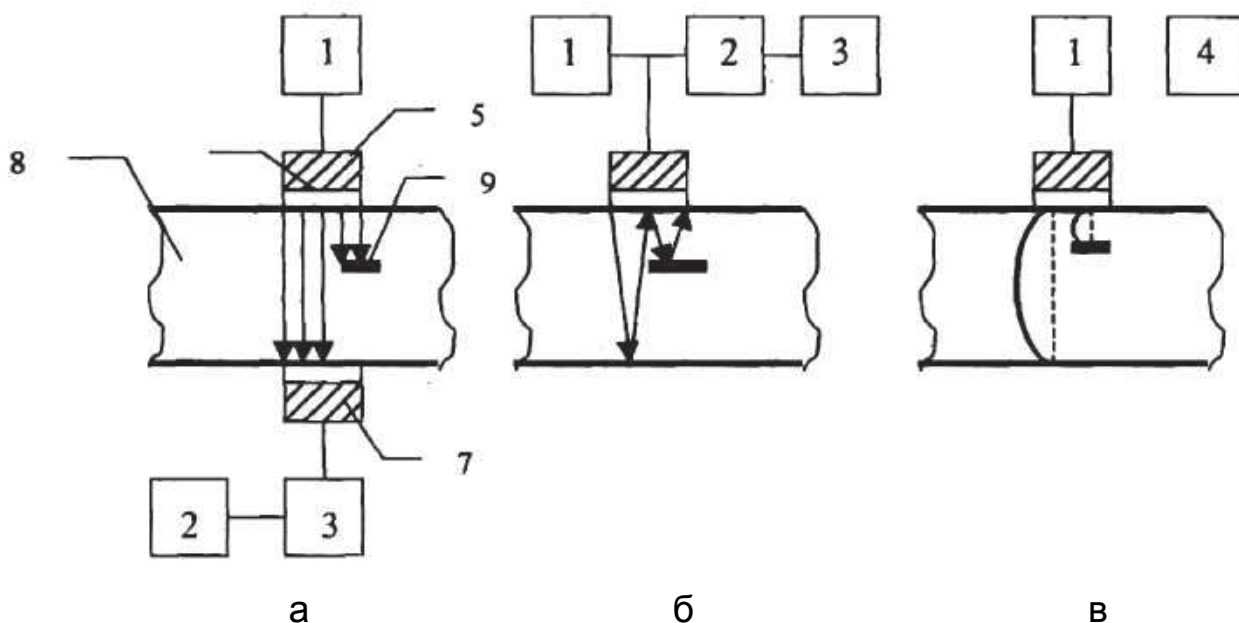


Рисунок 5.2 – Схеми ультразвукового контролю: а – тіньовий метод; б – луна-метод; в – резонансний метод; 1 – блок генератора; 2 – блок підсилювача; 3 – блок індикатора; 4 – блок реєстрації резонансів; 5 – демпфер; 6 – випромінювач; 7 – демпфер приймальної головки; 8 – контрольований об'єкт; 9 – дефект

5.1.1 Метод проникного випромінювання (тіньовий метод, або наскрізного проникання)

Метод (рисунок 5.2, а) базується на ослабленні ультразвуку, що проходить крізь деталь, при наявності всередині неї дефектів, створюючих ультразвукову "тінь". Якщо в деталі немає дефектів, то ультразвукова хвиля рухається прямолінійно, поки не досягне протилежного боку виробу. Чим більше дефект, тим більше ослаблення ультразвуку і навпаки. У разі, коли на шляху пружних хвиль є дефект, то залежно від його місця розташування показання індикатора змінюються, тому що дефект відіб'є частину хвиль, і вони не потраплять на приймальну головку. Імпульс на екрані приладу при цьому зменшується або зникає, утворюється акустична

"тінь". Метод, як правило, застосовується для контролю якості листового прокату, підшипників ковзання, багат шарових дисків, клейових з'єднань. Тіньові дефектоскопи малочутливі: з їх допомогою можна виявити дефект, що спричиняє зміну сигналу не менше ніж на 15 ... 20 %, інакше дефект залишиться непоміченим. Недолік методу також полягає в тому, що неможливо визначити, на якій глибині знаходиться дефект. При реалізації тіньового методу необхідний доступ до контрольованої деталі з двох сторін.

5.1.2 Метод відбитого випромінювання (луна-метод)

Метод (рисунок 5.2, б) базується на посиленні в контрольований виріб коротких імпульсів і реєстрації інтенсивності й часу приходу луна-сигналів, відбитих від дефектів або меж виробу. Імпульс, надісланий випромінювачем, проходить крізь виріб і відбивається від протилежної сторони (поверхні). Якщо є дефект (тріщина, раковина), то він відіб'ється від них, що буде зареєстровано на екрані дефектоскопа у вигляді сплеску імпульсу. Якщо в деталі кілька тріщин або раковин, розташованих одна за одною, то на екрані дефектоскопа з'явиться кілька сплесків.

Луна-метод має низку переваг: дозволяє досліджувати вироби при односторонньому доступі до них, тому що не потрібно встановлювати приймач ультразвуку з протилежного боку. Чутливість луна-методу значно вище. При тіньовому методі ослаблення ультразвуку на 5 % не реєструється, при імпульсному буде помічено відображення навіть 1-го відсотка ультразвукової енергії. Перевага луна-методу полягає ще в тому, що він дозволяє не тільки з підвищеною чутливістю виявляти дрібні дефекти, але і визначати, на якій глибині вони знаходяться. За величиною відбитого луна-сигналу можна скласти уявлення про розміри дефекту.

Однак луна-метод непридатний для контролю виробів малих розмірів. Це пояснюється тим, що у імпульсних дефектоскопів є так звана "мертва зона" – ділянка безпосередньо біля поверхні деталі. На цьому місці дефект неможна виявити, тому що в момент повернення луна-сигналу від дефекту ще триває випромінювання прямого імпульсу. "Мертва зона" дефектоскопа буде тим менше, чим менше тривалість імпульсу.

При використанні поздовжніх хвиль "мертва зона" це неконтрольований поверхневий шар, в якому луна-сигнал від дефекту не відрізняється від зондуючого імпульсу. При використанні зсувних, поверхневих або нормальних хвиль "мертва зона" визначається мінімальною відстанню від центру випромінювання пошукової головки до дефекту, при якому реєструється луна-сигнал (рисунок 5.3). Тривалість імпульсу визначає і роздільну здатність дефектоскопії, тобто мінімальна відстань по глибині між дефектами, при якому луна-сигнали від цих

дефектів будуть спостерігатися на електронно-променевій трубці окремо.

Дефектоскоп працює таким чином. Від імпульсного генератора 1 (рисунок 5.4) на випромінювальну пластинку 2 подається короткочасний імпульс змінної напруги (тривалість 3 – 5 мікросекунд). Під дією його в пластинці збуджуються коливання, які у вигляді вузького пучка ультразвуку 3 передаються в досліджуваний виріб 4. Одночасно з подачею змінної напруги на випромінювальну пластинку такий самий імпульс подається в підсилювач 5, а також у спеціальний пристрій 6, що змушує електронний промінь в електронно-променевій трубці 7 пересуватися по горизонталі зліва направо.

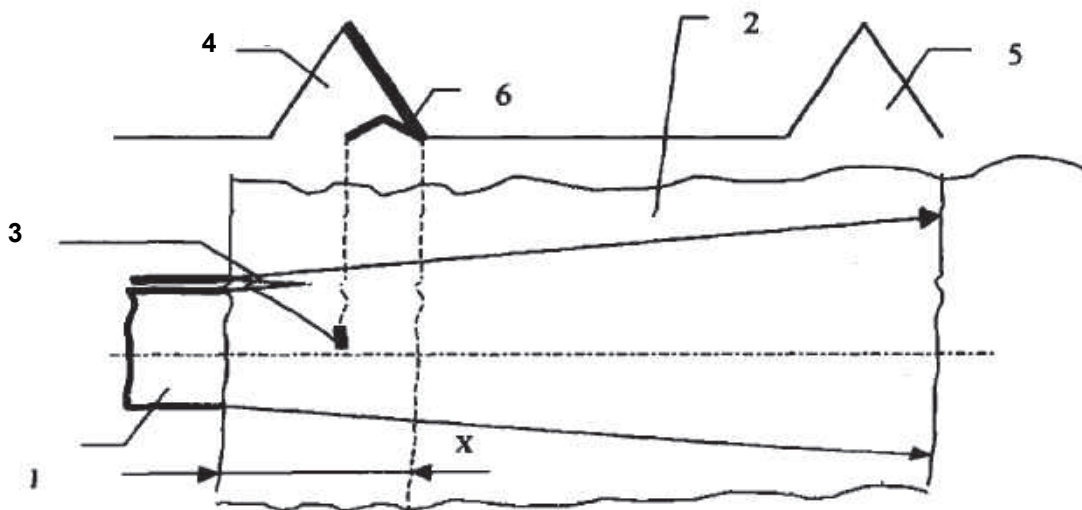


Рисунок 5.3 – "Мертва зона" при контролі поздовжніми хвилями:

1 – поєднана запобіглива головка; 2 – виріб; 3 – дефект; 4 – зондувальний імпульс; 5 – донний імпульс; 6 – імпульс від дефекту; X – мертва зона

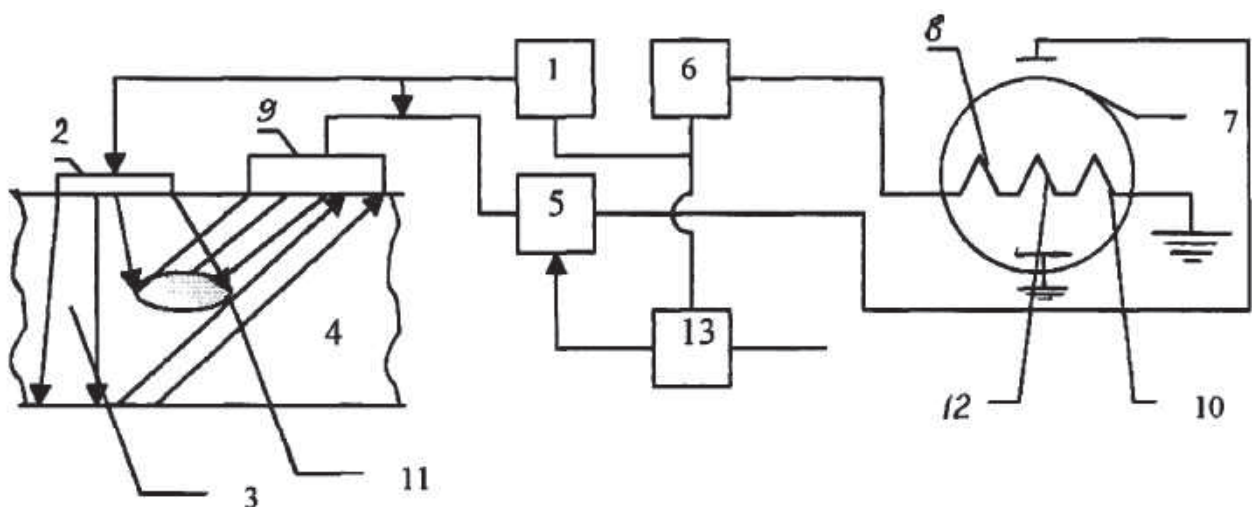


Рисунок 5.4 – Блок-схема імпульсного ультразвукового дефектоскопа з прийманням відбитого сигналу

Цей промінь прокреслює лінії на екрані трубки, де з'являється сплеск 8, що зветься початковим імпульсом. При відсутності дефектів у досліджуваному виробі вузький ультразвуковий пучок 3 пройде до протилежної його поверхні, відіб'ється від неї і, дійшовши до першої верхньої поверхні, потрапить на приймальну пластинку 9 і змусить її коливатися. Виникаюча на приймальній пластині різниця потенціалів посилюється. Посилені сигнали, підключені до електронно-променевої трубки, викличуть на правій стороні її екрану сплеск, що зветься донним імпульсом 10 (як би відбитий від дна виробу).

Якщо всередині досліджуваного виробу є дефект 11, то ультразвук дійде до нього раніше, ніж до протилежної грані, частково відіб'ється від межі дефекту і потрапить на приймальну пластину раніше.

Внаслідок цього на екрані трубки між початковим імпульсом 8 і донним імпульсом 10 виникає третій імпульс 12, що показує присутність дефекту в досліджуваному виробі. По відстані між імпульсами, відбитими на екрані трубки, можна визначити глибину залягання дефекту, а положення пошукових щупів на поверхні виробу показує розташування дефекту в горизонтальній площині.

Живлється дефектоскоп від блока живлення 13.

Імпульсні дефектоскопи дозволяють працювати як з двома пошуковими щупами, так і з одним. В останньому випадку щуп служить випромінювачем і приймачем.

Це можливо тому, що приймання відбитого сигналу відбувається під час пауз між імпульсами, і ніяких інших сигналів, крім відбитих, у цей час на п'єзоелектричну пластинку не надходить.

В імпульсних ультразвукових дефектоскопах застосовуються призматичні щупи, за допомогою яких можна вводити в контрольовані вироби ультразвуковий пучок під деяким кутом до поверхні. Це дозволяє виявляти дефекти, приховані під головками заклепок і т. д., які неможливо виявити за допомогою прямого щупа.

5.1.3 Резонансний метод

Резонансний метод засновано на реєстрації параметрів резонансних коливань, збуджених у контрольованому об'єкті. Коливання високої частоти, що виробляються генератором, безперервно випромінюються ультразвуковою головкою в перевіряємий виріб. Будь-яке тіло, предмет, деталь мають свою власну частоту. У тонкої деталі висока резонансна частота, а у великих предметів – низька. Якщо власна частота виробу дорівнюватиме частоті генератора, то виникне резонанс коливань. Знаючи частоту випромінених ультразвукових коливань і швидкість їх поширення в матеріалі контрольованого виробу, легко визначити розміри дефекту і

глибину його розташування.

Резонансний метод контролю оснований на порушенні в об'єкті так званих стоячих хвиль, що виникають за умови інтерференції пружних коливань, що вводяться в об'єкт, і коливань, відбитих від розділу об'єкт-повітря (або інше середовище). Така ситуація можлива за умови отримання резонансу внаслідок збігу власної частоти об'єкта і частоти збуджених у ньому коливань.

Основна область застосування резонансних ультразвукових приладів – товщинометрія (вимірювання товщини матеріалу об'єкта з одностороннім доступом).

Принцип резонансного дефектоскопа полягає в тому, що його налаштовують на резонансну частоту виробу. Якщо ультразвукову головку переміщати по виробу, то у всіх місцях з іншою товщиною резонансу не буде.

Ультразвукові методи дозволяють виявляти дефекти різного походження практично у всіх сталях і сплавах (магнітних і немагнітних), з яких виготовляють деталі та вузли літаків, вертольотів та їх двигунів. Виняток становлять лише деякі жароміцні дрібнозернисті сплави, що застосовуються в конструкції ГТД. Важливою перевагою методу є можливість виявлення при односторонньому підході до виробу внутрішніх дефектів, розташованих на великій глибині, або тих, що виходять на недоступну поверхню.

Однак метод має і низку недоліків. Так, для використання ультразвукового методу потрібне розроблення спеціальних перетворювачів, додаткових пристроїв і конкретних методичних рекомендацій стосовно кожного типу деталі й вузла. Метод не дозволяє точно оцінювати розміри і характер виявлених дефектів. Ускладнений контроль ультразвуковим методом деталей складної форми, що мають свердління, проточки, галтелі, валики посилення зварних швів й інші конструктивні рішення, що ускладнюють розшифровку результатів.

Сучасні ультразвукові дефектоскопи при збудженні в об'єкті поздовжніх і зсувних хвиль дозволяють виявити в товщі матеріалу несучільності з поверхнею відбиття $1 \dots 1,5 \text{ мм}^2$. Чутливість до дефектів при контролі деталей поверхневими хвилями приблизно $0,1 \text{ мм}$ – мінімальна глибина виявлення тріщин.

5.2 Методи ультразвукової голографії

У дефектоскопії широко використовуються ультразвукові методи неруйнівного контролю, причому поширені луна-імпульсні системи, в яких часто використовується сканування. Оскільки ультразвук є хвильовим процесом і, подібно до світла, може бути використаний для формування

зображення, давно вважалося, що в цілому ряді застосувань відтворення зображення може дати суттєві переваги перед звичайними системами дефектоскопії. Типовий метод візуального контролю являє собою ультразвуковий аналог оптичної системи, коли розсіяний від об'єкта ультразвук збирається ультразвуковою лінзою і фокусується в ультразвукове зображення, яке потім перетворюється в оптичне зображення за допомогою відповідного перетворювача. Однак технологічні труднощі, пов'язані з розробленням ультразвукових систем зображення, загальмували їх використання і подальший розвиток.

Метод акустичної голографії дозволяє усунути багато з цих труднощів. Метод базується на реєстрації ультразвукового зображення на ультразвуковій голограмі, перетворенні її в оптичний транспарант і подальшому отриманні зображення таким же чином, як при відновленні зображення з оптичної голограми.

Методи отримання ультразвукових голограм можуть бути розділені на два обширні класи: ультразвукові аналоги оптичних методів і електронні методи.

5.2.1 Метод поверхневого рельєфу рідини

Два випромінювача, під'єднані до одного генератора сигналів, поміщені у водяну ванну і орієнтовані так, що їх пучки перекриваються на поверхні (рисунок 5.5).

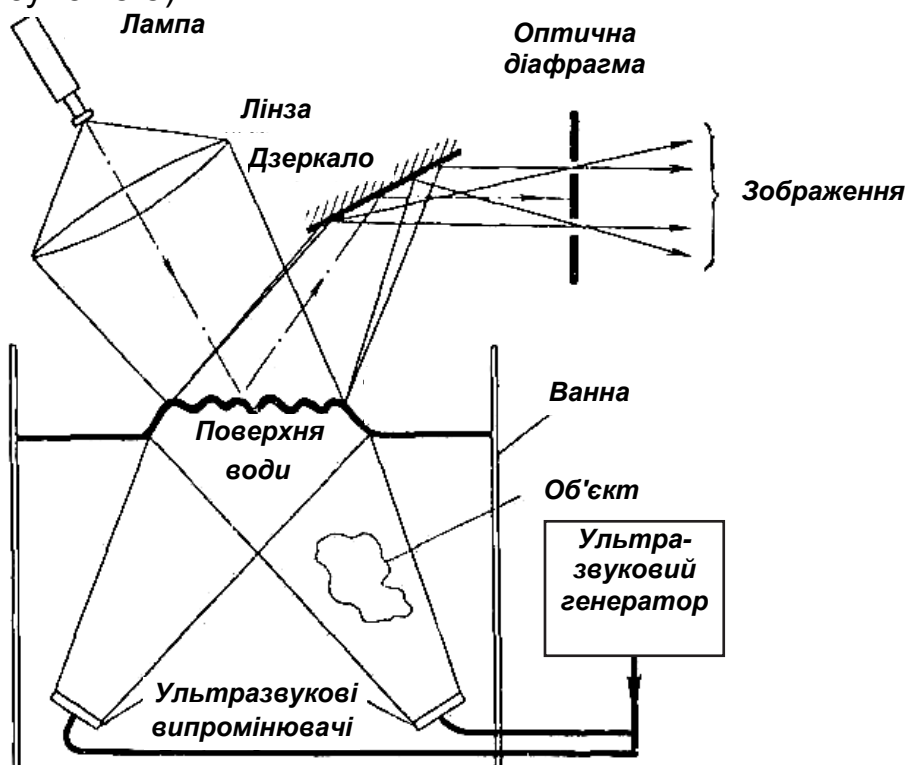


Рисунок 5.5 – Ультразвуковий аналог оптичної голографічної системи, оснований на методі поверхневого рельєфу рідини

Якщо на шляху одного з пучків помістити об'єкт, то рельєф поверхні, утворений стоячими хвилями від двох випромінювачів, змінюється і результуючий рельєф поверхні рідини перетворюється в ультразвукову голограму об'єкта. Для того, щоб спостерігати ультразвукові зображення, пучок когерентного світла, відбитий від поверхні води, фокусується в деякій площині, де зображення розглядають звичайними методами. За відсутності ультразвуку поверхня являє собою площину, і світловий пучок фокусується в один максимум.

При наявності ультразвуку, але без об'єкта, центральний максимум розщеплюється на ряд інших розташованих симетрично по відношенню до нього. За наявності об'єкта максимуми розмиваються, і два зображення спостерігаються в максимумах першого порядку дифракції, інші порядки усуваються діафрагмою. Для цього методу потрібна інтенсивність ультразвуку близько $0,1 \text{ Вт/см}^2$. При інтенсивності звуку від $0,1$ до $1,0 \text{ Вт/см}^2$ можна записати голограму на термопластичному матеріалі.

5.2.2 Електронні методи

Ультразвукова голограма з електронним опорним пучком. Об'єкт озвучується випромінювачем, що працює від генератора з частотою ω , мініатюрний приймач сканує поле предметної хвилі. Схему запису ультразвукової голограми з електронним опорним сигналом показано на рисунку 5.6.

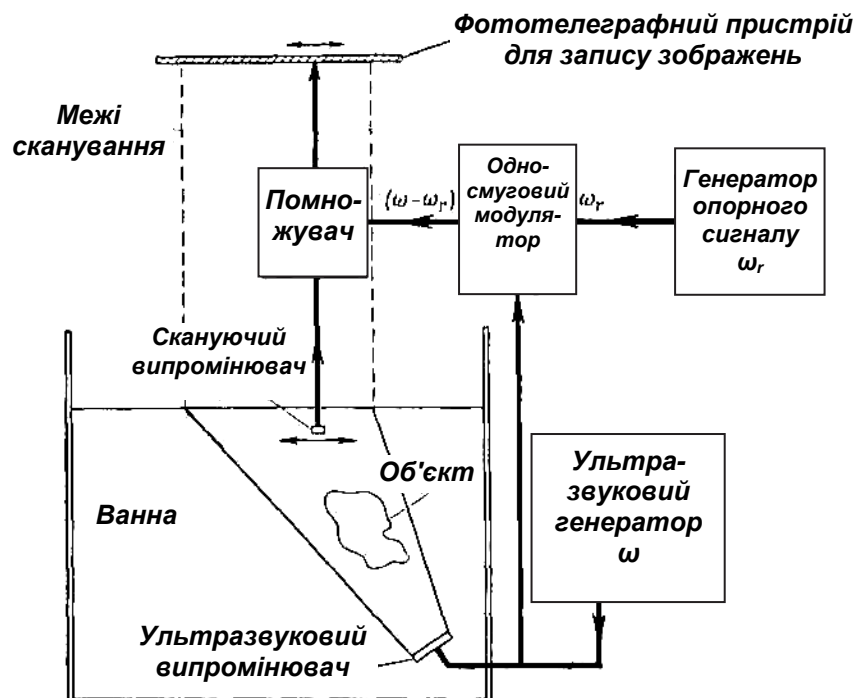


Рисунок 5.6 – Схема запису ультразвукової голограми з електронним опорним сигналом

Сигнал з ультразвукового генератора подається на односмуговий окремих модулятор, де він змішується з сигналом генератора опорного пучка частотою ω_2 для отримання на виході сигналу частотою $(\omega - \omega_2)$. Потім сигнал зі сканувального приймача перемножується з сигналом частотою $(\omega - \omega_2)$, і результуюча напруга надходить на фототелеграфний пристрій для запису зображень, сканування в якому здійснюється синхронно з приймачем.

Цей запис утворює оптичний транспарант. Замість сканувального приймача можна використовувати електронно-акустичний перетворювач, а голограму отримувати шляхом фотографування зображення з телевізійного екрану.

Метод синтезованої апертури. У імпульсній системі сканувальний приймач можна використовувати по черзі в двох режимах: випромінюванні і прийому поля розсіяного об'єктом. Схему запису ультразвукової голограми методом синтезованої апертури показано на рисунку 5.7.

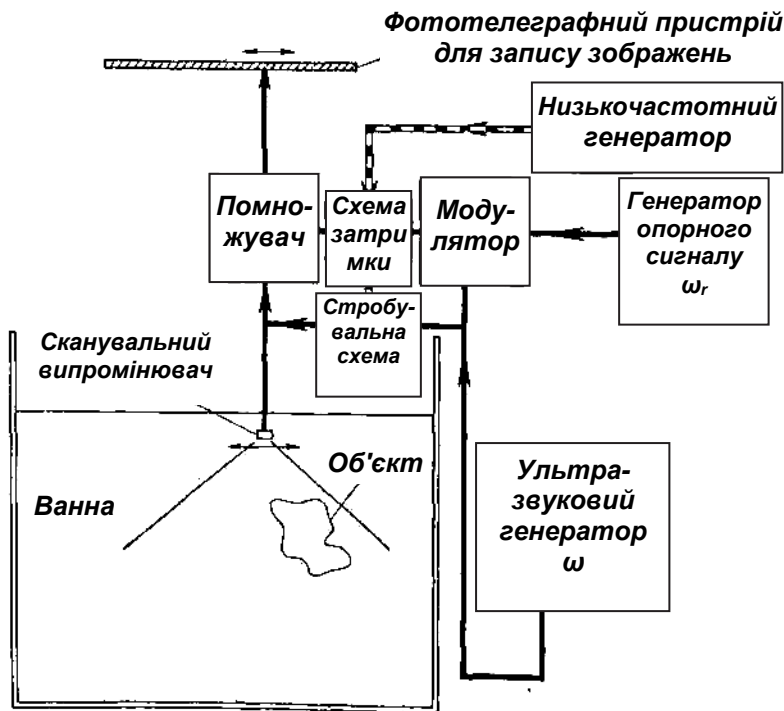


Рисунок 5.7 – Схема запису ультразвукової голограми методом синтезованої апертури

Сигнал з ультразвукового генератора надходить і до модулятора, з фототелеграфного пристрою для запису зображення, де створює, як і в попередньому випадку, електричний опорний сигнал, і на стробувальну схему, роль якої зводиться до формування з безперервного сигналу імпульсів тривалістю від 10 до 100 періодів несучої частоти. Імпульсний сигнал збуджує випромінювач, переміщення якого управляється

генератором низької частоти. Відбиті імпульси надходять на детектор, де вони перемножуються з частотою опорного сигналу, що пройшов через схему затримки. Процес синхронізується таким чином, що схема множення відмикається тільки на час, що дорівнює тривалості відбитих імпульсів. Час між моментом відмикання схеми затримки і початком випромінення імпульсу визначає глибину залягання шару, відбиття від якого надходить на множення; при цьому товщина самого контрольованого шару залежить від тривалості імпульсу. Продетектований сигнал оптично записується, і таким чином синтезується голограма шару.

Оскільки ультразвукова і оптична голографії мають багато спільного, коротко порівняємо їх.

Якщо оптична голографія, що має ефект об'ємності, дозволяє голографувати об'єкти висотою, наприклад 50 мм, і віддалені один від одного на відстань 50 мм, тобто відстань відповідає $\sim 10^6$ довжин хвиль, то при перерахунку для ультразвукової голографії, що працює на частоті 10 МГц, розміри об'єкта стануть ~ 1370 мм. Для ультразвукового імпульсу в 100 довжин хвиль на частоті 10 МГц роздільна здатність по дальності становить – 8,5 мм у воді й більше 25 мм у сталі, що в оптичному діапазоні еквівалентно мікроскопічній товщині близько 25 мм. З цього випливає, що отримання ультразвукового зображення при неруйнівному контролі має багато спільного з оптичною мікроскопією, і ультразвукова голограма відновлює досить плоске зображення. Ефект об'ємності виражений значно слабше, ніж в оптичній голографії.

Через складність обладнання ультразвукова голографія до теперішнього часу не знаходить широкого застосування. Однак в тих випадках, коли звичайні методи не мають успіху, застосування ультразвукової голографії зумовлено економічною необхідністю. Наприклад, при ультразвуковій голографії, що використовує імпульсні системи, можна контролювати об'єкт по окремих перетинах, розташованих послідовно один за одним, причому для кожного перетину окремо. Це полегшує інтерпретацію результатів контролю в порівнянні з іншими методами ультразвукової діагностики.

5.3 Метод акустичної емісії

Метод акустичної емісії оснований на виділенні та аналізі параметрів сигналів акустичної емісії. При контролі реєструються сигнали, що виникають при пластичній деформації ділянок контрольованого об'єкта.

Акустична емісія – це явище, яке виникає внаслідок звільнення енергії в твердих тілах, підданих пластичній деформації або зламу. Частина цієї енергії перетворюється в пружні хвилі, які розповсюджуються в матеріалі й можуть бути виявлені на його поверхні за допомогою високочутливих

перетворень.

Акустичні емісійні контрольовано-вимірювальні прилади мають дві особливі якості: здатність виявляти утворення або розвиток тріщини в часі і можливість безконтактного дистанційного контролю. Крім того, аналіз трьох і більше перетворень дає інформацію, достатню для визначення місця розташування сигналу.

Початковий пружно-пластичний імпульс є дискретним явищем і може розглядатися як точкове джерело. Поширення цих збурень в обмеженому середовищі призводить до деяких змін у сигналі, які і сприймаються перетворювачем. Цей сигнал називається «сигнал акустичної емісії».

Сигнали уловлюються перетворювачами, які завдяки своїм обмеженим розмірам, мають однакову чутливість у деякому діапазоні кутів. Уловлюються не тільки ті сигнали, які поширюються уздовж прямої, що з'єднує джерело емісії, а й сигнал, який через кінцеву товщину матеріалу може бути сумою багаторазових відбиттів від меж зразка.

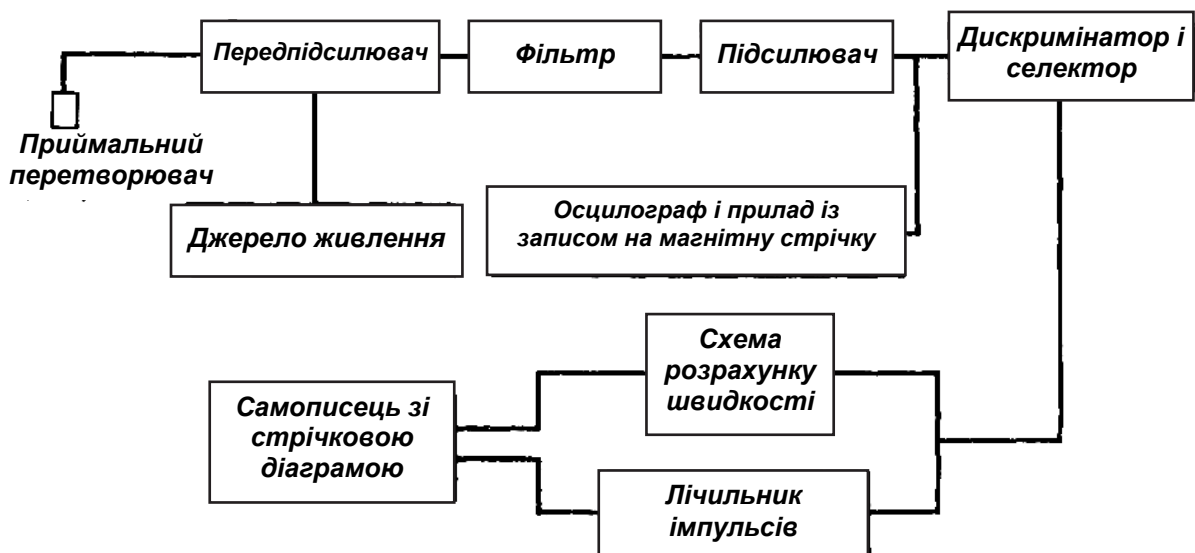


Рисунок 5.8 – Орієнтовна блок-схема емісійної випробувальної системи

Робота системи (рисунок 5.8) полягає в такому.

Сигнал з перетворювача подається на розташований по можливості ближче до перетворювача малoshумлячий передпідсилювач, потім сигнал пропускають через електронний фільтр для видалення небажаної низькочастотної інформації, далі сигнал надходить на підсилювач, після якого система ділиться на два канали: в одному каналі сигнал надходить до приладу для запису на магнітну стрічку з метою накопичення необроблених даних і на осцилограф для безперервного спостереження. По іншому каналу сигнал надходить на дискримінатор і селектор, і якщо сигнал перевищує визначену порогову напругу, то з'являється вихідна

напруга певної форми для подачі на схему рахунку швидкості та на підсумкову лічильну схему. Потім ці два параметри записуються на трековий самописець.

Відомо, що з підвищенням частоти різко зростає загасання в середовищі. При поширенні коливань з частотою вище декількох мегагерц їх амплітуда вже через кілька сантиметрів стане значно менше амплітуди більш низьких частот (рисунок 5.9).

Отже, імпульс акустичної емісії, що спочатку мав широкий спектр частот, фільтрується при проходженні через середовище, так що через декілька сантиметрів у ньому істотно переважають частоти менше декількох мегагерц. Однак на практиці важко використовувати низьочастотну (менше 1 МГц) частину спектра сигналу внаслідок гідравлічних шумів та інших перешкод. Тому найчастіше використовують вузькосмугові перетворювачі з центральною частотою 1 ... 2 МГц.

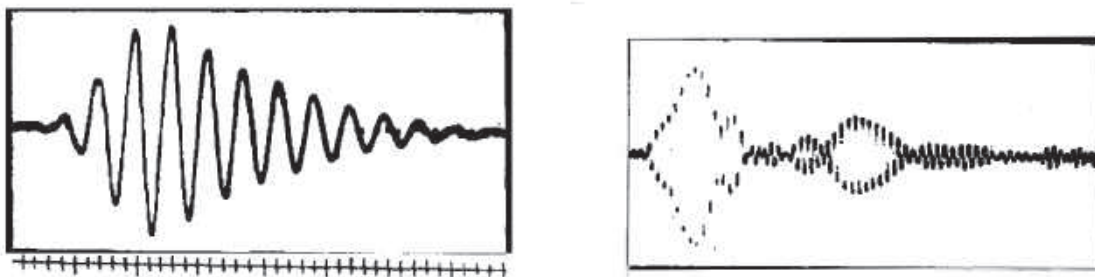


Рисунок 5.9 – Види сигналу акустичної емісії

Первинними характеристиками акустичної емісії є швидкість емісії і послідовний підрахунок загального числа спалахів. В якості робочих характеристик вивчаються висота і тривалість імпульсу сигналу. Ступінь досягнутої відповідності між параметрами акустичної емісії і зламу досить висока, що дозволяє використовувати метод з достатньою надійністю.

Акустична емісія є перспективним інструментом як для спостережень за структурною цілісністю, так і при вивченні видів розривів у матеріалі. Метод доцільно застосовувати для вирішення таких завдань:

- спостереження за ростом тріщин у процесі перевірочних випробувань резервуарів під тиском;
- постійний нагляд в експлуатаційних умовах за ділянками систем під напругою (тиском), в яких можуть утворитися тріщини;
- оцінювання якості зварних виробів з точки зору появи тріщин у процесі охолодження;
- вивчення особливостей росту втомних тріщин при різних умовах експлуатації (навантаження);
- проведення шумової діагностики технічного стану виробу.

5.4 Звукові методи

5.4.1 Імпедансний акустичний

В основу імпедансного акустичного методу контролю покладено реєстрацію величини акустичного імпедансу ділянки контрольованого об'єкта. Використовується залежність повного механічного опору (імпедансу) виробу від характеру зв'язку з'єднань його елементів між собою.

Зміна вхідного імпедансу контрольованої системи може оцінюватися по зміні амплітуди або фази реакції, що діє на датчик, який збуджує в системі пружні коливання (рисунок 5.10). Датчик (стрижень) 1 здійснює поздовжні коливання і, контактуючи з виробом 4, змушує його коливатися як єдине ціле. Механічний опір, який чиниться виробом стрижню, визначається жорсткістю системи: заповнювач (клей) 3, обшивка 2.

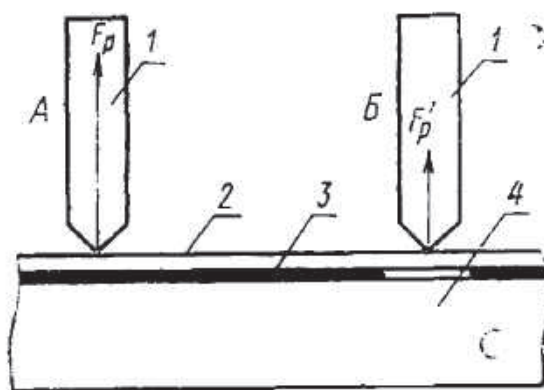


Рисунок 5.10 – Схема контролю якості склейки імпедансним методом

При контактуванні датчика з ділянкою конструкції А, де жорсткий зв'язок, сила реакції F_p виробу на стрижень значна. При положенні датчика в місці порушення жорсткого зв'язку Б, сила реакції буде менше - F'_p , що легко виявляється.

Дефект спричиняє також значний фазовий зсув. Тому, вимірюючи фазовий зсув між прийнятим сигналом і напругою збуджувального випромінювача генератора, виявляють дефекти по зміні фаз, що викликається ними. Імпедансний метод дозволяє виявляти зони порушення жорсткого зв'язку між елементами шарових конструкцій: розшарування, непростеї, непропаї, неповну полімеризацію.

5.4.2 Метод вільних коливань

Метод вільних коливань оснований на здатності збудження і подальшої реєстрації вільних коливань.

При заданих розмірах і формі виробу, однорідності матеріалу частота власних коливань є величиною визначеною. При наявності дефекту

(розшарування, раковини та ін.) параметри коливальної системи змінюються, це призводить до зміни частоти власних коливань.

Суть методу полягає в таких діях. Якщо тверде тіло, що володіє певною масою, пружністю і механічним опором, збудити різким ударом, то в ньому виникнуть власні (вільні) затухаючі коливання. Ці коливання мають певну частоту і змінюються, якщо контрольований виріб містить дефектні ділянки. Таким чином, збуджуючи у виробі пружні коливання і реєструючи його власні коливання, визначають наявність дефектів, що впливають як на величину амплітуди, так і на декремент їх загасання (рисунок 5.11).

Бойок датчика укріплений на якорі електромагніта 2. Б'ючи по поверхні контрольованого виробу 1 з частотою живлячого електромагніт змінного струму, він збуджує у виробі вільні коливання. Мікрофон 3 (п'єзоелемент) знаходиться на поверхні виробу, сприймає коливання і передає у вигляді електричних сигналів на підсилювач 4, на виході якого включені аналізатор 5 й індикатор. У найпростіших приладах як аналізатор використовують реле, а як індикатор – сигнальну лампу. Якщо датчик потрапляє на ділянку непроклею, то амплітуда збуджених у виробі коливань падає, сигнал на виході підсилювача зменшується, реле спрацьовує, і загоряється сигнальна лампа. Цей метод доцільно використовувати при виявленні місць порушення жорсткості, зокрема, відсутності зв'язку між шарами багат шарових матеріалів, а також внутрішніх дефектів у масивних виробках.

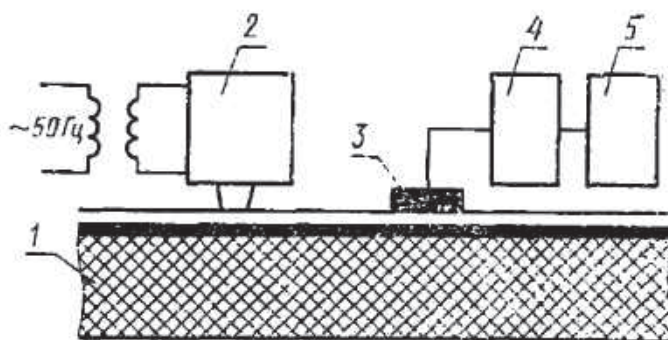


Рисунок 5.11 – Схема контролю якості склеювання методом вільних коливань

6 ОПТИЧНІ МЕТОДИ КОНТРОЛЮ

Оптичний неруйнівний контроль оснований на реєстрації параметрів оптичного випромінювання – електромагнітного випромінювання в діапазоні довжин хвиль $10^{-5} \dots 10^3$ мкм.

Око людини, озброєне при необхідності лінзою або мікроскопом, виявляється досить ефективним інструментом для безконтактного виявлення всіляких поверхневих порушень [7].

6.1 Візуально-оптичні методи контролю

Візуально-оптичні методи контролю (візуальний контроль за допомогою оптичних приладів) доцільно використовувати при:

- виявленні поверхневих дефектів типу тріщин, корозійних і зносних ушкоджень, відкритих раковин, пор та ін.
- пошуку місць руйнування конструкції, течі, забруднень;
- аналізі характеру і причин поверхневих дефектів, виявлених якимось іншим методом контролю;
- виявленні відхилень форми і розмірів деталей;
- перевірці якості обробки поверхні, її відбивності, колірних характеристик деталей.

При візуально-оптичному контролі оптичні прилади, що застосовуються, повинні забезпечувати необхідну кратність збільшення і добру контрастність зображення.

Розрізняють три групи приладів, заснованих на принципах геометричної оптики: візуальні, детекторні та комбіновані.

До *візуальних приладів* відносять оглядові прилади, мікроскопи, лупи, ендоскопи та широкий клас приладів для вимірювання кутових, лінійних та інших розмірів і величин. Приймачем інформації є око.

У *детекторних приладах* приймачем променистої енергії є всілякі детектори: речовини, що люмінесцують, хімічні реагенти, наприклад фотоемульсії, електронні прилади та ін.

Комбіновані прилади використовують поєднання оптичних систем з електричними і електронними приладами.

6.2 Голографічні методи

6.2.1 Принцип роботи лазера

Лазер – це джерело електромагнітного випромінювання видимого, інфрачервоного та ультрафіолетового діапазонів, оснований на вимушеному випромінюванні атомів і молекул. Слово "лазер" складено з початкових літер слів англійської фрази "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation", що означає "посилення світла в результаті вимушеного випромінювання". У вітчизняній літературі часто вживається замість слова "лазер" – оптичний квантовий генератор (ОКГ).

Відповідно до квантової теорії енергія елементарних випромінювачів може змінюватися тільки стрибками, кратними деякому значенню, постійному для даної частоти випромінювання. Мінімальна "порція" енергії називається квантом енергії.

При цьому випромінювання розглядається як потік елементарних неподільних частинок з нульовою масою і кінцевою енергією, яким

присвоєно назву фотона.

Будь-яка мікросистема включає в себе молекули, атоми, іони і електрони, рух і орієнтація яких відповідають дискретному ряду енергії - енергетичним станам (рівням).

Перехід з вищого рівня на нижчий пов'язаний з втратою енергії, яка виділяється у вигляді порції або кванта.

Якщо рівні розділені значною відстанню, то частота ν велика і випромінювання можливо у видимому або ультрафіолетовому діапазоні. Якщо рівні розташовані близько, то частота ν мала і випромінювання випускається в інфрачервоному або мікрохвильовому (НВЧ) діапазоні.

Щоб атом або молекула могли випускати випромінювання, вони попередньо мають бути підняті на вищий енергетичний рівень, тобто повинні бути збуджені. Існують різні способи збудження, один з них – збудження в результаті поглинання випромінювання (рисунок 6.1). Якщо випромінювання, що падає іззовні, має частоту ν , відповідну енергії збудження, тобто якщо кванти випромінювання $h\nu$ мають енергію, що дорівнює $W_2 - W_1$, то атом або молекула переходить з рівня W_1 на рівень W_2 з поглинанням кванта випромінювання. В цьому і полягає принцип поглинання. Збуджений атом або молекула можуть самі повернутися до початкового стану, випромінюючи квант енергії. Це акт спонтанного випромінювання.

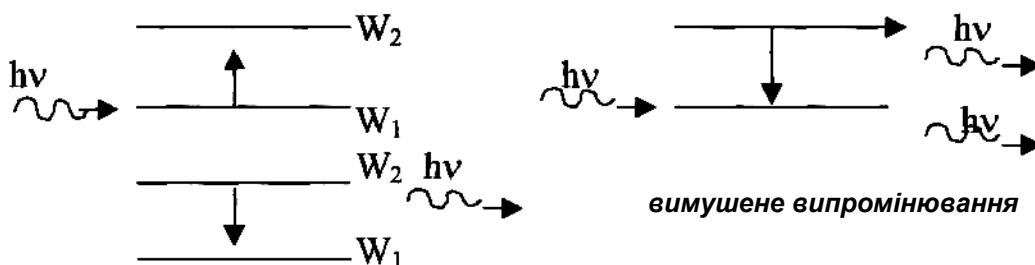


Рисунок 6.1 – Принцип вимушеного випромінювання

Квант випромінювання $h\nu$, якщо його енергія дорівнює $W_2 - W_1$ і якщо його атом або молекула знаходяться в збудженому стані W_2 , переводить електрон на нижчий енергетичний рівень W_1 , спричиняючи емісію такого ж кванта випромінювання $h\nu$ при вимушеному випромінюванні. В результаті з одного кванта виникає два за рахунок енергії збудженого атома або молекули.

Розглянемо роботу широко використовуваного He – Ne лазера $\lambda = 6328 \text{ \AA}$ (0,6328 мкм). Схему пристрою наведено на рисунку 6.2.

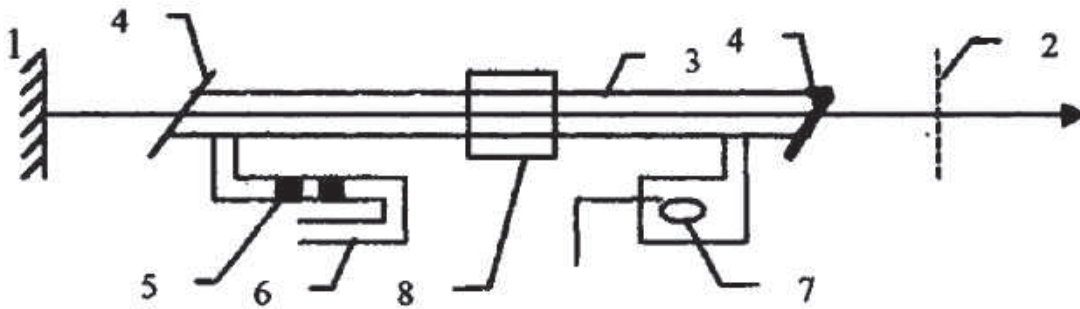


Рисунок 6.2 – Схема He-Ne лазера: 1 – глухе дзеркало; 2 – напівпрозоре дзеркало; 3 – кварцова трубка, заповнена He-Ne сумішшю; 4 – вихідні торці, розташовані під кутом Врюстера (під кутом внутрішнього відображення); 5 – катод; 6 – накал катода; 7 – анод; 8 – підпалювальний електрод

Кварцова трубка наповнена розрядженим гелієм з домішкою неону. Через суміш цих двох газів пропускають електричний розряд. Розігнані електрони збуджують атоми гелію до енергетичного рівня 2S, який є метастабільним (рисунок 6.3).

Атоми гелію, перебуваючи в збудженому стані, беруть участь у тепловому русі й час від часу стикаються з атомами неону, надаючи їм свою енергію і збуджуючи їх. Рівень 3S є довготривалим, тому велике число атомів неону заселяють збуджений рівень 3S. Коли число атомів на рівні 3S перевищить число атомів на рівні 2P, тоді і відбудеться лазерний ефект, тобто відбудеться виділення цуга хвилі.

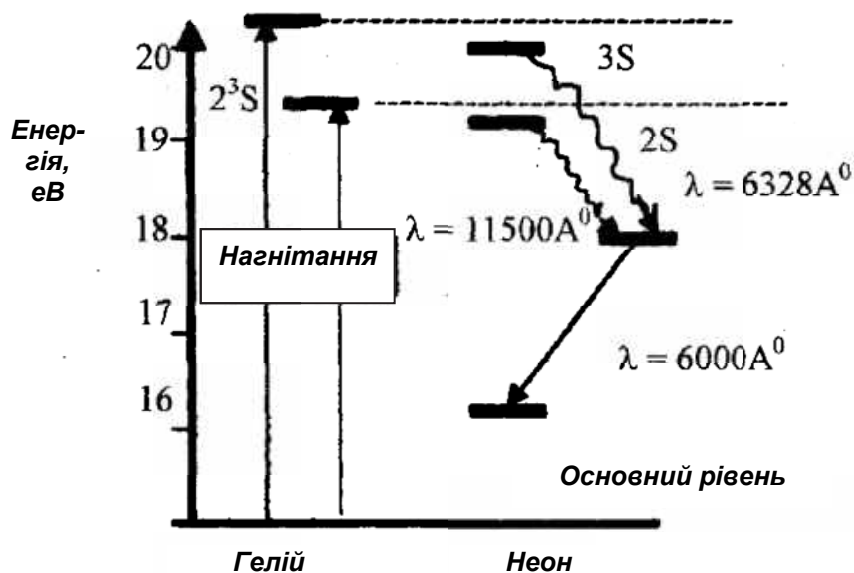


Рисунок 6.3 – Діаграма енергетичних рівней He-Ne лазера

Згідно електромагнітної теорії, коливання, що створюються атомами світлового джерела, не тривають необмежено в часі. Атоми випромінюють "цуги" хвиль, причому довжина хвильового цуга і спектральний склад випромінюваного світла пов'язані між собою. Чим довший хвильовий цуг, тим більш вузький спектр. Цуги хвиль зображують у вигляді відрізків синусоїд.

Основними властивостями лазерного випромінювання є висока когерентність і малий кут розбіжності.

Когерентність – це узгоджене в часі протікання декількох коливальних процесів, що проявляються при їх складанні. Коливання називаються когерентними, якщо різниця їх фаз залишається постійною в часі і при складанні коливань визначає амплітуду сумарного коливання.

Розрізняють часову і просторову когерентність.

Часова когерентність – це ступінь монохроматичності.

Величина просторової когерентності пов'язана прямо пропорційно зі збільшенням розмірів джерела і обернено пропорційно з відстанню від джерела до місця реєстрації.

6.2.2 Основні принципи голографії

Голографія – це нова галузь науки, що має досить широку область застосування. В основному голографія практикується як метод реєстрації довільного коливального процесу, що дозволяє зафіксувати як амплітуду, так і фазу коливань, а потім відтворити їх у будь-який зручний момент часу. Це істотно відрізняє голографію від звичайних способів реєстрації, що здійснюються в фотографічних матеріалах, фотоелектричних приймачах і т. п., які можуть реагувати тільки на інтенсивність (або квадрат амплітуди) коливання.

Вся інформація про форму об'єкта міститься в складній світловій хвилі, що розсіюється об'єктом при його освітленні. Голографічний процес дозволяє реєструвати цю форму на голограмі в незмінному вигляді. Таким чином в будь-який інший час після цього часу форма об'єкта може бути відтворена і використана як тривимірний шаблон, з яким можна порівнювати довільно малі вимірювання форми реального об'єкта.

У голографії реєструються амплітуда і фаза всієї хвилі, що розсіюється поверхнею об'єкта, на деякій відстані від нього, причому реєструються таким чином, що ці ж амплітуда і фаза можуть бути відтворені у будь-який інший час після цього часу.

Відомо, що фотографічні пластинки або інші приймачі, чутливі тільки до інтенсивності та нечутливі до фази.

Тобто інформація про фазу світлової хвилі безслідно губиться. У зв'язку з цим у голографії використовують спеціальний спосіб реєстрації

фазової інформації. Такий спосіб реалізується шляхом реєстрації результату інтерференції хвилі, що йде від об'єкта з простою плоскою або сферичною хвилею.

Основну схему голографічного процесу показано на рисунках 6.4 і 6.5.

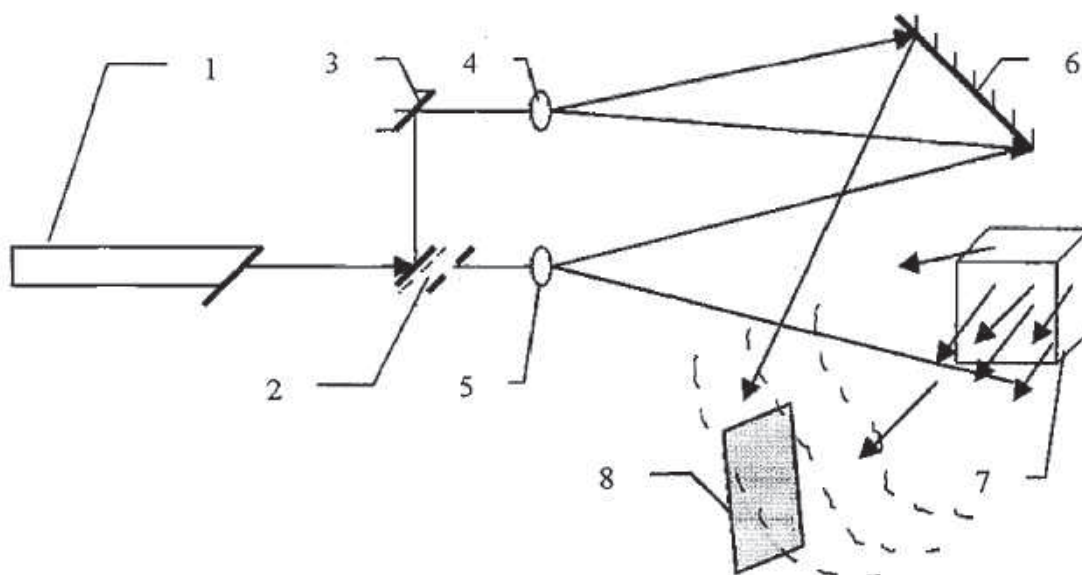


Рисунок 6.4 – Голографічний запис за Е. Лейтом і Ю. Упатнієксом:
 1 – лазер; 2 – дільник світлового пучка; 3 – дзеркало; 4, 5 – розширювачі випромінювання; 6 – дзеркало; 7 – об'єкт; 8 – реєструвальне середовище

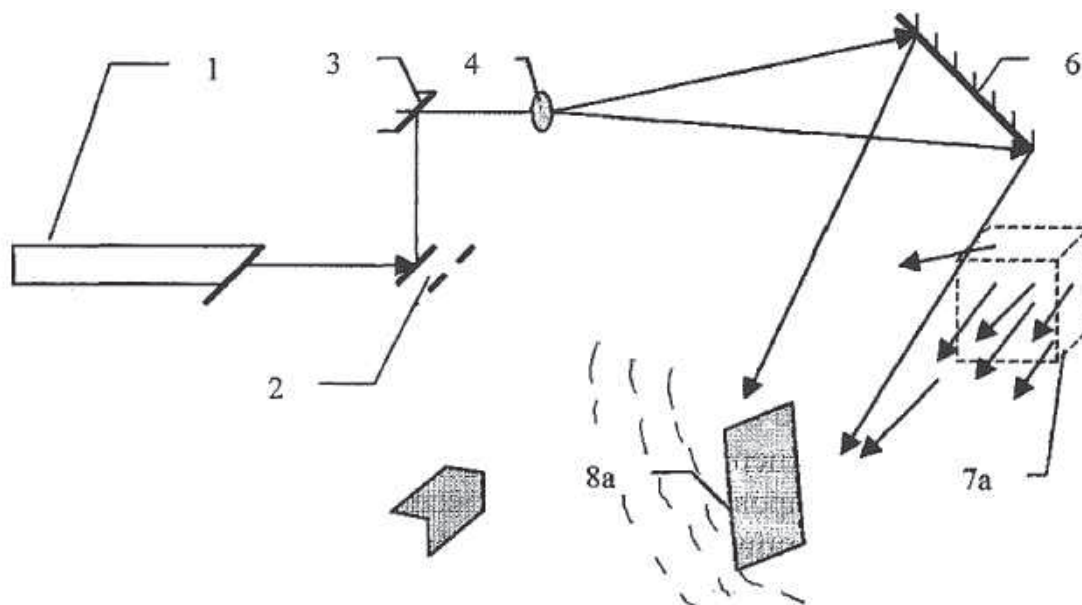


Рисунок 6.5 – Голографічне відновлення зображення:
 7а – уявне зображення об'єкта; 8а – голограма

Почорніння фотографічної пластини визначається кількістю падаючого на неї світла. Якщо припустити, що ампліудне пропускання

обробленої фотопластинки пропорційно інтенсивності хвилі, що падає на неї, а це справедливо, коли запис відбувається на лінійній ділянці почорніння фотоемульсії. Якщо тепер голограму освітити опорним пучком, то отримаємо відновлене поле.

Слід зазначити, що спрощена математична модель голографічного процесу запису і відновлення не описує ряд важливих факторів, що впливають на процес запису і відновлення. Деякі з них:

- 1) вплив поляризації;
- 2) вплив когерентності (рівність шляхів);
- 3) вплив нелінійності та ін.

Таким чином, у будь-який момент часу форма об'єкта може бути відтворена і використана як тривимірний шаблон, з яким можна порівнювати досить малі вимірювання реального об'єкта.

6.2.3 Деякі особливості голографічного процесу

1. Глибина сцени, що голографується, пов'язана з довжиною когерентності лазерного випромінювання, так як утворювати стабільну інтерференційну картину можуть тільки хвилі одного цуга. Зазвичай довжина когерентності випромінювання для газових лазерів – це кілька десятків см.

2. Голографічна інтерференційна картина має дуже дрібну структуру. Тому для її реєстрації необхідні високороздільні реєструючі середовища. Роздільність реєструючих середовищ для різних схем запису голограм має бути 1000 ... 5000 лин/мм.

3. Так як час реєстрації голограм досить великий (до декількох секунд) через недостатні потужності лазера і низьку чутливість реєструвальних середовищ, необхідний віброзахист голографічних установок.

4. Інформація про об'єкт на голограмі реєструється в кожній її точці, тобто якщо голограму розбити, то кожен її шматочок буде відновлювати повне зображення об'єкта. Цю властивість голограми використовують для виготовлення голографічних масок інтегральних схем. Така маска не боїться подряпин, забруднень і т.д.

5. На одному реєструвальному середовищі можна записати безліч зображень, змінюючи кут падіння опорної і предметної хвиль.

6.2.4 Методи голографічної інтерферометрії

За допомогою голографічних методів (рисунок 6.6) можна здійснювати порівняння геометричних форм об'єкта в різні моменти часу. Причому для голографії неважливо, в результаті яких впливів відбулася зміна форми (механічних, теплових, магнітних або якихось інших).

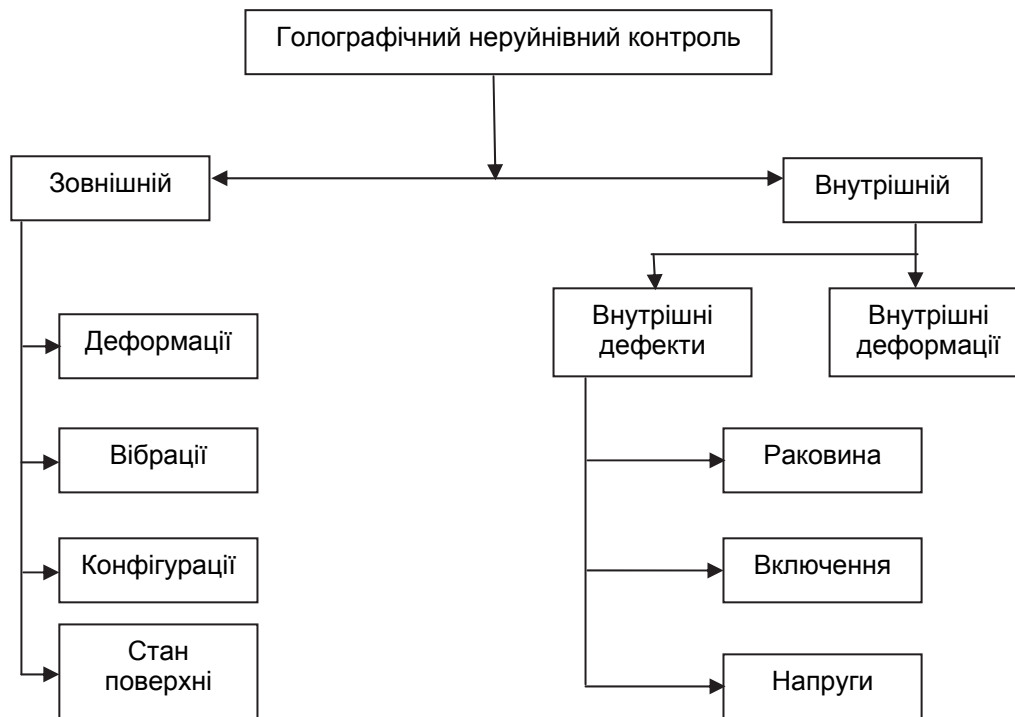


Рисунок 6.6 – Схема основного застосування голографічного неруйнівного контролю

Припустимо, що в початковий момент на голограмі була зафіксована предметна хвиля, згідно з рисунком 6.4, що характеризує об'єкт 7 у деякому початковому стані. Перервавши експозицію фоточутливого середовища і не прибираючи його з голографічної схеми, впливаємо на досліджуваний об'єкт, наприклад, дочекаємося, коли в результаті теплових полів відбудеться формозміна об'єкта. Припустимо, що зміни відбулися уздовж осі X; тоді при другому експонуванні предметна хвиля повільно змінюється, відображаючи досліджувані малі вимірювання, що сталися з об'єктом.

Аналогічно тому, як це було при однокспозиційній голографії, висвітливо голограму опорною хвилею.

Зображення об'єкта, відновлене з голограми і зазнавши такі зміни між експозиціями, які привели до зміни фази розсіяного світла, виявляється промодульованими інтерференційними смугами.

Такий метод голографічного порівняння двох станів об'єкта називається методом двох експозицій. В наш час відомо три методи голографічної інтерферометрії: метод двох експозицій, метод реального часу (живих смуг) та метод усереднення.

Метод двох експозицій оснований на послідовній реєстрації двох голограм предмета, що знаходиться в двох різних станах, на одне й те ж реєструюче середовище при рівних умовах (відмінність в умовах полягає лише в тому, що між експозиціями об'єкт піддається впливу, що приводить

до зміни його геометрії (для відбивавальних об'єктів) або зміни показника заломлення (для випадку прозорих об'єктів).

Метод живих смуг. Якщо помістити голограму (однієї експозиції) на те саме місце, де вона експонувалася, а предмет прибрати, то відновлена світлова хвиля, розсіюється предметом під час експозиції. Якщо предмет не прибрати, то можна спостерігати дві хвилі: одна з яких йде від об'єкта, інша - відновлена голограмою. Ці хвилі когерентні. Якщо ми будемо впливати на об'єкт так, що відбудуться геометричні зміни, то хвилі в силу своєї когерентності будуть інтерферувати, тобто зображення об'єкта виявиться пересіченим інтерференційними смугами, що характеризують ці мікрозміни. Таким чином, вдається змусити інтерферувати дві світлові хвилі, що існують у різний час. До винаходу голографії це було неможливо.

Метод усереднення (застосовується для дослідження вібрацій). Цей метод оснований на тому, що вібруючі точки об'єкта за час експозиції набагато більший періоду коливань у крайніх точках знаходяться більше часу, ніж у проміжних положеннях.

6.2.5 Основні схеми отримання голограм

Однопроменева схема (рисунок 6.7) використовується для отримання тінювих зображень дрібних нерухомих і рухомих частинок в аерозолях, двофазних потоках і т.п., при концентрації частинок до 10 ... 15 % і розмірах до 500 мкм. Переваги цієї схеми: ефективне використання променевого лазера, невисокі вимоги до тимчасової і просторової когерентності, допускаються реєстручі середовища з невеликим розділенням (200 ... 300 лин/мм), що володіють високою чутливістю.

До недоліків можна віднести: локалізацію відновлених зображень в нульовому порядку дифракції, чутливість до дефектів голограми.

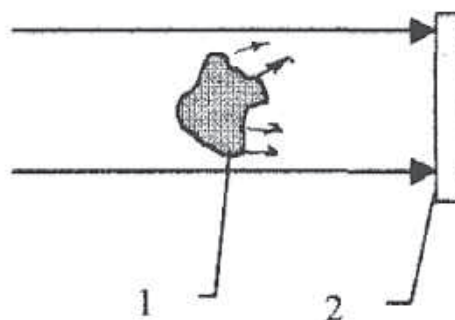


Рисунок 6.7 – Однопроменева схема: 1 – об'єкт досліджень;
2 – реєструвальне середовище

Двопроменева схема з похилим опорним пучком широко використовується для отримання об'ємних зображень дифузно відбивавальних об'єктів з кутом огляду 180°. При дифузійному

підсвічуванні вона дозволяє отримувати об'ємні зображення дзеркально відбивавальних і прозорих об'єктів. При імпульсному випромінюванні схема дозволяє голографувати відбивальні об'єкти, що переміщуються з великою швидкістю. Для прозорих об'єктів обмеження щодо швидкості практично відсутнє.

Переваги цієї схеми; відновлені зображення рознесені по куту; можливість використання дифузного освітлення, що приводить до відсутності впливу дефектів голограми на якість зображення і дозволяє отримувати об'ємні зображення дзеркально відбивальних і прозорих об'єктів; можливість дослідження відновлених зображень традиційними оптичними методами.

Недоліки: більш складна схема, ніж попередня (потрібні елементи для поділу світлових пучків і вирівнювання їх шляхів); потрібні реєструвальні середовища з великим розділенням (до 3000 лін/мм), які мають малу чутливість, і в зв'язку з цим при використанні лазерів з безперервним випромінюванням потрібен віброзахист голографічної схеми, більш того, підвищуються вимоги до потужності й когерентності випромінювання лазера. Схема у зустрічних пучках (рисунок 6.8) дозволяє отримувати об'ємні зображення, відновлювані в білому світлі.

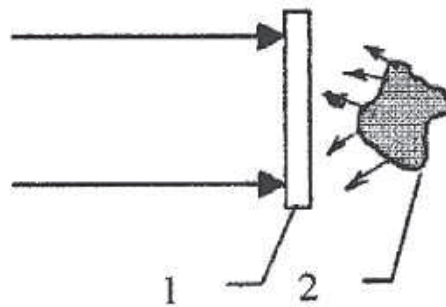


Рисунок 6.8 – Схема у зустрічних променях

Переваги такої схеми: отримання зображень, відновлюваних у немонохроматичному світлі; відновлюється єдине зображення (уявне або дійсне).

Недоліки: необхідні реєструючі середовища з високою роздільною здатністю (близько 5000 лін/мм) і малою усадкою емульсії після прояву.

Схема отримання голограм сфокусованих зображень (рисунок 6.9) застосовується для отримання плоских об'єктів транспарантів, відновлюваних у білому світлі. Переваги цієї схеми: невисокі вимоги до просторової когерентності лазера, мала чутливість до вібрацій при зйомці голограм.

Недоліки: мала глибина сцени; чутливість до дефектів голограми; аберації оптичної системи впливають на відтворене зображення.

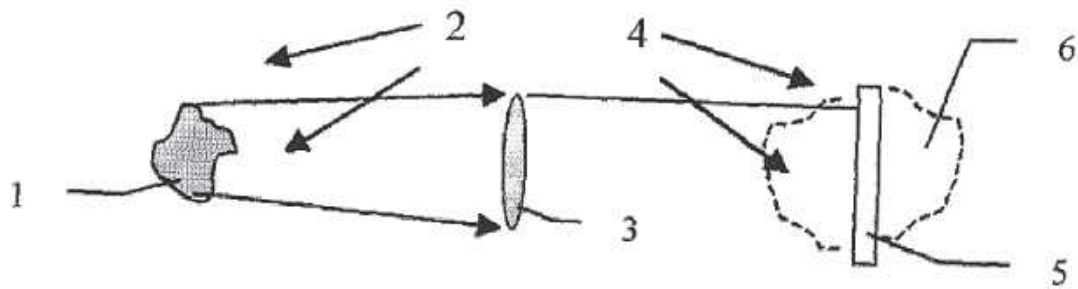


Рисунок 6.9 – Схема отримання голограм сфокусованих зображень:
 1 – об'єкт досліджень; 2 – пучок лазерного світла, що висвітлює об'єкт;
 3 – фокусувальна лінза; 4 – опорний пучок; 5 – реєструвальне середовище; 6 – зображення плоских об'єктів

6.3 Спекл-інтерферометричний метод

Метод спекл-інтерферометрії базується на подвійному фотографуванні спекл-структури дифузно-відбивального об'єкта, освітленого когерентним випромінюванням (рисунок 6.10).

Спекл-структура зображення відбувається в результаті дифракції світла на обмеженій апертурі оптичного інструменту (зокрема, об'єктива, лінзи).

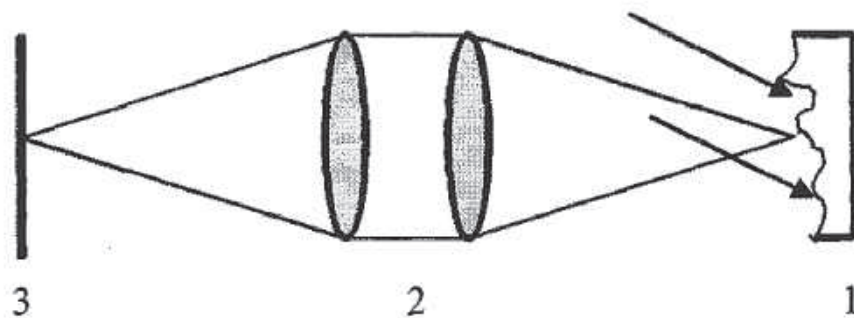


Рисунок 6.10 – Схема запису спекл-фотографій: 1 – дифузно відображає об'єкт дослідження; 2 – фокусує об'єктив; 3 – реєструвальне середовище

Якщо об'єкт досліджень сфотографувати один раз на реєструвальне середовище до прикладання збурювальних сил, а потім, не змінюючи параметрів схеми і місця розташування реєструвального середовища, сфотографувати вдруге після прикладання до об'єкта збурювальних сил, то на реєструвальному середовищі зафіксується двічі експонована спекл-фотографія.

Якщо цю спекл-фотографію після оброблення просвітити в точці нерозведеним променем, то на екрані буде висвітлено систему інтерференційних смуг, що характеризує величину і напрямок зсуву відповідної точки поверхні об'єкта.

Методи голографічної інтерферометрії, що дозволяють порівняти з точністю до амплітуди і фази хвилі, що розсіюються тривимірним об'єктом, у двох станах (до і після прикладення збурювальних сил), мають високу чутливість, добру роздільну здатність, великий обсяг інформації на одному матеріальному носії, наочністю і т. д. Однією з основних причин, що гальмують процес широкого впровадження цих методів у виробництво, є складність, трудомісткість, у ряді випадків неоднозначність інтерпретації інтерференційних картин, що одержуються при вимірах. Методи спекл-інтерферометрії, основані на подвійному фотографуванні спекл-структури дифузно відбивальної когерентне випромінювання поверхні, характеризуються високою точністю, простотою реалізації, зниженими вимогами до когерентності джерел випромінювання, механічної стабільності установки, роздільної здатності реєструвальних середовищ і т. ін. Одним з головних переваг спекл-інтерферометрії у порівнянні з голографічною інтерферометрією є простота кількісного розшифрування і відсутність принципових труднощів її автоматизації (рисунок 6.11).

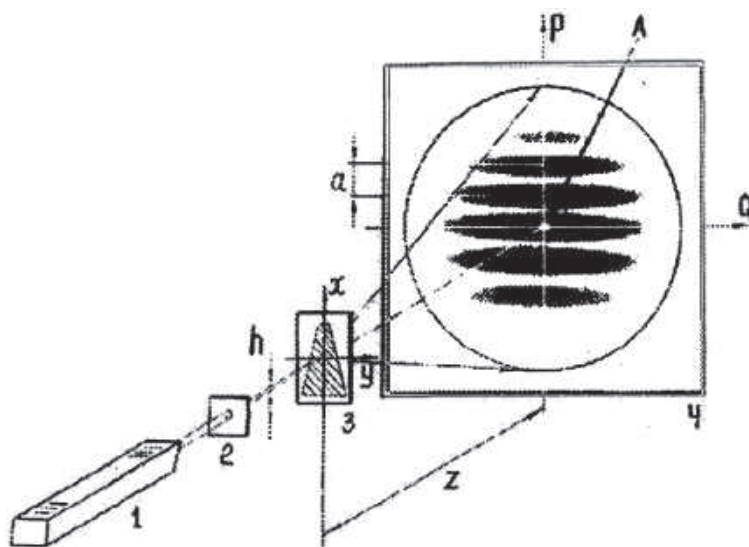


Рисунок 6.11 – Схема кількісної оцінки двічі експонованих спекл-фотографій: 1 – лазер; 2 – діаграма; 3 – двічі експонована спекл-фотографія; 4 – екран; 5 – негатив; a – крок інтерференційних смуг; Z – відстань між спекл-фотографією і екраном

Вочевидь, що переваги одного з методів компенсують недоліки іншого. Таким чином, має безперечний інтерес розробка методів, здатних поєднувати переваги голографічного і спекл-інтерферометрії.

6.4 Інтерферометричний метод

Інтерферометрію і її засоби застосовують для прецизійних вимірювань у різних областях машинобудування. В експериментальній механіці визначилися декілька напрямків, де цей метод знайшов ефективне застосування. Відзначимо основні напрямки: вимірювання поперечних деформацій і переміщень з точністю, яка визначається довжиною монохроматичного світла (оптична інтерферометрія слабозігнутих поверхонь); вимірювання форми, рельєфу і визначення якості поверхонь (лазерна і голографічна інтерферометрія); оптична і голографічна інтерферометрія в фотопружності; дослідження форм і частот об'єктів, що коливаються (голографія); вимірювання деформацій на натурних об'єктах (безбазова спекл-голографія).

Схеми основних методів спекл-голографічної інтерферометрії зображені на рисунку 6.12.

Відомі класичні схеми інтерферометрів Фарби – Перро, Маха – Цендера, Майкельсона, Посту основані на отриманні різниці ходу двох когерентних хвиль від загального джерела монохроматичного світла, які на деякій відстані від джерела інтерферують, тобто підсилюють або гасять одна одну. Так, при проходженні паралельних променів через прозору пластину відбувається часткове відбиття від першої і другої поверхонь (рисунок 6.13).

На виході з пластини інтерферують проникні промені C і D або відбиті A і B. Проникні промені інтерферують значно слабкіше, ніж відбиті, але інтерференцію можна посилити, наносячи на поверхню напівпрозоре дзеркальне покриття. Промені посилюються в тих точках, де різниця ходу двох відбитих променів або променів, які пройшли крізь пластину різними шляхами, виявляється кратною довжині хвилі.

Раніше на інтерферометрі зі звичайною ртутною лампою і введенням в одне з плечей інтерферометра елементів кругового полярископа Нізіда і Сато також отримали суми і різниці головних напружень як сполучені картини ізопах та ізохром.

Розділення смуг досягається в контактних задачах високою когерентністю He-Ne – лазера і застосуванням іммерсії, причому досліджуване поле має значний розмір (170x170), тоді як при ртутній лампі система дозволяла досліджувати поле 80x80 мм. Трудомісткість виконання цього дослідження традиційними методами з чисельним поділом головних напружень непорівнянна з трудомісткістю ефективного поляризаційно-інтерферометричного дослідження.

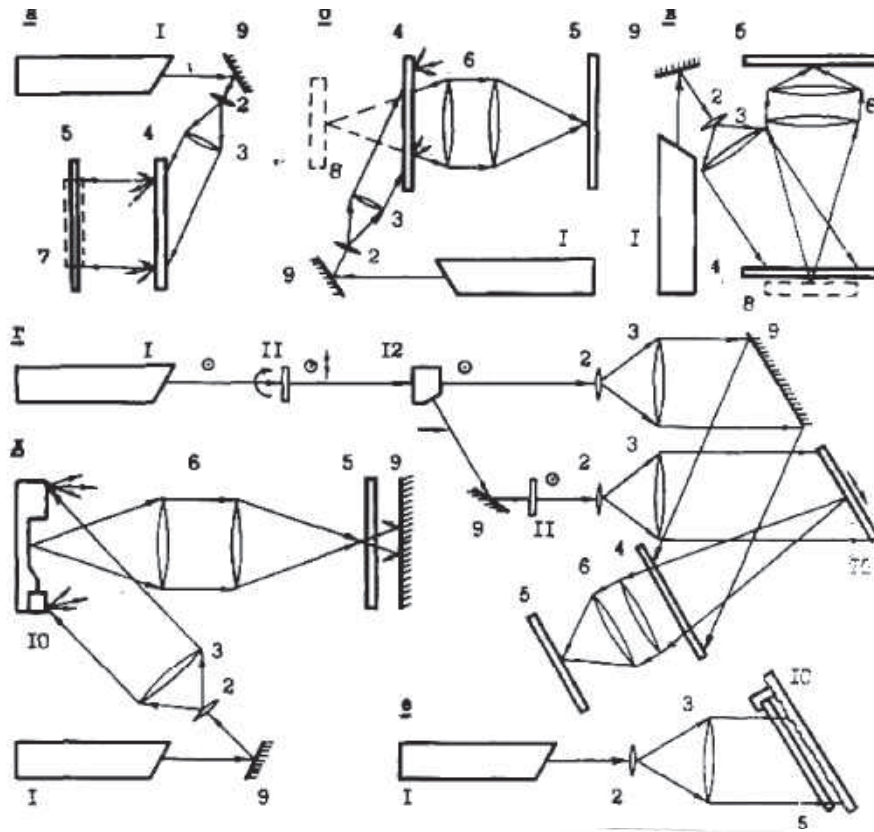


Рисунок 6.12 – Схеми основних методів спекл-голографічної інтерферометрії: I – запис спекл-інтерферограми з відновленою двічі експонованою голограмою з похилим опорним пучком: а – дійсних зображень; б – уявних зображень; в – відновлених голограмою у зустрічних пучках уявних зображень; г – запис спекл-інтерферограми при дослідженнях у реальному масштабі часу; II – одночасний запис спекл-інтерферограми і голограм подвійної експозиції у зустрічних пучках: д – для об'єктів складної форми; е – для плоских об'єктів; 1 – лазер; 2 – об'єктив; 3 – колімуюча лінза; 4 – двічі експонована голограма; 5 - реєструвальне середовище; 6 – фокусувальний об'єктив; 7 – відновлені дійсні зображення; 8 – відновлені уявні зображення; 9 – дзеркало; 10 – об'єкт досліджень; 11 – півхвильові пластинки; 12 – призма Фріка – Ріттера

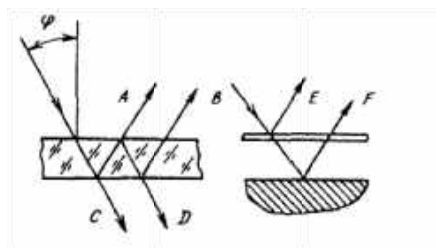


Рисунок 6.13 – Схеми інтерферувальних променів

На рисунку 6.14 зображена схема установки з гелієво-неоновим лазером, на якій вирішено ряд завдань.

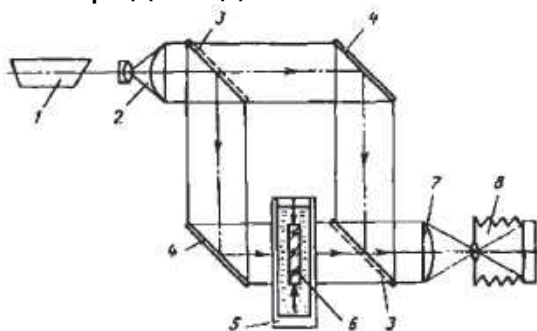


Рисунок 6.14 – Схема інтерферометра Маха – Цендера – Різдвяного для дослідження фотопружних моделей: 1 – лазер; 2 – розширювач-коліматор; 3 – світлоподільник; 4 – відбивачі; 5 – кювета з плоскопаралельними стінками; 6 – модуль; 7 – коліматор; 8 – камера

6.5 Поляризаційно-оптичні методи

6.5.1 Метод прозорих об'єктів або моделей

Багато оптично прозорих матеріалів (скло, полімери, кристали), ізотропні в звичайних умовах, стають анізотропними після механічного навантаження. При проходженні світла в них виникає подвійне променезаломлення, величина якого характеризує ступінь напруженого стану контрольованого об'єкта.

Подвійне променезаломлення – це оптична властивість кристалів. При проходженні світла через прозору кристалічну середу світловий промінь розкладається на дві взаємно перпендикулярні плоскополяризовані складові, що поширюються всередині кристала з різною швидкістю. Ці два промені часто називають звичайним і незвичайним променями.

Внутрішню напругу визначають за допомогою полярископа (рисунок 6.15).

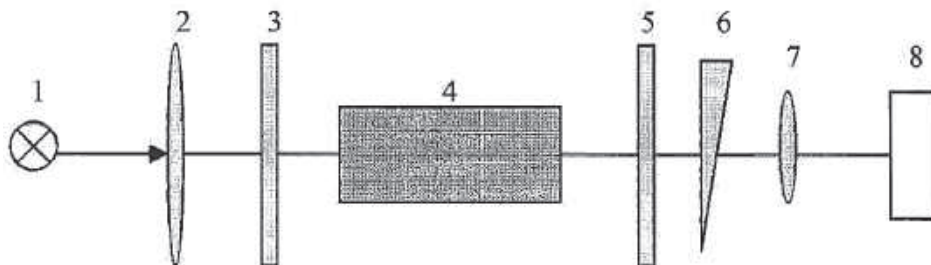


Рисунок 6.15 – Схема полярископа для контролю внутрішніх напруг у прозорих об'єктах: 1 – джерело світла; 2 – конденсатор; 3 – поляроїд; 4 – об'єкт; 5 – аналізатор; 6 – поляризаційний компенсатор; 7 – окуляр; 8 – спостерігач

Аналізатор приводить коливання звичайного і незвичайного променів в одну площину і створює умови для їх інтерференції. При цьому на екрані видно систему темних і світлих смуг, відповідних різниці ходу звичайного і незвичайного променів.

Порядок смуги визначається на підставі спостереження за картиною інтерференції в процесі зростання навантаження. У білому світлі видно кольорові смуги, і процес вимірювання полягає в оцінці кольору поля після введення контрольованого об'єкта і його зіставлення з кольором тарировальної таблиці.

У схрещеному положенні поляроїдів 3 і 5 (налаштування на темряву) по всьому полі моделі спостерігають дві системи смуг як результат інтерференції. При цьому видно систему смуг-ізохром, що залежить від величини навантаження (напруги), що визначається різницею ходу, а також систему чорних смуг ізоклін, що залежить від положення поляроїдів, здатних у полярископі повертатися в схрещеному положенні на будь-який кут, відлічуваний, наприклад, від гравітаційної осі.

Широке застосування для контролю серійної продукції на заводах і для науково-дослідницької роботи знайшли полярископи великого поля огляду з дифузним освітлювачем.

Полярископ (рисунок 6.16) складається з освітлювача 1, в якому застосовані U-образні лампи денного світла з алюмінієвим відбивачем і матовим дифуззором, поляроїдів з лімбами на зовнішній циліндричній поверхні оправи, які обертаються незалежно один від одного, чвертьхвильових пластинок 3, діафрагми 5 і зеленого (червоного) світлофільтру 6, що підвищує контраст для спостереження і зйомки смуг. Камера 7 має затвор з діафрагмою. Призначення полярископа великого поля – дослідження великих моделей методом смуг; він оснащений висувною твердою рамкою з декількома силовими електроприводами постійного струму.

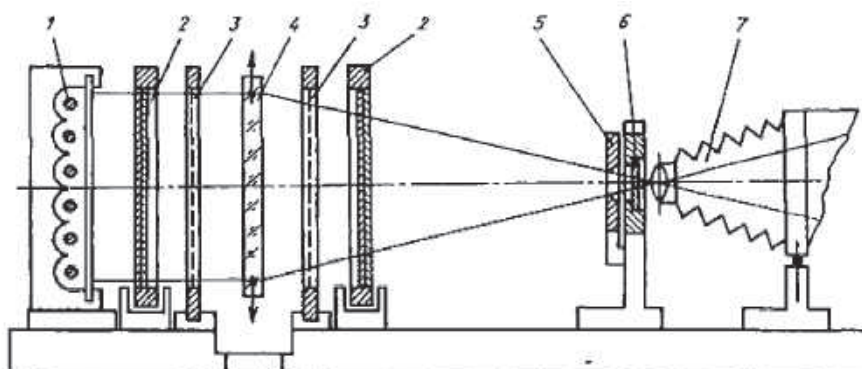


Рисунок 6.16 – Схема полярископа великого поля огляду з дифузійним освітлювачем

6.5.2 Метод фотопружних покриттів

Якщо надійно приклеїти тонке покриття з фотопружного матеріалу до деформованої деталі з металу або іншого непрозорого матеріалу, то в цьому покритті у відбитому поляризованому світлі будуть спостерігатися ізохрами і ізокліни, як при наскрізному просвічуванні моделі. Число смуг через малу товщину покриття буде невеликим, колірна гамма їх у білому світлі буде яскравою, характерною для перших порядків смуг. Зазвичай застосовують фотопружні покриття товщиною 0,5 ... 2 мм і при пружному деформуванні металів отримують, як правило, не більше чотирьох смуг. Особливістю методу фотопружних покриттів є можливість вивчення пружно і пластичних деформацій на натурних матеріалах.

Конструкції відбивних полярископів побудовані за Т- і V-подібними схемами (рисунок 6.17).

Недоліком Т-образної схеми є деяка втрата освітленості при проходженні напівпрозорого дзеркала. Недоліком V-образної схеми є похибки похилого падіння і відбиття променів.

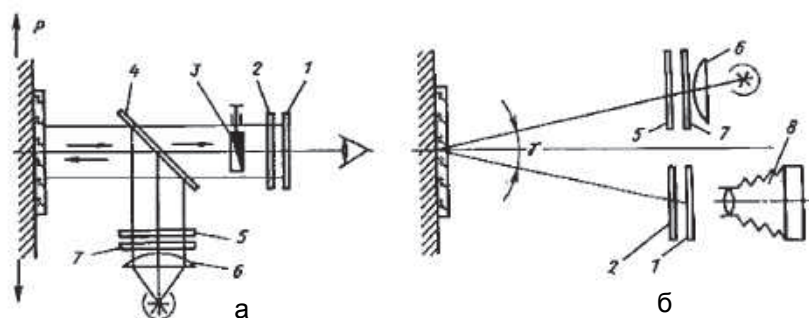


Рисунок 6.17 – Схеми відбивних полярископів: а – Т-образного типу; б – V-образного типу; 1 – поляризатор; 2, 5 – чвертьхвильові пластини; 3 – компенсатор; 4 – напівпрозоре дзеркало; 6 – конденсорні лінзи; 7 – аналізатор; 8 – камера

6.6 Метод ділільних сіток

Дослідження пластичних деформацій при руйнуванні матеріалів методом ділільних сіток виконані у 40–60-х роках, показано вплив концентрації напружень (отворів і цільових надрізів) на міцність деталей з конструкційних матеріалів і розглянуті технологічні завдання деформування тонкостінних деталей з алюмінієвих сплавів. Розвиток техніки нанесення мікросіток дозволив дослідити пружнопластичні деформації в області вершини тріщини при циклічному навантаженні. Виключно ефективним виявилось використання методу ділільних сіток до завдань пластичного деформування металів при обробленні тиском. Метод справив значний вплив на проектування нового інструменту і

режимів штампування, пресування, витяжки, прокатки і т. д. Сучасні технологічні методи підвищення втомної міцності та в'язкості руйнування (тріщиностійкості) напівфабрикатів з штампованих заготовок і прокату спираються на експериментальні дослідження, що виконуються методом ділільних сіток й іншими оптико-геометричними методами.

Інший напрямок досліджень – це вивчення НДС в іншій області на гумових і полімерних моделях при малих і великих деформаціях (до 18 %).

Для дослідження задач оброблення металів тиском являє інтерес визначення швидкостей переміщень, деформацій, ліній струму. Швидкість переміщень v_x, v_y, v_z і деформацій отримують чисельним диференціюванням, рідше – графічним. Вимірювання деформацій по осередках досить трудомісткі, а для формування надійних результатів при диференціюванні точність вимірювань збільшень і координат повинна бути досить висока.

Розрахунок напружень виконують на основі гіпотез теорії пластичності. Залежно від поставленого завдання і типу матеріалу обчислення проводять згідно з теоріями малих пружних деформацій, пластичної течії, опору матеріалів пластичній деформації.

Пластмасові моделі з оргскла, вініпласту, целулоїду досліджують методом ділільних сіток досить рідко, зазвичай його застосовують як допоміжний метод разом з тензометрією.

Залежно від поставлених дослідницьких завдань, а також від матеріалу деталі, від заданих граничних деформацій і зовнішніх умов (температури, вологостійкості, контакту з середовищем і т. д.), розробляють технологію нанесення сіток, растрів і фігур. При нанесенні базових фігур враховують і метод вимірювання деформацій, оскільки контрастність відтворення або спостереження, фактура матеріалу, прозорість, ширина чорних і світлих ліній та інші фактори впливають на точність і трудомісткість оброблення результатів.

Дряпання сіток і растрів застосовують при механічних випробуваннях матеріалів і при дослідженні технологічних задач оброблення металів тиском. Операцію проводять за допомогою голок, спеціально заточених побідитових різців, корундових і алмазних інденторів і наконечників.

У завданнях оброблення металів тиском сітки і растри наносять іноді безпосередньо на метал; в цьому випадку поверхню полірованих зразків, як правило, перед царапанням покривають тонким шаром контрастного металу способами вакуумного напилення або гальванічним, щоб створити колірну відмінність і контраст у лініях сітки. Добрий ефект отримують, наприклад, обмідненням сталевих зразків.

Накатка координатних сіток, фігур і растрів використовується для

нанесення базових елементів при вивченні пластичних деформацій і руйнування. Оригінал сітки виготовляють у вигляді цинкового кліше з рельєфом сітки заданого рисунка. Для нанесення сітки з матриці на деталь застосовують пружні валики, в тому числі складної форми (для нанесення на тіла обертання і складні поверхні). На дзеркальне скло або мармурову плиту валиком тонким шаром розгортають друкарську фарбу і переносять її на матрицю, а потім іншим валиком переносять рисунок сітки на деталь.

Офсетний спосіб виготовлення форми-кліше значно спрощує техніку нанесення сіток і растрів і дозволяє покрити більшу площу на плоских і невеликої кривизни деталях з жорстких і м'яких матеріалів (каучук, гума). Офсетний друк базується на принципі виборчого змочування форми - зображення сітки або растра, згідно з яким друкувальні елементи добре сприймають друкарську фарбу, але відштовхують воду, а пробільні - навпаки. Перенесення зображення з офсетної форми на досліджувану поверхню здійснюють, як і з цинковим кліше, - еластичним гумовим валиком. Офсетну форму виготовляють фотохімічним способом із застосуванням еталонних плівкових фотонегативів за стандартною технологією.

Видавлювання або штампування сіток на поверхню пластичних матеріалів здійснюється жорсткою матрицею, потім матеріал відпалюють і з заготовки з сіткою вирізають зразки.

Перфорування сіток-решіток, що застосовуються в дослідженні процесів ОМТ, здійснюють по сітковим шаблонам висвердлюванням і розгортанням пакета з тонкої алюмінієвої або свинцевої фольги. З появою лазерної прошивки малих отворів технологія перфорації, в тому числі для сіток-решіток, може принципово змінитися.

Фотосітки та фоторастри – найбільш поширені сучасні елементи оптико-геометричних методів. Виготовлені на скляних підкладках, вони є еталонами при вимірах і репродукуванні. Фотокопії на плівці служать для контактного друку, а також для перенесення емульсії з растром за так званим «способом розшарівних плівок».

6.7 Метод муарових смуг

Метод, який використовує муаровий ефект для вимірювання деформацій і переміщень на поверхні плоских деталей і, рідше, - в об'ємних прозорих моделях, застосовують при пружно і пластичній деформації металів і для вирішення інших пружних задач на низькомодульних матеріалах. У завданнях вигину пластин, деформування мембран і оболонок, а також вивчення закритичної поведінки тонкостінних конструкцій після втрати стійкості застосовують інші різновиди методу муарових смуг, що використовують методи оптичного важеля при відбитті

або проєціюванні растрів. Використовуючи стробоскопічне освітлення і спосіб оптичного суміщення растрів за допомогою муарових картин, візуалізують форми коливань пластин і оболонок. Метод застосовують для технологічного контролю форми поверхні великих деталей малої і середньої кривизни типу аеродинамічних поверхонь, а в оптичному виробництві - для контролю деталей оптики. Поточний контроль форми плоского прокату і стрічок у металургійному виробництві здійснюють у темпі листової прокатки безпосередньо в стані. Відомо застосування муарового ефекту в растрових оптичних приладах, а також у муарових датчиках положення, які реєструють лінійні та кутові переміщення в засобах автоматики.

Муаровий ефект – явище механічної інтерференції, виникає при накладенні двох і більше систем ліній, сіток, растрів або точок, як картина почергових темних і світлих смуг. Одне з чудових властивостей муарового ефекту як вимірювального інструмента полягає в тому, що він володіє великим і регульованим коефіцієнтом передавальної функції, що зв'язує кроки (частоти) вихідних растрів з кроком (частотою, швидкістю переміщення) муарових смуг. Цей коефіцієнт досить великий, що дозволяє узгодити роздільну здатність зору людини або інструменту, що заміняє його при візуальному спостереженні поля муарових смуг, з відповідними мікропереміщеннями об'єктів.

Методи вимірювання деформацій і переміщень, основані на муаровому ефекті, припускають наявність еталонного, контрольного (базового) растра, пов'язаного з деталлю, що відчуває деформацію. Накладення двох растрів утворює поле муарових смуг, однозначно характеризують лінійні або кутові переміщення точок досліджуваної деталі (поверхні) за певними напрямками.

Оптичні схеми для дослідження деформацій на плоских поверхнях непрозорих деталей, а також у плоских зрізах або перетинах прозорих моделей з пластмас, оргскла, поліуретанів, використовують три типи накладення растрів (рисунок 6.18).

За схемою А реалізується спосіб подвійної експозиції одного растра на деталі, що виконується спочатку до деформування (контрольний растр) і потім після деформування. За схемою Б використовують контрольний растр з дуже малим зазором на робочий растр, нанесений на деталь. Контрольний растр базується безпосередньо на зразку по осях симетрії або в точках, де відомі переміщення. Варіантом схеми Б є схема В, призначена для прозорих об'єктів. У цьому випадку модуль з робочим растром висвітлюється колімаційним пучком світла; між контрольним і робочим растром зазвичай вводять іммерсійну рідину. За схемою Г реалізують оптичне суміщення робочого і контрольного растрів за

допомогою довгофокусного об'єктива і поворотного екрану. Цю схему застосовують для безконтактних вимірювань при підвищених температурах, в умовах динамічних навантажень, в агресивних середовищах, а також при дослідженні об'ємних прозорих моделей з вклеєними растрами.

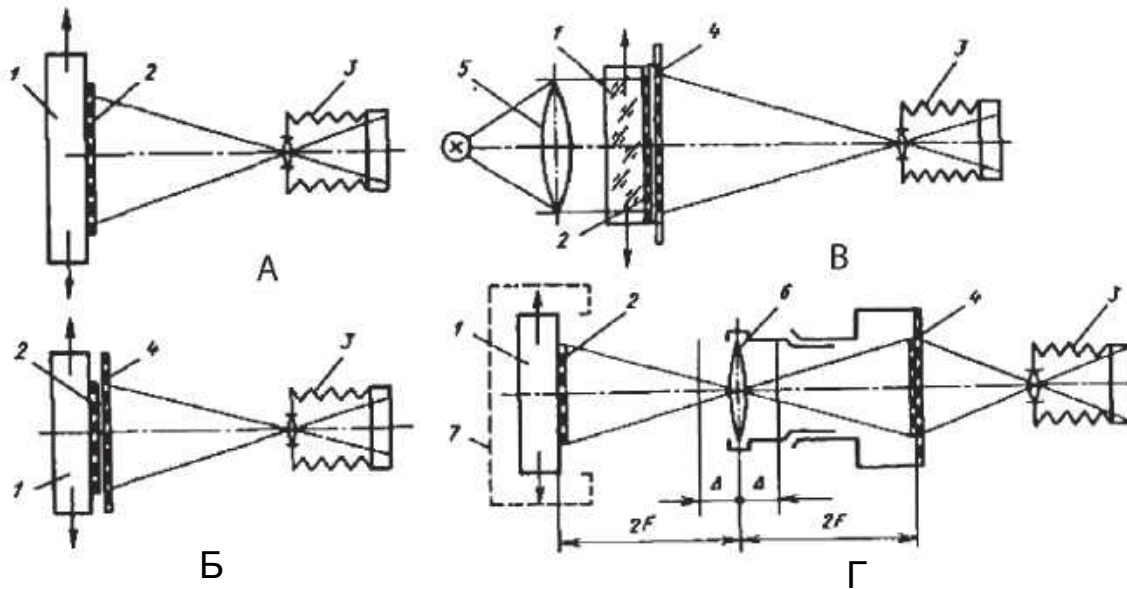


Рисунок 6.18 – Оптичні схеми накладення растрів освітлення муарових смуг: 1 – деталь; 2 – робочий растр; 3 – фотокамера; 4 – контрольний растр; 5 – коліматор; 6 – об'єктив; 7 – термокамера

6.8 Дзеркально-оптичний метод

При дослідженні вигину пластин у напівнатурному і модельному експерименті дзеркально-оптичним методом вимірюють за допомогою відображеної координатної сітки куту і кривизни до поверхні.

У цьому випадку плоска або майже плоска поверхня деталі або моделі повинна бути дзеркальною. Ортогональну сітку на плоскому екрані розташовують паралельно площині об'єкта, що деформується, на деякій відстані від нього. Відображення сітки в об'єкті реєструють фотокамерою або кінокамерою для процесів, що відбуваються поза часом (рисунок 6.19).

Зазвичай на один негатив виконують дві експозиції – до і після навантаження, а потім обидва зображення обробляють, як і в методі ділільних сіток, на вимірювальному мікроскопі за спеціальною методикою. Для реєстрації нестаціонарних процесів, наприклад, при зварювальному нагріванні алюмінієвої пластини, спотворення відображеної сітки від температурного викривлення поверхні фотографують у часі в міру просування електрода.

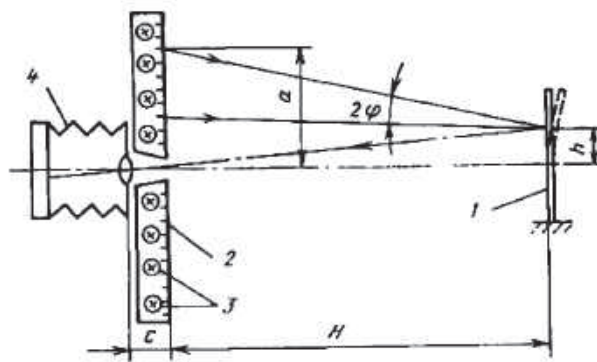


Рисунок 6.19 – Схема дзеркально-оптичної установки ІЕЗ ім. Є.О. Патона:
 1 – модель; 2 – екран з сіткою; 3 – лампа;
 4 – фотокамера

Слід зазначити основні переваги методу – простоту технічної реалізації і можливість безконтактної реалізації нестационарних процесів деформування з однієї експозиції.

7 РАДІАЦІЙНІ МЕТОДИ

Радіаційні методи контролю основані на різному поглинанні матеріалами, що відрізняються за щільністю і товщиною шару, рентгенівських променів, гамма- і бета- випромінювань, нейтронів та інших елементарних частинок при просвічуванні виробів з метою отримання інформації про внутрішній стан на будь-якому реєстраторі: рентгенівській плівці, флюоресцирувальному екрані та ін.

Радіаційні методи контролю забезпечують виявлення всіляких дефектів у матеріалі, що є оптично непрозорим, за рахунок реєстрації ослаблення інтенсивності випромінювання, що проходить через контрольований об'єкт. Об'єктами контролю можуть бути зварні з'єднання, злитки і виливки, агрегати, вузли і механізми, багат шарові матеріали і конструкції, матеріали великої щільності, клеєні з'єднання. Радіаційні методи виявляють дефекти і несправності типу непроварів, тріщин, газових пор, прожогів, рихлоти, шлакових включень, різну товщину стінок об'єкта, та певних руйнувань, корозійних поразок, втомних деформацій, наявності сторонніх предметів і т.д.

Джерелом проникливої радіації (іонізуючого випромінювання) служать рентгенівські трубки, прискорювачі заряджених частинок і радіоактивні ізотопи. Їх застосовують для просвічування сталевих деталей товщиною до 160 ... 200 мм.

7.1 Радіографічний метод

Радіографічний метод контролю оснований на перетворенні радіаційного зображення контрольованого об'єкта в радіографічний знімок або записи цього зображення на пристрої зберігання даних з наступним перетворенням у світлове зображення. Найчастіше він реалізується за допомогою знімків, одержуваних на спеціальних чутливих плівках і методом ксерографії. Якщо при неруйнівному контролі рентенографічним методом об'єкт неоднаковий по товщині й щільності або має раковину, то за об'єктом інтенсивність випромінювання буде неоднакова: в місці раковини вона буде більше, ніж в місцях, де немає дефектів.

При реєстрації на рентгенівській плівці після фотооброблення отримують негативне зображення об'єкта – рентгенівський знімок, і за ступенем почорніння судять про наявність дефектів у досліджуваному виробі.

Іншим способом отримання видимого зображення є ксерографія. Це один з перспективних методів реєстрації зображення. Основною його перевагою є швидке отримання ксерограм, що важливо при експрес-аналізі, та відсутність необхідності у хімічних реактивах і фотолабораторії.

Суть методу реєстрації полягає в тому, що іонізуюче випромінювання, проходячи через шар попередньо зарядженого фотонапівпровідника, створює електростатичне зображення, яке просвічує об'єкт. Після цього поверхню пластини запилують наелектролізованим порошком, що виявляє приховане зображення. Якщо не потрібно зберігати це зображення, то порошок видаляють після візуального огляду, а пластину використовують знову (рисунок 7.1).

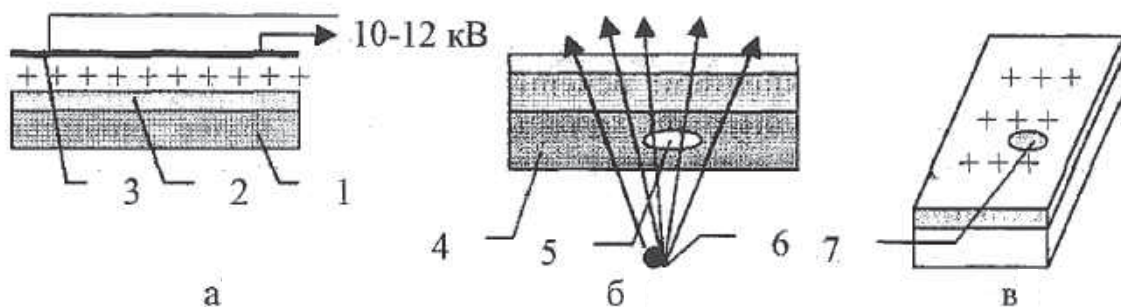


Рисунок 7.1 – Ксерографічний метод реєстрації просвічування виробів:
а - зарядка елемента; б - загальна схема просвічування; в – прояв прихованого зображення. 1 - металева підкладка; 2 - шар напівпровідника;
3 - електрод для зарядки напівпровідника;
4 - виріб; 5 - дефект; 6 - джерело випромінювання;
7 - зображення дефекту, проявленого за допомогою порошку

Ксерографічні пластини складаються з алюмінієвої підкладки 1 і

нанесеного на неї шару фотопровідникового матеріалу 2 (аморфний селен). Щоб зробити пластину чутливою до іонізуючого випромінювання, поверхні селенового шару надають заряд за допомогою електрода 3. Потім її, подібно рентгенівській плівці, поміщають у світлонепроникну касету і разом з контрольованою деталлю 4 опромінюють джерелом іонізуючого випромінювання 6. Під впливом рентгенівського або у випромінювання селеновий шар зарядженої пластини стає провідником, і поверхневий заряд стікає через шар селену на підкладку. Ступінь розрядки пластини залежить від дози падаючого на неї випромінювання. Тому при просвічуванні деталі на поверхні селенового шару утворюється приховане електростатичне зображення, яке являє собою картину розподілу на ній зарядів.

Приховане зображення проявляють запиленням селенового шару дрібним наелектризованим порошком, зарядженим електрикою протилежного знака. Дефект 5 стає видимим 7.

За допомогою радіографії контролюють зварні та паяні з'єднання. Довжину контрольованої ділянки встановлюють такою, щоб дефекти виявлялися без істотних спотворень. Дефекти на знімках мають вигляд більш темних або світлих смуг або за заміром інтенсивності лікування судять про наявність дефектів і їх розмірах.

Дефекти просвічування реєструють з використанням іонізаційних камер газорозрядних лічильників або сцинтиляційних лічильників.

Іонізаційна камера - це прилад, що складається з двох ізольованих один від одного електродів, між якими знаходиться повітря або інший газ (рисунок 7.2).

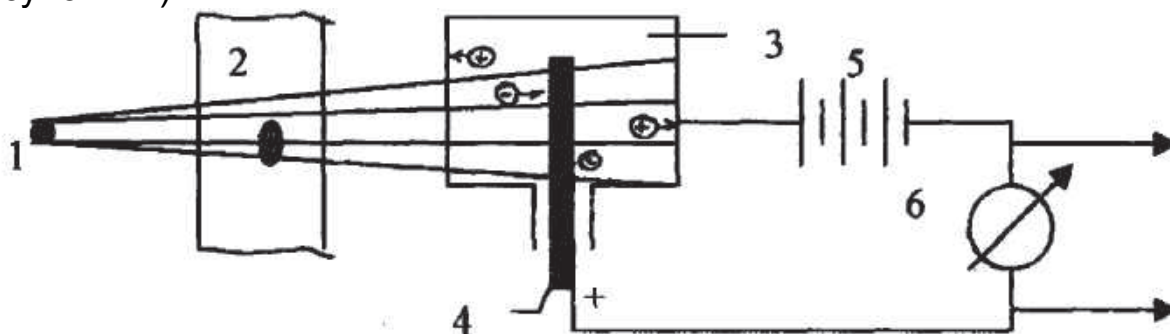


Рисунок 7.2 – Схема реєстрації результатів просвічування за допомогою іонізаційної камери: 1 - джерело випромінювання; 2 - контрольований виріб; 3 – зовнішній електрод (корпус камери); 4 - внутрішній електрод; 5 – джерело живлення; 6 - пристрій, що реєструє

Під дією іонізуючого випромінювання атоми газу всередині камери іонізуються, виникають вільні електрони і іони, які переміщуються: електрони – до електрода з позитивним зарядом, а іони - з негативним.

В електричному ланцюзі виникає іонізаційний електричний струм, який вимірюють різними вимірювальними приладами.

Газорозрядник лічильника являє собою запаяну скляну або металеву колбу з двома електродами. Колба насичена повітрям або газами під певним тиском, а на електроди подається висока, що доходить до 1000 В, напруга. Електрони, вибиті з атомів газу, спричиняють іонізацію інших атомів газу і т.д.

Сцинтиляційні та напівпровідникові прилади набули широкого поширення для реєстрації іонізуючого випромінювання.

В основі дії сцинтиляційних лічильників лежить здатність ряду кристалів (йодистих калію і натрію) світитися, тобто сцинтилювати під дією іонізуючого випромінювання. Сцинтиляції кристала виникають у вигляді готельних спалахів, які за допомогою фотоелектронного помножувача перетворюються в електричні імпульси і реєструються вимірювальними приладами.

Недоліками радіаційних методів контролю є громіздкість і складність використовуваної апаратури, низька маневреність при проведенні контролю в цехових і аеродромних умовах, труднощі підходу з рентгенівською трубкою до виробів складної конфігурації, тривалість і висока вартість виявлення внутрішніх дефектів металу (велика витрата плівки і фотореактивів), незручності, пов'язані з обробленням плівок у темряві. Істотним недоліком є необхідність пристроїв захисту від біологічної дії на організм людини рентгенівського і гамма-випромінювань, суворого дотримання правил техніки безпеки.

7.2 Радіоскопічний метод

Радіоскопічний метод (радіаційна інтроскопія) оснований на перетворенні радіаційного зображення контрольованого об'єкта у світлове зображення на вихідному екрані радіаційно-оптичного перетворювача, причому аналіз отриманого зображення проводиться в процесі контролю. Для отримання інформації використовують такі перетворювачі випромінювання: флуороскопічний екран; рентгенівський електронно-оптичний підсилювач яскравості зображення.

Установки візуального контролю з безпосереднім наглядом зображень відрізняються простотою в експлуатації. Флуороскопічний екран складається з двох основних частин. З боку джерела випромінювання знаходиться відносно тонкий флуоресцюючий шар сірчистого цинку, який під дією поглиненого їм випромінювання випромінює світло пропорційно до поглиненої енергії або інтенсивності випромінювання. З боку спостерігача встановлюють свинцеве скло. Інтенсивність світла, що випускається екраном, пропорційна інтенсивності випромінювання, що

падає на нього. Для візуальної оцінки необхідна достатня сила світла, тобто інтенсивність випромінювання повинна бути великою, що, у свою чергу, вимагає збільшення ступеня екранування спостерігача.

Зображення на екрані забарвлене в жовто-зелений колір. У результаті більшої інтенсивності випромінювання, яке потрапило на екран у місцях дефектів типу пустот, тріщин і т.п., екран флуоресціює сильніше.

Однак, значною перешкодою для розпізнавання дефектів є нечітке екранне зображення. Цей недолік виправляється застосуванням електронних підсилювачів, у ряді випадків забезпечених телевізійною установкою.

7.3 Радіометричний метод

В основу радіометричного методу контролю покладено вимірювання одного або декількох параметрів іонізуючого випромінювання після його взаємодії з контрольованим об'єктом. Інформація про іонізуюче випромінювання може бути отримана в цифровому, стрілочному або аналоговому вигляді. Приймачем випромінювання є радіометричний детектор. Досліджуваний виріб перевіряють, переміщуючи його між джерелом випромінювання і його наступником, і по заміру інтенсивності випромінювання судять про наявність дефектів і їх розмірів.

Реєстрація результатів просвічування проводиться з використанням іонізаційних камер, газорозрядних лічильників або сцинтиляційних лічильників.

8 ТЕПЛОВІ МЕТОДИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

Теплові методи контролю засновані на реєстрації теплових полів, температури або теплового контрасту контрольованого об'єкта. Методи дозволяють виявляти дефекти матеріалів зі зміни розподілу та інтенсивності теплового випромінювання (наприклад, дефекти в трубах, прокаті, зварних швах і ін.).

Теплові методи контролю поділяють на: пасивні і активні. При пасивному способі контролю об'єкт не піддається впливу зовнішнього джерела енергії. Цей метод застосовують для виявлення відхилень від заданої форми і геометричних розмірів, а також при дослідженні теплового режиму контрольованих об'єктів. Активний спосіб контролю дозволяє виявляти порушення цілісності (тріщини, пористість, включення, розшарування) і зміни в структурі, фізико-хімічні властивості шляхом впливу на об'єкт зовнішнім джерелом енергії.

Нагріте тіло є джерелом електромагнітного випромінювання широкого спектру. У термографії використовують в основному інфрачервону його

область, невидиму оку людини; при примусовому нагріванні контрольованого об'єкта понад 400 °С можливі такі небажані явища, як рекристалізація, зміна фізичних властивостей та ін. Зазвичай обмежуються нагріванням до температури, яку об'єкт може отримати при експлуатації. У ряді випадків температура нагріву лише трохи перевищує кімнатну. Звідси впливають підвищені вимоги до чутливості, а також до безінерційної апаратури, яка застосовується для реєстрації,

У загальному випадку задача визначення несправності контрольованого об'єкта і його елементів зводиться до ідентифікації теплового поля контрольованого примірника з еталонним.

Еталонне теплове поле може бути визначено як методами математичного моделювання, так і експериментальним шляхом. Математичне моделювання теплового поля – завдання досить складне і в наш час ще не досить розроблена. Тому найбільшого поширення набули експериментальні методи визначення еталонних полів. Для експериментального визначення теплових полів у наш час застосовують контактні та неконтактні методи.

До контактних методів вимірювання температури відносяться:

- вимірювання температури за допомогою термопар;
- вимірювання температури за допомогою температурно-чутливих фарб і складів;
- люмінесцентні методи;
- рідкокристалічні методи;
- фотоемульсійні методи.

Метод вимірювання температури за допомогою термопар добре відомий. Але цей метод малоефективний через нерівномірність температури в окремих частинах вимірюваного об'єкта.

З інших методів найбільш перспективні й прості методи температурно-чутливих фарб і складів, а також рідкокристалічні методи. Температурно-чутливі фарби під дією температури змінюють колір, а склади плавляться. Основний недолік – дискретність індикації контрольованих значень температури.

Від цього недоліку вільні рідкокристалічні методи, які базуються на використанні властивостей змінювати забарвлення під дією температури. Зміна забарвлення реєструється за допомогою досліджень дифракції та інтерференції в тонких плівках. За допомогою цього методу можна визначити різниці температур менше 0,1 °С.

Більш перспективні й універсальні – неконтактні методи вимірювання температури, основані на властивості тіл отримувати електромагнітну

енергію, пропорційну їх температурі. Вони поділяються на дві групи:

- 1) методи, що базуються на одночасній реєстрації теплового випромінювання різних ділянок контрольованого об'єкта;
- 2) методи з послідовною реєстрацією випромінювання окремих ділянок об'єкта.

До першої групи належать методи: евіографії, еджеографії, червоного поглинання з використанням явища фотоемісії і вторинної емісії електронів, використання багатоелементних приймачів випромінювання та інші.

Евіограф працює так. За допомогою оптичного пристрою через вікно в колбі на чорну сторону мембрани фокусується теплове випромінювання об'єкта, нагріваючи її ділянки до температури об'єкта.

Одночасно, з іншого боку мембрани за допомогою спеціального підігрівача підвищують температуру парів, які при досягненні в цієї частині колби тиску, що відповідає точці роси, концентрується на мембрані. При цьому шар конденсату залежить від температури різних ділянок мембрани. Висвітлюючи чорну поверхню мембрани і використовуючи ефект інтерференції світла, можна спостерігати теплограму або фотографувати її.

Еджеограф дозволяє візуально спостерігати розподіл тепла по поверхні тіл, що мають незначну температуру (30 ... 40 °С). чутливим елементом у приладі є напівпровідникова плівка (аморфний селен товщиною 1 мкм). Тепловий потік від об'єкта направляється на селенову плівку, покриту хромом для збільшення її теплопоглинальної здатності. Нагріваючи окремі ділянки плівки до різних температур і підсвічуючи її натрієвою лампою, можна спостерігати теплограму, оскільки ділянки з більш високою температурою виглядають темними, а з низькою - світлими.

Фотоемісійні поверхні використовуються в трубках з перетворенням інфрачервоного зображення у видиме при довжині хвилі до 1,2 мкм.

Найбільш перспективними є багатоелементні приймачі випромінювання. Для їх ефективного застосування необхідні:

- малі розміри окремих елементів з метою отримання високого кутового дозволу;
- висока щільність розміщення елементів;
- висока порогова й інтегральна чутливість по відношенню до випромінювання, що спостерігається.

Схему інфрачервоного електронно-оптичного перетворювача зображення наведено на рисунку 8.1.

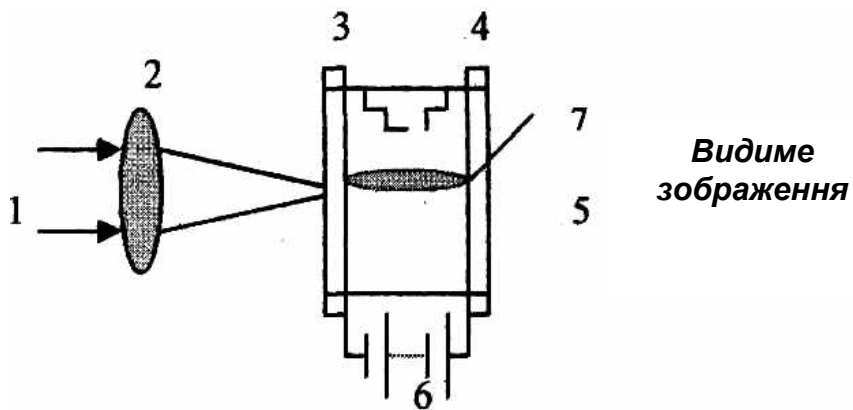


Рисунок 8.1 – Схема інфрачервоного електронно-оптичного перетворювача зображення: 1 – короткохвильове випромінювання; 2 – об'єктив; 3 – фотоемісійний екран (фотокатод); 4 – флуоресцентний екран; 5 – видиме зображення; 6 – висока напруга; 7 – електрони

До другої групи належать методи, які використовують розгортку (сканування) електронним чи оптичним променем. У системах здійснюється послідовний поелементний перегляд теплового поля контрольованого об'єкта. Теплове випромінювання перетворюється в приймальнику випромінювання в електричний сигнал, який далі посилюється і реєструється. Сканувальні системи підрозділяються на механічні, оптико-механічні та фотоелектронні. Найбільшого поширення набули перші дві. Прилади для реєстрації теплових профілів (теплових полів) отримали назву радіометрів (мікрорадіометрів).

Різновид радіометрів – тепловізори (рисунок 8.2). Серед сучасних засобів дослідження стану об'єктів одне з чільних місць посідають засоби теплового моніторингу. Ці засоби забезпечують візуалізацію теплового стану об'єкта за рахунок перетворення теплового випромінювання на електричний сигнал, який надалі використовується для аналізу стану об'єкта спостереження, що дає змогу розв'язувати задачі дистанційного та безконтактного неруйнівного контролю в недоступному для людського зору інфрачервоному діапазоні спектра випромінювання.

Тепловізор складається з двох основних блоків: спеціальної камери, призначеної для сканування променя, і блока індикації (вдосконаленого осцилоскопа) для відтворення зображення об'єкта на екрані.

У тепловізорі зазвичай є пристрій, що дає можливість отримувати ізотерми - лінії, відповідні поверхні з однаковою температурою.

Тепловізор з оптико-механічним скануванням містить у собі приймальну оптичну систему 1, детектор ІК-променів 2, що сканує систему, яка забезпечує послідовний перегляд об'єкта заданому закону,

підсилювач 4, систему розгортки і синхронізації 5 і кінескоп 6.

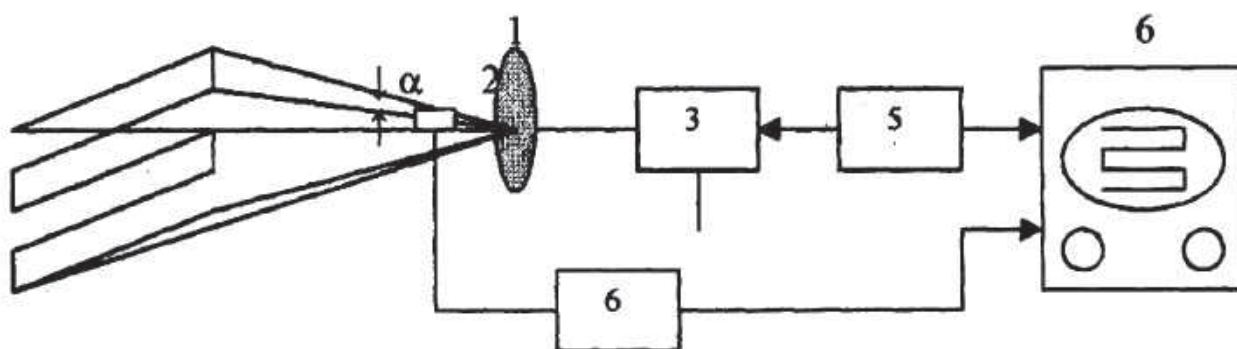


Рисунок 8.2 – Структурна схема тепловізора: 1 - оптична система; 2 - приймач випромінювання; 3 – сканувальний пристрій; 4 - підсилювач; 5 - система розгортки і синхронізації; 6 – електронно-променева трубка

Принцип дії тепловізора полягає в перегляді за заданим законом руху поверхні об'єкта вузьким оптичним променем з кутовим розміром α . Кадрова розгортка здійснюється хитним плоским дзеркалом, рядкова - обертовим дзеркальним барабаном. Вузол рядкової розгортки забезпечує отримання близько 1600 рядків у секунду за допомогою барабана з вісьмома гранями, що обертається з частотою 12000 об/хв.

У вузлі передбачається блок синхронізації, що складається з лампи, що відображає дзеркала, і фотодіода. Потік світла від лампи падає на грань дзеркального барабана, що відповідає початку рядка; відбитий сигнал потрапляє на дзеркало і фотодіод. З фотодіода сигнал надходить на формувач синхроімпульсів. Фотоприймач кріпиться на кронштейні, ізолюваному від рядкової розгортки, і має юстувальні переміщення.

Поруч з приймачем кріпиться передпідсилювач. На тильній стороні оправи великого дзеркала розташовуються формувачі малих і кадрових синхроімпульсів. Приймальна камера має візир – далекомір для наведення її на досліджуваний об'єкт і для фокусування об'єктива. На рисунку 8.3 зображена оптична схема тепловізора, а на рисунку 8.4 – його електронна частина.

Відмінною особливістю тепловізійних мікроскопів є збільшення оптичного об'єктива. Тепловізійні мікроскопи призначені в основному для обстеження і вимірювання теплових полів виробів мікроелектроніки.

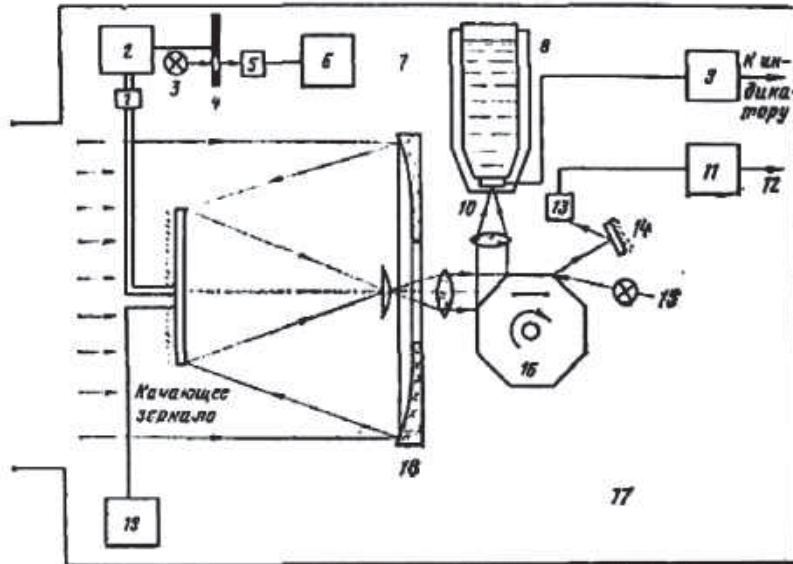


Рисунок 8.3 – Оптична схема тепловізора: 1 – шарнірна система; 2 – двигун кадрової розгортки; 3, 15 – лампа; 4 – модулятор; 5, 13 – фотодіод; 6 – формувач кадрового імпульсу; 7 – посудина Дьюара; 8 – охолоджувальна рідина; 9 – попередній підсилювач; 10 – приймач; 11 – формувач малих імпульсів; 12 – синхроімпульси рядкові; 14 – дзеркало; 16 – обертовий барабан; 17 – приймальна камера; 18 – сферичне дзеркало; 19 – фокусувальний двигун

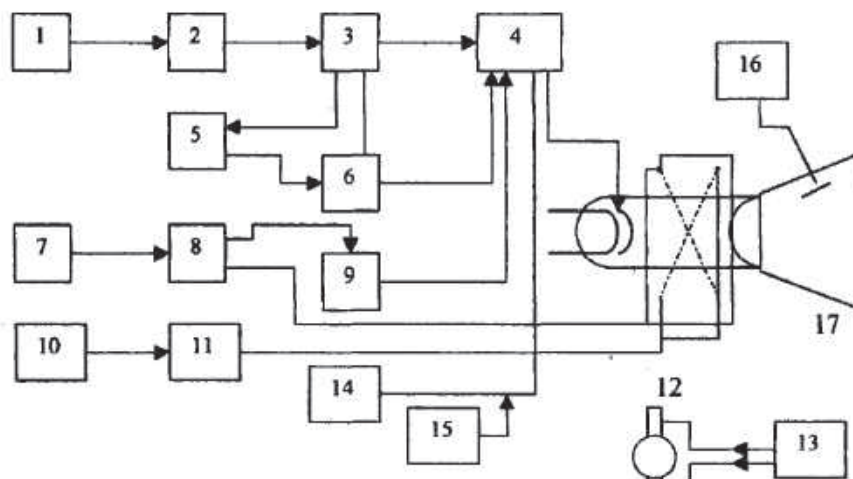


Рисунок 8.4 – Схема електронної частини тепловізора: 1 – попередній підсилювач; 2 – проміжний видеопідсилювач; 3 – блок шкали; 4 – крайовий видеопідсилювач; 5 – дискримінатор; 6 – генератор імпульсів підсвітки; 7 – формувач кадрових синхроімпульсів; 8 – блок кадрової розгортки; 9, 14 – генератор імпульсів гасіння; 10 – формувач малих синхроімпульсів; 11 – блок рядкової розгортки; 12 – двигун малого розгорнення; 13 – перетворювач напруги 400 Гц, 115 В; 15 - блок живлення; 16 – блок високої напруги; 17 – кінескоп

9 РАДІОТЕХНІЧНІ НВЧ-МЕТОДИ

На використанні взаємодії радіовипромінювання СВЧ-діапазону з матеріалами базуються ряд порівняно нових методів неруйнівного контролю.

Вважається, що СВЧ-діапазон займає область довжин хвиль від 1 мм до 1 м, що відповідає інтервалу частот від 0,3 до 300 Гц. У більшій частині радіодефектоскопів використовуються хвилі довжиною від 5 до 200 мм. Але для виявлення малих дефектів очевидні переваги використання більш короткохвильового випромінювання.

Значення довжин хвиль, частот і енергій кванта у різних діапазонах електромагнітного випромінювання наведено в таблиці 9.1.

Таблиця 9.1 – Розподілення діапазонів випромінювання

Довжина хвилі, м	Частота, Гц	Енергія фотона, ЕВ	Діапазон
до 10^{-14}	від $3 \cdot 10^{22}$	10^8	Космічне випромінювання
10^{-13} - 10^{-9}	$3 \cdot 10^{21}$ - $3 \cdot 10^{17}$	10^7 - 10^3	Рентгенівське та гамма-випромінювання
10^{-8} - 10^{-7}	$3 \cdot 10^{16}$ - $3 \cdot 10^{15}$	10^2 -10	Ультрафіолетове випромінювання
10^{-6}	$3 \cdot 10^{14}$	1	Видиме світло
10^{-5} - 10^{-4}	$3 \cdot 10^{13}$ - $3 \cdot 10^{12}$	10^{-1} - 10^{-2}	ІЧ-випромінювання
10^{-3} - 10^{-1}	$3 \cdot 10^{11}$ - $3 \cdot 10^9$	10^{-3} - 10^{-5}	СВЧ
від 1	$3 \cdot 10^8$	10^{-6}	Радіохвилі

Провідні матеріали непрозорі для СВЧ-випромінювання. Тому ці методи використовуються для дослідження внутрішньої структури діелектриків або поверхні провідників.

У радіодефектоскопії, як і в ультразвуковій дефектоскопії, роздільна здатність контрольних приладів визначається довжиною хвилі в зразку. При цьому, СВЧ-випромінювання, на відміну від рентгенівських променів, не має біологічної небезпеки для здоров'я людини.

У приладах радіодефектоскопії використовуються такі три класи методів контролю:

1) метод "на проходження", при якому внутрішній простір зразка визначається згідно з впливом на сигнал, що проходить через зразок. Цим способом можна вимірювати товщину непровідних матеріалів і виявляти наявність дефектів або визначати структуру матеріалу;

2) метод "на відображення", при якому сигнал, відбитий від поверхні або внутрішніх шарів зразка, контролюється для отримання такої ж інформації, як і в попередньому методі. Цим способом можна вимірювати товщину непровідних матеріалів, визначати стан їх поверхні або підповерхневого шару;

3) метод "розсіювання", що є окремим випадком відображення, коли

відбиває середовище, складається повністю з провідного матеріалу. Для виявлення пористості в такому середовищі особливо ефективно застосування короткохвильової частини СВЧ-діапазону.

Існують, так само, методи, що включають комбінацію названих раніше методів.

9.1 Метод «на проходження»

На рисунку 9.1 зображено схему вимірювання «на проходження» сигналу.

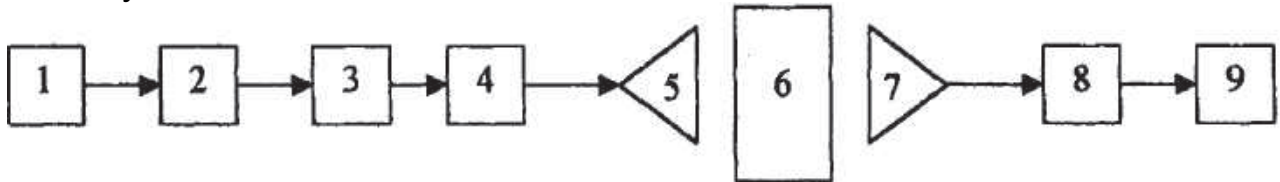


Рисунок 9.1 – Схема вимірювання на проходження сигналу:

- 1 - джерело живлення; 2 - клістрон; 3 - розв'язувальний пристрій; 4 – атенюатор; 5, 7 - рупор; 6 - зразок; 8 - кристалічний детектор; 9 - підсилювач та індикатор

Атенюатор - це пристрій, що служить для ослаблення, тобто регулювання потужності електромагнітної хвилі СВЧ-діапазону (рисунок 9.2). Так як електромагнітні хвилі в приладах від одного блоку до іншого передаються за допомогою хвилеводів, то пристрій атенюатора принципово відрізняється від регулювальних пристроїв, застосовуваних у радіотехнічних системах.

Ослаблення хвилі в хвилеводі досягається за допомогою провідної пластини, яку поміщають уздовж осі хвилеводу паралельно його вузькій стінки. Електричне поле індукує в платівці струми, які прагнуть зменшити це поле. Ступінь ослаблення можна регулювати переміщенням пластини поперек хвилеводу.

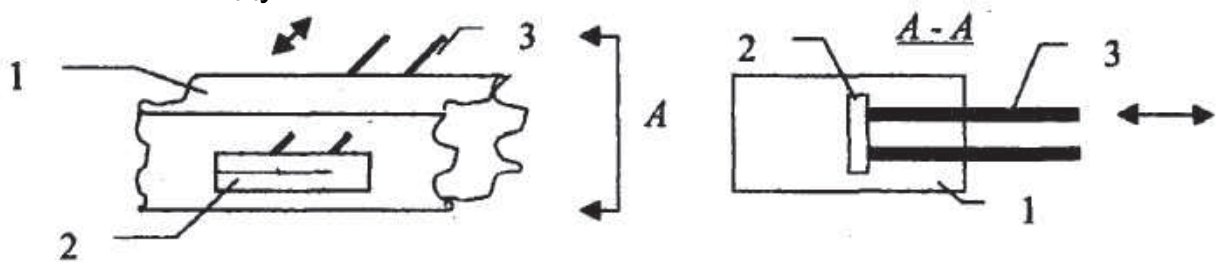


Рисунок 9.2 – Атенюатор:

- 1 – хвилевід; 2 – провідна пластинка; 3 – регулювальні стрижні

Метод "на проходження" застосуємо для дослідження стану каучуко-полімерних зразків під час полімеризації, для спостереження процесу вулканізації ракетного палива, вимірювання вмісту води в матеріалах та ін.

9.2 Метод «на відображення»

Схему методу «на відображення» зображено на рисунку 9.3.

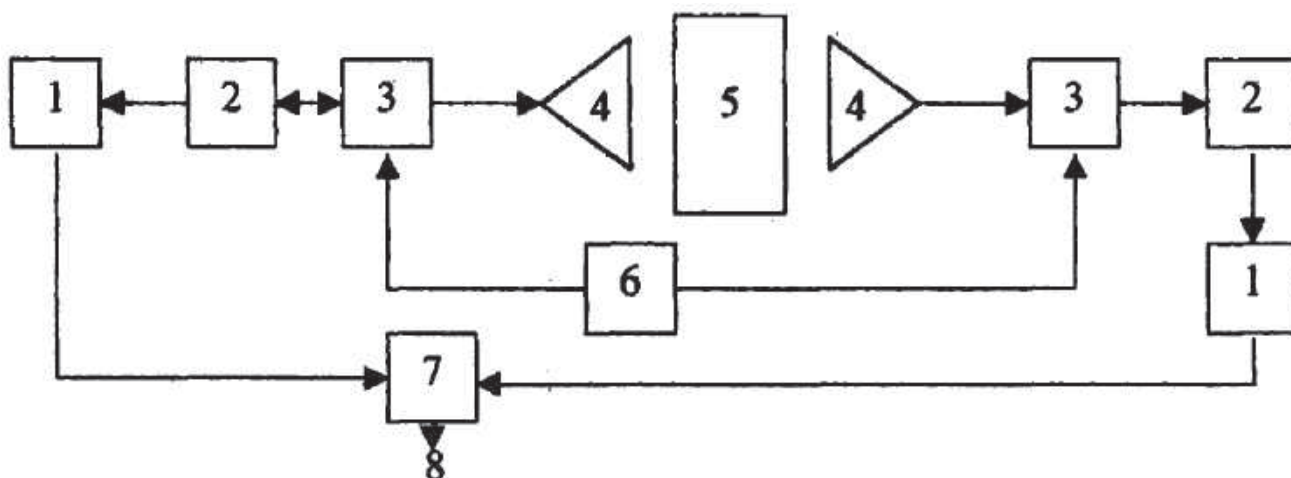


Рисунок 9.3 – Схема «на відображення» (двостороння для вимірювання товщини провідної пластини):

1 – підсилювач; 2 – детектор; 3 – спрямований освітлювач; 4 – рупор;
5 – зразок; 6 – генератор; 7 – змішувач; 8 – сигнал, пропорційний товщині

У цій схемі використовується загальний генератор, сигнал від якого подається до антен, розташованих по обидва боки зразка. Кожна антена сконструйована таким чином, що відбитий сигнал змінюється лінійно по амплітуді при переміщенні зразка. Сумарний сигнал від двох антен пропорційний товщині зразка.

Метод "на відображення" застосовують для вимірювання швидкостей займання в РДТТ, оскільки як властивості запалення поверхні внаслідок високої концентрації електронів майже такі ж, як і металеві відбивачі.

Є роботи по застосуванню цього методу для контролю швидкості ударної хвилі, зумовленої початковою стадією горіння і кінцевим вибухом у зразках з вибухової речовини, для виявлення дефектів, що мають розміри близько 3 мм у пористій структурі скловолокна.

9.3 Метод «розсіювання»

Поле, розсіяне об'єктом у будь-якій точці, є поле, виміряне в цій точці, зменшене на складову падаючого поля, так, що всі радіотехнічні СВЧ-методи базуються на розсіяному випромінюванні. Однак, в цьому випадку термін «метод розсіювання» застосовують до тих випадків, коли поле розсіювання переважає над полем спадної хвилі і лінійні розміри об'єкта, що розсіює, малі або порівняні з довжиною хвилі випромінювання.

Для візуалізації СВЧ-полів застосовуються:

- 1) сканування радіохвильового поля з одночасним синхронним переміщенням пера самописця;
- 2) рідкі кристали;
- 3) фотографічні пластини, пов'язані з тепловими ефектами.

Таким чином, радіотехнічні СВЧ-методи, крім зазначених унікальних методів застосування, в основному використовуються для:

- вимірювання товщини;
- дефектоскопії;
- структуроскопії;
- контролю фізико-механічних параметрів;
- контролю технологічних параметрів;
- контролю динамічних характеристик.

В наш час радіотехнічні методи не можна поставити за значенням в області неруйнівного контролю в один ряд з ультразвуком, радіографією або вихровими струмами; тим не менш, вони необхідні для вирішення завдань, які важко вирішити іншими методами, більш того, зараз спостерігається підвищений інтерес до цих методів контролю з боку як розробників, так і споживачів.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Биргер, И. А. Техническая диагностика / И. А. Биргер. - М. : Машиностроение, 1978. - 240 с.
2. Диагностика авиационных двигателей / В. Н. Лозовский [и др.]. - М. : Машиностроение, 1986. - 230 с.
3. Дефектоскопия деталей при эксплуатации авиационной техники / под ред. П. И. Беди. - М. : Воениздат, 1978. - 231 с.
4. Неразрушающий контроль металлов и изделий: справочник / под ред. П. М. Самойловича. - М. : Машиностроение, 1976. - 456 с.
5. Методы неразрушающих испытаний / под ред. Р. Шарпа. - М. : Мир, 1972. - 496 с.
6. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: справочник. В 2-х кн. / под ред. В. В. Ключева. - М. : Машиностроение, 1986.
7. Бурумкулов, Ф. Х. Контроль качества продукции машиностроения : учеб. пособие / Ф. Х. Бурумкулов, И. Н. Земскова - М. : Изд-во стандартов, 1982. - 184 с.

Навчальне видання

Набокiна Тетяна Петрiвна
Атаманчук Роман Валентинович

**НЕРУЙНIВНI МЕТОДИ ДIАГНОСТУВАННЯ
ЕЛЕМЕНТIВ АЕРОКОСМIЧНОЇ ТЕХНIКИ**

Редактор Є. О. Александрова

Зв. план, 2018

Пiдписано до друку 17.08.2018

Формат 60x84 1/16. Папiр офс. № 2. Офс. друк

Ум. друк. арк. 4,4. Обл.-вид. арк. 5,0. Наклад 50 пр.

Замовлення 268. Цiна вiльна

Видавець i виготовлювач
Нацiональний аерокосмiчний унiверситет iм. М. Є. Жуковського
«Харкiвський авiацiйний iнститут»
61070, Харкiв-70, вул. Чкалова, 17
<http://www.khai.edu>
Видавничий центр «ХАІ»
61070, Харкiв-70, вул. Чкалова, 17
izdat@khai.edu

Свiдоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавцiв, виготовлювачiв i розповсюджувачiв видавничої
продукцiї сер. ДК № 391 вiд 30.03.2001