

9. РАДІАЦІЙНИЙ КОНТРОЛЬ (РК)

9.1. Радіаційний контроль та його види

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

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

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

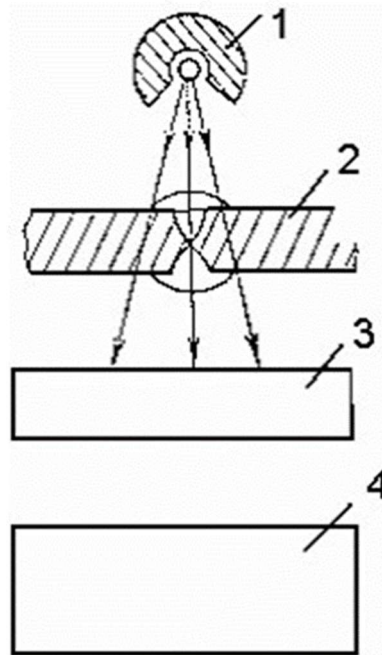


Рис. 9.1. Система радіаційного контролю:

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

До характеристик джерела випромінювання відносяться:

1. енергія та інтенсивність випромінювання, розмір активної частини випромінювача;

2. об'єкт контролю характеризується товщиною і густиною матеріалу;
3. характеристики детектора випромінювання контрастність, чутливість, ефективність тощо.

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

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

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

9.2. Класифікація радіаційних методів неруйнівного контролю

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

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



Рис. 9.2. Схема рентгенографічного методу

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

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



Рис. 9.3. Схема гамаграфічного методу

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

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

мм. Отримане зображення перетворюється в телевізійне та по кабелю передається на монітор, розташований у віддаленому від рентген- камери приміщенні оператора.

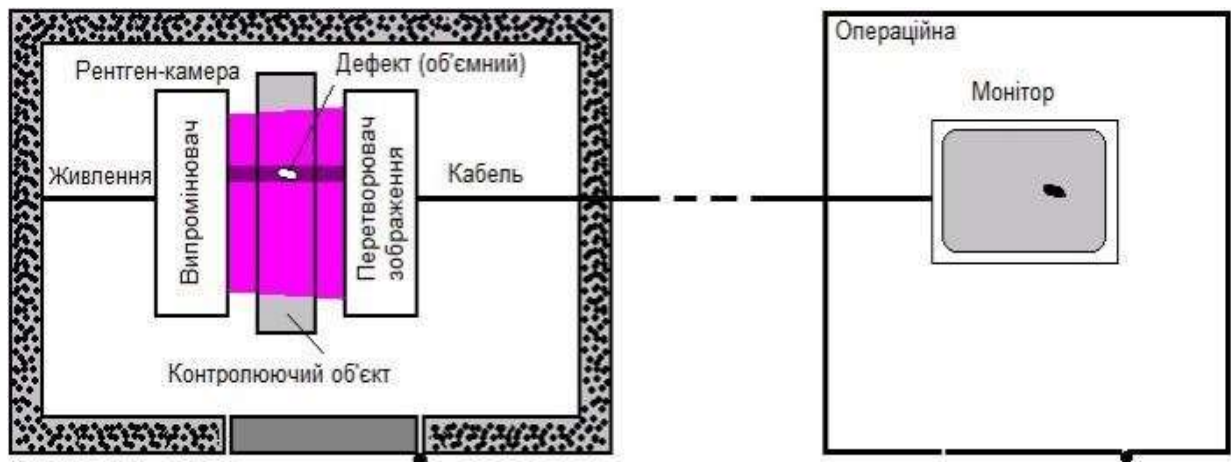


Рис. 9.4. Схема рентгеноскопичного методу

За видами використовуваного іонізуючого випромінювання РК поділяється на:

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

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

Способи реєстрації радіаційних зображень поділяються на три групи:

1. **радіографічні** (фотографічний, ксерорадіографічний, строборадіографічний тощо);
2. **радіоскопічні** (способи радіаційної інтроскопії: візуальні радіаційні, тобто бачення радіаційних зображень на екрані перетворювача, радіотелевізійні, стереорадіоінтроскопічні);
3. **радіометричні** (іонізаційний; спектрометричний; сцинтиляторний). Найбільшого поширення набули рентгенографія, рентгеноскопія і γ -контроль.

9.3. Джерела і властивості іонізуючого випромінювання

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

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

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

Радіоактивні ізотопи є джерелом рентгенівського α -, β - і γ -випромінювання, потоків нейтронів і позитронів, і використовуються для просвічування сталевих виробів завтовшки до 200 мм.

Для отримання рентгенівського випромінювання використовують рентгенівську трубку, що представляє собою скляну колбу, з якої відкачано повітря до 10^{-4} – 10^{-6} Па (рис. 9.5).

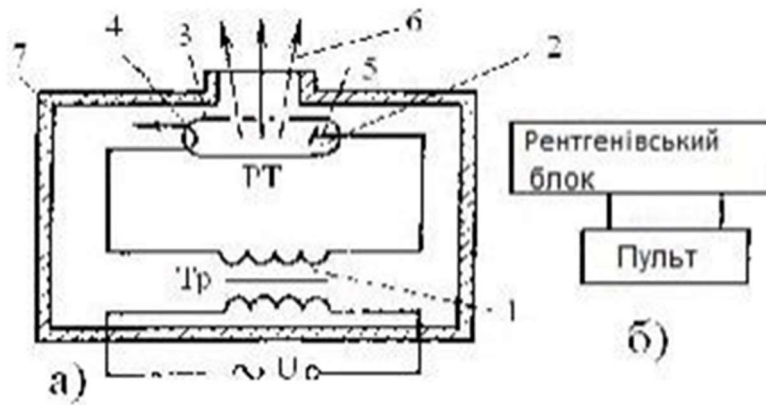


Рис. 9.5. Принципова схема (а) і блок-схема (б) рентгенівського апарату-моноблоку: 1 - трансформатор; 2 - рентгенівська трубка; 3 - скляна колба; 4 - катод; 5 - анод з мішенню; 6 - рентгенівське випромінювання; 7 - кожух

У посудину впаяно два електроди - катод 4 у вигляді спіралі з товстого вольфрамового дроту і анод 5 з мідного порожнього циліндра («антикатод») з привареною до нього мішенню з вольфраму.

До спіралі катода подається низьковольтна напруга (2-12 В), а до електродів - висока напруга (більше 10 кВ).

При розжаренні спіралі внаслідок термоелектронної емісії з неї вилітають електрони, які спеціальним пристроєм фокусуються у вузький пучок і під дією електричного поля з великою швидкістю рухаються до аноду.

Струм, що проходить через трубку, вимірюється міліамперметром на пульті управління. Струм трубки регулюється зміною ступеня розжарення нитки катода. Електрони, що потрапляють на мішень аноду, гальмуються в ній і втрачають швидкість, а отже, і кінетичну енергію. Частково кінетична енергія електронів перетворюється на променисту енергію, яка виділяється у вигляді фотонів гальмівного випромінювання, використовуваного при дефектоскопії виробів, а частина переходить в тепло.

Частка кінетичної енергії $R(\%)$, перетвореної на рентгенівське випромінювання, залежить від анодної напруги U і порядкового номера матеріалу мішені Z .

Для вольфрамової мішені ($Z = 74$) при напрузі менше, ніж 100 кВ $R \approx 0,01\%$, при $U = 100$ кВ $R = 1\%$, а при $U = 2$ МВ - більше 20%. Більша частина енергії перетворюється в тепло, яке необхідно відводити від анода

охолоджуючим середовищем (масло, вода, газ). У деяких випадках для зменшення розігріву анода його виконують таким, що обертається.

Ділянка мішені аноду, на якій фокусується рентгенівське випромінювання, називається **дійсною фокусною плямою (пятном) трубки**. Проекція її в напрямку виходу променів - **ефективною фокусною плямою**.

Фокусні плями можуть бути лінійними із співвідношенням сторін 1: 1,25 або круглими. Трубки з фокусною плямою від 100 мкм до 1 мм -гострофокусні, з плямою менше 100 мкм - мікрофокусні.

Інтенсивність випромінювання рентгенівської трубки можна регулювати анодним струмом і напругою. При зміні струму (тобто нагріві катоду) змінюється тільки інтенсивність, а при зміні напруги змінюється і енергія випромінювання. Мінімальна довжина хвилі рентгенівського випромінювання, що утворюється, відповідає максимальній енергії кванта. Енергія кванта тим більше, чим вище швидкість електронів, яка визначається напругою на трубці.

Енергетичний спектр гальмівного випромінювання визначається величиною напруги на трубці. Чим вище напруга, тим більше швидкість електронів, тим більше енергія випромінювання, тим менше довжина хвилі і тим більше проникаюча здатність випромінювання.

Оскільки електрони, що випускаються катодом, мають неперервний розподіл швидкостей, енергетичний спектр гальмівного випромінювання має неперервний характер, тобто в ньому присутні кванти зі всілякими значеннями енергій - від нуля до деякого максимального значення, що відповідає максимальній кінетичній енергії електронів, що гальмуються.

Якщо енергія електрона настільки велика, що він выбиває електрони з внутрішніх оболонок атомів речовини мішені, на фоні неперервного спектру гальмівного випромінювання виникає лінійчатий спектр характеристичного випромінювання (рис. 9.6). Підбираючи матеріали мішені, можна отримувати різні спектри.

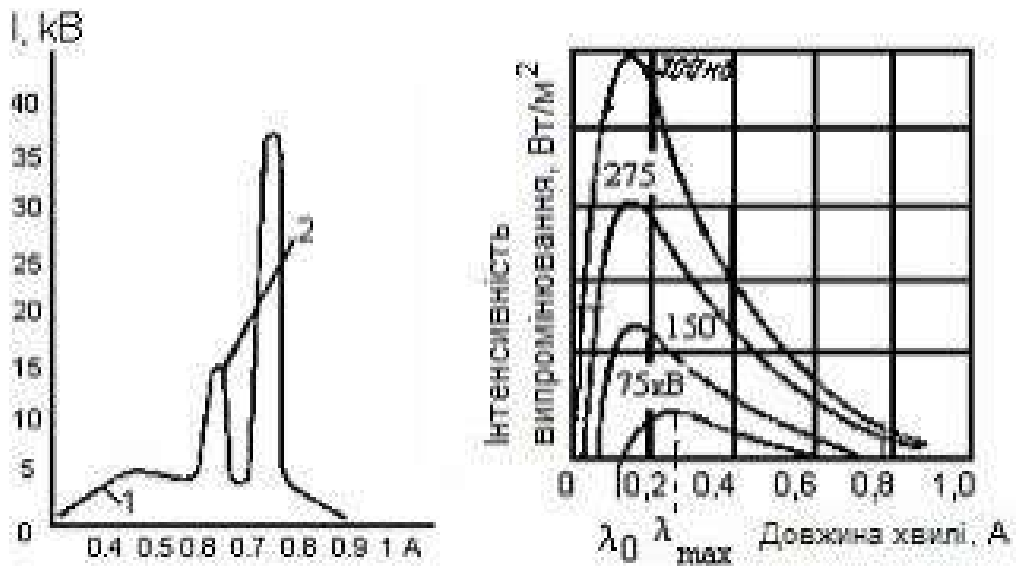


Рис. 9.6. Суцільний (1) і лінійчатий (2) спектри рентгенівського випромінювання для мішені з молібдену при $U = 35\text{кВ}$ та . спектри гальмівного рентгенівського випромінювання при різних напругах

Енергія випромінювання залежить тільки від напруги, від величини анодного струму вона не залежить. Існують різні модифікації конструкції рентгенівської трубки. Двоелектродні трубки (з напругою $U \leq 200 - 300\text{кВ}$) мають електричне фокусування електронів, при якому розмір фокусної плями не змінюється у всьому діапазоні регулювання анодного струму і напруги. Трубки з винесеним анодом, які використовуються для панорамного просвічування, мають додаткове магнітне фокусування. При напругах від 300кВ до 2МВ застосовують секціоновані (каскадні) трубки, які мають додаткові проміжні кільцеві електроди, що забезпечують вирівнювання електричного поля по довжині трубки. Магнітне фокусування дозволяє регулювати розмір фокусної плями. Сучасні рентгенівські трубки роблять розбірними;анतिकатоди знімні.

На рис. 9.8 представлена принципова конструкція двоелектродної рентгенівської трубки.

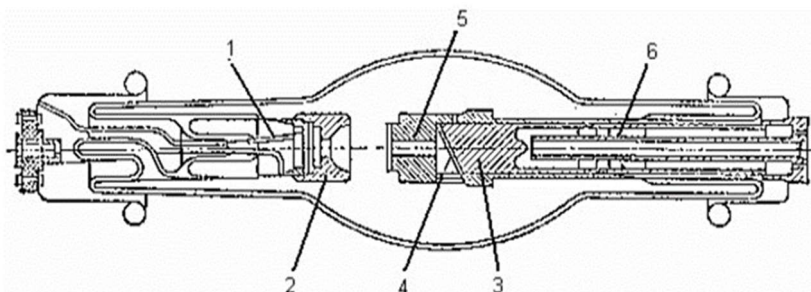


Рис. 9.8. Принципова конструкція двоелектродної рентгенівської трубки:
 1 - катод; 2 - фокусуючий пристрій; 3 - анод; 4 - вольфрамова мішень; 5 - чохол анода; 6 - патрубок для введення охолоджуючої рідини

Рентгенівський апарат складається з електронної рентгенівської трубки, вміщеній в захисний кожух, катодного і анодного генераторних пристроїв, штатива, масляного насоса, пульта управління.

Бак генераторного пристрою, кожух з трубкою і бак насоса заповнені трансформаторним маслом, яке слугує ізолятором. Масло, прокачується через захисний кожух та охолоджує анод трубки (це можуть бути і вода або зріджені гази). Захисний кожух виконують із свинцевого листа, об'єм заповнюється маслом. Масло від насоса надходить спочатку на порожнистий анод трубки, а потім в захисний кожух. Для виходу випромінювання в кожусі є спеціальне

А вікно,засклене матеріалом,слабо поглинаючим випромінювання. У трубках, розрахованих на м'яке випромінювання $\lambda_0 > 20$, $U < 30$ кВ, вікна засклені берилієм, який добре пропускає таке випромінювання.

Бетатрон. Бетатрон - індукційний прискорювач електронів (рис. 9.9, 9.10) -складається з електромагніта, рентгенівської бетатронної камери, блоку живлення і пульта управління. Від решти застосовуваних у дефектоскопії прискорювачів він відрізняється портативністю

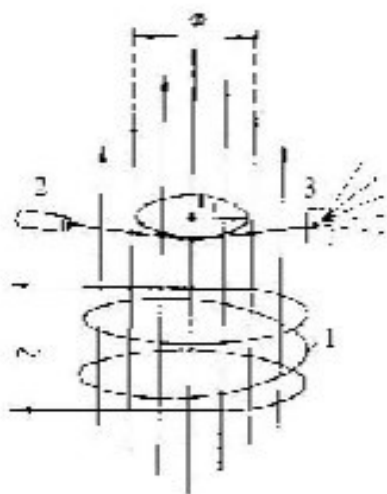


Рис. 9.9. Схема роботи бетатрона: 1 - котушка збудження; 2 - інжектор; 3 - мішень; Φ - магнітний потік

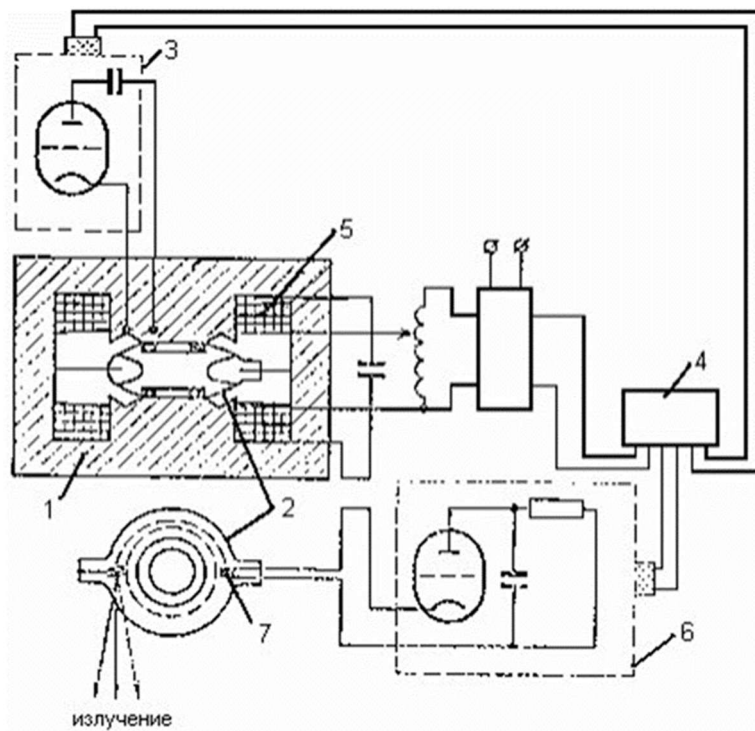


Рис. 9.10. Схема бетатрона:

1 магнітопровід; 2 - камера; 3 - блок живлення; 4 - пульт управління; 5 - котушка електромагніта; 6 - блок живлення інжектора; 7 - інжектор

В один з патрубків бетатронної камери вставлений інжектор (електронна гармата). Система інжекції змонтована в окремому блоці або під облицювальним кожухом електромагніту. Електромагніт призначений для індукування у вакуумній камері бетатрона електричного поля, необхідного для прискорення та управління рухом електронів.

Скляна кільцева камера розташована між полюсами електромагніту і є джерелом гальмівного випромінювання. Блок живлення подає на котушки змінний струм. Виникаючий магнітний потік, що змінюється синусоїдально, індукує в камері вихрове електричне поле. Під дією цього поля електрони, введені в камеру інжектором, рухаються з прискоренням по колу.

За кожен оборот електрони одержують відносно невеликий приріст енергії, приблизно 15-20 еВ, що пояснюється невеликою напруженістю електричного поля. Магнітне поле зростає від нуля до максимального значення за чверть періоду; напрямок вихрового електричного поля за цей проміжок часу не змінюється. За цей проміжок часу електрон встигає зробити величезне

(до декількох мільйонів) число обертів. При цьому електрони прискорюються до енергії декількох десятків мегаелектрон-вольт. Прискорені електрони зміщуються з рівноважної орбіти і спрямовуються на мішень з платини або вольфрама. В результаті гальмування електронів в матеріалі мішені виникає жорстке гальмівне випромінювання ($\lambda < \lambda_0$, зазвичай 0,2-2А).

Вихід випромінювання сильно залежить від енергії прискорених електронів. Максимальна енергія гальмівного випромінювання лише ненабагато менше максимальної енергії прискорених електронів.

В бетатронах з великим радіусом вакуумної камери, в яких електрони набувають великої енергії, отримується більш інтенсивне гальмівне випромінювання, ніж в бетатронах з малим радіусом камери. Ефективна енергія випромінювання становить (0,3 - 0,5) E_{max} .

Фокусування пучка електронів відбувається в процесі їх прискорення, в результаті чого фокусна пляма бетатрона має маленькі розміри (0,1-0,01мм). З нього виходить інтенсивний і дуже вузький пучок з кутом розходження (раствора) 5...60, завдяки чому забезпечується висока різкість знімків, що дає високу чутливість методам просвічування.

Серійно випускаються бетатрони для дефектоскопії виробів зі сталі (до 450 мм товщини), алюмінію (до 1800 мм), титану (до 880 мм). Бетатрон Б5М-25 застосовується в медичній практиці. Розроблені бетатрони як в стаціонарному виконанні, так і пересувні. Розміри електромагніта від 400, 520 мм до 1500, 1700 мм для великих камер (відповідно і вага від 100 кг до 5000 кг).

Лінійні прискорювачі і мікротрони. В лінійних прискорювачах частинки одноразово проходять електричне поле з великою різницею потенціалів, тобто прискорюються по прямому методу.

На рис. 9.11 представлена схема лінійного прискорювача з бігучою хвилею.

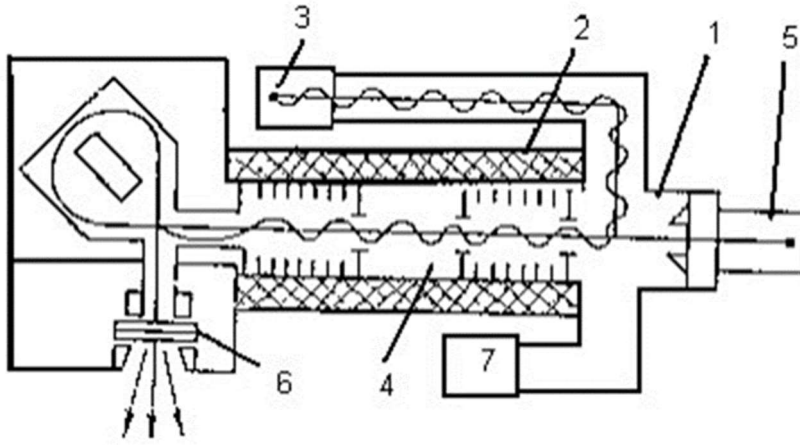


Рис. 9.11. Схема лінійного прискорювача:

1 - камера; 2 - електромагніт; 3 - генератор; 4 - хвилевід; 5 - електронна гармата; 6 - мішень; 7 - вакуумний насос

Електрони, що генеруються гарматою 5 імпульсно з енергією 30-100 кеВ, прискорюються електричним полем бігучої електромагнітної хвилі, створюваної високочастотним генератором 3 в циліндричному хвилеводі 4 (на кожні 30 см шляху в хвилеводі електронам надається енергія приблизно 1 МеВ). Електричне поле бігучої хвилі направлено по осі циліндра. Прискорені електрони потрапляють на мішень 6, в якій виникає гальмівне випромінювання великої інтенсивності. Так, лінійні прискорювачі з енергією 10-25 МеВ створюють гальмівне випромінювання, потужність експозиційної дози якого на відстані 1м від мішені складає 2000-25000 Р/хв, що дозволяє використовувати їх для контролю зварних швів товщиною 400-500 мм.

Лінійний прискорювач з секціонованою прискорюючою трубкою складається з великої кількості проміжних електродів. На кожен електрод подається зростаюча вдвічі постійна напруга. Найбільша напруга досягає 1-2 МеВ і більше при струмі 0,2 мА. Діаметр фокусної плями ~ 1 мм. Використовується для контролю деталей товщиною 125-250 мм.

Лінійний прискорювач зі стоячою хвилею складається з інжектора електронів, джерела змінної напруги і металевого резонатора, усередині якого розташовані пролітні (пролетные) металеві трубки. Електрони із інжектора потрапляють в порожнину (полость) резонатора і проходять уздовж пролітних трубок. Під дією електричного поля в проміжках між трубками електрони

прискорюються і в кінці шляху гальмуються на мішені, де і генерується гальмівне випромінювання.

Мікротрон (рис. 9.12) - циклічний резонансний прискорювач електронів з постійним за часом і однорідним магнітним полем.

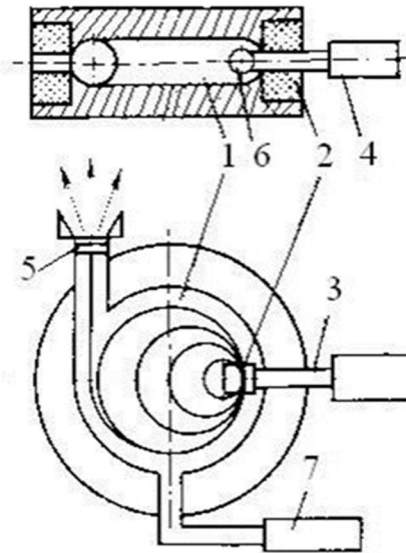


Рис. 9.12. Схема мікротрона:

1 - камера; 2 - електромагніт; 3 - хвилевід; 4 - електронна гармата; 5 - мішень; 6 - резонатор; 7 - вакуумний насос

Електрони, запущені в вакуумну камеру 1, рухаються по колах різного радіусу, які мають спільну точку дотику в місці розташування резонатора, надвисокочастотне полі якого прискорює електрони. Резонанс прискорення створюється внаслідок кратного збільшення періоду високочастотної напруги при кожному перетині електронами прискорюючого зазору резонатора. Резонатор збуджується через хвилевід 3 за допомогою потужної імпульсної електронної гармати 4. Вакуумна камера знаходиться під неперервною відкачкою за допомогою насоса 7. Прискорені електрони на останній орбіті або попадають на мішень 5, в якій виникає рентгенівське випромінювання, або за допомогою спеціального пристрою виводяться з камери. Електронний пучок мікротрона на відміну від інших типів прискорювачів володіє високою моноенергетичністю. Мікротрон дозволяє прискорити електрони до енергії в кілька сотень МеВ. Ефективна фокусна пляма мікротрона невелика (близько 2-3 мм). Мікротрон МД10 дає випромінювання експозиційної дози на відстані

1м від мішені і дозволяє просвічувати деталі товщиною до 500 мм. Час просвічування деталі товщиною 200 мм складає близько 10 с.

Радіоізотопні джерела γ - і β -випромінювання.

Джерело випромінювання являє собою закриту ампулу (заварену або завальцовану) з корозійно-стійкої сталі або сплавів алюмінію і для герметичності зверху покриту епоксидним клеєм. Усередині ампули поміщаються штучні радіонукліди, одержувані в ядерних реакторах при опроміненні речовин в нейтронних потоках або при обробці продуктів розпаду, що утворюються в реакторах.

До радіаційно-фізичних характеристик радіоактивних джерел випромінювання відносяться період напіврозпаду, спектр випромінювання, питома активність, потужність експозиційної дози на відстані 1м від джерела і геометричні розміри випромінювача.

Внутрішні розміри ампули визначають розміри активної частини джерела. Проекція активної частини ампули в напрямку просвічування утворює фокусну пляму джерела.

Для гамма-дефектоскопії застосовують ізотопи з високою питомою активністю, такі як кобальт $^{60}\text{Co} = 100\dots 200 \text{ (Ки)}_{\Gamma}$, цезій $^{137}\text{Cs} = 25 \text{ (Ки)}_{\Gamma}$, селен ^{75}Se , іридій ^{192}Ir , тулій ^{170}Tm , європій $^{152}\text{Eu} + ^{154}\text{Eu}$ та інші (найбільша питома активність становить у марганцю $^{54}\text{Mn} = 200 \text{ Ки}$).

Енергетичні спектри випромінювання застосовуваних джерел складаються з окремих груп γ - квантів і гальмівного спектру, що виникає при гальмуванні β -частинок. В спектрах більшості радіонуклідів, використовуваних при дефектоскопії, інтенсивність гальмівного випромінювання нехтуючи (надзвичайно) мала. Інтенсивність окремих ліній дискретного спектру і співвідношення між ними визначаються числом виходу γ - квантів різних енергій на акт розпаду (у відсотках).

В радіаційній дефектоскопії застосовують радіонукліди з періодом напіврозпаду від декількох днів до десятків років. В табл. 9.1 наведені деякі відомості про найбільш поширені радіонукліди.

Гамма-дефектоскоп складається з наступних основних блоків: радіаційна головка з джерелом випромінювання; пристрій для безпечної зарядки приладу ампулами, пульт управління дистанційним переміщенням

ампул, випуском і перекриттям гамма-випромінювання; штатив для кріплення радіаційної головки відносно об'єкта контролю.

Радіаційні головки мають свинцевий або вольфрамовий захист, що забезпечує зниження потужності дози випромінювання на відстані 1 м від джерела, що знаходиться в положенні зберігання, до гранично допустимої дози 2,8 мР / год (2,01 \square 10 А/кг) і менше, а на відстані 0,1 м - до 100 мР / год (7,17 \square 10⁹ А/кг) і менше. Конструктивно головки виконують з джерелом випромінювання, що може переміщуватися або нерухомим.

Конструктивно всі дефектоскопи радіаційного контролю поділяються на **універсальні шлангові дефектоскопи і дефектоскопи затворного типу.**

В **універсальних шлангових дефектоскопах** (рис. 9.13) джерело випромінювання поміщається в криволінійний канал - лабіринт і фіксується в положенні зберігання спеціальним замком. Після відкриття замка джерело може бути переміщене до вихідного вікна головки (фронтальне просвічування конусним пучком випромінювання) або може подаватися в зону контролю з радіаційної головки по гнучким ампулопроводу 6. У цьому випадку панорамний пучок випромінювання формується за допомогою змінних колімуючих (коллимируючих) головок 7. Переміщення джерела здійснюється ручним або електроприводом з пульта управління 1. Відстань між пультом і головкою у переносних приладів від 3,5 до 12 м; біля пересувних - до 50 м.

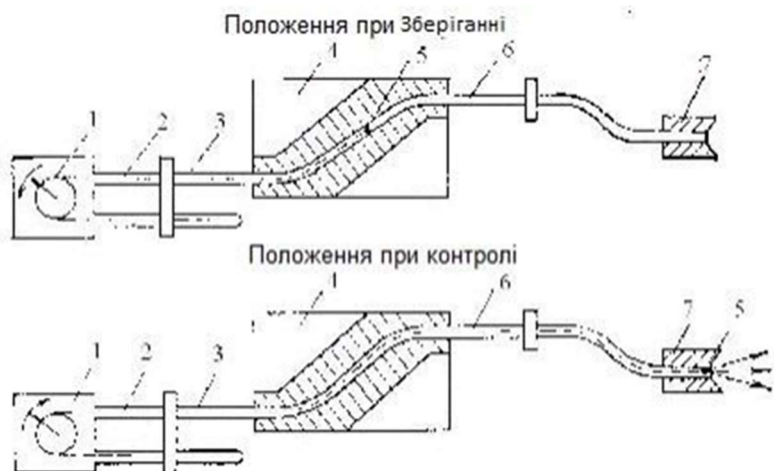


Рис. 9.13. Схема гамма-дефектоскопа шлангового типу:

1 - привід управління; 2 - подаючий трос; 3 - з'єднувальний шланг; 4 - радіаційна головка; 5 - тримач джерела випромінювання; 6 - ампулопровід; 7 - колімуюча головка

На рис. 9.14 представлена схема дефектоскопа затворного типу, призначеного для роботи в польових, цехових, монтажних умовах. Існує кілька модифікацій таких дефектоскопів.

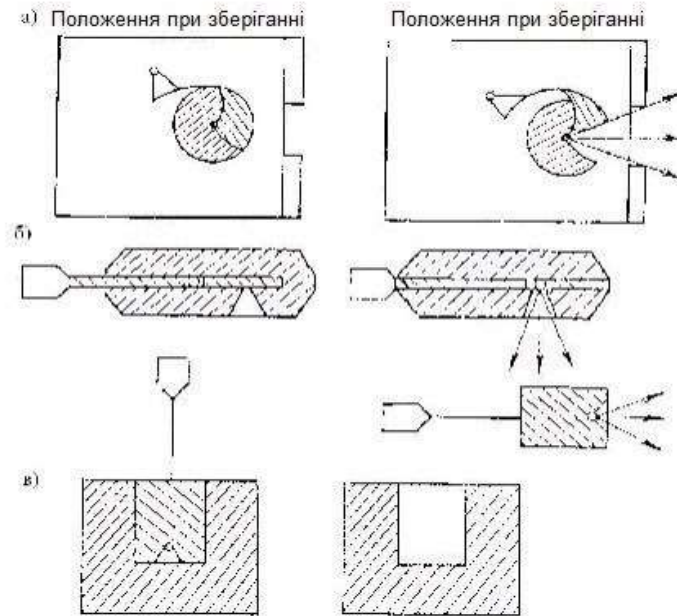


Рис. 9.14. Схеми дефектоскопа затворного типу:

а - гамма-дефектоскоп з відкриванням затвору; б - гамма-дефектоскоп з переміщенням джерела; в - гамма-дефектоскоп з виємною склянкою

9.4. Чутливість радіаційного контролю

На рис. 9.15 наведена схема радіаційного контролю виробу 1, усередині якого є дефект 2. Для визначеності припустимо, що 1 - металева деталь, а 2 - шлакове включення або непроплав в ній.

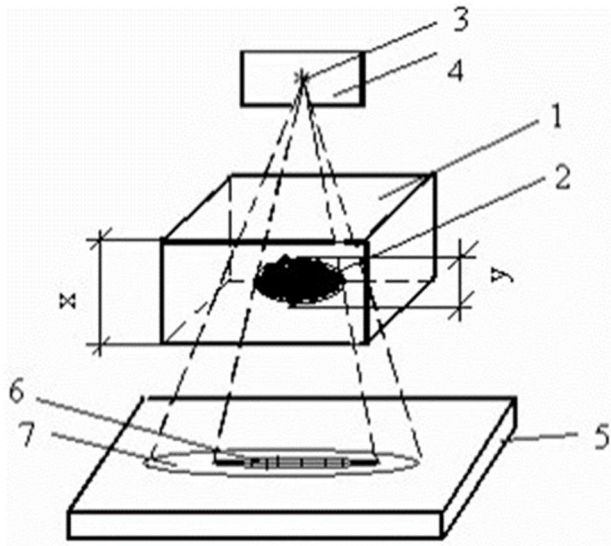


Рис. 9.15. До визначення чутливості методів РК

Джерело радіаційного випромінювання 3 (рентгенівська трубка, радіоактивний ізотоп, джерело β -частинок і т.п.) розташоване в захисному екрані 4. Реєстратором дефектів є рентгенівська плівка 5, розташована під контрольованим виробом 1. Радіаційне випромінювання, пройшовши через контрольований виріб 1 з дефектом 2, викличе різне потемніння фотоплівки 5: більш сильне 6, що відповідає зображенню дефекту 2, і більш слабке 7, що відповідає зображенню частини деталі 1 без дефектів. Ця обставина пояснюється тим, що дефекти в металевих деталях, як правило, мають щільність (густину) у багато разів менше, ніж щільність самої деталі. Ці дефекти - раковини, шлак, газові порожнини тощо. Такі неметалеві включення у багато разів слабкіше поглинають радіаційне випромінювання, ніж бездефектний метал.

Далі припустимо, що густина почорніння фотоматеріалу пропорційна інтенсивності випромінювання J , падаючого на фотоплівку (область 7 на рис. 9.15). Якщо в області 6, яка відображає дефект, інтенсивність радіаційного випромінювання дорівнює J_1 , то контрастність K зображення дефекту на фотоплівці буде дорівнює:

$$K = J - J_1. \quad (9.1)$$

Для обчислення величини контрастності припустимо, що коефіцієнт поглинання радіаційного випромінювання в матеріалі виробу дорівнює α_1 , а в матеріалі дефекту - α_2 . Товщина виробу і дефекту дорівнюють відповідно x і y (рис. 9.15). Нехай інтенсивність джерела випромінювання дорівнює J_0 . Після проходження бездефектної частини виробу інтенсивність пройденого випромінювання J буде дорівнювати

$$J = J_0 \exp(-\alpha_1 x). \quad (9.2)$$

Під місцем розташування дефекту інтенсивність випромінювання

$$J = J_0 \exp(-\alpha_1(x-y) - \alpha_2 y). \quad (9.3)$$

В цьому виразі перший доданок в показнику ступеня експоненти враховує ослаблення інтенсивності випромінювання в матеріалі виробу, а другий доданок - в матеріалі дефекту.

Підставивши вирази (9.3) і (9.2) у формулу (9.1), отримаємо контрастність зображення дефекту

$$K = J \frac{1 - \exp(-(\alpha_1 - \alpha_2)y)}{1 - \exp(-\alpha_1 x)}. \quad (9.4)$$

Розміри дефекту y завжди мізерно малі в порівнянні з розмірами x контрольованого матеріалу, а коефіцієнт поглинання α_2 в матеріалі дефекта y багато разів менше коефіцієнта поглинання α_1 в контрольованому матеріалі. Розкладаючи експоненціальну функцію в степеневий ряд, з виразу (9.4) отримаємо

$$K = J \frac{1 - 1 + (\alpha_1 - \alpha_2)y - \dots}{1 - \exp(-\alpha_1 x)} = J(\alpha_1 - \alpha_2)y. \quad (9.5)$$

З виразу (9.5) випливає, що контрастність зображення дефектів при РК, по-перше, пропорційна товщині дефекту y , по-друге, пропорційна різниці коефіцієнтів поглинання випромінювання в матеріалах виробу і дефекту

$\alpha_1 - \alpha_2$.

Ці результати природно було очікувати виходячи з уявлень про фізичні процеси при радіаційному контролі.

Більш цікавий висновок з формули (9.5) можна отримати, якщо її спростити, враховуючи, що завжди $\alpha_2 \ll \alpha_1$. Тоді

$$K = J\alpha_1 y. \quad (9.6)$$

З виразу (9.6) випливає, що контрастність зображення дефектів тим більше, чим більше коефіцієнт поглинання випромінювання в контрольованому матеріалі. Цей висновок прямо протилежний висновку, наприклад, при контролі за допомогою випромінювання ультразвукових хвиль, коли чіткість контролю знижується із зростанням коефіцієнта поглинання хвиль.

Вираз (9.6) дозволяє зробити практично важливий висновок: контроль за допомогою радіаційного випромінювання найбільш ефективний для матеріалів з великими коефіцієнтами поглинання. Це в основному метали.

9.5. Способи реєстрації радіаційних зображень

Найбільшого поширення в радіаційній дефектоскопії отримав радіографічний контроль з використанням в якості детектора випромінювання радіографічної плівки. В якості джерел випромінювання при цьому контролі використовуються всі три типи джерел випромінювання.

Різновидом радіографічного контролю є **флюорографічний метод**, при якому розподіл інтенсивності іонізуючого випромінювання перетворюється у видиме світло на сцинциляторному екрані і потім реєструється за допомогою оптичної системи на флюорографічній плівці (рис. 9.16, а, б).

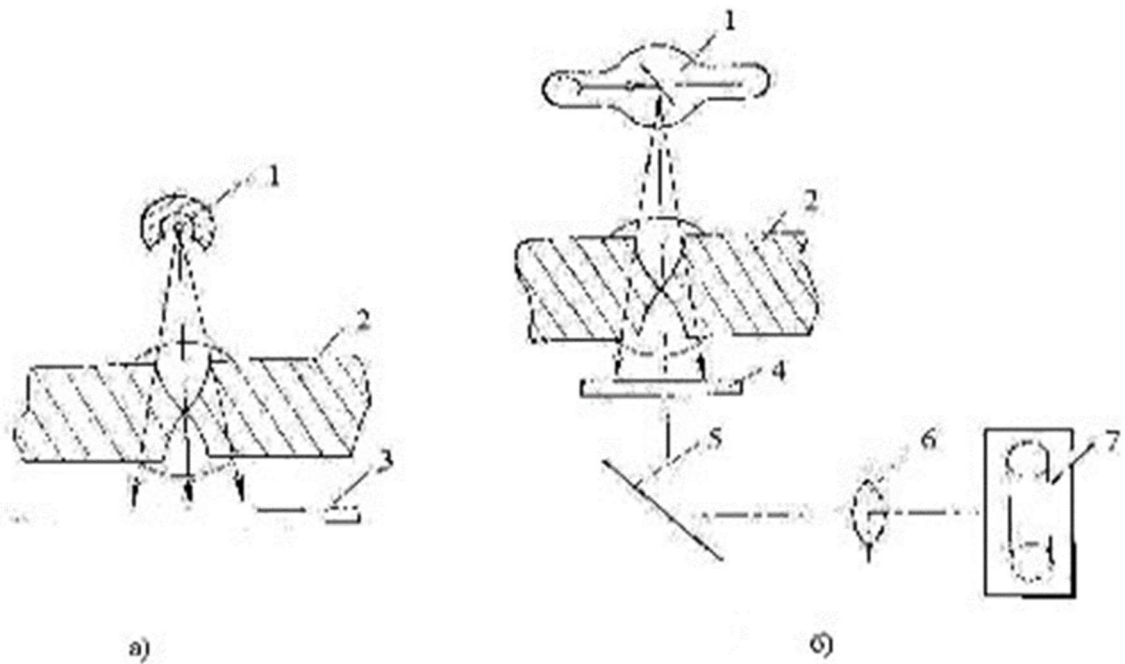


Рис. 9.16. Схема радіографічного контролю з використанням: а - радіографічної плівки; б - флюорографічної плівки; 1 - джерело випромінювання; 2 - контрольований об'єкт; 3 - радіографічна плівка; 4 - монокристалічний екран; 5 - дзеркало з поверхневим відбиванням; 6 - оптична система; 7 - касета з флюорографічною плівкою

Найбільшого поширення в якості детектора при радіографічному методі контролю отримали **радіографічні плівки**.

Радіографічні плівки поділяють на дві групи:

1. **безекранні** для використання без флуоресцентних екранів або з металевими підсилюючими екранами

2. **екранні** плівки, які застосовуються спільно з флуоресцентними екранами.

Основними характеристиками плівок є спектральна чутливість, контрастність і роздільна здатність. На рис. 9.17 представлена схема будови радіографічної плівки. Основою плівки служить гнучка прозора підкладка 4 з негорючої пластмаси - ацетілцелюлози. На підкладку з двох сторін наносять чутливу до випромінювання емульсію 2, що представляє собою шар желатини товщиною 10-30 мкм, у якій рівномірно розподілені мікрокристали бромистого срібла. Розміри мікрокристалів не перевищують 3 мкм. Для збільшення міцності з'єднання між емульсією і підкладкою лежить шар спеціального клею 3, званий підшаром. Зовні на емульсію наносять захисний

шар 1 із задубленої желатини товщиною до 1 мкм для запобігання емульсії від механічних пошкоджень.

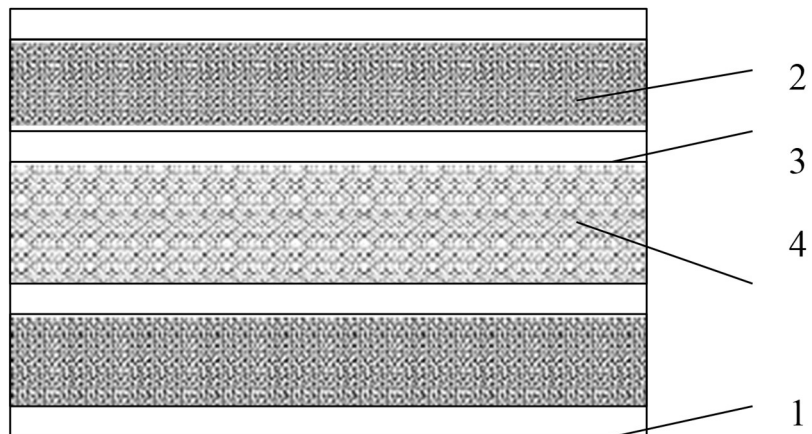


Рис. 9.17. Схема будови радіографічної плівки

Під впливом випромінювання бромісте і хромісте срібло розкладаються і виділяють срібло чорного кольору. Подвійний шар фотоемulsії збільшує чутливість в два рази. Чутливість плівки визначається оптичною густиною почорніння

На рис. 9.18 представлений приблизний вигляд характеристичної кривої плівки, яка є залежністю густини почорніння від логарифма експозиції.

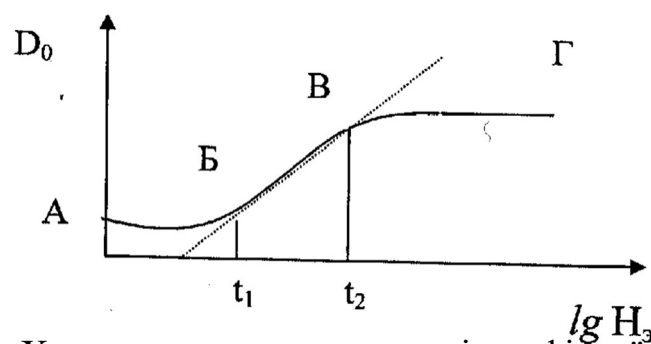


Рис. 9.18. Характеристична крива радіографічної плівки

Початкова ділянка характеристичної кривої відповідає відсутності випромінювання. Вона характеризує густину вуалі D_{01} - величину густини обробленої плівки, яка не піддана опроміненню.

При тривалому зберіганні D_{01} збільшується. Ділянку кривої АБ називають областю **недоплатки**. В цій області почорніння плівки зі збільшенням експозиції незначне. На ділянці ВВ густина почорніння

пропорційна експозиції. Ця область відповідає області робочих експозицій у радіографії. Тангенс кута нахилу робочої ділянки називають коефіцієнтом контрастності плівки. Ділянка ВГ відповідає області **перетримки**.

Чутливість плівки вимірюють величинами, зворотними величині дози випромінювання, необхідної для отримання густини, що перевищує на 0,85 густину вуалі.

Випадково виникаючі скупчення і розрядження зерен срібла створюють враження зернистості зображення і погіршують виявляємість дрібних дефектів при радіографічному контролі.

Зернистість називають також гранулярністю G. Із збільшенням енергії випромінювання гранулярність зростає. Велику гранулярність мають зображення, отримані із застосуванням підсилюючих флуоресцентних екранів. Гранулярність радіографічних знімків, а також розсіювання випромінювання в емульсії радіографічних плівок призводить до того, що стрибкоподібна зміна інтенсивності випромінювання на границях дефекту реєструється як плавна зміна густини почорніння радіографічної плівки. Кількісну характеристику величини розмиття називають **власною нерізкістю** радіографічних детекторів випромінювання u_p . Величина власної нерізкості безекранних радіографічних плівок залежить від спектрального складу випромінювання і дорівнює 0,4 мм при використанні в якості джерела випромінювання ^{60}Co , 0,28 мм при використанні ний ^{192}Ir і 0,1 мм для ^{170}Tm . При використанні гальмівного випромінювання з максимальною енергією в спектрі від 150 до 250 кеВ величина власної нерізкості змінюється від 0,1 до 0,17 мм.

Радіографічні плівки можна використовувати в комбінації з екранами (металевими або флуоресцентними).

Екранні радіографічні плівки призначені для реєстрації випромінювання оптичного діапазону, що виникає при впливі іонізуючого випромінювання на флуоресцентні екрани. Вони сенсibilізовані в оптичному діапазоні випромінювання, їх спектральна чутливість узгоджена зі спектром випромінювання флуоресцентних екранів.

У порівнянні з безекранними плівками екранні мають велику чутливість і менший коефіцієнт контрастності. Власна нерізкість екранних плівок при

використанні гальмівного випромінювання з максимальною енергією в спектрі 150 - 250 кеВ становить 0,6 мм.

Підсилюючі металеві екрани застосовують для скорочення часу просвічування. Підсилююча дія металевих екранів заснована на вибиванні з них вторинних електронів під дією іонізуючого випромінювання. Вибиті електрони діють на емульсію плівки і викликають додаткову фотохімічну реакцію, яка посилює дію первинного випромінювання.

Металеві екрани виконують з важких елементів - свинцю, міді, рідше - з вольфраму і титану. Екрани встановлюють позаду і попереду радіографічної плівки. Застосування екранів призводить до скорочення експозиції. Задній екран захищає плівку від розсіяного випромінювання.

Флуоресцентні екрани виготовляють на основі люмінофор. Підсилююча дія флуоресцентних екранів пов'язана з додатковим впливом на плівку світіння, виникаючого в люмінофорі під дією іонізуючого випромінювання. В якості люмінофорів використовують суміш дрібних кристалів сульфїду цинку і сульфїду кадмію, активованих сріблом ZnS (Ag); CdS (Ag), а також CaWO₄; (Ba, Pb) SO₄; Gd₂O₂S (Tb).

Люмінофор із зв'язуючою речовиною наносять на папір або картон. Радіографічну плівку розміщують між двома флуоресцентними екранами, у разі використання односторонніх радіографічних плівок - один екран, розташований з того боку плівки, на яку нанесена емульсія. При високих енергіях випромінювання перед переднім екраном або замість нього встановлюють металевий екран.

Основними характеристиками підсилюючих флуоресцентних екранів є коефіцієнт підсилення і величина власної нерізкості.

Коефіцієнт підсилення - відношення часу експозиції при використанні флуоресціюючих екранів, необхідного для отримання знімка із заданою оптичною густиною, до часу експозиції на тій же плівці без підсилюючих екранів. Величина коефіцієнта підсилення залежить від енергії випромінювання.

Власна нерізкість флуоресцентних екранів пов'язана з розсіюванням світла в екранах і залежить від густини упаковки зерен флуоресцентної

речовини в екрані. Величина власної нерізкості флуоресцентних екранів значно перевищує величину власної нерізкості радіографічної плівки і становить від 0,4 до 0,6 мм.

Коефіцієнт контрастності флуоресцентних екранів $k_n = 1$. Коефіцієнт контрастності екранних радіографічних плівок значно нижче, ніж коефіцієнт контрастності безекранних плівок. Отже, при однаковому радіаційному контрасті загальний контраст зображення на знімках, отриманих з використанням флуоресцентних екранів, значно нижче, ніж на знімках, отриманих при використанні безекранних плівок з металевими екранами.

Радіаційний контраст, створюваний джерелами випромінювання, не залежить від детектора випромінювання. Отже, застосування флуоресцентних екранів призводить до погіршення виявляємості дефектів. Однак радіаційний контраст може бути збільшений при використанні флуоресцентних екранів на основі рідкоземельних елементів з великим коефіцієнтом підсилення, оскільки їх застосування дозволяє знизити напругу на рентгенівській трубці. Це, в свою чергу, збільшує коефіцієнт ослаблення випромінювання і дозволяє отримати контраст зображення, що перевищує контраст зображення, одержуваний при використанні безекранних плівок.

Різновидом радіографічного контролю є **ксерорадіографія**.

Ксерорадіографія - спосіб отримання зображення на поверхні тонкого шару напівпровідникового матеріалу, електропровідність якого залежить від інтенсивності іонізуючого випромінювання.

Ксерорадіографічна пластина - тонкий шар селену високої чистоти (99,992%), напилений у вакуумі на поліровану провідну підкладку. Як матеріал підкладки найчастіше використовується алюміній, можливе використання латуні, скла чи паперу з провідними шарами. Товщина шару селену становить 100-400 мкм. Чутливість пластин K визначають величиною, зворотною дозі випромінювання, при якій досягається задана густина почорніння. Перед проведенням експонування пластину сенсібілізують, для чого її з заземленою підкладкою (подложкой) пересувають над дротяним електродом, що знаходиться під напругою 5-10 кВ відносно заземленої підкладки. В результаті виникає коронний розряд, і поверхня селенового шару, звернена до електрода, заряджається до потенціалу 600 В щодо підкладки.

Операція сенсібілізації і подальшого експонування пластини проводиться в темряві. Сенсібілізовану пластину поміщають в світлонепроникну касету і розташовують за КО.

Під дією іонізуючого випромінювання електропровідність пластини зростає і потенціал селенового покриття знижується пропорційно дозі випромінювання, поглиненого в шарі селену під зарядженою ділянкою. На наступній стадії ксерорадіографічного процесу потенціальний рельєф, що утворився на селеновому шарі, проявляють, для чого на поверхню пластини з боку селенового шару напилюють попередньо заряджені частинки дрібнодисперсного порошку барвника. В результаті електростатичної взаємодії заряджених частинок з потенційним рельєфом селенового шару пластини отримують просторовий розподіл шару барвника, який відображає розподіл інтенсивності випромінювання за КО.

Після проявлення зображення на ксерографічній пластині його переносять на папір і закріплюють.

Папір з липким шаром гумовим валиком накочують до пластини, потім папір витримують в парах органічного розчинника або нагрівають. При цьому липкий шар паперу розмякає і утворює з барвником міцне зображення.

Ксерографічна установка дозволяє ефективно контролювати вироби зі сталі товщиною 25-30 мм. Це перспективний вид контролю, роздільна здатність теоретично складає 50 ліній/мм. В даний час якість випускаємих пластин дозволяє отримати роздільну здатність близько 10 ліній/мм і більше (у рентгенографічних плівок роздільна здатність поки вище). При низьких енергіях випромінювання чутливість ксерографічних пластин перевищує чутливість радіографічних плівок, тому їх застосування перспективно при контролі тонких сталевих виробів та виробів з легких сплавів.

При радіографічному методі контролю важливий правильний вибір відстаней між джерелом, контрольованим об'єктом і детектором. Геометрична нерізкість може бути зменшена застосуванням джерела з можливо малим лінійним розміром фокусної плями, установкою касети з плівкою впритул до просвічуваної ділянки і збільшенням фокусної відстані.

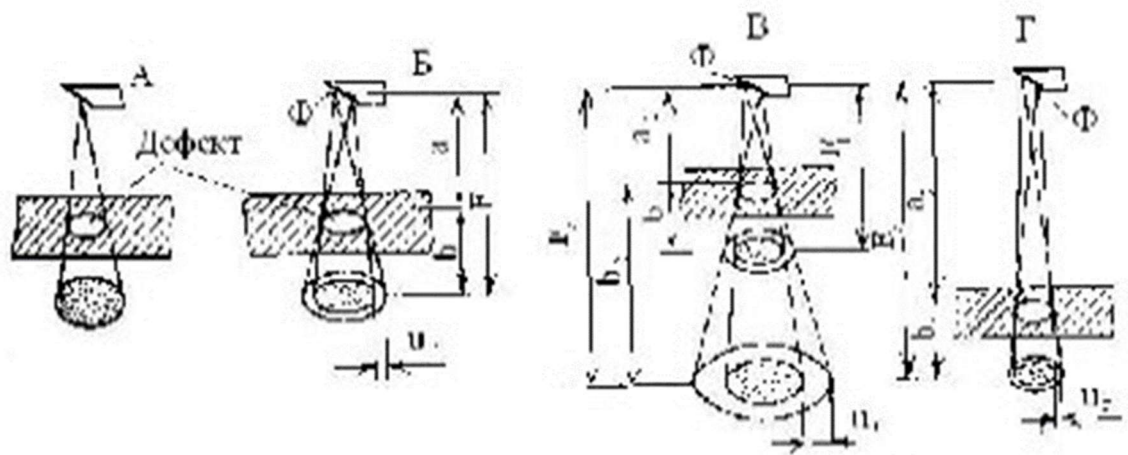


Рис. 9.19. Основні геометричні співвідношення при радіографічному контролі: А - точкова пляма; Б - лінійна пляма; В, Г - зміна нерізкості при зміні відстані між дефектом і детектором

Якщо відстань від дефекту до плівки велика (КО великий або плівку не можна прикласти впритул до поверхні об'єкта), зображення дефекту виходить збільшеним, з розмитими краями, зниженим радіаційним контрастом. Величина геометричної нерізкості має максимальну величину для дефектів, розташованих на поверхні виробу, зверненої до П.

Від вибору фокусної відстані F залежать продуктивність контролю і мінімальні розміри виявляємих дефектів.

Продуктивність радіографічного контролю прийнято вимірювати лінійним розміром або площею ділянки деталі, контрольованої за одиницю часу. При зростанні F зростає розмір контрольованої ділянки, зменшується нерізкість (ефект розмитості). Однак надмірне збільшення фокусної відстані веде до значного збільшення часу експозиції, що знижує продуктивність контролю.

При реєстрації зображення дефектів геометрична нерізкість сумується з власною нерізкістю радіографічної плівки U_p . Нерізкість зображення на радіографічній плівці погіршує виявлення дефектів, особливо коли величина нерізкості порівнянна з розмірами дефекту. Для контролю зварних та стикових з'єднань, литих виробів рекомендується дотримуватися деяких оптимальних геометричних співвідношень між джерелом, контрольованим об'єктом і детектором.

При просвічуванні деталей, що мають різкі перепади товщини, отримуються дуже контрастні негативи. Зображення тонких частин виходить занадто темним, а товстих - занадто світлим (оптична густина почорніння виходить за межі оптимальних значень). В цих випадках вживають таких заходів:

1) проводять просвічування при великих значеннях напруги порівнянно з оптимальними;

2) у вікна захисного кожуха встановлюють фільтри (вони фільтрують м'яке випромінювання і створюють пучок жорсткого випромінювання - зі збільшенням жорсткості випромінювання контрастність зменшується);

3) використовуються менш контрастні плівки без підсилюючого флуоресціюючого екрану;

4) застосовують дві плівки з різною чутливістю;

5) застосовують спеціальні компенсатори - тверді (прокладки з матеріалу деталі), сипучі (дрібний дріб, металеві або пластичні мастики, сурик, парафін) або рідкі – водні розчини хлористого або йодистого барію.

Наведемо основні правила просвічування, що забезпечують високу чутливість радіографічного методу:

- фокусна пляма має бути по можливості якнайменшою;

- фокусна відстань повинна бути по можливості максимальною; - плівка повинна бути дрібнозернистою (висококонтрастною);

- розмір поля опромінення повинен бути якомога менше;

- плівка повинна бути розташована якомога ближче до КО;

- вісь робочого пучка випромінювання повинна бути спрямована перпендикулярно плівці;

- слід зменшувати дію розсіяного випромінювання на плівку.

Для розшифровки результатів контролю широко використовують негатоскопи. До найбільш вдалих відносять ті, в яких в якості джерела використані галогенні лампи. Їх відрізняють невеликі габарити, потужний світловий потік, хороша рівномірність освітлення вихідного вікна.

Радіоскопічний метод заснований на представленні кінцевої інформації про іонізоване випромінювання на флуоресцентном екрані за допомогою електронно-оптичних перетворювачів, оптичних підсилювачів і телевізійних

систем. Як джерело іонізуючого випромінювання використовують рентгенівські апарати, а також потужні джерела випромінювання високої енергії - лінійні прискорювачі мікротронів. При радіоскопічному контролі в якості детекторів використовуються флуоресцентні або монокристалічні екрани. Зображення з цих екранів через оптичну систему передають на приймальню трубку телевізійної системи і спостерігають з потрібним підсиленням (рис. 9.20). Як детектори випромінювання можуть бути також використані рентген - відікони, які одночасно є і детектором випромінювання, і передавальною телевізійною трубкою. Зображення, підсилене телевізійною системою, спостерігають на екрані відео-контрольного пристрою (рис. 9.21). Джерелами випромінювання в таких випадках служать рентгенівські апарати.

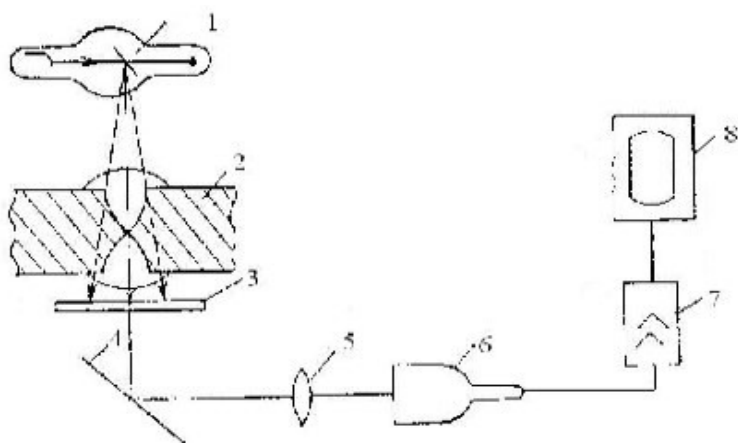


Рис.9.20. Схема радіоскопічного контролю з використанням монокристалічного екрану: 1 - джерело; 2 - контрольований об'єкт; 3 - монокристалічний екран; 4 - дзеркало з поверхневим відбиванням; 5 - оптична система; 6 - передавальна телевізійна трубка; 7 - підсилювач; 8 - відеоконтрольний пристрій

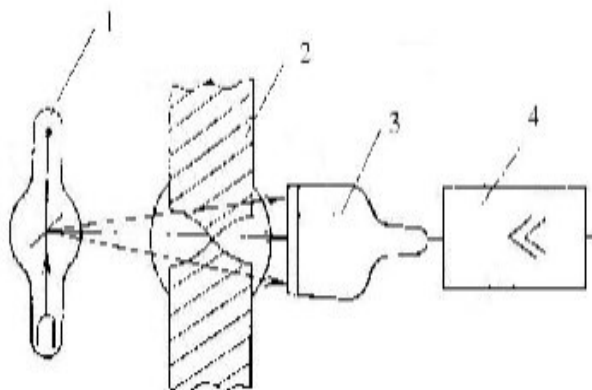


Рис. 9.21. Схема радіоскопічного контролю з використанням рентгенотелевізійної установки з рентген-відіконом: 1 - джерело; 2 - контрольований об'єкт; 3 - рентген-відікон; 4 - підсилювач

Обов'язковим елементом будь-якої схеми є вхідний екран-перетворювач тіньового радіаційного зображення в зображення, представлене іншою формою енергії.

В якості перетворювачів при радіоскопічному методі контролю використовують:

1. рентгенооптичні перетворювачі, які перетворюють радіаційне зображення у видиме;
2. фоторезистивні перетворювачі, що переводять радіаційне зображення в рельєф провідності на напівпровідниковому екрані;
3. рентгено-електронні перетворювачі, що перетворюють радіаційне зображення в потік електронів.

В останніх двох випадках необхідно подальше перетворення потенціального рельєфа або потоку електронів в оптичне зображення.

Радіоскопія дозволяє спостерігати як безпосереднє зображення об'єкта контролю на екрані, так і дистанційну передачу зображення телевізійною системою.

До основних характеристик елементів схем радіоскопічного контролю належать:

- квантовий вихід - число носіїв інформації, які генеруються в приймачі на один поглинений квант;
 - ефективність виходу, або ККД знімання інформації - частка носіїв інформації, які можуть бути використані для подальшого формування зображення;
 - чутливість перетворювача, яка характеризується відношенням світлового потоку або струму електронів на виході перетворювача до потужності експозиційної дози;
 - інерційність перетворювача, яка характеризується інерційною сталою
- реакції перетворювача на включення або вимикання випромінювання;

- контрастність перетворювача кп, яка характеризується зміною радіаційного зображення після перетворення; для більшості перетворювачів $k_p \leq 1$, тобто в кращому випадку перетворювач не погіршує контрасту первинного зображення;

- роздільна здатність п, яка визначається числом ліній на міліметр при 100% -му контрасті радіаційного зображення $k_p = \frac{f}{p}$, - власна нерізкість U_p перетворювача, $U_p = 1,5$;

- частотно-контрастна характеристика – функціональний зв'язок між роздільною здатністю перетворювача і контрастом одержуваного зображення.

Найчастіше в якості екранів використовують рентгенооптичні перетворювачі, флуороскопічні і монокристалічні екрани.

Флуороскопічні екрани являють собою шар люмінофора, змішаного з речовиною, нанесений на підложку. Флуороскопічні екрани не прозорі для власного випромінювання, товщина шару люмінофора невелика. При збільшенні випромінювання ефективність флуороскопічних екранів знижується. Роздільна здатність не перевищує 2-3 ліній / мм.

Монокристалічні екрани виконані з монокристалів лав йодистого цезію або натрію, активованого талієм.

CsI (Tl) більш чутливий, ніж NaI (Tl). Вони володіють меншим квантовим рівнем, але більшою поглинає здатністю;

спектр випромінювання краще відповідає чутливості фотокатодов передавальних телевізійних трубок. Роздільна здатність близько 10 ліній / мм. Екрани прозорі для власного випромінювання, товщина застосовуваного екрану залежить від енергії випромінювання. Чим більше енергія випромінювання, тим більше ефективно застосування монокристалічних екранів.

Флуороскопічні і монокристалічні екрани безінерційні. Серійно випускаються екрани різної форми: диски (до 200 мм в діаметрі), пластини (до 1500x1000x20 мм), блоки, плівки товщиною 0,05-0,5 мм.

До іншого виду перетворювачів - фоторезисторні перетворювачі - відносяться рентген-відікони. Це передавальна телевізійна трубка, чутлива до

іонізуючого випромінювання. Перетворення радіаційного зображення в потенційний рельєф відбувається в тонкому шарі напівпровідника, нанесеного з внутрішньої сторони вхідного вікна рентген - відікона. Мала товщина шару напівпровідника дозволяє отримати хорошу роздільну здатність, що перевищує роздільну здатність радіографічного знімка. Перетворення зображення на вхідному вікні трубки має переваги перед передачею оптичного зображення з екрану, оскільки усуваються два етапи перетворення: рентген - світло і оптична передача, усуваються втрати в оптичній системі. Недолік - система володіє значною інерційністю, що не дозволяє спостерігати зображення в динаміці, поле рентгенівського контролю обмежено полем фотопровідної мішені.

Рентгеноелектронне перетворення використовують в рентгенівських електронно-оптичних перетворювачах (РЕОП).

Електрони, що вибиваються іонізуючим випромінюванням з вхідного вікна РЕОП, прискорюються високою напругою і фокусуються на вихідному вікні, на яке нанесений шар люмінофора (рис. 9.22). Під дією прискорених електронів на вихідному вікні виникає зменшене оптичне зображення. Роздільна здатність - до 50 ліній/мм.

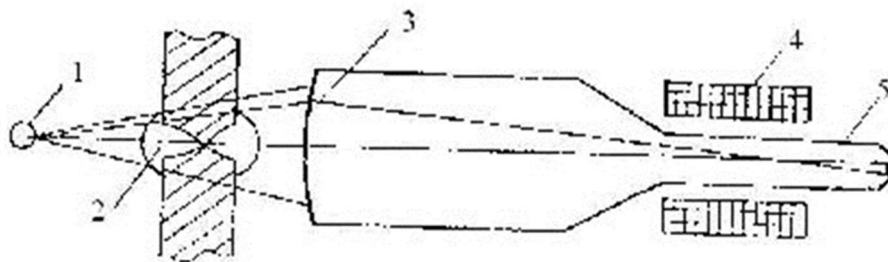


Рис. 9.22. Схема рентгенівського електронно-оптичного перетворювача:

1 - джерело випромінювання; 2 - контрольований виріб; 3 - фотокатод; 4 - фокусує котушки; 5 - вихідний екран

Радіоскопічний метод контролю дозволяє досліджувати КО безпосередньо в момент просвічування. Мала інерційність дозволяє контролювати об'єкт під різними кутами, це полегшує розшифровку результатів контролю, дозволяє відокремити зображення КО від шуму, що виникає в тракті формування зображень.

Зазвичай максимальна товщина КО зі сталі не перевищує 10-45 мм (рідше 80-150 мм). У цьому випадку необхідно застосування потужних джерел іонізуючого випромінювання (мікротронів або лінійних прискорювачів).

Основний недолік радіоскопічного методу контролю - неякісний документальний запис результатів контролю; складна електронна апаратура; великі габарити і маса блоку перетворювача.

При **радіометричному контролі** інтенсивність іонізуючого випромінювання вимірюють послідовно в різних точках за КО (рис. 9.23). В якості джерел зазвичай використовують радіоактивні джерела випромінювання або прискорювачі електронів. В якості детекторів найчастіше застосовуються сцинтиляторний детектор, напівпровідниковий детектор, рідше - іонізаційні камери та газорозрядні лічильники.

Вузький пучок іонізуючого випромінювання переміщається по КО, послідовно просвічуючи всі його ділянки. Випромінювання, що пройшло через об'єкт, реєструється іонізаційним детектором випромінювання, на виході якого утворюється електричний сигнал з величиною, пропорційною інтенсивності поступаючого випромінювання. Електричний сигнал, пройшовши підсилювач, реєструється індикаторним пристроєм - самописцем, осцилографом, міліамперметром тощо. За наявності дефекту реєструючий пристрій відзначає зростання інтенсивності.

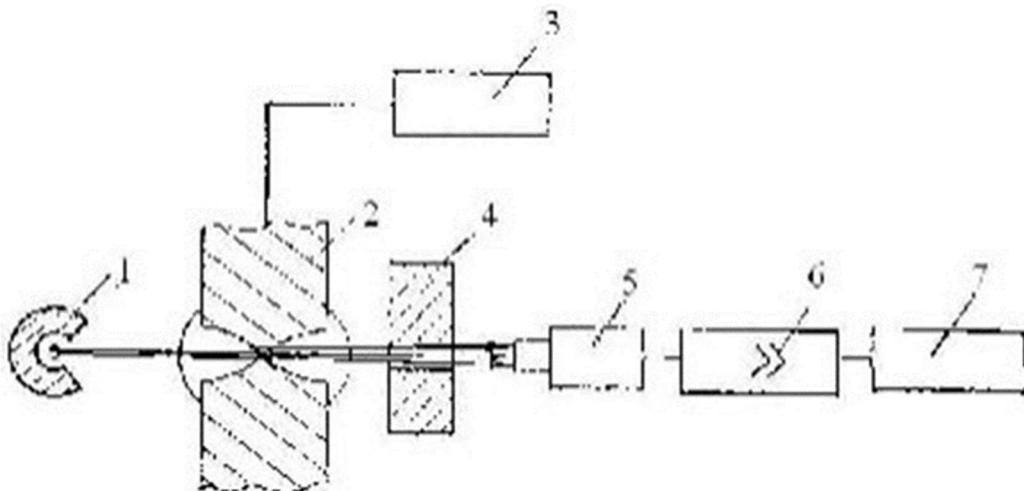


Рис. 9.23. Схема радіометричного контролю: 1 - джерело випромінювання; 2 - контрольований об'єкт; 3 - механічний пристрій для переміщення контролюваного виробу; 4 - коліматор; 5 - детектор випромінювання; 6 - підсилювач, 7 - самописець

Для збільшення роздільної здатності потрібен дуже вузький пучок. Однак якщо пучок дуже вузький, то знижується число фотонів, що потрапляють на детектор. Зазвичай площа вікна коліматора становить близько 1 см^2 .

Радіометричні методи дозволяють визначити протяжність дефекту і його променевий розмір. Об'ємні дефекти визначаються з точністю до 3-5%.

Переваги радіометрії - висока чутливість (0,3-3%), можливість безконтактного контролю, висока (порівняно з радіографією) продуктивність. До **недоліків** слід віднести необхідність одночасного переміщення на однаковій відстані джерела іонізуючого випромінювання і дефекту; неможливість визначення форми і глибини розташування дефекту; неможливість усунення впливу розсіяного випромінювання.

У промисловості використовується для контролю сталених виробів товщиною від 20 до 1000 мм.

Принцип роботи **іонізаційних детекторів** заснований на іонізуючій дії випромінювання на газ. Вихідним сигналом є іонізаційний струм або імпульси струму, що виникають при дії на газове середовище випромінювання.

На рис. 9.24 наведено графік залежності імпульсу струму від напруги на електродах, на якому виділені робочі ділянки різних іонізаційних детекторів випромінювання. В залежності від величини напруги U , що подається на електроди, існують різні режими роботи трубки: -режим насичення, - режим пропорційності, - режим газового розряду.

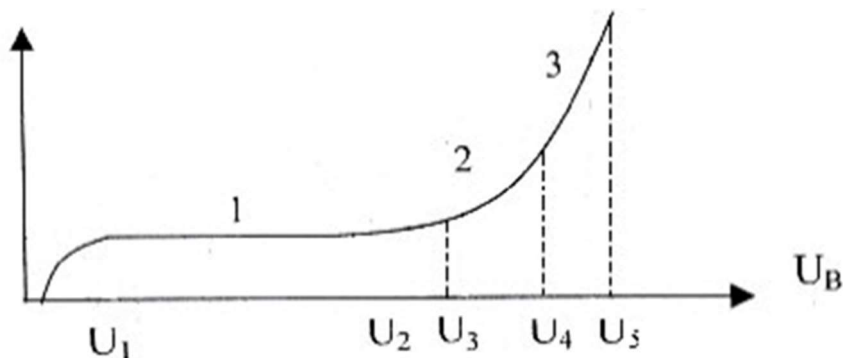


Рис. 9.24. Залежність імпульсу струму вихідного сигналу від напруги на електродах газорозрядного лічильника при різних режимах роботи

Іонізаційні камери працюють в режимі насичення іонізаційного струму при порівняно невеликих напругах, що подаються на електроди $U_{ел}$ (100-220 В).

Детектування α - і β - частинок відбувається за рахунок безпосередньої іонізації цими частками газу в камері; детектування γ - квантів обумовлено в основному вторинними електронами, які вивільняються при взаємодії цього випромінювання зі стінками камери. Для детектування потоку теплових нейтронів, які не іонізують газ безпосередньо, в матеріал камери або газ вводять добавки (кадмій, бор), що забезпечують ядерну реакцію, в процесі якої утворюються заряджені частинки.

Пропорційні лічильники (ПЛ) (рис. 9.25) працюють в режимі газового підсилення (область 2 рис. 9.24), де імпульс струму пропорційний первинній іонізації. На електроди подається напруга $U \geq 300 - 400В$, електрони, створені випромінюванням всередині лічильника, набувають енергії, достатньої для іонізації газу. Виникаючі при цьому вторинні електрони рухаються до нити аноду з прискоренням і створюють на своєму шляху нові електрони і т.д. Виникає лавиноподібний процес, званий **газовим підсиленням**. Коефіцієнт газового підсилення становить $10...10^4$ і пропорційний прикладеній напрузі. Вихідний сигнал ПЛ значно більше сигналу іонізаційної камери. За величиною імпульсу можна судити про вид випромінювання або його енергії.

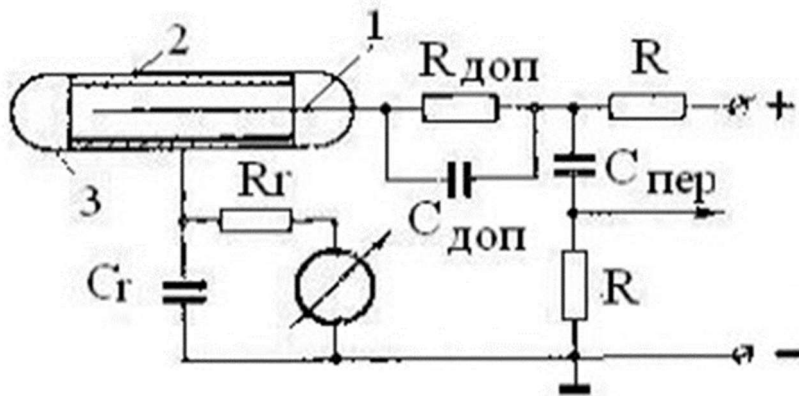


Рис. 9.25. Схема пропорційного лічильника:

1 - нитка аноду; 2 - катод у вигляді металевого циліндра; 3 - скляний балон

Лічильники Гейгера-Мюллера також є пропорційними, але працюють в режимі самостійного розряду (область 3 рис. 9.24), коли амплітуда імпульсу не залежить від виду та енергії реєстрованого випромінювання. Напряга $U_{ел}$ в цьому випадку складає $\sim 700 - 1000$ В.

При цій напрузі відбувається збудження молекул газу (випромінювання ультрафіолетових фотонів та інтенсивне вибивання іонами вільних електронів з катода), що призводить до розряду по всій довжині нитки анода. Вплив навіть однієї частинки викликає неперервний розряд по всьому об'єму лічильника, як це відбувається в неонових трубках. Для реєстрації наступної частинки необхідно автоматично перервати розряд в трубці.

В самогасячих лічильниках в газ, що наповнює лічильник, вводять гасячу добавку - гази органічних сполук, кисень або галогенні сполуки.

Самогасячі галогенні лічильники працюють при менших напругах $U_{ел} \approx 400 - 450$ В і володіють високою чутливістю. Вихідний сигнал цих лічильників не залежить від типу випромінювання і має велику амплітуду (від 1 до 50 В).

Лічильники Гейгера-Мюллера використовуються для вимірювання густини потоку частинок або потужності дози різних видів випромінювання.

Напівпровідникові детектори (НПД) (рис.9.26) працюють за принципом фотопровідності, тобто під дією падаючого випромінювання в детекторі з напівпровідника (Ge;Si) виникає потік носіїв електричного струму. Напівпровідникові лічильники працюють за принципом іонізаційної камери.

Якщо на напівпровідниковий детектор, що володіє n-p - переходом, падає β - випромінювання (або γ - кванти), то в його чутливій області

виникають пари «електрон - дірка» подібно парам «електрон - іон» в камері. Число утворених пар «електрон - дірка» пропорційно енергії, втраченій в чутливій області детектора ($\sim 3 \cdot 10^5$ пар на 1 МеВ енергії, втраченої в процесі іонізації).



Рис. 9.26. Схема напівпровідникового лічильника

У разі прикладання запірної напруги (n-шар підключається до позитивного полюсу батареї, а р-шар - до негативного) в ланцюгу лічильника протікає струм, аналогічний іонізаційному. Цей струм значно більше струму камери, оскільки гальмуюча здатність твердої речовини в сотні разів більше гальмуючої здатності газу, а на утворення пари «електрон - дірка» затрачається енергії менше, ніж на утворення пари «електрон - іон». Чутлива область W може досягати 10 мм; такі лічильники успішно працюють при низьких температурах, у вакуумі, вони не чутливі до магнітних полів, компактні.

Сцинтиляторні, або радіюлюмінесцентні, детектори. Робота їх заснована на світлозбуджуючій дії випромінювання на речовину. Такими речовинами є люмінофори, або сцинтилятори, які перетворюють поглинену енергію іонізуючого випромінювання у видиме світло.

Під дією рентгенівського або γ - випромінювання флуороскопічні екрани на основі сульфідів цинку і кадмію $ZnS (Ag)$; $CdS (Ag)$ дають жовто-зеленувате світіння, яке відповідає максимальній чутливості ока. Люмінофори на основі $CaWO_4$; $(Ba,Pb)SO_4$ дають інтенсивне світіння у синій, фіолетовій і ультрафіолетовій областях спектру, до якого чутлива фотоемульсія рентгенівських плівок. Застосовуються також органічні сцинтилятори - антрацен, стілбен, n-терфелін.

Сцинтиляторний лічильник (рис. 9.27) складається із сцинтилятора 1, фотоелектронного помножувача (ФЕП) 2 та електронної реєструючої апаратури.

ФЕП являє собою скляний балон, на частині внутрішньої поверхні якого нанесено сур'мяноцезієве покриття, що служить фотокатодом 3. У середині трубки є кілька електродів - помножувачів (дінодов), підключених до дільника

напруги. Для живлення ФЕП використовують стабілізовані високовольтні джерела напруги в 1000-2000 В.

При попаданні іонізуючого випромінювання сцинтилятор випускає фотони видимого світла у вигляді окремих спалахів. Під впливом цих фотонів з катода ФЕП 3 вириваються фотоелектрони, які електричним полем направляються на діоди. Тут вони в результаті вторинної емісії електронів⁵ підсилюються. Загальний коефіцієнт посилення ФЕП складає 10 ...10⁹.

Амплітуда імпульсу струму пропорційна інтенсивності випромінювання, що потрапляє на сцинтилятор.

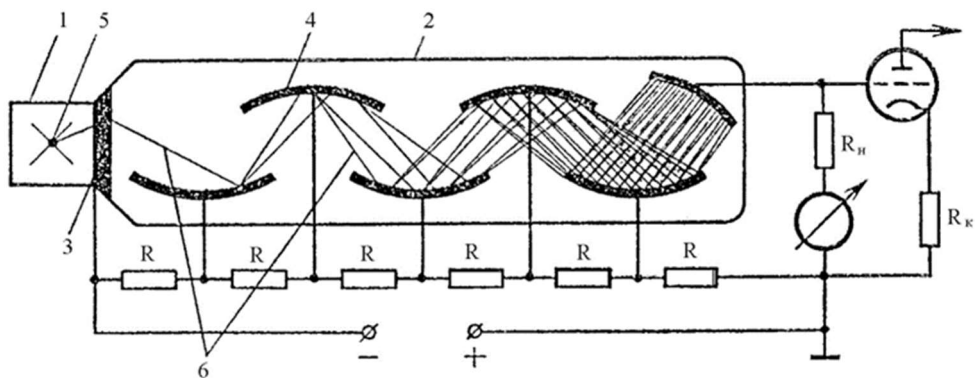


Рис. 9.27. Схема сцинтиляторного лічильника:

1 сцинтилятор; 2 - фотоелектронний помножувач; 3 - фотокатод; 4 - діоди; 5 - фотони; 6 – фотоелектрони.

Сцинтиляторні лічильники можна застосовувати для вимірювання числа заряджених частинок, γ -квантів, швидких і повільних нейтронів; для вимірювань потужності реєстрації γ -квантів ці дози іонізуючого випромінювання (ІВ). Для лічильники більш ефективні, ніж газорозрядні, і рівноцінні напівпровідниковим.

Томографія. Суть методу полягає в отриманні різкого зображення тільки тих частин об'єкту, які знаходяться в тонкому (не більше 2 мм) шарі на певній глибині або в декількох тонких шарах, розділених інтервалами заданої товщини (кроком томографії). Цього домагаються, наприклад, синхронним переміщенням (рис. 9.28) рентгенівської трубки (А1®А3) і касети з екранами і плівкою (О®О3) відносно просторового центру кочення (качення) О. У результаті одержують зображення виділеного шару MN, розташованого в площині, що проходить через центр качіння.

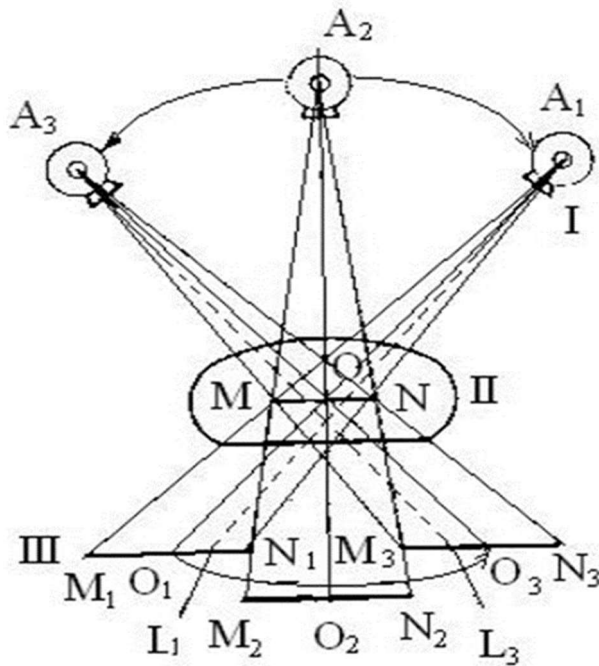


Рис. 9.28. Схема утворення томографічного зображення:

I - рентгенівська трубка; II - об'єкт контролю; III - касета з плівкою

Це зображення являє собою геометричне місце точок виділеного шару, тіні яких нерухомі по відношенню до плівки. Таким чином, в томографії використовують ефект динамічної нерізкості зображення. Синхронний рух джерела випромінювання і плівки щодо об'єкту дозволяє розмити зображення неаналізуємих дефектів або шару, зображення яких в звичай прийнятому методі радіографії накладаються одне на одне, і більш різко виділити зображення необхідного для виявлення дефекту або шару. Мінімальна товщина виділяємого шару складає 1,5 мм.

В даний час широко використовують **комп'ютерну томографію**. У порівнянні зі звичайним рентгенівським зображенням томограми мають набагато вищу інформативність, оскільки детально показують внутрішню геометричну структуру, розподіл густини і елементного складу матеріалу. Підвищений обсяг інформації в рентгенівській комп'ютерній томографії отримується за рахунок великого числа первинних перетворювачів (від 250-500 до 2000), неперервного обертання системи «перетворювач - детектор» навколо об'єкта на 360°.

Томографи дають можливість вирішення багатьох завдань неруйнівного контролю. Їх застосовують для контролю об'єктів з невеликим загасанням випромінювання, наприклад, композитів, вуглепластиків, гуми товщиною до 20 мм і розміром до 1,5 м при роздільній здатності за густиною 0,2%. За допомогою томографів впевнено виявляються тріщини з розкриттям 0,01-0,02 мм, що на порядок вище звичайної радіографії.

9.6. Заходи безпеки при радіаційному контролі

Всі радіаційні методи пов'язані з високою небезпекою. Тому при проведенні радіаційної дефектоскопії повинні бути вжиті заходи щодо захисту від іонізуючого випромінювання. Розроблені «Основні санітарні правила роботи з радіоактивними речовинами та джерелами іонізуючих випромінювань» ОСП-72, а також «Норми радіаційної безпеки» НРБ-69. У відповідності з НРБ-69 встановлені гранично допустимі дози і межі випромінювань.

Гранично допустимою межею (ГДМ) називають річний рівень опромінення персоналу, який не викликає при рівномірному накопиченні дози протягом 50 років несприятливих змін у стані здоров'я самого опроміненого та його потомства.

Встановлено 3 категорії опромінюваних осіб:

А - персонал (професійні працівники, які безпосередньо працюють з джерелами іонізуючого випромінювання);

Б - окремі особи з населення; В - населення в цілому.

До категорії Б належать особи, які працюють у приміщеннях, суміжних з тими, де працює персонал А, а також особи, що проживають в межах санітарно-захисної зони підприємства.

Для персоналу встановлені гранично-допустимі дози (ГДД), а для окремих осіб з населення - межі доз. ГДД встановлені для чотирьох груп критичних органів або тканин тіла. Так, для всього організму ГДД опромінення осіб категорії А дорівнює 0,05 Зв/рік, В - 0,005 Зв/рік.

Для проведення РК можуть залучатися особи, які досягли 18-річного віку, пройшли попередньо медичний огляд, вивчили інструкції та методики

просвічування та правила технічної експлуатації установок. Всі особи, які проводять радіаційний контроль, повинні проходити медичний огляд не рідше 1 разу на рік.

Доза опромінення всього організму, гонад або червоного кісткового мозку представника персоналу не повинна перевищувати дозу опромінення, яка визначається за формулою $D \leq 0,05 (N - 18)$, де D - доза, Зв; N - вік, роки; 18 років - вік початку професійного опромінення.

У будь-якому випадку доза, накопичена у віці до 30 років, не повинна перевищувати 0,6 Зв. Найбільша доза за квартал для чоловіків - не більше 0,03 Зв, для жінок - не більше 0,013 Зв.

Дозу опромінення вимірюють за допомогою індивідуальних дозиметрів, які слід носити в нагрудній кишені.

Зниження рівня радіації досягається спрямуванням випромінювання в сторону землі, зменшенням часу опромінення, збільшенням відстані від джерела до працюючого.

Найбільш поширений спосіб захисту від іонізуючого випромінювання - екранування - ослаблення випромінювання шаром важкого матеріалу. Стіни приміщень, перекриття підлог захищають важкими металами, такими як свинець, свинцеве скло, вольфрам, барит, використовується також бетон, цегла.

В залежності від часу роботи джерела іонізуючого випромінювання протягом тижня, сили струму в рентгенівській трубці, напруги на трубці, відстані від джерела до захисної огорожі товщина стінки зі свинцю може становити від 0,5 мм до 25 мм і, відповідно, до 620 мм з бетону ($\rho = 2,35$ кг/м³).

Спеціальними нормативними документами передбачені наступні особливі заходи безпеки при здійсненні радіаційного контролю:

1. При проведенні рентгенографічного та гамаграфічного контролю в зоні робіт не повинно бути сторонніх осіб. Ця зона обмежується радіусом 25 м від місця зйомки для рентгенографічного та 50 м для гамаграфічного методу. При цьому джерело випромінювання слід орієнтувати в такому напрямку, в якому найменш ймовірна присутність людей.

2. Ділянка проведення рентгенографічного та гамаграфічного контролю повинна бути обнесена з'ємною огорожею. У перекритих проходах і проїздах повинен бути вивішений знак радіаційної небезпеки.

3. Оператор повинен бути одягнений:

при проведенні рентгенографічного контролю - в білий халат або комбінезон і в білий головний убір;

при проведенні гамаграфічного контролю - також і в спеціальний захисний фартух з свинцевим наповнювачем.

4. При проведенні контролю будь-якими радіаційними методами оператор повинен мати при собі лічильник Гейгера для контролю навколишнього радіаційного фону, а також індивідуальний нагрудний радіаційний дозиметр для фіксування накопиченої дози опромінення. У процесі експозиції оператор повинен стежити за навколишнім фоном і в разі перевищення допустимого рівня віддалитися від джерела на безпечну відстань. Особи, у яких індивідуальним дозиметром

зафіксовано перевищення допустимої дози опромінення, відсторонюються від участі у проведенні радіаційного контролю на термін, встановлюваний відповідними органами.

5. На зовнішній стороні дверей приміщень для зберігання джерел випромінювання, дверей рентген-камер для рентгеноскопічного контролю і на бортах спецавтомобілів для перевезення засобів гамаграфічного контролю повинен бути нанесений знак радіаційної небезпеки. На двері рентген-камери рекомендується змонтувати підсвічування знака із загорянням синхронно з включенням апарату. Спецавтомобіль повинен бути також забезпечений жовтим проблісковим маячком та спеціальним піддоном в днище салону для доставки несправних джерел до місця їх поховання (заклинювання відкритого затвора джерела гамма-випромінювання є радіаційною аварією, і таке джерело ремонту не підлягає).

6. Усі лабораторії, що здійснюють радіаційний контроль, повинні мати відповідну ліцензію та санітарно-гігієнічний паспорт (заключення), що видаються відповідними органами. Окремими паспортами повинні бути забезпечені рентген-камери і спецавтомобілі.

Переваги радіаційних методів - наочність результатів контролю і можливість виявлення дрібних округлих дефектів (пор), які ультразвуковою дефектоскопією визначаються ненадійно.

Крім високої небезпеки, радіаційні методи мають наступні **недоліки**:

1. Апаратура не схильна до портативності (вага найбільш легких апаратів в повному комплекті досягає 20 кг).

2. Апарати для рентгенівського контролю характеризуються великою витратою електроенергії; рентгенографічний і гамаграфічний методи - витратою плівки та засобів її хімічної обробки.

3. Неможливо виявити найбільш небезпечні площинні дефекти, так як вони практично не впливають на гальмування променевої енергії: сукупна густина залишається однаковою в області дефекту і поза ним (рис. 9.29).

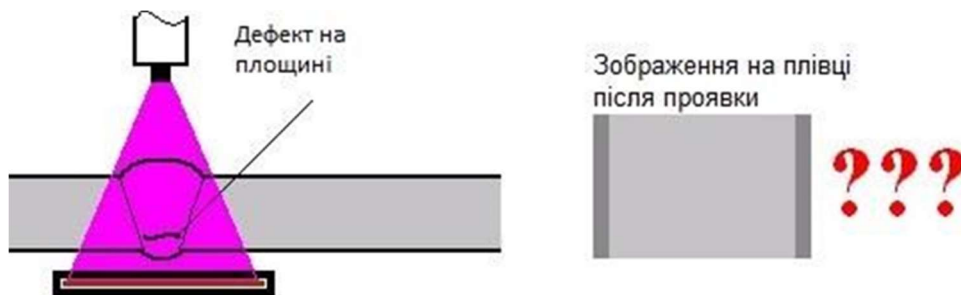


Рис. 9.29. Пропуск радіаційним методом існуючого дефекту

В кінці 1990-х рр. за результатами значної кількості міжнародних досліджень було встановлено, що достовірність радіаційного контролю метала в середньому становить лише 19%. У зв'язку з цим інтерес до радіаційних методів на даний час поступово знижується: більшість лабораторій воліє застосовувати ультразвуковий контроль, втричі більш доствірний і повністю безпечний.