

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

Јована С. Васић

**Радиографска испитивања
елемената машинских конструкција**

Мастер рад

Крагујевац, 2021.

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер студије

Модул: Машинске конструкције и механизација

Предмет: Испитивање машинских конструкција

Број индекса: 338/2019

Јована С. Васић

Радиографска испитивања елемената машинских конструкција Мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. Др Добривоје Ћатић - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог мастер рада кандидат треба да:

На основу анализе литературних извора из области Испитивање машинских конструкција представи примену радиографске методе при испитивању елемената машинских конструкција. У раду представити историјат развоја, техничке и основне принципе. У наставку рада размотрити такође и опрему и прибор потребну за радиографско испитивање. Уз то размотрити и предности и мане примене ове методе, као и последице које примена ове методе оставља на околину, људе и примениоца. Све поступке примене радиографске методе испитивања илустровати практичним примерима који се могу наћи у литератури. На крају дати свој закључак о самој методи, њеној примени и даљем развоју.

Препоручена литература:

- [1] Charles J. Hellier; Handbook of nondestructive evaluation; first edition; Mc Graw Hill Professional; United States of America; 2003.
- [2] Peter J. Shull; Nondestructive Evaluation Theory, Techniques, and Applications; The Pennsylvania State University Altoona, Pennsylvania; New York; Basel; 2002.
- [3] Mohammed Omar; Nondestructive testing methods and new applications; Clemson University, Internacional Center Automotive Research CU-ICAR, Greenville, SC, USA, 2012.
- [4] Robert A Smith, Non-Destructive Testing NDT – Guidance Document: An Introduction to NDT Common Methods, The British institute of Non-destructive testing, Britain, 2015.

Крагујевац, 04.03.2021.

Ментор:
Др Добривоје Ћатић, ред. проф.

Садржај

1. Увод	1
2. Недеструктивно испитивање.....	2
2.1. Дефиниција.....	2
2.2. Почетак развоја недеструктивног тестирања.....	3
3. Врсте метода испитивања и њихов избор.....	8
3.1. Врсте испитивања.....	8
3.2. Начин избора метода.....	8
4. Увод у радиографско тестирање.....	10
4.1. Општа дефиниција.....	10
4.1.1. Густина.....	11
4.1.2. Контраст.....	11
4.1.3. Дефиниција.....	11
4.2. Почетак радиографије као методе недеструктивног испитивања	11
4.2.1. Откриће рендгенских зрака.....	12
4.2.2. Откриће гама зрачења.....	14
5. Радиографске технике.....	16
5.1. Извор зрачења	17
5.2. Основни елементи зрачења.....	17
6. Радиоактивни процеси.....	20
6.1. Нуклеарни (радиоактивни) распади.....	20
7. Извори зрачења у радиографији врсте и карактеристике	22
7.1. Фотони – квант зрачења.....	23
7.2. Електрони и радиоактивност– извор зрачења	26
7.3. Нуклеус и радиоактивност– извор зрачења	27
8. Основи зрачења – принципи	29
8.1. Карактеристике зрачења	29
8.2. Принципи Х-радиографије	33
8.3. Принципи гама радиографије.....	35
9. Опрема и прибор	37
9.1. Извори радијација.....	38
9.2. Опрема Х зрака	38
9.3. Опрема гама зрака	40
9.4. Прибор	41
10. Процедура испитивања и анализа резултата	44

10.1. Техника испитивања.....	44
10.2. Одређивање положаја грешке	47
10.3. Одређивање дужине и ширине грешке.....	48
10.4. Радиографски филм	50
10.5. Обрада филма.....	50
10.6. Густина	52
11. Радиографска процена	54
11.1. Процена артефакта	55
11.2. Процена дисконтинуитета	55
11.2.1. Пукотине	55
11.2.2. Недостатак фузије	55
11.2.3. Непотпуна пенетрација	56
11.2.4. Укључивања (густа и мање густа).....	56
11.2.5. Порозност	56
11.2.6. Геометријски услови.....	56
11.3. Прекиди ливења.....	57
12. Услови за ефективно испитивање без разарања.....	58
12.1. Сертификација особља.....	58
13. Предности и недостаци радиографске методе	60
13.1. Утицај зрачења на човека	61
13.1.1. Соматски ефекти (директни)	61
14. Практични примери примене радиографских испитивања.....	63
14.1. Практични примери у медицини.....	64
14.2. Практични примери испитивања возила	64
14.3. Практични примери при испитивању машинских елемената	65
14.4. Испитивање заварених спојева.....	67
14.5. Снимање цевовода.....	69
14.6. Упоредивање рендгенских снимака услед различитог зрачења	71
15. Закључак.....	75
Литература	76

Изјављујем да сам овај мастер рад урадила самостално, уз навођење и напомене ментора др Добривоја Ћатића, као и служећи се стеченим знањем, искуством и наведеном литературом.

Васић Јована, 338/2019

Списак слика

<i>Слика 1 - Рани ковач</i>	Страна 4
<i>Слика 2 - Начин снимања и резултати на филму</i>	Страна 10
<i>Слика 3 - Вилхелм Конрад Рентген</i>	Страна 12
<i>Слика 4 - Снимак сачмаре</i>	Страна 13
<i>Слика 5 - Снимак шаке</i>	Страна 13
<i>Слика 6 - Рендгенски уређај почетком Другог светског рата</i>	Страна 14
<i>Слика 7 - Пјер и Марија Кири</i>	Страна 14
<i>Слика 8 - Лабораторија одакле је екстрактован радијум</i>	Страна 15
<i>Слика 9 - Једнодимензионално мерење</i>	Страна 16
<i>Слика 10 - Састав атома</i>	Страна 18
<i>Слика 11 - Ознака атомског језгра</i>	Страна 18
<i>Слика 12 - Пролазак алфа, бета и гама и неутронског зрачења кроз различите врсте материјала</i>	Страна 21
<i>Слика 13 - Електромагнетни спектар</i>	Страна 22
<i>Слика 14 - Спектар зрачења</i>	Страна 23
<i>Слика 15 - Спектар зрачења цеви X-зрака</i>	Страна 24
<i>Слика 16 - Релативна осветљеност 4 типа извора X-зрака или γ-зрака</i>	Страна 25
<i>Слика 17 - Енергетски нивои и ознаке</i>	Страна 26
<i>Слика 18 - Карактеристични преласци</i>	Страна 27
<i>Слика 19 - 4 процеса апсорпције</i>	Страна 30
<i>Слика 20 - Принцип полувредности слоја</i>	Страна 32
<i>Слика 21 - Илустрација типичних рендгенских цеви и пресек цеви</i>	Страна 33
<i>Слика 22 - Процес испитивања X-зрацима</i>	Страна 34
<i>Слика 23 - Начин испитивања гама зрацима</i>	Страна 36
<i>Слика 24 - Општи НДТ систем</i>	Страна 37
<i>Слика 25 - X-зрачне цеви</i>	Страна 39
<i>Слика 26 - Индустијска X-зрачна машина</i>	Страна 39
<i>Слика 27 - Рендгенски систем од 150 kV</i>	Страна 40
<i>Слика 28 - Рендгенски систем од 300 kV</i>	Страна 40
<i>Слика 29 - Техника „рибљи пол“</i>	Страна 40
<i>Слика 30 - Уређај за излагање</i>	Страна 41
<i>Слика 31 - Подешавање експозиција гама зрака</i>	Страна 41
<i>Слика 32 - Алуминијумска фолија</i>	Страна 42
<i>Слика 33 - Касета за заштиту радиограма</i>	Страна 42
<i>Слика 34 - Оловне ознаке</i>	Страна 43

<i>Слика 35 - Илуминатор</i>	Страна 43
<i>Слика 36 - Технике испитивања</i>	Страна 45
<i>Слика 37 - Прозрачивање елемента у облику равне плоче</i>	Страна 45
<i>Слика 38 - Прозрачавање чворног места код сложеног елемента</i>	Страна 45
<i>Слика 39 - Прозрачивање узорка различите дебљине</i>	Страна 46
<i>Слика 40 - Техника испитивања цилиндричних елемената</i>	Страна 46
<i>Слика 41 - Техника испитивања заварених елемената</i>	Страна 47
<i>Слика 42 - Одређивање локације корозивних оштећења</i>	Страна 48
<i>Слика 43 - Стерео радиографија</i>	Страна 48
<i>Слика 44 - Шематски приказ увећања грешке</i>	Страна 49
<i>Слика 45 - Мануална обрада филма</i>	Страна 51
<i>Слика 46 - Аутоматски прецесор</i>	Страна 51
<i>Слика 47 - Дензитометар</i>	Страна 52
<i>Слика 48 - Интерпретација радиографије са илуминатором високог интензитета</i>	Страна 54
<i>Слика 49 - Шематски приказ радиографског испитивања</i>	Страна 63
<i>Слика 50 - Расподела густине зрачења при појави дисконтинуитета</i>	Страна 63
<i>Слика 51 - Примери радиографије у медицини</i>	Страна 64
<i>Слика 52 - Испитивање возила X зрацима</i>	Страна 64
<i>Слика 53 - Испитивање возила гама зрацима</i>	Страна 65
<i>Слика 54 - Поступак испитивања</i>	Страна 65
<i>Слика 55 - Метална плоча и њен радиографски снимак</i>	Страна 66
<i>Слика 56 - Радиографски снимак гама зрацима</i>	Страна 66
<i>Слика 57 - Радиографски снимак метка X зрацима</i>	Страна 66
<i>Слика 58 - Радиографски снимак завареног споја</i>	Страна 67
<i>Слика 59 - Прслине у завару</i>	Страна 67
<i>Слика 60 - Радиографски филм при снимању грешака у завару</i>	Страна 68
<i>Слика 61 - Примери откривања грешака у завару</i>	Страна 68
<i>Слика 62 - Испитивање цеви у условима градилишта</i>	Страна 69
<i>Слика 63 - Радиографски снимци цевовода</i>	Страна 70
<i>Слика 64 - Упоредивање радиографског снимка снимљеног X и гама зрачењем</i>	Страна 71
<i>Слика 65 - Упоредивање снимка насталог при испитивању неутронским и гама зрачењем</i>	Страна 72
<i>Слика 66 - Снимци настали при испитивањима различитом волтажом зрака</i>	Страна 72
<i>Слика 67 - Различите грешке уочене радиографским испитивањем на истим елементима</i>	Страна 73

<i>Слика 68 - Различити дефекти на елементима истог материјала</i>	Страна 73
<i>Слика 69 - Упоредивање снимака насталих различитом камером</i>	Страна 74
<i>Слика 70 - Симулиран дефект и реалан изглед</i>	Страна 74

Списак табела

<i>Табела 1 - Настанак и развој недеструктивног испитивања</i>	Страна 5
<i>Табела 2 - Карактеристике честица које учествују у реактивним процесима структурних метода</i>	Страна 20
<i>Табела 3 - Листа различитих нивоа енергије</i>	Страна 35
<i>Табела 4 - Сажетак извора са карактеристикама</i>	Страна 35
<i>Табела 5 - Густине филма</i>	Страна 53
<i>Табела 6 - Предности и мане радиографских НДТ метода</i>	Страна 60

Abstract:

Through the presented work, the analysis and description of non-destructive testing was performed. The paper presents the history of non - destructive testing, as well as the division and all technical and basic principles. The aim of this paper was to describe strictly one non-destructive testing, namely radiographic testing. According to that goal, the paper presents the history of radiographic testing, the basis of origin, technical and basic principles of the type of radiation used and the principle of using that radiation for the purpose of recording in the examination of elements. In addition, testing techniques, accessories and equipment used for that, the method of obtaining the dimensions of errors, error characteristics, as well as the advantages and disadvantages of this type of testing and what impact this type of testing has on humans are presented. At the very end, practical examples of using this method and comparison are given, and everything is rounded off with a conclusion.

Keywords: Non-destructive method, radiographic method, gamma radiation, X-ray, testing

Резиме:

Кроз предствљени рад анализирано је и описано недеструктивно испитивање. У раду је представљен историјат недеструктивног тестирања, као и подела и сви технички и основни принципи. Циљ рада био је опис стриктно једног недеструктивног тестирања и то радиографског тестирања. Према том циљу у раду је представљен историјат радиографског тестирања, основа настанка, технички и основни принципи, врста зрачења која се користи и сам принцип коришћења тог зрачења у сврхе настанка снимака при испитивању елемената. Поред тога представљене су и технике испитивања, прибор и опрема која се за то користи, начин добијања димензија грешака, карактеристике грешака, као и предности и мане оваквог тестирања и какав утицај ова врста тестирања има на човека. На самом крају дати су практични примери коришћења ове методе и упоређивање, а све је заокружено закључком.

Кључне речи: Недеструктивна метода, радиографска метода, гама зрачење, X зрачење, тестирање

1. Увод

Кроз историју, истраживања, развој али и кроз свакодневни рад и битисање, грешке, хаварије, ломови, рушења јесу дешавања са којима се често сусреће. Било да се ради о машинству, грађевини, медицини, науци, спорту, свакодневном игрању, возњи неког превозног средства, увек постоји ризик од неке повреде, непоузданог или несигурног рада. Многе индустрије и научне екипе предузимају мере како би се сва опрема, сви апарати, машине, играчке, начин њихове примене и експлоатације што више олакшали али и унапредили и осигурали. Када се започне нека промена елемената или се започне конструисање новог елемента, увек се креће од избора или промене материјала, облика и димензија. Међутим, да би се све то изабрало и конструисање извело, јако је битно провући те елементе кроз одређена испитивања која ће потврдити један сигуран, поуздан а квалитетан рад.

Једна од технички најбитнијих врста испитивања јесу разорна и безразорна испитивања, односно деструктивна и недеструктивна. Сама имена кажу да се код првих за потребе испитивања врши разарање елемента који се испитује, док код других то није случај. Свакако, циљ обе врсте испитивања јесте да се дође до жељених резултата, односно одговора на питање.

- Да ли је елемент исправан?
- Шта је код њега изазвало губитак радне способности?
- Какве последице је губитак радне способности оставио?
- Шта би код елемента могло да изазове губитак радне способности?
- Колико оптерећење елемент може да издржи?
- Како се елемент може унапредити на основу добијених резултата?

Недеструктивна метода је свакако метода која је настала након испитивања са разарањем и она која се још увек развија. Недеструктивна метода испитивања, опште представљено, примењује се како би се осигурало да се зграде неће срушити, да се авиони неће срушити, или да производи неће пропасти, а користи се у свакодневном животу кроз опште или детаљније и стручније облике.

У самом раду извршена је анализа методе без разарања, тачније радиографске методе. Најпре кроз историјски развој и опште напомене самог недеструктивног тестирања, затим и кроз настанак, развој, издвајање предности и недостатака, опис опреме и инструмената, примене као и опис самог начина испитивања стриктно радиографског тестирања представљено је све оно што се треба знати и чиме се треба водити при примени наведене методе. Циљ овог рада јесте да се што боље представи једна од метода недеструктивног тестирања, да се представи њена анализа, практична примена, учинак у науци и коначан закључак.

2. Недеструктивно испитивање

2.1. Дефиниција

Општа дефиниција недеструктивног тестирања или тестирања без разарања - НДТ (*NDT – Nondestructive testing*) је испитивање односно тестирање која се врши на било којој врсти објекта без промене тог објекта на било који начин. Само испитивање врши се како би се утврдило одсуство или присуство услова или дисконтинуитета који могу имати утицај на функционалност или употребљивост тог објекта. Недеструктивно тестирање се такође може изводити да би се мериле и друге карактеристике објекта испитивања, као што су величина, облик, конфигурација или структура, садржај легуре, тврдоћа, величина зрна итд. Најједноставнија дефиниција недеструктивног тестирања јесте испитивање које се врши на објекту било ког типа, величине, облика или материјала како би се утврдило присуство или одсуство дисконтинуитета или процена неке друге карактеристике материјала. Ова врста тестирања може се још наћи и под називима недеструктивни преглед, недеструктивна контрола и недеструктивна евалуација [1].

Иако НДТ не може гарантовати да се губитак радне способности неће десити, оно игра значајну улогу у смањењу могућности појаве губитка. Међутим, други утицајни фактори, као што су неадекватан дизајн и неадекватна примена објекта, који су неизбежни и увек постоје, могу допринети неуспеху чак и када се НДТ примењује на одговарајући начин.

НДТ, као технологија, забележило је значајан раст и јединствену иновацију у последњих 25 година. У ствари, данас се сматра да је једна од најбрже растућих технологија са становишта јединствености и иновативности, до чега је дошло услед побољшања опреме и њене модификације, као и услед темељнијег разумевања материјала и употреба различитих производа и система. Данас је ова врста тестирања веома значајна и пронашла је широко распрострањену употребу и прихватљивост у индустрији, што је допринело побољшању безбедности више од било које друге технологије. Постало је саставни део практично сваког процеса у индустрији, где губитак радних способности производа може довести до несрећа или телесних повреда.

Недеструктивно тестирање је у ствари процес који свакодневно врши свака особа за сопствене потребе, а да није ни свесна да се то дешава. Људско тело је описано као један од најјединственијих инструмената недеструктивног тестирања. Топлота се може осетити постављањем руке у непосредној близини врућег објекта и без додиривања, одређујући да у том објекту постоји релативно висока температура. Са чулом мириса, може се одредити да је присутна непријатна супстанца једноставно на основу мириса који произлази из ње. Уз обично посматрање неког објекта, могуће је одредити хрпаваост, конфигурацију, величину и облик једноставно кроз осећај додир. Чуло слуха омогућава анализу различитих звукова и буке и на основу ове анализе, могу се донети пресуде и одлуке које се односе на извор тих звукова. Али од свих људских чула, чуло вида пружа најнапреднији и јединствен приступ недеструктивном тестирању. Када се узме у обзир широка примена осећаја вида и коначних информација

које се могу утврдити једноставним визуелним надзором, постаје сасвим очигледно да визуелно тестирање представља веома широко коришћени облик недеструктивног тестирања.

У индустрији, недеструктивним тестирањем чини се много тога. Овом врстом тестирања врло ефикасно може да се врши:

- испитивање сировина пре обраде,
- евалуација материјала током обраде – користи се као средство контроле процеса,
- испитивање готових производа,
- евалуација производа и структура након пуштања у употребу итд.

Недеструктивно тестирање се у ствари може сматрати испитивањем са напреднијим обликом људских чула, које је напредак постигло коришћењем софистицираних електронских инструмената и друге јединствене опреме. Коришћењем специјалне опреме и инструмената довело је до тога да се људска чула, која су основа испитивања, кроз њих развију и по истом том принципу врше испитивања. На овај начин сама испитивања јесу разумљивија за схватање и анализу и приближнија су за човека и објашњење. С друге стране, злоупотреба или неправилна примена недеструктивног теста може узроковати катастрофалне резултате. Ако тест није исправно вођен или ако је тумачење резултата нетачно, може доћи до катастрофалних резултата. Од суштинског је значаја да квалификовано особље спроведе само испитивање на безбедан и технички исправан начин, како би се ти проблеми свели на минимум.

Сумирано, недеструктивно тестирање је вредна технологија која може пружити корисне информације о стању објекта који се испитује, када се узму у обзир сви битни елементи теста, усвојене процедуре, а испитивање се врши од стране квалификованог особља. Сама техника испитивања се кроз историју мењала и развијала, па је тако настало више различитих метода у оквиру ове врсте испитивања. Свака од њих је описана својим главним карактеристикама које су управо кроз тај историјски развој и настале.

2.2. Почетак развоја недеструктивног тестирања

Немогуће је идентификовати одређени датум који би указао тачно када је почело недеструктивно тестирање. Један облик недеструктивног тестирања јесте звучна техника. Звучну технику су деценијама користили ковачи (слика 1) као и рани звонари. Слушањем звука звона или звука при удару од стране ковача, вршило се испитивање исправности метала [1].



Слика 1- Рани ковач

Још једна техника која се међу првима користила, а убраја се у недеструктивно испитивање, јесте визуелна. За визуелну методу испитивања човек је користио чуло вида, као одокативну методу. Данас је ова метода кроз употребу инструмената и опреме доста напредовала, али је свакако њена основа и даље иста.

Корени недеструктивног тестирања почели су да се обликују пре двадесетих година прошлог века, али већина метода које су данас познате нису се појављивале до краја 1930. и почетком 1940. године. Главни разлог настанка и развоја ове врсте испитивања јесте због свих догађаја током Другог светског рата. Током Другог светског рата постојао је значајан број катастрофалних хаварија и других несрећа у вези са неадекватним техничким решењем, што је довело до забринутости за квалитет система и компоненти. Један од таквих неуспеха догодио се у Конектикату у САД-у, у марту 1854. године када је око два сата у поподневним часовима, парни котао експлодирао огромном јачином. Експлозија је резултирала великом штетом као и страдањем и повредом одређеног броја људи. Услед велике забринутости дошло је до истраживања која су извршена ради утврђивања узрока и утврђивања кривице, као и налажења решења да се будуће грешке санирају. Овај поступак сврстава се у значајну прекретницу у значају и напретку НДТ. Десет година касније, 1864. године, држава Конектикат је усвојила закон о инспекцији котлова. Још једна предност која је резултат ове експлозије котла била је оснивање Политехничког клуба 1857. године. Циљ ових организација и закона био је санирање, спречавање или ублажавање грешака, а да се притом не изврши никаква деформација при испитивању, самим тим вршио се и полагани развој недеструктивног тестирања.

Још једна од катастрофалних грешака која је довела до развоја НДТ јесте пароброд под називом „Султана“. 27. априла 1865. године се кретала изнад Мемфиса када су експлодирала три од њена четири котла. Извештаји очевидаца ове катастрофе пријавили су да је бочна страна спаљена до линије воде у року од 15 минута, а број погинулих, иако није прецизиран, процењен је између 1200 и 1600, што би могло бити најгора катастрофа у морској историји.

У пролеће 1866. године, законодавство у Конектикату усвојило је акт о оснивању „Hartford Steam Boiler Inspection and Insurance Company“. Године 1911. формиран је први одбор за кодирање котлова. Увођење и примена кода код котлова

имало је значајан утицај на развој и примену неdestructивних испитивања током година, од свог оснивања и прве публикације.

На настанак и развој НДТ било је још много утицаја. То је допринело развоју много различитих метода у оквиру НДТ-а. Настанак и развој тих метода представљен је табелом 1 [1].

Табела 1- Настанак и развој неdestructивних метода

Пенетрантно тестирање - ПТ (Penetrant testing - PT)	Рана пенетрантна тестирања била су у употреби пре 20. века. Метода није била широко употребљивана све до додавања видљивих боја и флуоресцентних материјала, што се догодило 1940.
Магнетно тестирање - МТ (Magnetic particle testing - MT)	Главни узрок настанка јесте катастрофа исклизнућа точкова воза из шина, што је резултирало системом за откривање електричне струје - магнетног поља. Примарна употреба ове методе била је откривање дисконтинуитета у прузи. Године 1929. формирана је „Magnaflux Corporation“ за промовисање употребе магнетних принципа за индустријске НДТ апликације.
Радиографско тестирање - РТ (Radiographic testing - RT)	Године 1920. започет је развој технике рендгена за испитивање одливака, завара и оклопне плоче како би се у основи побољшао квалитет материјала који користи војска. Лабораторија доктора Лестера (<i>Lester Grinspoon</i>) јесте место где се ова метода развијала и која је поседовала опрему која је била архаична према данашњим стандардима, али ова рана опрема служила је као основа за будући развој методе радиографског тестирања која користи изворе X и гама зрака.
Ултразвучно тестирање - УТ (Ultrasonic testing - UT)	Први кораци у развоју ове методе предузети су 1870-их објављивањем рада „Теорија звука“ Лорда Рејлија (<i>John William Strutt, 3rd Baron Rayleigh</i>). Овај рад је објаснио природу и својства таласа у чврстим телима, течностима и гасовима, што је довело до развоја технике које су тренутно у употреби у неразорном испитивању.

Испитивања вртложним струјама - ЕТ (<i>Eddy current testing - ET</i>)	Иако су принципи испитивања вртложним струјама имали своје корене 1831. године, до деведесетих година прошлог века дошло је до потпуног развоја ове методе. Први снимљени тест вртложном струјом извршен је 1879. године. Он је у стању да увиди разлику између различитих метала, водећи рачуна о промени фреквенције, која је у основи резултирала ефектима отпорности материјала и магнетне пропусности. До 1926. године развијен је први електромагнетни инструмент који се користи за мерење дебљине материјала. Током Другог светског рата и раних 1940-их, даљи развој резултирао је бољим и практичнијим инструментима вртложне струје.
Тестирање акустичних емисија - АЕ (<i>Acousting emission testing - AE</i>)	Годинама уназад, познато је да материјали могу емитовати одређене буке када су под притиском. Током педесетих година прошлог века, прву опсежну студију овог феномена, који се назива тестирањем акустичних емисија је извршио др Џозеф Кејзер (<i>Joseph Kaiser</i>) у Минхену, у својој докторској студији. У суштини, његова истраживања показале су да су догађаји акустичне емисије узроковани малим пропустима у материјалу који је био подвргнут стресу. АЕ је значајно порастао и ова метода је постала вредна НДТ метода за одређивање стања, понашања и карактеристика у раду многих материјала и структура. Употреба високофреквентног звука за откривање дисконтинуитета у материјалима такође је уведена у 1940-их.
Термичко испитивање - ТИ (<i>Thermal infrared testing - TIR</i>)	Пошто људи могу да осете варијације у температури, одувек је било могуће посматрати промене термичке енергије. Физика термографије је запажена још 1800-их година. Крајем 19. века посматрано је и истраживано топлотно зрачење, и на крају инструменти су стварно развијени да би се мериле промене зрачења енергије. Прва термална слика направљена је 1840. године, али стварни развој термичког сликања није се јавио у главним областима индустрије све до 1950-их и почетка 1960-их. Ова јединствена метода тестирања је забележила феноменални раст и експанзију, јер је развијено све више апликација.

Као што је поменуто, кључни период настанка и развоја неструктивних тестова јесте током Другог светског рата. Пре рата, неструктивно тестирање се обично сматрало делом инспекцијских активности различитих компанија. Еволуција

недеструктивних тестова може бити директно повезана са повећаном забринутости за сигурност, смањењем сигурносних фактора, развојем нових материјала и укупном потрагом за већом поузданошћу производа.

Од краја 1950 до данас, НДТ је доживео невероватан развој, иновације и раст кроз нове инструменте и материјале. Могућност повезивања већине најновије опреме са рачунарима имала је драматичан утицај на ову технологију. Способност складиштења огромних количина података са скоро тренутним могућностима архивирања довела је НДТ на ниво који је могао бити само замишљен, али НДТ технологија је и даље у повоју. Ова хронологија ће наставити да расте пошто се узбудљиви нови изазови представљају кроз ширење технологије и јединствени материјални развој. Потрага за откривањем и идентификовањем мањих дисконтинуитета неће се завршити док катастрофални пропусти више не могу бити повезани са постојањем материјалних недостатака.

3. Врсте метода испитивања и њихов избор

3.1. Врсте испитивања

Сам начин недеструктивног испитивања може се описати кроз неколико метода, као што су и њихови почечи у претходном делу представљени. Те методе су:

- визуелно тестирање,
- пенетрантно тестирање,
- магнетно тестирање,
- ултразвучно тестирање,
- термичко инфрацрвено тестирање,
- акустично (звучно) тестирање,
- тестирање вртложним струјама и
- радиографско тестирање.

3.2. Начин избора метода

Постоји неколико нивоа да би се одабрала одговарајућа НДТ метода за одређену апликацију. Главни фактор при избору методе јесте да се изабере она која највише повећава вероватноћу откривања недостатка уз разматрање економских, регулаторних и других фактора [2].

Основни нивои одабира НДТ методе су:

- разумевање физичке природе материјалне примене дисконтинуитета за испитивање,
- разумевање основних физичких процеса који регулишу НДТ методе,
- разумевање физичке природе интеракције пробног поља (материјала) са тест материјалом и
- разумевање потенцијала и ограничења расположиве технологије.

Да би се користила било која НДТ метода, мора се имати одговарајуће знање за оно што се тражи - материјална својства, дисконтинуитет - празнина или дубина пукотине листа или дебљине премаза, итд. Као карактеристике материјала, узимају се механичке особине (еластичне константе) или проводљивост, пропорционалност или магнетна пропустљивост. За дисконтинуитете, поред познатог карактера, такође је битно и разумевање њихове везе са материјалом. Мора се такође имати основно знање о томе како се одређене НДТ методе спроводе. Свака од ових метода има одређене захтеве који морају бити испоштовани, како би се тестирање спровело, један пример јесте да одабир тестирања зависи од врсте материјала који се тестира. Поред тога, мора се разумети и интеракција између принципа рада НДТ метода и оних својства и карактеристика у објекту који се тестира.

Сходно томе, при одређивању методе тестирања битно је поставити стриктна питања.

- Да ли ће метода бити прикладна за употребу?
- Да ли метода може представити информације у вишеструком смислу?
- Да ли је метода компатибилна са објектом испитивања и пропратном опремом?

При избору НДТ методе постоје увек и ограничења технологије. Само зато што постоји повезаност између физичких принципа НДТ методе и оних у објекту тестирања, не значи да је та метода доступна или да поседује осетљивост за мерење жељених одлика. Такође постоји и разлика стварне осетљивости релативне опреме на окружење у ком се користи. Иако фабрике често наводе осетљивост лабораторијског мерења, ово се може значајно разликовати од онога што се може очекивати у индустријским испитивањима.

Многи други фактори могу утицати на избор НДТ методе:

- Да ли је цена сходна методи НДТ?
- Да ли је брзина детектовања битан фактор?
- Који прописи постоје који могу диктирати не само НДТ методу већ такође и процедуру?
- Како питања животне средине ограничавају избор?
- Да ли се тест извршава на терену или у специјализованој лабораторији за тестирање?

Са основним схватањем свих пет нивоа може се обавити избор који оптимизује НДТ методу са применом апликатора.

4. Увод у радиографско тестирање

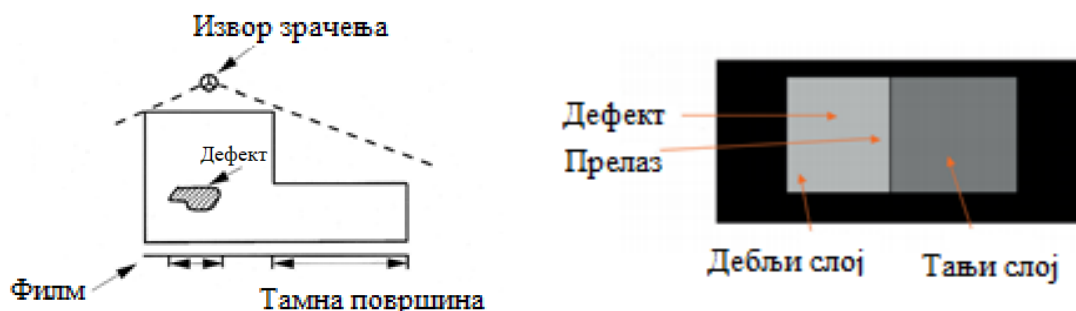
4.1. Општа дефиниција

Радиографија јесте једна од најстаријих НДТ метода. У индустрији, због здравствених и сигурносних разлога, за одређене ситуације, ова метода сврстава се у други план и алтернативне методе је замењују. Свакако, радиографија, и поред што већег избегавања, остаје једна од две главне НДТ методе [1].

Неки материјали, било због њихове дебљине или структуре зрна, могу бити тешко снимљени неком другом методом која се сматра квалитетнијом, или може бити потребна трајна визуална евиденција. Према томе, радиографија може бити алтернатива, што је главни разлог настајања и примене ове методе.

Радиографско испитивање функционише тако што производи краткоталасно X - или гама зрачење (γ – зрачење) и усмерава га на неки објекат. Зрачење у одређеној мери продире у материјал дела. Уколико је ово зрачење довољно да прође кроз предмет, оно може бити снимљено на фотографском филму које се налази са друге стране објекта испитивања.

Ако објекат има високу густину, односно ако је дебљи објекат, он апсорбује више зрачења што узрокује да уствари мања количина зрачења дође до филма, што даје светлију слику. Ако објекат има мању густину, тј. када је пролазни део смањен или постоји материјал мање густине у поређењу са околним материјалом, она ће апсорбовати мање зрачење због чега ће више зрачења погодити филм, стварајући тамнију слику (слика 2). Тањи део компоненте и дефектна површина дозвољавају већу изложеност филма инцидентном зрачењу које долази од извора зрачења. Када се филм обради, радиографија је тамнија у овим областима.



Слика 2 - Начин снимања и резултати на филму

Слика на филму се у почетку не може видети што се назива латентна слика и може се видети само када се филм развије. Квалитет ове слике углавном зависи од три својства: густине, контраста и дефиниције.

4.1.1. Густина

Густина у радиографији се представља као степен тамне боје на филму. Густина може бити минималне и максималне количине како би филм био разумљив. Густина се може најбоље представити односом датим изразом:

$$\text{Густина} = \text{Log}10 \frac{(\text{Инцидентно светло})}{(\text{Емитовано светло})} \quad (1)$$

4.1.2. Контраст

Радиографски контраст представља се као степен разлике између поља густине на филму. Ако на филму постоји само црно и бело, то се представља као висок контраст, јер постоји велика разлика између густина и њиховог рефлектовања на филм. Ако се на филму налазе само тонови сличне густине, то се представља као низак контраст. Радиографски контраст је производ контраста филма и субјективног контраста. Филмски контраст зависи од врсте коришћеног филма и процеса развоја:

- филмови с великим зрнцима, односно брзи филмови, они филмови који изискују мало време експозиције и
- филмови са малим (финим) зрнцима, односно спори филмови, они који изискују дуже време експозиције али и бољи квалитет испитивања.

Контраст предмета зависи од самог предмета, од тога који се екрани и филтери користе и од таласне дужине радијације. Екрани и филтери се користе за изрезивање нежељеног зрачења ради побољшања слике.

4.1.3. Дефиниција

Радиографска дефиниција је степен оштрине на границама поља густине, односно она представља јасноћу ивица при преласку са једне на другу густину. У одређеном филму постоји одређена инхерентна неоштрина која се повећава смањењем таласне дужине зрачења, али је увек присутна у одређеној мери. Геометријска неоштрина се може контролисати уз одређене мере:

- величина извора гама или жаришна тачка рендгенског зрачења што је могуће мања,
- растојање између објекта и филма што је могуће мање и
- растојање између извора зрачења и објекта што је могуће веће.

4.2. Почетак радиографије као методе недеструктивног испитивања

Почетак радиографског тестирања (РТ) заснива се на два битна догађаја. Први је представљен открићем рендгенских зрака Вилхелма Конрада Рентгена (*Wilhelm Conrad Röntgen*) 1895. Други је представљен најавом открића новог радиоактивног материјала назван „радијум“ од стране Марије и Пјера Кирија (*Maria Skłodowska-Curie u Pierre Curie*), у децембру 1898. године [1].

4.2.1. Откриће рендгенских зрака

Један од најбитнијих умова у радиографији је човек који је открио рендгенске зраке - Вилхелм Конрад Рентген (слика 3). Постоје различити извештаји о томе како су рендгенски зраци откривени током периода у његовој експерименталној лабораторији на Универзитету у Вурзбургу.



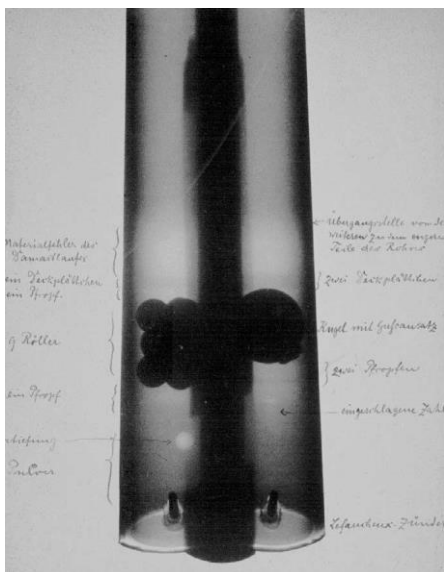
Слика 3- Вилхелм Конрад Рентген

Рентген је радио у лабораторијској соби и експериментисао је са вакуумском цевчицом, која се називала Крукова цев, која је била покривена црним фотографским папиром, како би се боље визуализовали ефекти произведене катодне цеви. Једном приликом, цев је била под напоном, док се картон прекривен баријум-платиноцијанидом налазио недалеко од цеви. Иако није било видљиве светлости из Крукове цеви због тамног папира који га је обухватао, Рентген је приметио да екран баријум-платиноцијанида флуоресцира. Он је такође приметио да, док је померао картон са премазом баријум-платиноцијанида ближе туби, он је флуоресцирао са још већим интензитетом, што је доказало да из цеви потиче непознат зрак. Као резултат овог открића, Рентген је спровео даље експерименте који су укључивали снимање радиограма различитих предмета у његовој лабораторији, укључујући дрвену кутију која садржи металне тегове, браву на вратима лабораторије и двострану сачмару, (слика 4). Такође је снимао и друге материјале, као што су карте, књиге, дрво, чак и неке танке металне плоче, све у циљу добијања што више информација.

Рентген је једном приликом снимио и руку своје жене. Тада је приметио да на том раном рендгенском снимку кости стварају светлију слику, пошто су гушће од меса (слика 5).

Услед недовољно информација о овом феномену, Рентген се позвао на ове непознате зраке као „Икс зраке”, али многи од његових колега назвали су их „Рендгенген зраци”.

Израз Рендгенски зраци био је прилично популаран у ранијим годинама двадесетог века а 1902. године, појам Х-зраци је почео да се задржава. Прве вести о овом открићу појавиле су се 1896. године и највећу примену имало је у медицини, јер је управо кроз прве презентације ово откриће представљено у том смеру.



Слика 4 - Снимак сачмаре



Слика 5 - Снимак шаке

Јако значајна чињеница у вези са Рентгеном је да је он одбио да патентира ово откриће, тако да би свет могао слободно да га користи. У првих 20 година након Рентгеновог открића, рендгенски зраци су се првенствено користили у медицинске сврхе од стране лекара који су развијали технику, гледајући у људско тело док је пацијент још био жив. Године 1912. неки од истражитеља су направили први успешан експеримент користећи дифракцију X-зрака. Готово одмах након овог експеримента, В. Д. Кулиц (W. D. Coolidge) изумео је Кулицову цев, која је омогућила да се произведе много већи интензитет X –зрака и да се омогући једнака контрола зрачења. На сцени тестирања без разарања, Др Х. Х. Лестер (H. H. Lester) почео је да експериментише са различитим материјалима почетком 1920-их. Иако су се неки радови наставили, значај рендгенских снимака у НДТ-у није постао потпуно познат, нити технологија која се широко користи, све до Другог светског рата. Важност индустријске радиографије одразила се на име техничког друштва које је сада познато као *Америчко друштво за испитивање без разарања*. Основана је 1941. под именом *Америчко индустријско друштво за радијум и X-зраке*

Развој догађаја, изазван Другим светским ратом, довео је до значајних иновација и проналаска радиографске опреме која је произвела интензивније зраке и већу енергију. На слици 6 приказан је „мобилни” рендгенски уређај који је могао да произведе енергију до 250 kW.

Свакако, радови Хорација Лестера и Вилијама Кулинца били су значајни, међутим, друге доприносе су дали рани научници и инжењери, као што су Гералд Тенеј, Џејмс Бли, Доналд Оконор, Едвард Крискуоло, Данијел Полански, Семјуел Венк (Gerald Tenney, James Bly, Donald O'Connor, Edward Criscuolo, Daniel Polansky, Samuel Wenk) и многи други.



Слика 6 - Рендгенски уређај почетком Другог светског рата

4.2.2. Откриће гама зрачења

Постоје многе приче о Марији и Пјеру Кирију (слика 7), и нема сумње да су ова два физичара водила веома занимљиве научне животе. Обоје су били јако посвећени физици, математици и науци и заједно су радили на многим експериментима [1].



Слика 7 - Пјер и Марија Кири

Једно од њихових раних запажања било је да торијум даје исте зраке као и уранијум. Такође су извукли супстанцу из смоле, сличну бизмуту, за који су тврдили да садржи метал који никада раније није био познат. Предложено је да се овај нови, високо активни материјал зове полонијум. У тим раним данима експериментисања, уведен је термин „радиоактивност“. На крају, 26. децембра 1898. године, они су показали да постоји веома активан нови материјал који реагује и понаша се хемијски, готово као чисти баријум. Тада су предложили да се за овај нови елемент користи назив радијум.

Да би се доказало да тај елемент постоји, морали би га произвести у довољној количини и одредити такве карактеристике као што је његова атомска маса. Да би се то постигло, потребна им је била велика количина смоле из које би могао да се екстрахује радијум. Успели су да добију неколико тона смоле и почело је интензивно, напорно одвајање радијума од корита, што то је био тежак посао. Радили су у шупи са земљаним подом (слика 8), која је имала стаклени кров и није пружала адекватну заштиту од кише. Од неколико тона смоле могли су да издвоје један дециграм готово чистог радијум-флуорида. Тада је утврђено да је атомска тежина радијума 225.



Слика 8 - Лабораторија одакле је екстрактован радијум

Марија је представила овај рад у својој докторској тези 25. јуна 1903. Као резултат открића овог новог елемента, Марија Кири је била добитник Нобелове награде. Она је била прва жена која је примила ову награду.

Пјер Кири је прстима држао мале стаклене цеви које садрже соли радијума и отопине. Он је заправо обавио медицинске тестове на себи тако што је узорак радијумске соли умотавао у своју руку до десет сати, а затим је оцењивао резултат, који су били у облику опекотина, из дана у дан. Након много дана остао је ожиљак.

Педесет година након ових експериментисања, присуство радиоактивности се још увек примећивало у лабораторији где су Киријеви радили тако напорно, захтевајући опсежно чишћење. Марија је такође почела да примећује ефекте изложености радијацији. Прсти су јој били оштећени и у ожиљцима. И Пјер и Марија су почели да доживљавају знакове умора. Они очигледно нису имали појма о утицају зрачења на људско тело у то време.

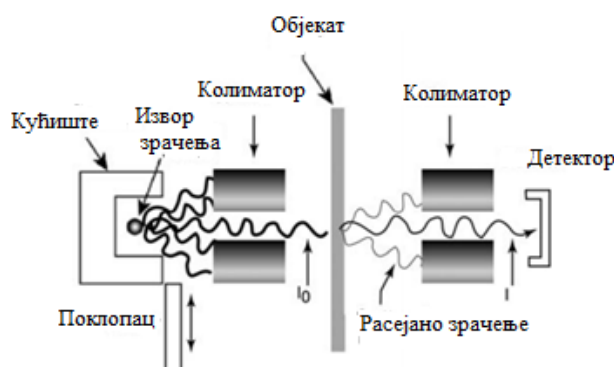
Рад Марије и Пјера Кирија означио је почетак многих других догађаја који би на крају довели до радиоактивних извора који се данас примарно користе у индустријској радиографији, наиме иридијума 192 и кобалта 60. Научна заједница дугује много брачном пару Кири за њихов рани жртвени рад, посебно с обзиром на штету коју су лично претрпели као резултат раног излагања радијуму.

5. Радиографске технике

Радиографске технике су историјски и тренутно једна од најчешћих метода НДТ. Радиографија је једна од ретких НДТ метода које могу испитати унутрашњост предмета и једина НДТ метода која има могућност испитивања свих материјала. Поред тога, радиографија је метода која је била у употреби преко сто година.

Ова метода испитивања јесте преглед радиологије, како у уобичајеној једнодимензионалној и дводимензионалној методи радиографије, тако и у растућим пољима рачунарства – томографије ЦТ (CT - *computed tomography*) и других тродимензионалних метода [2].

Једна општа метода радиографског испитивања јесте једнозрачно, односно једнодимензионално мерење, односно зрачења дуж једне линије. Извор и детектор су обично опремљени колиматорима који усмеравају зрачења у праволинијску путању и минимализују ефекат расејаног зрачења (слика 9). Предмет се поставља између извора и детектора, тако да се може одредити слабљење зрака кроз предмет.



Слика 9 - Једнодимензионално мерење

Сама радиографија је термин који се користи за опис дводимензионалне слике тродимензионалног објекта уз помоћ продорног зрачења. То је врста графика сенки направљене фотонима или честицама које делимично продиру у предмет који се проучава. Радиографије усмеравањем зрака ка елементу који се испитује осликавају потребне информације на детектор који се налази са друге стране елемента. Стога се радиографија понекад назива и радиографска пројекција. У уобичајеном случају, извор зрачења је или мали у односу на слику, или извор јесте конфигурисан тако да зрачење путује паралелно пре него што прође кроз објекат. Ако је радиографија у дигиталном облику, појединачни елементи детектора се зову пиксели (елементи слике).

Компјутеризована томографија је метода за реконструкцију и представљање тродимензионалног приказа тродимензионалног објекта. Једноставно, многе пројекционе радиографије узимају се за објекат под различитим угловима. Коришћење рачунара, алгоритама, тродимензионални објекат се може реконструисати из ових радио графика и ти услови и последице се могу приказати. Иако се читав тродимензионални објекат може реконструисати из 2Д радиографије, 3Д радиографија

се сматра прецизнијом, јер за разлику од пројекционе радиографије пресек у 3Д радиографији омогућава идентификацију дубинских информација. Често су потребне хиљаде дигиталних радиографија како би се имало довољно података за постизање високог нивоа верности „реконструкције“ предмета.

Неке специјализоване технике узимају у обзир расејавање и секундарно зрачење транспорта у радиографији методама Монте Карло (*Monte Carlo*), које су веома рачунарски применљиве. Ове методе су донедавно захтевале присуство великих машина на главном рачунару, али су сада доста олакшане уз присуство и коришћење стоних и преносних рачунара.

Да би се сама радиографија спровела битно је дефинисати зрачење преко ког се уствари добијају потребне информације прекида континуитета. Да би се само зрачење представило, најпре је потребно представити изворе тог зрачења као и начин настанка самог зрачења, односно пренос енергије и све основне податке које се односе на настанак зрачења.

5.1. Извор зрачења

У природи постоје стабилно и нестабилно атомско језгро. Нестабилна атомска језгра се спонтано распадају тако да избацују било честична зрачења или фотонско зрачење, чиме прелазе у енергијски стабилнија стања. Процес је познат под називом радиоактивност, а зрачења која распадом настају зову се радиоактивна зрачења. Ово заправо значи да сва зрачења воде порекло из језгра атома. Зрачење може бити резултат енергије која се ослобађа како се атомска језгра распадају са једног нивоа енергије на други у процесу стабилизације. Специфична врста промена енергије одредиће врсту зрачења која ће се емитовати као што су α , β , неутронско, γ или X зрачење. Уз ово мора се још и напоменути да су за радиографију најбитнији гама и X-зрачење.

Радиоактивна зрачења спадају у групу јонизирајућих зрачења. Због својих специфичних особина нашла су широку примену у многим областима живота, па тако и у подручју медицине где се користе у медицинској дијагностици и терапији, или у машинству за испитивање елемената.

СИ јединица за енергију је Џул (J), док је основна јединица за енергију зрачења електронски Волт или (eV), која се најчешће изражава [3].

5.2. Основни елементи зрачења

Да би се што боље разумео сам настанак зрачења и процес испитивања, јако је битно представити неке основне појмове ове материје [3].

Атомско језгро – (слика 10), односно нуклеус који се састоји се од неутрона и протона. Радиоактивност као појава везана је за стабилност атомског језгра. За разумевање радиоактивности потребно је поновити неке основне податке о структури атома и о силама које делују у унутрашњости атомског језгра.

Атом се састоји од позитивно наелектрисаног атомског језгра (нуклеуса) и негативно наелектрисаног електронског омотача у којем се у квантитативном (тачно одређеним) енергијском стању великим брзинама померају електрони.

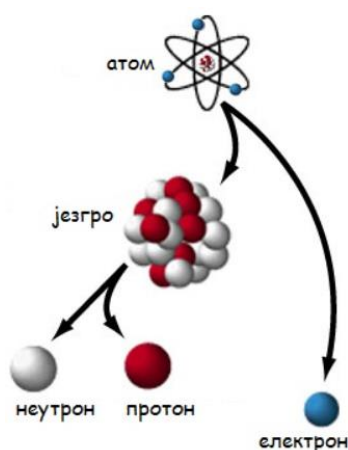
Материја се у природи јавља у два облика као:

- физичко тело и
- физичко поље.

Физичко поље је простор у којем се осећа деловање неке силе (гравитационе, електромагнетне, нуклеарне, итд.). Преко физичких поља остварују се сва међуделовања у природи.

Под појмом **физичко тело** подразумевају се сва тела која имају масу (оловка, сто, молекули, атоми итд.).

Хемијски елементи су најједноставнија форма постојања физичког тела. Од њих је састављено елементарно физичко тело, дакле чисто физичко тело које се хемијским путем не може даље раставити на једноставнија тела.



Слика 10 – Састав атома

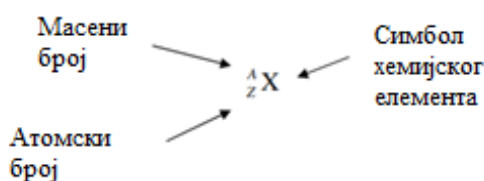
Атом је најмања честица која поседује хемијске особине елемената, па се разликују атоми: водоника, угљеника, радијума итд. Атоми одређеног хемијског елемента скраћено се приказују њиховим хемијским симболима (водоник - H, угљеник - C, гвожђе - Fe, уранијум - U, ...)

Елементарне честице од којих је састављен атом су: електрони, протони и неутрони. Сврстани су у елементарне честице у време када је степен научних сазнања био такав да се одређеном броју субатомских честица није могла приписати одређена унутрашња структура.

Протон поседује позитивно елементарно наелектрисање, електрон негативно елементарно наелектрисање док је неутрон елементарна честица без наелектрисања. Атом у електронски неутралном стању има исти број електрона у орбити и протона у атомском језгру.

У средишњем делу атома налази се атомско језгро (нуклеус) у којој су нуклеони (протони и неутрони) везани јаком нуклеарном силом.

Означавање атомског језгра - Као што се симболима у хемији означавају хемијски елементи (X), тако постоји и конвенција о означавању атомског језгра (слика 11). При томе атом се опште означава као X-A, а атомско језгро као A_ZX .



Слика 11 – Ознака атомског језгра

Изотопи су нуклиди с једнаким бројем протона (Z), а различитим бројем неутрона (N). У периодном систему елемената налазе се на истом месту. Изотопи истог хемијског елемента имају иста хемијска, а различита физичка својства, па се хемијским поступцима не могу разликовати и раздвојити.

Када је пример водоника дат на следећи начин ${}^1_1\text{H}$, ${}^2_1\text{H}$, ${}^3_1\text{H}$, кроз три своја изотопа, то значи да су прва два изотопа водоника стабилна, а трећи, изотоп водоника са два неутрона у језгру је радиоактиван.

Изотопи исте врсте хемијских елемената могу се разликовати на основу разлике у масама (физичка својства) користећи законе померања нелектрисаних честица у магнетским и електричним пољима.

Радиоизотопи су нестабилни изотопи неког елемента који се распадају у процесу дезинтеграције атомског језгра. Нашли су широку примену у медицини. Радиоизотоп неког елемента унесен у тело пролази истим биолошким путевима као и стабилни изотоп. За разлику од стабилног изотопа, кретање или накопљање у појединим органима може се погодним уређајима пратити изван, јер зраче продорно јонизирајуће зрачење.

Атомски, редни или протонски број (Z), једнак је броју протона у атомском језгру и одређује редни број елемента у периодном систему елемената. Сваки хемијски елемент окарактерисан је бројем протона у атомском језгру, тако да број протона унутар атомског језгра одређује о којем се хемијском елементу ради.

Тако језгро водоника има један протон, угљеника 6 протона, олова 82 протона. До броја 92 - уранијум елементи се могу наћи у природи. Преко тог броја елементи се могу произвести вештачким путем.

За електрично неутралан атом број протона у атомском језгру једнак је броју орбиталних електрона.

Масени број једнак је укупном броју протона и неутрона (нуклеона) у језгру атома.

Неутронски број (N) једнак је броју неутрона у атомском језгру.

6. Радиоактивни процеси

Као што је већ напоменуто, радиоактивни процеси су промене стања и састава атомског језгра у којима долази до емисије различитих врста зрачења. Деле се на нуклеарне распаде и нуклеарне реакције [3].

Нуклеарни распади су процеси у којима радиоактивна језгра спонтано прелазе у нижа енергијска стања уз емисију било фотона било честица.

Нуклеарне реакције су процеси у којима једно атомско језгро реагује са неким другим атомским језгром, елементарном честицом или фотоном производећи у кратком времену једну или више других језгара и евентуално друге честице.

Имена, симболи и особине честица које учествују у реактивним процесима дати су у табели 2.

Табела 2 - Карактеристике честица које учествују у реактивним процесима

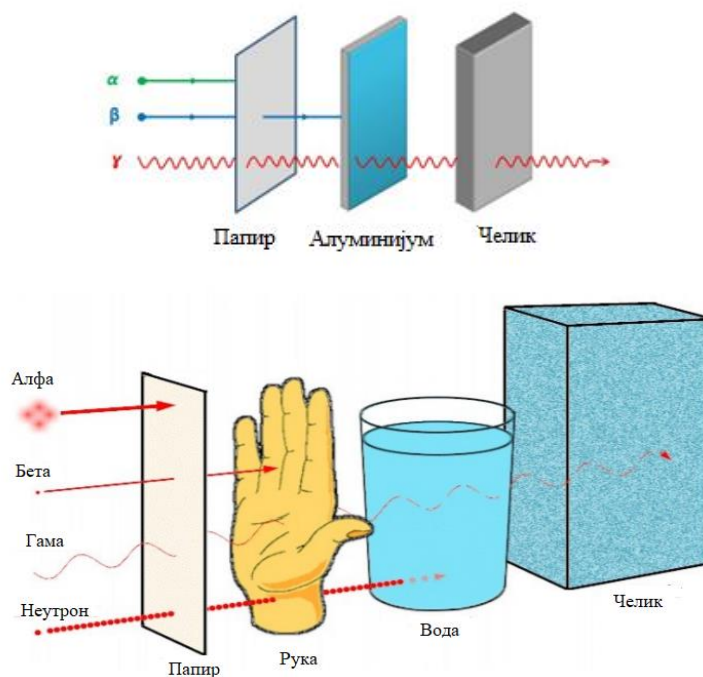
Име	Симбол	Масени Број	Маса	Наелектрисање
Протон	$p; {}^1_1p; {}^1_1H$	+1	1,007277	+1
Неутрон	$n; {}^1_0n$	1	1,008665	0
Електрон	$e; e^-; {}^0_{-1}e; \beta^-$	0	0,000548	-1
Позитрон	$e^+; {}^0_{+1}e; \beta^+$	0	0,000548	+1
Фотон	$h\nu; \gamma$	0	0	0

6.1. Нуклеарни (радиоактивни) распади

Нестабилна радиоактивна језгра спонтано се распадају у процесу радиоактивности и том приликом емитују радиоактивно зрачење (алфа (α), бета (β), гама (γ) зрачење) и тако прелазе у енергетски нижа и стабилнија стања. Радиоактивна зрачења убрајају се у јонизирајућа зрачења, јер јонизирају атоме тела на коју падају (избацују електроне из њихових атомских омотача) [4].

Приликом набројаних распада долази до претварања радиоактивног језгра у емисију радиоактивног зрачења. Распаде уобичајено прати, осим емисије честичног зрачења (α , β) и емисија фотона гама (γ) или X-зрачења. Понекад се у распаде убраја и гама распад, иако он није распад у правом смислу речи јер се емитује чиста енергија.

Због различите природе зрачења насталих при радиоактивним распадима (маса, наелектрисање, енергија), различита је и њихова продорност, односно домет (слика 12).



Слика 12 - Пролазак алфа, бета, гама и неутронског зрачења кроз различите врсте материјала

Алфа честице (језгро хелијума) може зауставити слој папира или слој изумрлих станица коже. Ако доспеју унутар организма изразито су опасне.

Бета минус честице (електрони), зауставља неколико милиметара алуминијума. Опасност представља кочно X зрачење које настаје његовим проласком кроз тело, или гама зрачење које се емитује ако језгро после емисије бета честице остане у побуђеном стању.

Гама зрачење (електромагнетне природе), има највећу дубину продирања. Гама зрачење не може у потпуности зауставити ни челична плоча. Најбоље га апсорбују материјали великог атомског броја (олово) и велике густине.

Управо ова карактеристика продирања зрачења кроз материјал образлаже зашто се у радиографији користи искључиво гама и X зрачење.

7. Извори зрачења у радиографији врсте и карактеристике

Најпознатији облик радиографске енергије за НДТ је електромагнетне природе. Електромагнетно зрачење се може описати енергијом појединих фотона. Године 1900. Макс Планк (*Max Planck*) је поставио теорију о дисконтинуитету енергије. То значи да ужарено тело може емитовати или апсорбовати тачно одређену енергију. Најмањи износ енергије назива се квант енергије или квант зрачења (фотон) и рачуна се према изразу:

$$E = h \cdot \nu \quad (2)$$

$$\nu = c/\lambda \quad (3)$$

$$E = h \cdot c/\lambda \quad (4)$$

при чему је:

E - енергија зрачења,

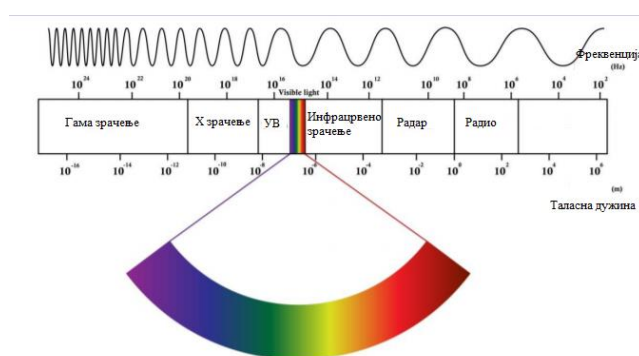
h - Планкова константа која износи $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$,

ν - фреквенција зрачења,

c - брзина светлости која износи $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ и

λ - таласна дужина.

Фотони у енергетском опсегу од 1 keV до 10 MeV су део електромагнетног спектра који се обично примењује за НДЕ и представљају или γ -зраке или X-зраке, (слика 13), зависно од тога потичу ли из језгра или орбитала [5, 6].



Слика 13 - Електромагнетни спектар

Поред фотона, за НДТ се користе и електрони, протони, а посебно неутрони. Сви извори који се користе за НДТ на бази зрачења директно или индиректно се усмеравају уз помоћ додатне опреме. У зависности од опреме зрачење се користи директно или се производе радиоизотопи који се затим користе као извор зрачења.

Радиоизотопи који се јављају у природи постоје, али ниједан није важан извор НДТ зрачења. Фотони су најчешћи и најпознатији облик извора зрачења.

Године 1913. дански физичар Нилс Бор (*Niels Henrik David Bohr*), на основу Планкове теорије, поставио теорију о грађи атома према којој распоред електрона у атому није случајан. Према Бору, електрони се могу налазити око језгра само на тачно одређеним квантним путањама. Будући да се свакој од путања приписује одређена количина енергије, енергија електрона који се креће путањом тачно је одређена. Каже се да је енергија електрона квантитативована. Енергетски најстабилније стање атома назива се стационарно стање. У стационарном стању атом не апсорбује и не емитује енергију.

Ако се загрејаном атому доведе енергија, атом ће прећи у побуђено стање. Када атом апсорбује енергију електрон прелази у виши енергијски ниво. При повратку електрона из вишег у нижи ниво, атом емитује енергију у облику светлости (квант зрачења). Од разлике енергија почетног и коначног стања електрона:

$$E_2 - E_1 = h \cdot \nu \quad (5)$$

при чему је:

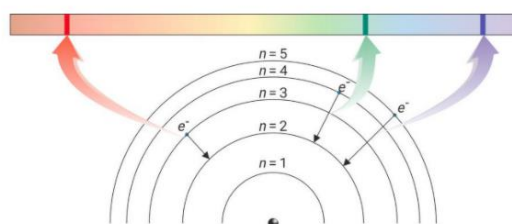
E_2 – енергија једног енергетског нивоа,

E_1 – енергија другог енергетског нивоа,

h – Планкова константа која износи $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ и

ν – Фреквенција зрачења

зависи хоће ли таласна дужина зрачења бити у видљивом делу спектра (слика 14).



Слика 14 – Спектар зрачења

7.1. Фотони – квант зрачења

У претходном одељку описано је основно порекло фотонског зрачења. Овде се представља физика заједничких извора фотонског зрачења и понашање фотонског зрачења са материјалима [2].

Извори радиоизотопа могу емитовати гама и X-зраке, често из истог извора. Користиће се $^{109}_{48}\text{Cd}_{61}$ као илустративни пример.

Кадмијум-109 има распад од 100% на електронском снимку и постаје $^{109}_{47}\text{Ag}_{62}$. Сребро-109 се производи у будном неутронском стању након хватања електрона. Будни $^{109}_{47}\text{Ag}_{62}$ нуклеус се распада до почетног или стабилног стања помоћу неутронског прелаза. Овај прелаз неутрона емитује γ -зрак са енергијом од 88 keV. Електрон који се користи у електронском закључавању електрона такође оставља атом сребра у будном стању. Електронско упражњено место К је обично попуњеном једним од електрона L љуске који емитују карактеристични рендген енергије 22 или 25 keV. Ове енергије су

карактеристичне за сребро. Дакле, ^{109}Cd производи три фотонске енергетске линије – један γ -зрак и два X-зрака (израз линија се односи на емисију зрачења дискретне енергије која ствара конус, врх или линију на плочи интензитета изнад енергетског спектра зрачења). Остали радиоизотопи су доступни са γ -зраком енергије у распону од преко 1 MeV.

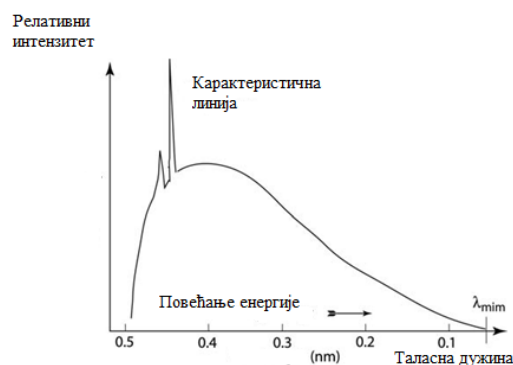
Електронски напајане X-зрачне цеви су увелико технолошки најважнији фотонски извори за радиографију. Ове цеви функционишу побуђујући енергетске електроне (кинетичку енергију велике брзине) на мету (аноде, назване због своје функције унутар цеви). Овај процес производи много различитих рендгенских зрака од којих су неки карактеристични рендгенски зраци чија је енергије одређена анодним елементом. Електрони одбацују орбиталне електроне из атома анодног материјала. Ова електронска слободна се одмах попуњавају и емитују се рендгенски зраци. Најчешћи анодни материјал је волфрам, W, X-зраци K-серије енергетске вредности од 58, 59, и 67 keV. Инцидентни електрони морају имати енергију која прелази 70 keV да би дошло до избацивања електрона K серије из W, тако да се X-зраци из W појављују само када електрони у цеви прелазе 70 keV у кинетичкој енергији.

Постоји други процес који се дешава у цевима X-зрака, који обично доминира продукцијом X-зрака. Електрони пуни енергије који пролазе кроз материју су склони одбијањима проузрокованим њиховом интеракцијом са електронима структуре атома.

Оба процеса се резултују у губицима енергије зрачења у форми *bremsstrahlung* (Немачка реч за прекид зрачења). У спектру емисија зрачења *bremsstrahlung* заузима бесконачност енергија које се шире све до енергије случајног електрона. Бесконачност *bremsstrahlung*-а је супер наметнута на карактеристичним линијама да би формирала излазни спектар из цеви X-зрака (слика 15). Мали делић енергије случајног електрона која се конвертује у *bremsstrahlung* енергију се повећава енергијом електрона и са атомским бројем аноде.

Само мали делић енергије X-зрака произведене у цевима аноде стиже до објекта који се испитује. Абсорпција у аноди, отворима на цевима и у путањи кретања доприноси модификовању спектра. Додатно, X-зраци су произведени у малом броју са скоро изотропном угаоном дистрибуцијом. Образац сферичног зрачења резултује у густини флукса ϕ X-зрака из извора снаге S (фотона произведених у јединици времена), који се смањују за $1/r^2$.

$$\phi = S/4\pi r^2 \quad (6)$$



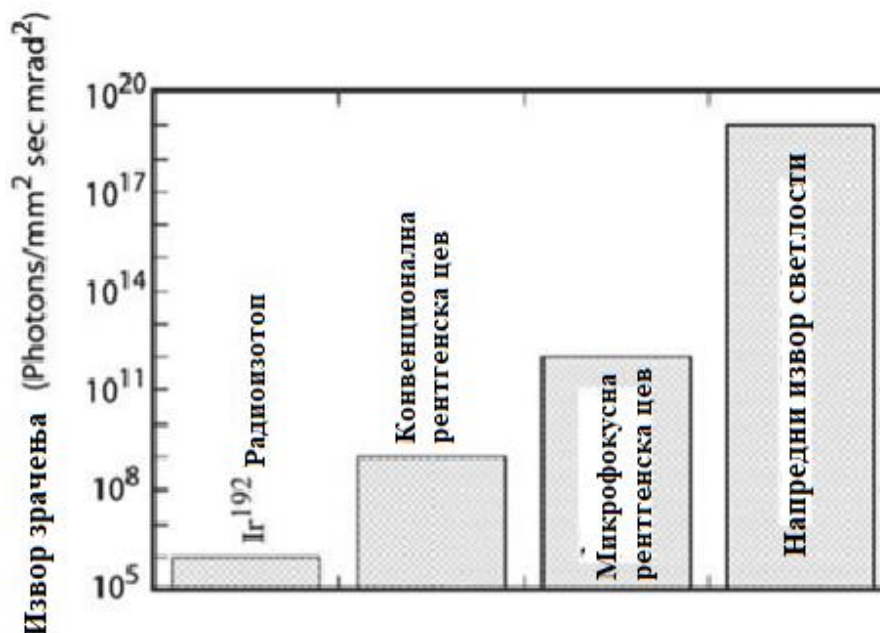
Слика 15 - Спектар зрачења цеви X-зрака – континуална емисија зрачења и карактеристична "линија" скока зрачења

У изразу (6) r је раздаљина од извора. Део $1/r^2$ смањење у густини флукса зрачења са раздаљином од извора се назива инверзни квадратни закон. Снага извора цеви се повећава линеарно са струјом електрона (број електрона по јединици времена који погађају предмет/мету) и приближно као квадрат енергије убрзаних електрона. Још један користан детаљ при опису извора НДТ фотона јесте њихова сјајност. Сјајност је дефинисана као доступна густина флукса фотона подељена са квадратом дивергенције зрака. Што сјајнији извор, више фотона је садржано у сету података стечених у одређеном времену.

Најинтензивнији извори Х-зрака за НДТ су синхотрони. То су велике машине са веома високим енергетским електронима који круже у прстенастом складишту. Када су ови електрони одбијени (угаоно убрзани), било код магнетних савијања или у уређају који се назива Виглер, они емитују широкопојасну фотонску радијацију, где су неке од њих у опсегу од 1-20 keV. Ови фотони путују низ светлост до експерименталне станице и они су објекти тестирања који се могу изложити високом интензитету зрачења.

Синхотрони испоручују светлост фотона која је 10^9 пута већа од Х-зрачне цеви. Њихова светлост је толико висока да се монохроматар може користити за филтрирање широкоопсежног зрака у циљу проласка малог дела енергије (еквивалентно таласној дужини) за употребу у квантитативном сликању, при чему остаје још Х-зрачног осветљења које превазилази радиоизотопе и рендгенске цеви. Слична осветљења најчешћег радиоизотопа, Х-зрачних цеви, и напредних извора светлости (ALS) синхотрона су приказани у Лоренс Берклијевој (*Lawrence Berkley*) лабораторији. Цена, физичка величина и мала рендгенска енергија (обично мања од 20 keV) ограничавају коришћење синхотрона у конвенцијалном НДТ. Али се највише просторног скенирања и већина квантитативног рада на терену врши уз помоћ ових машина. Напредни извори светлости у Лоренс Берклијевој лабораторији раде са електронима на 1.9 GeV.

Јачина извора светлости из различитих машина приказана је дијаграмски на слици 16.



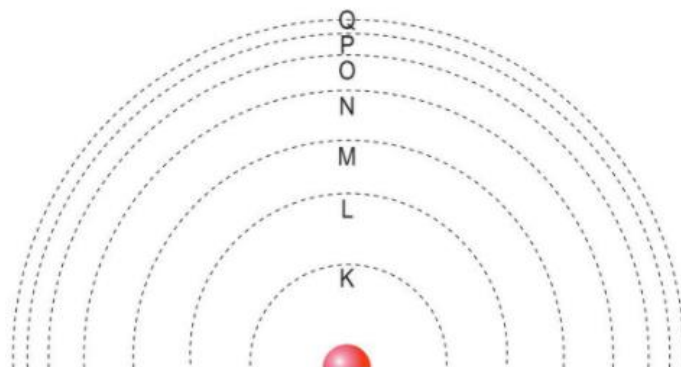
Слика 16 - Релативна осветљеност 4 типа извора Х-зрака или γ -зрака

Плазма - потпуно јонизовани гасови, састављени од јона и слободних електрона такође емитују зрачење у рендгенском опсегу. Сви објекти емитују електромагнетно

зрачење на енергијама (таласним дужинама) у односу на своју температуру. Знајући да са војним применама инфрацрвених слика за детекцију и циљање непријатеља значи да објекти близу собне температуре емитују се у инфрацрвеном режиму, док се врући објекти емитују у видљивом црвено врућем светлосном облику. Плазме које емитују у нижем делу енергетског опсега рендгенског зрака, сада могу бити произведене комерцијалним, кратким импулсним, високоенергетским ласерима. Истраживачки системи су произвели Х-зраке базиране на плазми. Ови извори ће највероватније бити технолошки важни за НДТ у будућности. Они већ постају избор Х-зрачне литографије. Рендгенска литографија је нови процес који се развија како би се произвели мали објекти потребни за мале и брзе компјутерске чипове.

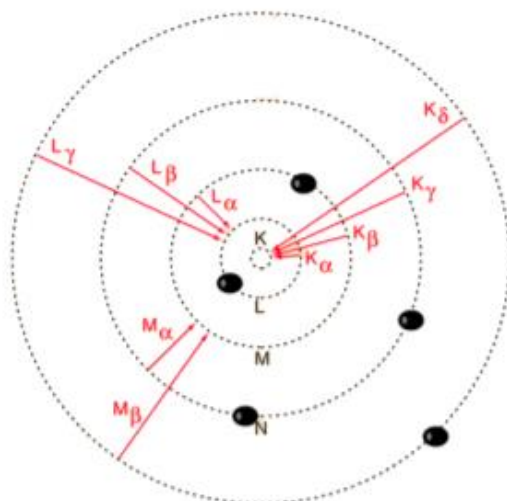
7.2. Електрони и радиоактивност – извор зрачења

Електрони окружују језгро, стварајући различите љуске које чине енергетске нивое. Они који су ближе језгру су ниже енергије и чвршће су везани од оних на удаљеној орбити. У класичној дефиницији атомске физике најчешће коришћена у НДЕ јесте најближа грана, означена као К љуска. Излазећи из нуклеуса, ознаке су К до Q (слика 17). У свакој љусци постоје мале разлике у енергији које су означене индексима. Када се орбитирајући електрон уклони намерним озрачивањем, фотоном, онда атом остаје у будном стању. Убрзо, електрони се међусобно распоређују како би атом вратили у почетно стање. Приликом ове транзиције, енергија може бити ослобођена у виду Х-зрака енергијом која је једнака разлици између енергије у будном и у стању мировања. Х зрак се такође назива и карактеристика Х зрачења, јер је то енергија карактеристична за елемент који пролази кроз транзицију [2, 6].



Слика 17 - Енергетски нивои и ознаке

Енергија карактеристичног Х-зрачења зависи од енергетске разлике између енергетске љуске од које је узет електрон и енергетске љуске која има слободно место. Пример илуструје ознаку која се користи за карактеристичне рендгенске зраке. Ако слободно место (тренутно) постоји у К љусци атома и попуњено је од Л љуске, карактеристични Х- зрак ће емитовати такозвани K_{β} Х-зрачење. Сличним процесом се попуњава шупљина остала у једној од спољних љусци при чему долази до емитовања још једног карактеристичног Х – зрака (слика 18).



Слика 18 - Карактеристични преласци

Овај процес траје све док се атом не врати у своје почетно стање. К серија Х-зрачења су од технолошког значаја јер поседују највишу енергију и највећу пенетрацију. Највиши енергетски рендген серије К настаје када је упражњено место испуњено слободним (неограниченим) електроном. Х-зраци К серије повећавају енергију при расту атомског броја. Максимум за гвожђе - Fe је 7 keV, док је за волфрам - W 70 keV. Иако емитујући атом одређује енергију карактеристичних рендгенских зрака, релативни бројеви сваке енергије зависе од стања извора.

7.3. Нуклеус и радиоактивност— извор зрачења

Нуклеус атома водоника (један протон) је стабилан без неутрона. Ако се дода два неутрона стабилном атому водоника, он постаје нестабилан и радиоактиван изотоп тритиум. Изотоп је било који од два или више атома хемијског елемента са истим атомским бројем неутрона. Ако нуклеус има превише или премало неутрона, он постаје енергетски нестабилан и распадаће се док не достигне енергетски стабилан ниво. Радиоактивно распадање је процес који прати емитовање α , β , неутронског, γ , Х-зрачења или неку од комбинација [2].

Неки трансуранијски нуклеиди ће спонтано изазвати фисију брзином корисном за извор неутрона. Извори неутрона такође се могу произвести користећи секундарне нуклеарне реакције. Када се α , емитујући радиоизотоп, помеша са Be - берилијумом, неутрони се стварају реакцијама (α, n). Неутрони такође могу бити произведени мешањем одговарајућег (високоенергетског) γ емитера са Be. Ови извори обично се не користе за НДЕ зато што се њихово емитовање γ емисије садржи превише емисије неутрона.

Пошто су већ дефинисани рендгенски зраци као електрони који произлазе и орбитирају око језгра, може се рећи да распад нуклеарне енергије може да произведе Х-зраке. Ово су два основна механизма. Нуклеус се може кретати у стабилном простору тако што ће хватати електрон. Протон унутар нуклеуса се након тога конвертује у неутрон. Ово резултује трансформацију елемента у нови елемент са истим масеним бројем, Z, али са нижим атомским бројем. Овом новом елементу недостаје електрон

унутар његове љуске. Као што је описано у претходном делу, Х-зраци се производе како се попуњавају упражњена места.

Радиоактивно распадање је феномен вероватноће. Стопа дезинтеграције линеарно зависи од броја присутних радиоактивних атома. Ако један почиње са фиксираним количином радиоактивних језгара, преостали број се континуално смањује и стопа распада се континуално смањује. Ако је број језгра у тренутку $N_0 = 0$, онда број нуклеуса N_t остаје непромењен:

$$N_t = N_0 e^{-\lambda_r t} \quad (7)$$

при чему је λ_r - константа распадања.

Полувреме τ изотопа је дефинисано као време потребно да се број радиоактивних нуклеуса бројно преполови. Због тога је:

$$\tau = \ln 2 / \lambda_r \quad (8)$$

Активност извора радиоизотопа је његова брзина распадања, из једначине 7:

$$\Lambda = |dN_t / dt| = |\lambda_r N_t| \quad (9)$$

Историјска јединица за радиоактивност је кири (Ci), дефинисана као 3.7×10^{10} дезинтеграције/секунди. Иако се Ci и даље користи, јединица СИ система за активност је бекерел (Bq), дефинисана као 1,0 дезинтеграције/секунди. Корисни извори радиографије садрже много MBq или чак GBq.

Два забележена упозорења се извршавају пре него што предмет напусти радиоактивност. Извор не производи увек одређени тип зрачења за свако распадање. Због тога јачина извора жељене радијације може бити само делић активности. Поред тога, апсорпција и расипање се одвијају унутар самог извора, тако да радијација која излази из извора може бити само делић распаднуте количине.

8. Основи зрачења – принципи

Било да се зрачење емитује из рендгенске цеви или извора гама зрака, постоје неке битне компоненте које се примењују на процес радиографског тестирања:

- извор зрачења X-зрака потиче из рендгенске цеви, а гама зраке емитују радиоактивни изотопи,
- испитни узорак који треба испитати,
- развој технике,
- снимање радиографије и обрада филма и
- интерпретација радиографске слике.

8.1. Карактеристике зрачења

Постоје одређене јединствене карактеристике у односу на зрачење које се морају разумети како би се остварила физика и променљиве укључене у производњу радиографије уз коришћење извора зрачења. Ове карактеристике се односе и на X зрачење и на гама зрачење. Једина разлика између X и гама зрачења јесте њихово настајање. X зраци се производе у рендгенској цеви, а гама зраци долазе из радиоактивног извора који се распада. Следеће карактеристике се односе на зрачење које ће се користити у испитивању материјала без разарања [1].

Зрачење се апсорбује и расипа по материјалу - Постоје четири уобичајена процеса апсорпције који утичу на количину зрачења која пролази кроз део. Четири процеса апсорпције су:

- фотоелектрични ефекат,
- Рејлијево расипање,
- Комптоново расипање и
- производња пара.

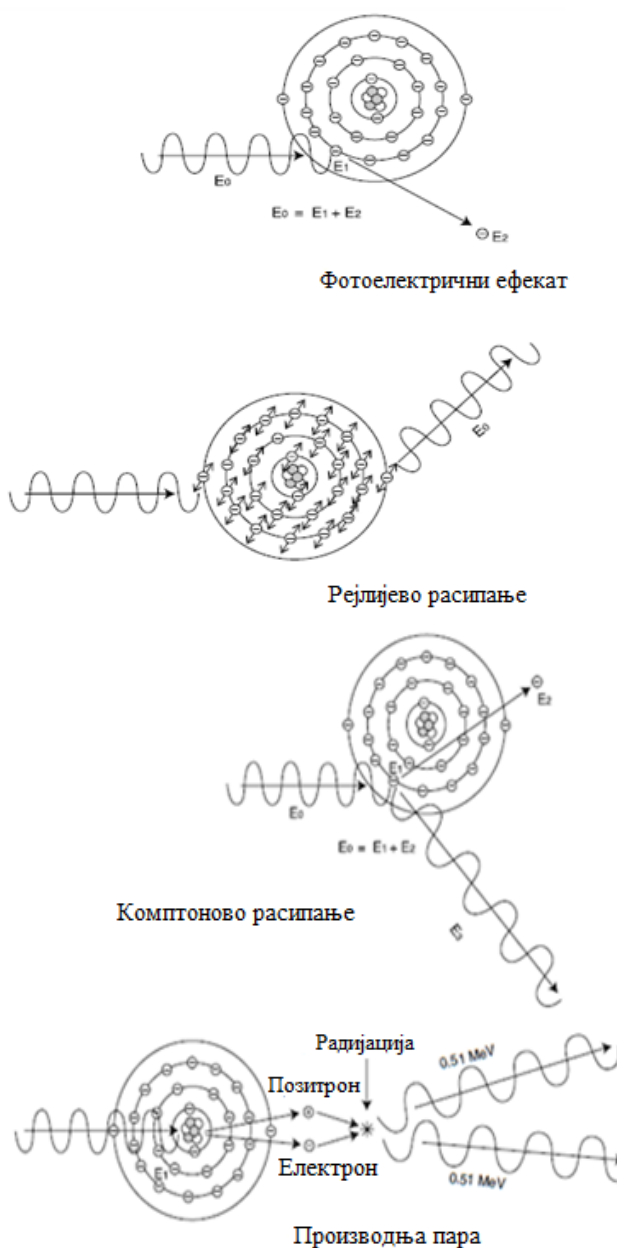
Фотоелектрични ефекат је онај процес у којем фотон ниске енергије зрачења (мање од 500 kV) преноси сву своју енергију на електрон у некој љусци материјалног атома. Енергија може једноставно помакнути електрон из једне љуске у другу, или ако постоји енергија изнад која је потребна за интеракцију с орбиталним електроном у материјалу, она ће дати кинетичку енергију и електрон ће бити избачен из атома.

Друго име за **Рејлијево расипање** је кохерентно распршење и то је директна интеракција између фотона и орбиталних електрона у атому материјала. Међутим, у овом случају се фотон одбија без икакве промене или смањења кинетичке енергије фотона или енергије атома материјала. У овом процесу нема електрона који се ослобађају из атома. Процењује се да Рејлијево расипање не чини више од 20% укупног пригушења.

Комптоново расипање је директна интеракција између фотона у опсегу енергије од 0,1-3,0 MeV и орбиталног електрона. У овом случају, када се електрон избаци из атомског материјала, користи се само део кинетичке енергије фотона. Фотон се затим расипа у другом смеру од правца из кога је дошао и заправо настаје са

редукованом енергијом и према томе, нижом таласном дужином. Комптоново расипање варира са атомским бројем материјала и варира, отприлике, обрнуто са енергијом фотона.

Производња пара је процес пригушења који резултује стварањем два фотона од 0,51 MeV (као резултат анихилације електрон-позитивног пара) распршеног зрачења за сваки високоенергетски инцидентни фотон који је на или изнад енергије од 1,02 MeV. Два фотона од 0,51 MeV путују у различитим правцима, узрокујући производњу електромагнетног зрачења кроз интеракцију са другим материјалним честицама. Енергије које прелазе 1,02 MeV резултирају додатном кинетичком енергијом која се примењује на пар честица. Ова четири облика слабљења или апсорпције приказана су на слици 19.



Слика 19 – 4 процеса апсорпције

Укупна апсорпција, дакле, представља комбинацију четири различите врсте апсорпције.

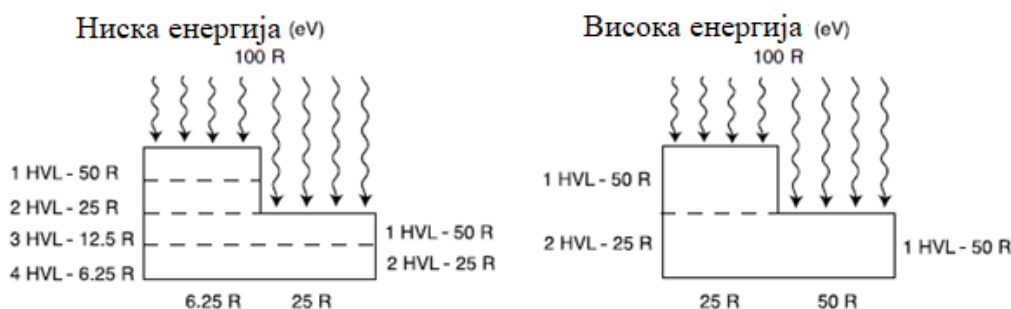
Продор радијације - Променљиве које се односе на продор зрачења могу се изразити са термином „слој полувредности“. Слој полувредности се дефинише као дебљина специфичног материјала која ће смањити интензитет зрачења на половину оне која улази у део. Ако је почетни интензитет зрачења 100 R, материјал који је тачно један слој полувредности ће смањити вредност од 100 R на 50 R. Друга дебљина слоја полувредности ће смањити тај 50 R на 25 R, и тако даље. Ако се то пренесе даље, радијација никада не достигне нулу. Још један термин који се користи је слој "десетина вредности". Принцип који се примењује је исти као и код слоја полувредности, осим што је дебљина нешто већа и смањује почетно зрачење на једну десетину на супротној страни. Фактори који су укључени у ове половине и десете вредности слојева су:

- енергија - што је енергија већа, то су дебљи слојеви половине или десетине вредности. Ово је подржано чињеницом да зрачење веће енергије производи краће зрачење таласне дужине, што резултује бољим продором. Слојеви половине и десете вредности су посебно корисни за израчунавање дебљине заштитног слоја приликом пројектовања кућишта или просторије за радиографију.
- тип материјала - што је већа густина материјала, то је слој полувредности тањи. Материјал који има ниску густину, као што је алуминијум или титанијум, омогући ће пролаз у више зрачења и мање апсорпције и расипања. Материјали са већом густином, као што су челик и олово, пружају много веће шансе за интеракцију због њиховог већег атомског броја. Код материјала веће густине биће већа апсорпција, а дебљина слоја полувредности ће бити знатно мања него код материјала мање густине и
- дебљина - као што је поменуто, дебљина слоја полувредности је специфична за дати материјал и енергију. Како се дебљина материјала повећава, количина апсорпције и распршења се повећава и количина зрачења која пролази кроз ту дебљину.

Слика 20 илуструје принцип полувредности слоја, користећи две различите енергије с истим узорком за испитивање. Када су присутни дисконтинуитети у материјалу, густина кроз попречни пресек у тој области тест материјала ће такође варирати, што утиче на количину зрачења која пролази кроз део. Управо из тог разлога радиографија је толико ефикасна у откривању дисконтинуитета, посебно оних који доводе до смањења попречног пресека материјала. Густине различитих дисконтинуитета увелико варирају од основног материјала. Ако, на пример, заваривање или ливење садржи гасне поре или друге дисконтинуитете, зрачење ће проћи кроз ова подручја са релативном лакоћом, стварајући већи ефекат експозиције на радиографском филму, резултирајући тамнијим подручјем на готовом рендгенском снимку.

Радијација путује у равним линијама и брзином светлости - Брзина светлости је 300 000 km у секунди.

Зрачење показује енергију - На електромагнетном спектру, таласне дужине X и гама зрака су много краће него код видљиве светлости. Знајући да се енергија зрачења повећава, производе се краће таласне дужине које обезбеђују већи продор кроз материјал који се испитује.



Слика 20 - Принцип полувредности слоја

Радијација јонизује материју - Јонизација је промена у електричној природи или карактеристикама материје. Електрони су премештени или избачени из орбите, чиме се мења електрична вага. То је, случајно, оно што изазива највећу бригу за људе. Када зрачење прође кроз живо ткиво, ћелије су захваћене - електрично измењене и настаће оштећење.

Зрачење није честица - Зрачење нема масу, и иако се X- и гама зраци понашају као честице, оне су заправо бестежинске. Да би описали ефекат зрачења док је у интеракцији са материјом, зрачење се понекад назива фотонима, што је још један начин да се каже енергија велике брзине која путује брзином светлости која се понаша као честице; али у ствари, нема честица у X- или гама зрачењу.

Зрачење нема електрично пуњење - X и гама зрачења нису под утицајем јаким електричних или магнетних поља.

X и гама зрачење се не може фокусирати - Ако је X или гама зрачење усмерено према стакленом сочиву, зрачење се не би фокусирало као што то чини светлост. У ствари, зрачење које пролази кроз то сочиво би се апсорбовало у већој мери у дебљом делу сочива и више зрачења би прошло кроз тање делове сочива.

Људи не могу осетити X или гама зрачење - Зрачење се не може видети, окусити или осетити. Нема мириса и ако су људи изложени зрачењу, ефекти се не остварују у одређеном временском периоду. Другим речима, тело пролази кроз латентни период пре него што су видљиви штетни ефекти излагања зрачењу.

Радијација узрокује флуоресценцију у неким материјалима - Неки минерали и соли флуоресцирају када су изложени зрачењу. Флуороскопија користи флуоресцентни екран који претвара део зрачења у светло. Када се користи у радиографији, светлост која се емитује са флуоресцентног екрана ствара много већи ефекат експозиције на филм који се налази поред њега, чиме се значајно смањује изложеност.

Интензитет зрачења - Зрачење се изражава у рендгенима по сату (R/h), рендгенима у минути (R/min), или милиреендгенима на сат (mR/h). Интензитет се смањује са даљином коју пролази. Ово је функција инверзног квадратног закона, који каже да се интензитет зрачења мења инверзно са квадратом растојања. Како се удаљеност од извора зрачења удвостручује, интензитет се смањује на једну четвртину.

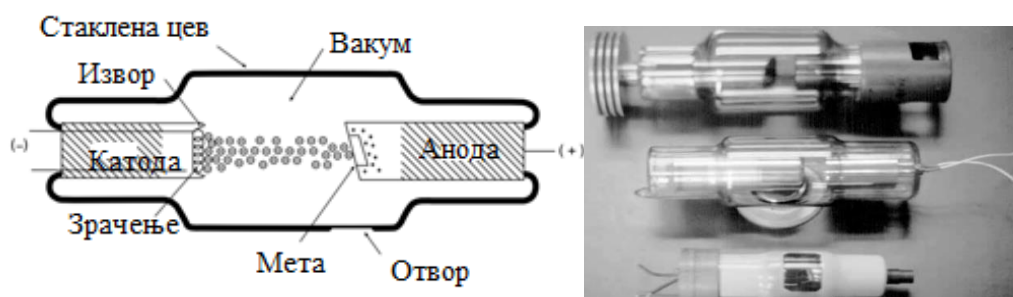
Зрачење производи хемијске промене у изложеном филму - Емулзија филма је хемијски промењена јонизацијом док је зрачење у интеракцији са њом. Да није било ове карактеристике, не би било могуће произвести радиографску слику на филму.

8.2. Принципи Х-радиографије

Х-зраци се производе у вакуумској цеви када електрони велике брзине, који су негативно наелектрисани, привлаче позитивним потенцијалом у аноди и сударају се са метом. Електрони се производе када се филамент, обично волфрам, загрева. Добијени електрони се „кувају“ и сударају са метом у аноди. Виша струја примењена на нит ће резултирати већим бројем електрона и, према томе, већим интензитетом зрачења. Енергија зрачења је функција примењеног напона или киловолта у односу на аноду. То узрокује повећање брзине електрона и, када се примени виши напон, резултира зрачењем више енергије. Енергија зрачења је њена најважнија карактеристика. Она је директно повезана са таласном дужином и способношћу тог зрачења да продре. Што је енергија већа, то је краћа таласна дужина и већи је продор. Мета у аноди у већини рендгенских цеви је обично направљена од волфрама. Волфрам има висок атомски број, што га чини идеалним материјалом за интеракцију са електронима велике брзине. Такође има високу тачку топљења, 3249 °C, што је од суштинске важности, јер је мета подложна високим температурама као резултат удара електрона. Будући да се скоро сва кинетичка енергија из електрона трансформише или претвара у топлоту, анода мора имати способност расипања те топлоте. У ствари, 97-99% конверзије енергије резултира стварањем топлоте и око 1–3% се претвара у рендгенске зраке [1].

Укратко, како се енергија повећава, зрачење са краћим таласним дужинама резултује већим продором. На катодној страни цеви, која садржи филамент и чашу за фокусирање, број електрона расте са повећањем примењених милиампера, што резултира повећањем интензитета зрачења. Величина мета у аноди је веома важна, јер то утиче на оштрину слике објекта који се снима. Ово је директно повезано са дефиницијом коначне слике. Што је мета мања или извор зрачења, то је оштрија резултантна радиографска слика. Као што је горе поменуто, енергија зрачења се изражава у напону или киловолту, при чему је један електрон волт износ напона који је потребан за енергију и замену једног електрона. Заједнички израз за енергију рендгенског зрачења је у јединицама килоелектронских волти (keV), али то је кратко на kV. Киловолт је једнак хиљаду волти. Већина индустријских радиографских техника користи енергетски опсег од око 100 kV до 400 kV. Интензитет зрачења се изражава у милиамперима (mA). Уопштено говорећи, енергија зрачења може се описати и као квалитет зрачења и интензитет (у милиамперима) као количина. Енергије изнад 400 kV опсега сматрају се високоенергетским Х-зрачењем. Опрема за производњу високоенергетских рендгенских зрака укључује:

- рендгенске цеви са трансформатором резонантног типа (слика 21),
- бета троне,
- линеарни убрзач и
- *Van de Graaff* генераторе.



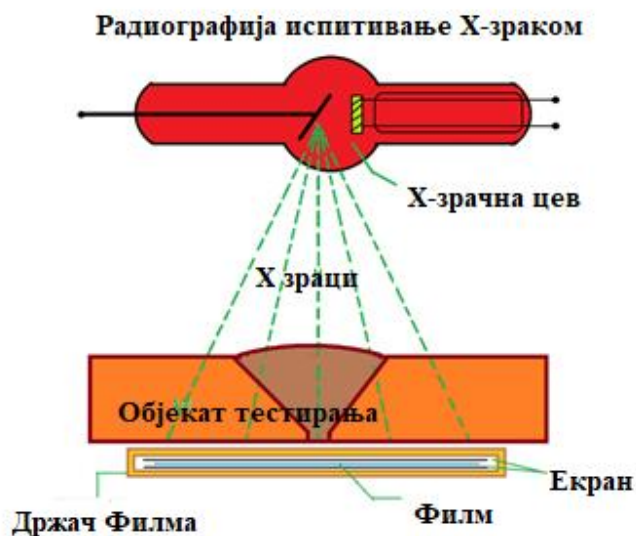
Слика 21 – Илустрација типичних рендгенских цеви и пресек цеви

Старији од ових високоенергетских рендгенских јединица су резонантни трансформаторски рендгенски уређаји, који су развијени 1940-их. Њихов енергетски опсег је од 250 kV до 4 MeV. Рендгенска цев је симетрично лоцирана унутар трансформатора. Електрони се убрзавају до врло великих брзина помоћу електрода и фокусирају се колиметором док улазе у продужну комору. Могуће је продрети кроз 200 mm челика са овом опремом.

Бетатрони убрзавају електроне кружном путањом користећи наизменично магнетно поље и типично производе енергију у опсегу од 10-30 MeV. Цев је у облику крофне и електрони повећавају своју брзину са сваком орбити док не достигну врло високу енергију. Они се на крају воде од њихове кружне путање до циља и генеришу се X-зраци.

Линеарни убрзавачи производе електроне велике брзине употребом радиофреквентне енергије повезане са таласоводом и имају енергије од 5 до око 25 MeV. Ови системи садрже електронску пушку, убрзавач и таласовод. Електрони се убрзавају дуж таласовода електричним пољем.

Van de Graaff генератори, познати и као електростатички генератори, производе рендгенске енергије од око 500 kV до 6 MeV. Системи се састоје од појасева великих брзина који прелазе око 4000 метара/минут и граде електрично наелектрисање који се преноси до високонапонског терминала. Ово резултује високим електростатичким наелектрисањем који се користи за убрзавање електрона кроз цев до циља. На слици 22 представљен је начин испитивања X-зрацима са претходно описаном опремом.



Слика 22 – Процес испитивања X-зрацима

Табела 3 садржи листу различитих нивоа енергије добијених рендгенским изворима и приближне дебљине продора које би биле типичне за челик [7].

Табела 3 – Листа различитих нивоа енергије

Енергија X-зрачења	Дебљина продирања у челику
100 kV	25,4 mm
150 kV	50,8 mm
200 kV	50,8 mm – 127 mm
250 kV	76,2 mm – 203,2 mm
300 kV	101,6 mm – 609,6 mm
400 kV	127 mm – 914,4 mm
1,0 MeV	203,2 mm – 1219,2 mm
2,0 MeV	304,8 mm – 1524 mm
6,0-10,0 MeV	914,4 mm – 4876,8 mm
10,0-20,0 MeV	3048 mm – 7315,2 mm
15,0-30,0 MeV	3657,6 mm – 9144 mm
Извори	Дебљина продирања у челику
Индијум 192	127 mm – 431,8 mm
Цезијум 137	152,4 mm – 609,6 mm
Кобалт 60	304,8 mm – 1524 mm

8.3. Принципи гама радиографије

Као што је раније споменуто, два најчешће коришћена извора гама зрака у индустријској радиографији су иридијум 192 и кобалт 60. Други извори који су се у ограниченој мери користили у индустријској зони су тулијум 170 и цезијум 137, и наравно, радијум 226. Табела 4 садржи сажетак ових извора са карактеристикама и подацима који се односе на полуживот, енергију и способност продирања у челик [1].

Табела 4- Сажетак извора са карактеристикама

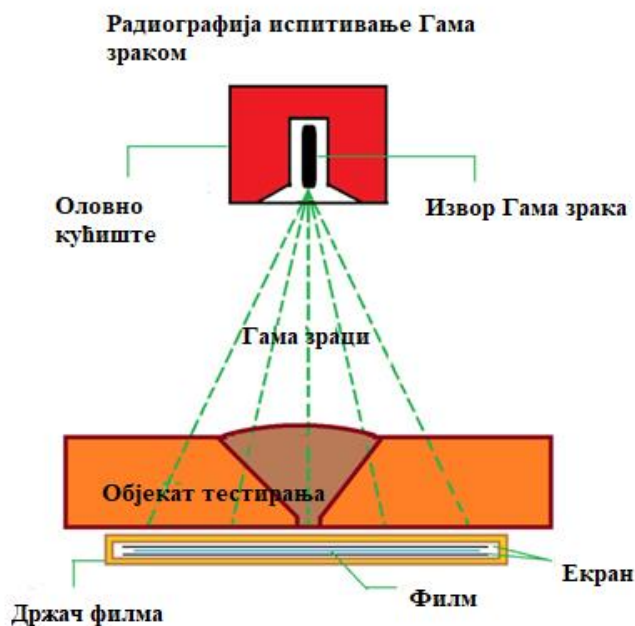
Извор	Ознака	Број	Маса	Изотоп	Век	Енергија	Емисија
Цезијум	Cs	55	132,91	137	30 год.	0,66 meV	4,2 R/C
Кобалт	Co	27	58,9	60	5,3 год.	1,33 meV	14,5 R/C
Иридијум	Ir	77	192,2	192	75 дана	0,21 meV	5,9 R/C
Радијум	Ra	88	226	226	1602 год.	0,24 meV	9,0 R/C

Постоје одређене карактеристике радиоактивних изотопа које треба разумети.

Енергија радиоактивног изотопа је јединствена за тај специфични радиоактивни материјал. Неки од ових радиоактивних изотопа заправо дају спектар, или број јединствених енергетских снопова. За изворе, енергија се никада не мења за дати радиоактивни изотоп.

Радиоактивни изотопи пропадају с временом. Са пропадањем долази смањење активности или квантитета. Радиоактивни полуживот је количина времена која је потребна да се одређени радиоактивни изотоп распадне или се смањи на половину своје оригиналне активности. Сећајући се да је код извора X-зрака интензитет или количина зрачења функција примењених милиампера.

Један од начина да се схвати дезинтеграција је визуализација атома радиоактивног изотопа као превише неутрона у нуклеусу. Временом, нуклеус се буквално разбија или распада. У том чину дезинтеграције даје се сноп зрачења са јединственом енергијом. Поред тога, створени су и други материјали нуспроизвода. Када се 37 милијарди ових дезинтеграција дешава у јединичном времену од једне секунде, постоји један кири од тог радиоактивног изотопа. Опет, полуживот је време које је потребно да се изворна активност смањи на половину онога што је првобитно било. За кобалт 60, полуживот је 5,3 године. Његова енергија је већа од иридијума. За иридијум 192, постоји седам главних енергетских пакета произведених током процеса дезинтеграције у распону од нешто преко 0,2 до око 0,6 MeV (приближно 200 до 600 kV). Код кобалта 60 постоје две дискретне гама енергије (понекад изражене као фотонске енергије), 1,17 и 1,33 MeV. Са овом већом енергијом, могуће је испитати материјале који су нешто дебљи или гушћи. Други фактор који треба узети у обзир када се користе радиоактивни изотопи је њихова специфична активност. Специфична активност извора изражена је у кирима по граму. Што је већи број кирија за дату физичку величину, то је већа специфична активност. Главна предност високо специфичног извора активности је побољшана дефиниција која ће бити резултат високе активности и мале физичке величине. На слици 23 представљен је начин испитивања гама зрацима [7].

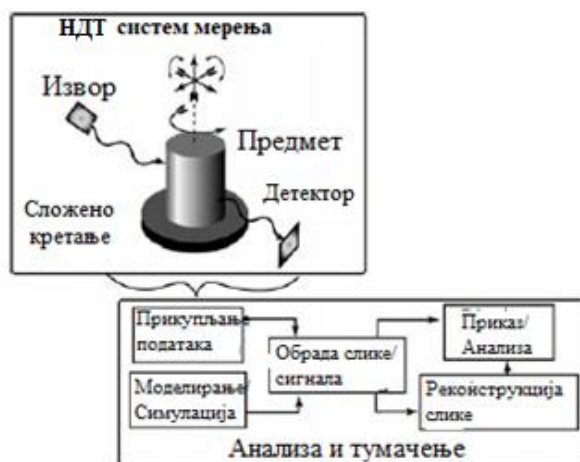


Слика 23 – Начин испитивања гама зрацима

9. Опрема и прибор

Радиографски НДТ системи садрже исте основне компоненте сличне многим другим НДТ методама. Ове компоненте се могу раздвојити у две категорије:

- НДТ систем мерења и
- системи за анализу и интерпретацију (слика 24).



Слика 24 - Општи НДТ систем

Систем мерења је део који укључује извор, објекат (предмет) и детектор [2].

Извор представља извор енергије која се испитује - X-зрака, γ -зрака или неутронска зрачења. Извори зрачења могу се конфигурисати да делују као тачка, линија или као извор подручја.

Предмет је испитивани материјал који мора да делује у интеракцији са зрачењем (апсорпцијом) да би се откриле карактеристике материјала и унутрашње карактеристике.

Детектор надгледа промене зрачења из извора услед интеракције зрачења и објекта. Иако се X-зрак/ γ -зрак, опрема увелико разликују од једноставне филмске радиографије до сложене СТ слике, сви они имају исте основне елементе.

Уопштено, опрема која се користи у овим системима није јединствена за одређени систем, нпр. исти линеарни детектори могу се користити за пројекцијску радиографију система за скенирање пртљага као они који се користе за СТ машину под условом да детектор има потребна својства, као што су брзина и осетљивост скенирања за одређену апликацију.

Најчешћи извори зрачења и детекторе који се користе у радиолошком НДТ морају бити представљени како би се целокупна опрема обухватила.

9.1. Извори радијација

Расправа о изворима радијација подељена је у две категорије, као што је претходно већ споменуто:

- електрични погон - ток енергетских електрона је или успорен унутар циља или се окреће магнетним пољем, ослобађајући фотоне са енергијом која се креће од неколико keV до неколико MeV и
- радиоизотропни извори – извор радиоактивних материјала који спонтано емитују X-зраке или γ -зраке фотона док ти нестабилни атоми пропадају.

9.2. Опрема X зрака

Апарати са X-зрацима - Најважнији извор X-зрака за НДТ користи физикални принцип који је довео до Рентгеновог открића, тј. када енергични електрони погоде објекат, стварају се X-зраци. X-апарати се састоје од цеви за генерисање, напајања и каблова. X-цеви стварају зрачење сударом убрзаних електрона са циљаним материјалом који ослобађа фотоне са енергијом која се креће од неколико keV до неколико MeV. Спектар емитованог зрачења састоји се од две различите компоненте:

- широки континуални спектар и
- уски опсег (дискретне или карактеристичне линије) зрачења.

X-цеви нуде значајан степен контроле над излазним зрачењем:

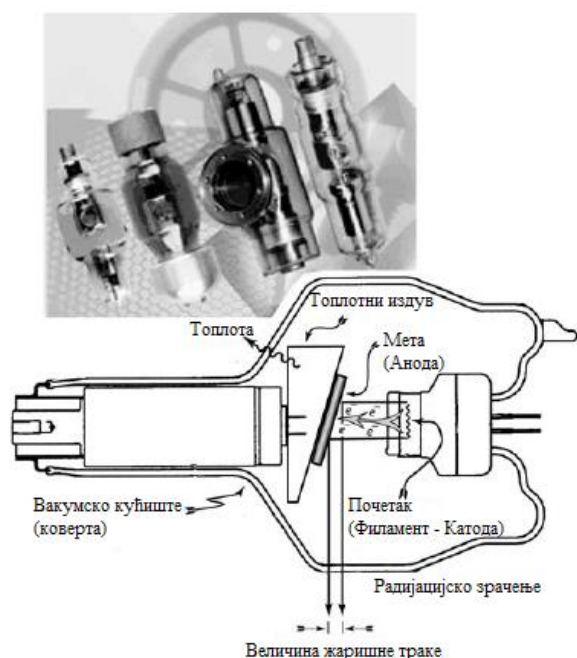
- подешавањем напона који убрзава електроне може се у великој мери контролисати излазни енергетски спектар, тј. енергија фотона,
- уметањем намерне X-филтрације може се у одређеној мери контролисати излазни енергетски спектар, тј. енергија фотона,
- избором циљног материјала може се одабрати енергија дискретних опсега (карактеристичних линија) произведених зрачења,
- подешавањем струје филамента која контролише број убрзаних електрона (струја цеви) може се контролисати излазни интензитет, тј. број фотона и
- одабиром жаришне величине може се снажно утицати на просторну резолуцију и број фотона.

Основна X-цев састоји се од филамента, мете и вакуумског кућишта (слика 25). Унутар цеви је потребан вакуум да би се генерисали и преносили електрони. Подржавајући систем укључује напајање за струју филамента и високонапонски извор напајања за пристрански напон за убрзавање електрона (слика 26).

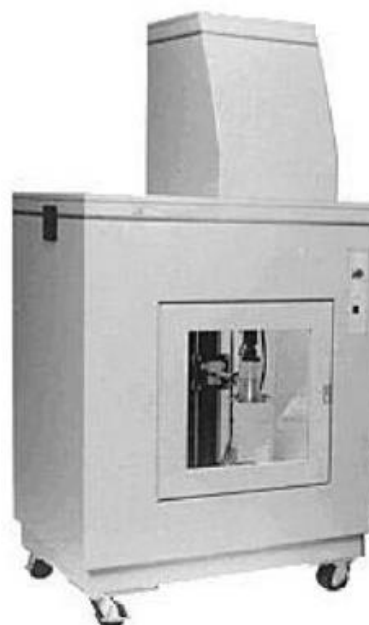
У раду, струја тече кроз отпорнички филамент, који се назива и катода, ослобађајући електроне који се убрзавају, напоном удаљавања, ка мети, који се назива и анода. X-зраци настају претварањем кинетичке енергије електрона у електромагнетно зрачење. У просеку, већина енергије електрона производи нежељену топлоту. Ово ограничава интензитет производње и радни век X-цеви. Једном у неко време, електрон долази у непосредну близину великог електричног поља узрокованог позитивно набијеним језгром и долази до значајног губитка енергије, стварајући користан фотон [2].

Генерално, индустријска рендгенска опрема се може категорисати по групама енергије. Оне рендгенске јединице које производе енергију до око 125 kV сматрају се ниском енергијом; од 125 до 400 kV, средња енергија; и они системи који производе

енергију зрачења изнад 400 kV сматрају се високом енергијом. Као што је већ поменуто, већина данашњих испитивања је обављена у средњем енергетском опсегу, од 125 kV до око 400 kV. То је најчешће коришћено за широки спектар примена, те је фокус тај распон енергије. Када се спомиње енергија као што је 300 kV, она обично означава максимални излаз енергије за ту одређену јединицу. За било који рендгенски уређај, енергија се обично може мењати од ниске енергије до максималне енергије за коју је цев оцењена. Као што је речено, X-зраци се производе у вакуумској цеви, грејући филамент негативно наелектрисаних електрона. Они су привучени позитивно напуњеном анодом, где постоје веома сложени судари и интеракције које производе углавном топлоту, са само малом количином енергије која се претвара у рендгенске зраке. Индустијски рендгенски системи долазе у различитим величинама, облицима и радним циклусима. У кабинетима се налазе рендгенски уређаји који су идеални за радиографију мањих делова од материјала мале густине или са ограниченом дебелином. Ове јединице кабинета обично производе мање енергије, обично до око 150 kV, као што је на слици 27.



Слика 25 - X-зрачне цеви

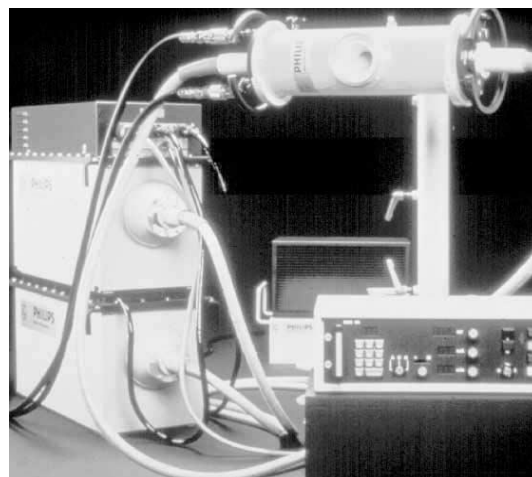


Слика 26 - Индустијска X-зрачна машина

Постоје рендгенски уређаји који су преносиви, са гасним цевним главама. Они су лагани и релативно лако се преносе за радиографију на терену. Многе од стационарних јединица су само-исправљене и континуалне дужности, као што су јединице константног потенцијала, које могу радити непрекидно током дугих временских периода. Цеви пуњене гасом раде са делимичним радним циклусима, око 50%. То значи да рендгенска цев може радити одређено време уз једнаку количину времена која је дозвољена за хлађење пре следећег излагања. На слици 28 илуструје се рендгенски систем са константним потенцијалом од 300 kV.



Слика 27 – Рендгенски систем од 150 kV



Слика 28 – Рендгенски систем од 300 kV

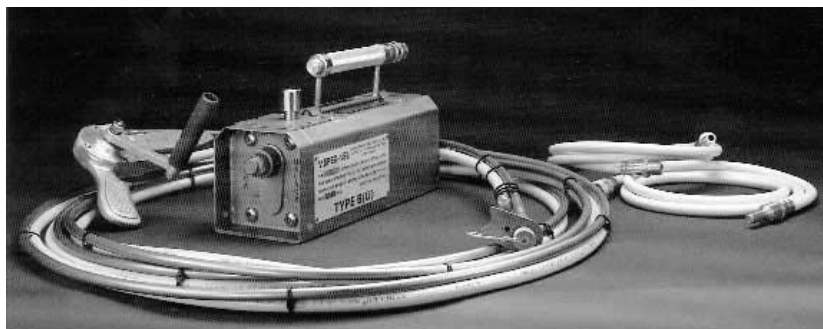
9.3. Опрема гама зрака

Као што је поменуто, први извор гама зрака који се користи у индустријској радиографији био је радијум. На слици 29 илуструје се техника „рибљег пола“ у којој је радијум транспортован унутар капсуле на крају линије која је била причвршћена за рибарски штап. Радиограф би ставио „куку“ на крај линије кроз ушицу на капсули, а затим је уклонио из складишта и однео га у подручје на којем се налазио објект који се испитује, као што је илустровано [1].



Слика 29 - Техника „рибљи пол“

Главна компонента система гама зрачења је уређај за излагање, као што је онај приказан на слици 30. Ови уређаји за излагање имају штитове који садрже S-цев у којој је извор иридијума задржан у капсули од нерђајућег челика и сигурно је закључан на месту када није у употреби. Материјал штита се обично прави од осиромашеног уранијума, за разлику од ранијих гама камера које су користиле заштиту од ливеног олова. Осиромашени уранијум је мало тежи од олова и има необично добре могућности заштите од зрачења.



Слика 30 – Уређај за излагање

Подешавање гама зрачења је приказано на слици 31, приказујући камеру са контролом извора, изворна цев која је позиционирана у извору стоји непосредно изнад заварене цеви која ће бити радиографирана. Радиограф „извлачи” извор до проширеног положаја. Дозвољено је да истекне претходно одређено време излагања и онда се извор враћа назад у камеру.



Слика 31– Подешавање експозиција гама зрака

9.4. Прибор

Постоји много различитих додатака који се користе у вези са узимањем радиограма [4]. Ови додаци укључују:

Рендген радиограми - Филм - Радиографски филм је далеко најважнија трајна евиденција у неразорном тестирању. Стандардни индустријски радиографски филм садржи две емулзије, по једну са сваке стране база филма. Постоји седам слојева који чине пресек филма. База, која заузима велику већину дебљине, израђена је од целулозе, триацетата или полиестер. Обе стране ове базе имају веома танак слој који садржи лепак који се спаја за емулзију. Емулзија садржи много малих кристалних зрна од сребра који су формиран у желатин. Овде се хемикалије мењају и настају када је емулзија изложена зрачењу или светлости. На две спољне површине постоји врло танак слој чврстог желатина који је предвиђен за заштиту емулзије. Емулзија је веома осетљива на руковање, хемикалије, абразије и различите нивое излагање светлости, тако да је од велике важности пажљиво третирати филм.

Појачавајуће фолије - Појачавају дејство зрачења на радиограм при експонирању (слика 32). Оне се стављају испред и иза радиограма и задатак им је да X

или гама зрачења (на које емулзија рендген радиограма мало осетљива) преведу у електронско или светлосно, на које је фотографска емулзија знатно осетљива. Према материјалима од којих се израђују разликују се:

- фолије од тешких метала (најчешће олова) и
- флуоресцентне фолије.



Слика 32 – Алуминијумска фолија

Касете за радиограме - Могу бити савитљиве и круте. Израђују се од непрозирне пластике, гуме и танког алуминијумског лима различитих стандардних димензија зависно од димензија филма. Касете штите радиограм од светлости, нечистоће и штетних гасова. Могу се и вакуумирати што обезбеђује добро налагање на радиограм. При избору касета мора се водити рачуна да нису оштећене и да уколико се прозрачавају закривљене површине буду довољно еластичне како би добро налегале на површину. На слици 33 приказана је крута касета за заштиту радиограма.



Слика 33 – Касета за заштиту радиограма

Идентификационе ознаке - Обично су то слова и бројеви стандардних димензија, а израђују се од олова или осиромашеног уранијума утиснутог у пластичне фолије. Постављају се на касете са радиограмом како би се добијени радиограм довео у везу са местом испитивања. На слици 34 приказане су оловна слова заједно са начином постављања на касетама за заштиту радиограма.

Пенетрамери (индикатори квалитета слике) - Основни циљ радиографског испитивања је откривање унутрашњих дисконтинуитета што се постиже, пре свега, израдом квалитетног радиограма. Остваривање овог циља зависи од низа параметара повезаних са карактеристикама извора јонизујућих зрачења, предмета испитивања, радиографског филма и хемијске обраде експонираног радиограма, који непосредно одређују осетљивост радиографске методе. За одређивање квалитета радиограма користе се специјални еталони, који се озрачавају заједно са предметом испитивања. На радиограму се ови еталони региструју и на основу одређивања најмање величине еталона (пречник жице, дебљине степеника, пречник рупе итд.) који је на радиограму регистрован, могуће је на основу утврђених захтева стандарда, норми, спецификација и

договора одредити квалитет радиограма. Ови еталони се називају индикатори квалитета слике (ИКС), односно, пенетрометри. Индикатори квалитета се израђују од материјала идентичних са материјалима који се испитују. Сви индикатори су стандардизовани и ознака стандарда мора да је видљива на индикатору. Стандардом се дефинише изглед, опис, димензије, материјали и начин обележавања. Избор индикатора врши се на основу врсте и дебљине материјала у циљу постизања квалитетног радиограма,



Слика 34 – Оловне ознаке

Филмски илуминатори високог интензитета - (слика 35) Преглед радиограма. Користе се за просветљавање радиограма ради откривања нехомогености у предметима који се испитују. Илуминатор представља извор дифузне светлости одређеног или континуалног промењљивог интензитета, који се емитује кроз површину стандардног облика и димензија. Код новијих илуминатора интезивна осветљеност екрана се успоставља ножном командом. За анализу детаља радиограма користе се и рефлектори са блендом, лупе за увећивање (до 10 пута) и друга помагала.



Слика 35 – Илуминатор

Још неки од прибора који се користе у радиографији јесу:

Главни екрани - за дигитално представљање снимка,

Процесна опрема - ручна или аутоматска,

Колиматори - посебно за употребу са радиоактивним изворима и

Дензитометри.

10. Процедура испитивања и анализа резултата

Препоручени кораци у радиографском испитивању су:

- потребно је темељно разумевање кодова, спецификација и захтева,
- развити технику на основу дебљине и врсте материјала,
- припрема скице,
- у тамној соби пажљиво поставити радиографски филм у касету са одговарајућим главним екранима,
- поставити филм испод подручја које треба испитати,
- осигурати да се користи тачан извор удаљености од филма,
- поставити одговарајуће ознаке станице и идентификационе бројеве у подручје које се испитује да би се осигурала лака повезаност са прекидом ако се открије,
- подесити параметре експозиције,
- направити експозицију,
- у мрачној соби уклонити и обрадити филм,
- оценити филм према артефактима,
- оценити филм ради усаглашености и
- попунити извештај.

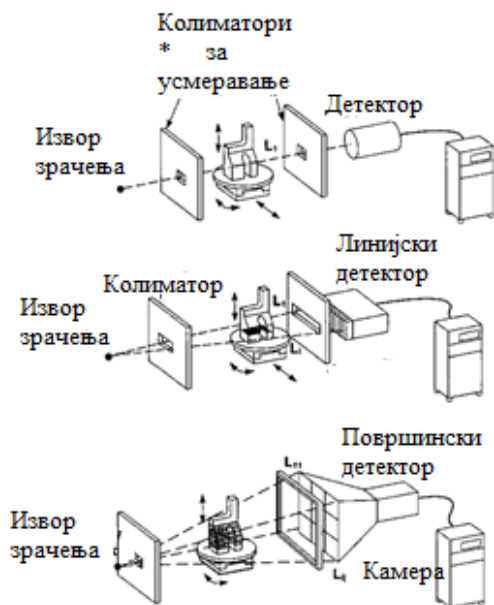
10.1. Техника испитивања

Главне три технике за радиографско испитивање дате су сликом 36. На слици се види да су главни елементи извор зрачења, колиматори за усмеравање зрачења, објект испитивања, детектор и камера – екран. Колиматор служи за усмеравање или дискретизовање зрака. У зависности од тога какав се објект испитује и у ком његовом делу се усмерава зрачење на таквој се удаљености од извора зрачења колиматор и поставља. Такође у зависности од тога да ли се на објекту испитивања врши испитивање само неког његовог дела или се испитује цео елемент, детектор може бити детектор једне тачке, линије или површине [2].

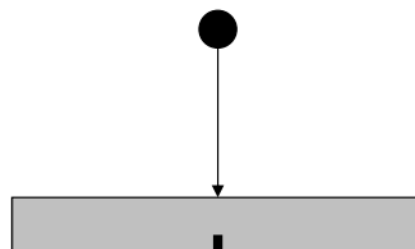
Да би се добио квалитетан радиограм који даје одговарајуће информације о предмету испитивања морају бити, пре испитивања, расположиви прецизни подаци неопходни за дефинисање оптимале технике испитивања. Ови подаци укључују поред информација везаних за карактеристике извора зрачења, радиограма, фолије, хемијске обраде и информације о врсти (типу) грешака које се желе открити, могућим локацијама и димензијама грешака, и слично, чиме се употпуњује скуп елемената потребних за дефинисање процедуре за испитивање. Овај скуп података зависи од врсте и облика производа који се испитује (одливци, откивци, заварени спојеви, цеви и слично).

Најједноставније технике озрачавања су код униформних дебљина узорака, равних површина, када примарни сноп зрачења пада нормално на материјал и озрачавање је равномерно, чиме се постиже највећа осетљивост. На слици 37 је дат пример најједноставнијег случаја униформне дебљине узорка када примарни сноп

зрачења пролази кроз најмању дебљину узорка, тј. једном експозицијом се озрачава једна дебљина узорка, чиме се постиже највећа осетљивост [9].

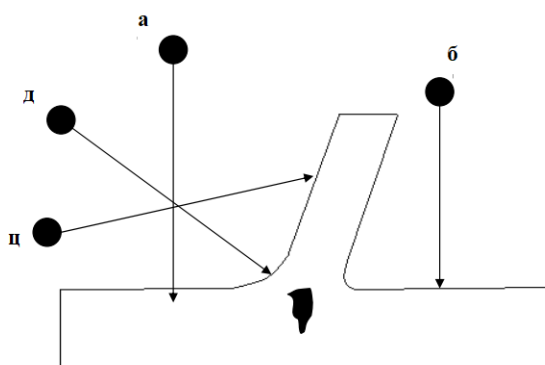


Слика 36 – Технике испитивања



Слика 37 – Озрачавање елемента у облику равне плоче

У случају сложене геометрије одливка или отливка (слика 38), исто се деле на више једноставнијих сектора (облика) који се снимају појединачно, што омогућује оптимални избор параметара озрачавања и ефикасно откривање типичних грешака (укључци, поразност, прслине и слично). На слици 38 је дат шематски приказ за узорак сложеније геометријске конфигурације чворно место – када се озрачавање врши из више правца са више експозиција. Правци а, б, ц покривају појединачне униформне дебљине узорка, али је потребан и додатни правац д ради откривања грешке у самом чворном месту.

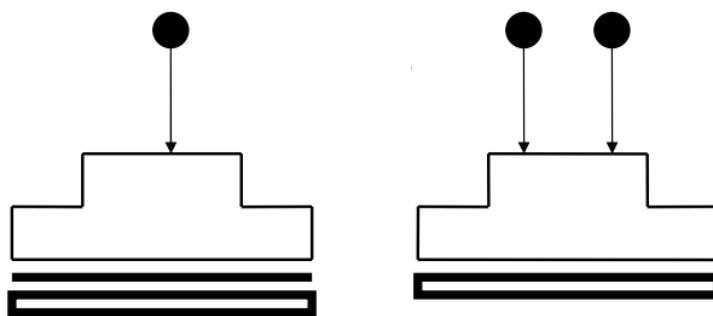


Слика 38 – Озрачавање чворног места код сложеног елемента

Када постоје знатне разлике у дебљини појединих зона узорка, постоје две могућности (слика 39) и то:

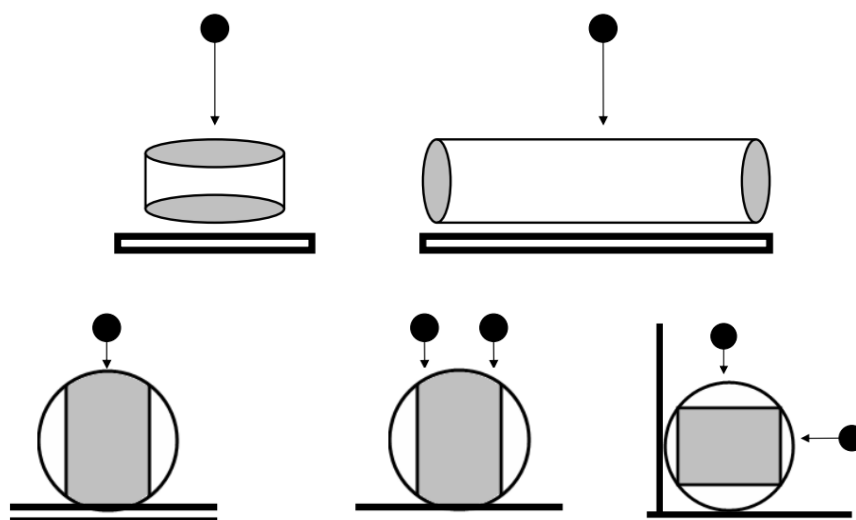
- истовремено експонирање (једна експозиција) два радиограма различите осетљивости радиограма истих осетљивости са различитим комбинацијама фолија (пакованих у истој касети - сендвич техника) и

- две експозиције са различитим вредностима напона (јачине извора).



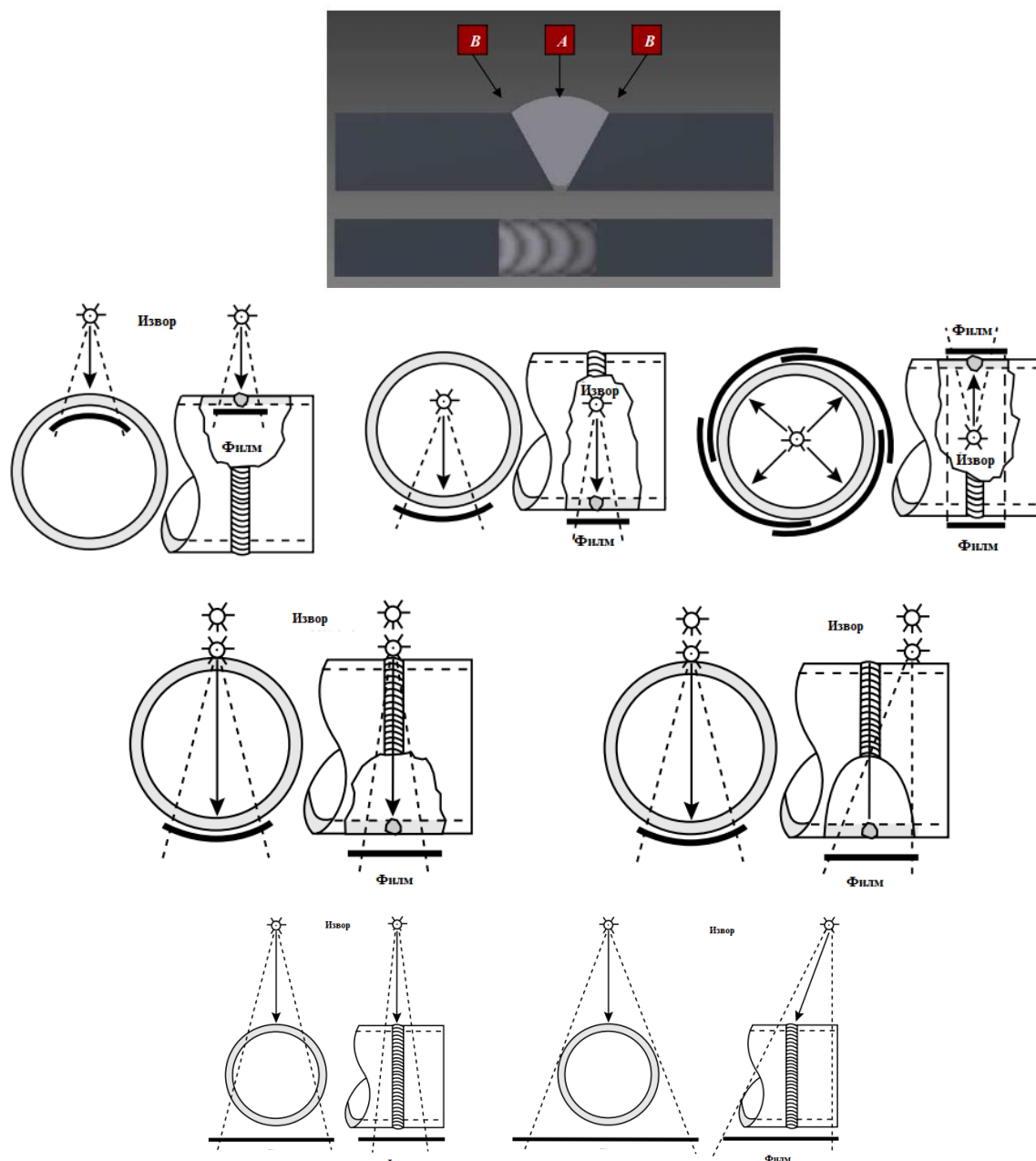
Слика 39 – Озрачавање узорка различите дебљине

Када су у питању цилиндрични елементи, постоје следеће могућности испитивања (слика 40).



Слика 40 – Техника испитивања цилиндричних елемената

Када су у питању заварени елементи елементи, постоје следеће могућности испитивања (слика 41).



Слика 41 – Техника испитивања заварених елемената

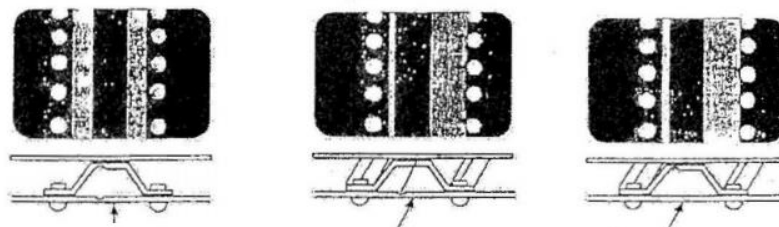
10.2. Одређивање положаја грешке

Радиографском методом је у одређеним условима могуће одредити положај грешке директно са радиограма. Предуслов за ово је познавање структуре објекта који се испитује, типова грешака које се могу појавити као и коректна интерпретација радиограма. Ове предуслове често у пракси није могуће обезбедити те је прецизно одређивање локације немогуће или непоуздано. Овде су представљена два типична примера одређивања локације грешке:

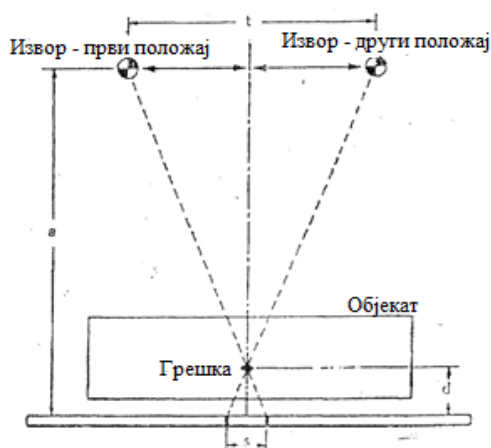
- случај одређивања положаја (локације) корозивних оштећења дат је на слици 42. Овде се користе две експозиције, свака са својим филмом, а положај

оштећења се одређује на радиограму, у односу на референтни положај околних профила и

- стерео радиографија - случај са две експозиције на једном филму, при чему се користи исти извор зрачења, на два различита положаја са тачно познатим размаком (слика 43).



Слика 42 – Одређивање локације корозивних оштећења



Слика 43 – Стерео радиографија

Локација дефекта у овом случају одређује се формулом:

$$d = s \cdot a / s + t \quad (10)$$

при чему је:

t - дистанца између чворова,

a - дистанца између извора и детектора и

s - дистанца између позиције грешке и детектора, уједно и ширина сенке на филму.

При овоме се мора водити рачуна, да би се обезбедила задовољавајуће укупно затамњење (пошто је ово техника са две експанзије истог филма), да се за сваку експанзију користи само половина укупне вредности јачине струје (mA). Најчешћа примена стерео радиографије је за одређивање дубине укључака и других запреминских грешака код одливака, откивака и заварених спојева [4].

10.3. Одређивање дужине и ширине грешке

На радиографу се тродимензионална грешка пројектује у дводимензионалну пројекцију, тако да се лако може одредити дужина и ширина грешке. При овоме треба

водити рачуна о појави увећања пројекције. У општем случају, сем код великих дебљина предмета, линеарно увећање пројекције грешке је ретко веће од 5%.

Увећање пројекције (слика 44) у општем случају се може утврдити релацијом:

$$g^* = f \cdot g / f - x \quad (11)$$

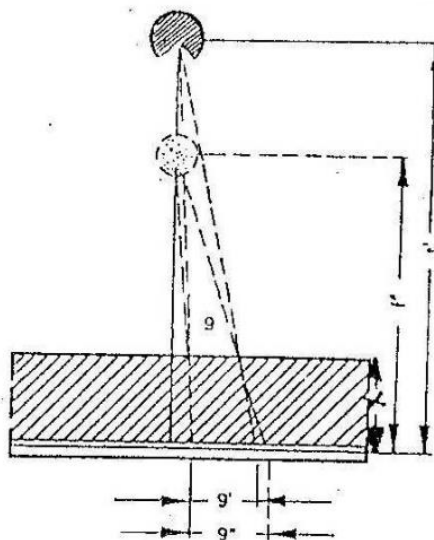
при чему је:

g^* – пројекција грешке у равни филма,

g – стварна величина грешке,

f – растојање између извора и филма и

x – удаљеност грешке од филма.



Слика 44 – Шематски приказ увећања грешке

Величину грешке по дубини радиографски је теже одредити. Поступак се састоји у мерењу густине затамњења на месту грешке и поређење промене густине затамњења на месту грешке ΔD_x са вредношћу промене густине затамњења одговарајућег степеника односно жице индикатора квалитета ΔD_{IKSi} . Пречник одговарајуће жице, односно степеника $IKSi$ приближно одговара димензији грешке ($\Delta D = \Delta a$) озрачавања, ако је испуњен услов:

$$|\Delta D_x| = |\Delta D_{IKSi}| \quad (12)$$

при чему важи:

$$\Delta D_x = D_x - D_0 \quad (13)$$

$$\Delta D_{IKS} = D_0 - D_{IKSi} \quad (14)$$

где су:

D_0 , D_x , D_{IKS} - густине затамњења на месту без грешке, на месту грешке i -тог степеника или жице индикатора респективно.

Провером овог једноставног начина одређивања висине грешке установило се да се величина грешке може одређивати са одступањем $\pm 30\%$. Вредности одступања се смањују ($\pm 20\%$) ако се индикатор постави у непосредној близини грешке [4].

10.4. Радиографски филм

Постоје четири опште класификације индустријског радиографског филма [1].

Класа 1 је описана као изузетно fino зрно, мале брзине, са врло високим могућностима контраста. Овај филм се обично користи за материјале ниже густине и могу се користити са или без оловних екрана.

Класа 2 је fino зрнаста фолија са високим контрастом, средње брзине која се такође користи за материјале ниже густине са зрачењем ниске и средње енергије. Ова класификација филмова тежи томе да буде коришћенија од класе 1 јер даје врло добру дефиницију, има fino зрно, и незнатно је већа у брзини филма од класе 1. Може се користити и са или без оловног екрана.

Класа 3 је филм велике брзине и зато захтева краћа времена експонирања. Обично се користи за X-зраке или гама зраке са већом енергијом и може се користити са или без водећих екрана. Сматра се филмом средњег контраста.

Специјална класа укључује филмове веома високе дефиниције и врло finoг зрна.

Постоје друге класе филмова различите ширине који се не користе тако често као четири групе.

10.5. Обрада филма

Након снимања радиограма, филм је спреман за обраду. Мануелна обрада филма је приказана на слици 45. Први корак у ручној обради је постављање филма на држач од нерђајућег челика који је предвиђен за ручну обраду или се пажљиво ставља у доводни део аутоматског процесора (слика 46) [1].

Први корак кроз који ће филм проћи је развој. Програмери су алкални раствори који мењају латентну или хемијски сачувану слику кроз радиографску емулзију у видљиву слику, што резултира различитим нијансама сиве или црне, у зависности од количине изложености. Агенти у програмеру смањују изложени халогенид сребра до металног сребра. То је такође акцелератор, који убрзава развој; конзерванс који спречава оксидацију развијача; и ограничавач, који помаже у контроли и смањењу хемијске магле која може настати током обраде филма. Прилично је уобичајена употреба ових елемената, а време развијања филма је од 5 до 8 минута на температури од 20°C до 68°C. Неки произвођачи филмова препоручују 4 до 7 минута на 68°C. Ако је температура виша од 68°C, а краће време развоја то ће бити прикладније. С друге стране, ако је температура програмера нижи од 68°C, биће потребно дуже време развоја.

Стандардно време и температура за развој треба усвојити и остати доследан током радиографске операција. Када се радиографски филм обрађује ручно, потребно је промешати филм док се налази у развојном процесу. То омогућава равномернији развој и спречава стварање мехурића ваздуха на површини филма. Ако филм није правилно узбуркан, хемијска активност у развоју биће нескладна и појавиће се стање „пробијања“ што може резултовати карактеристичним варијацијама у густини филма.

Следећи корак је заустављање или стопирање развоја. То се може учинити у једном од два начина. Филм се може извадити из програмера и ставити у водену купку за неколико минута, или се може ставити у кисели раствор зван стоп купка. Купка за заустављање је одличан начин да се одмах и доследно зауставе развојне активности.

Фиксатор служи за две главне функције. Прво, уклања неиспољени халогенид сребра кристала који остају у филму и, друго поправља или отврдњује слику. Фиксатор

такође утиче на архивска својства филма. Много пута се узимају пречице за поправљање процеса и филм се извади пре него што потпуно очврсне. У овом случају филм још увек може да садржи неке неиспољене кристале сребро халогенида и они ће се даље развијати сами. То би на крају могло резултирати тиме да слика филма има жућкаст или смеђи изглед. Добра је пракса да се филм држи у фиксатору око 15 минута, иако неки произвођачи филмова препоручују најмање двоструко време чишћења. Време чишћења је време које је потребно да се уклони преостали кристал халогенида сребра емулзије, односно рашчишћавање слике.



Слика 45 - Мануална обрада филма



Слика 46 - Аутоматски прецесор

Након фиксирања, филм одлази у испирање водом током одређеног времена, обично 30 минута. Воду треба непрестано мењати како би се уклонили преостали трагови развијача или поправљача. Ако се филм уклања из воде прерано, та скраћена архивска својства могу резултирати да филм на крају може постати жут или браон. На крају испирања водом, препоручује се постављање фолије у воду која садржи средство за влажење. Ово равномерно навлажи или премаже филм тако да се капљице воде не формирају, узрокујући артефакте када се филм осуши. Такође олакшава стално сушење филма.

Цео поступак обраде филма (осим поступка сушења) се изводи у условима сигурног осветљења у тамној просторији. Сигурносне лампице у тамној соби требало би повремено тестирати на сигурни утицај филма. На радни сто треба ставити неекспонирани филм са новчићем или неким другим непрозирним предметом на емулзији. После неког времена, то прелази оно најдуже време када би филмови били изложени сигурном светлу, објект би требало бити уклоњен и филм обрађен. Не би требало да се мења густина филма у подручје непрозирног објекта. Ако се слика објекта појави на филму, то означава да безбедносно светло није „сигурно“ и да га треба променити.

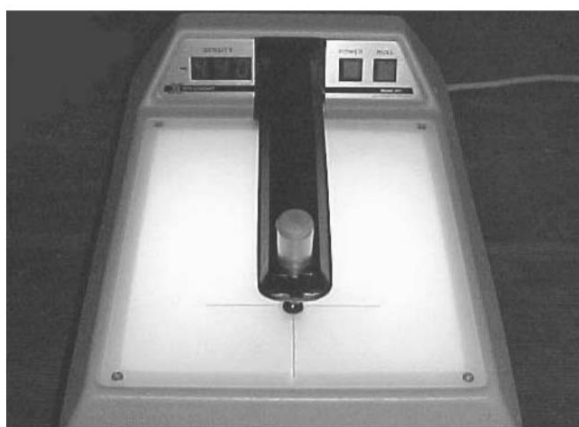
Код аутоматских процесора, време сушења на суво је око десет минута, у поређењу са временом које је потребно за обраду. То је зато што је решење за развојне

програмере више концентрисано и температура развоја је виша, што убрзава цео процес.

Аутоматски процесор је оптималан начин за обраду филма, јер резултира у конзистентним сликама са мање артефаката у поређењу са ручном обрадом. Аутоматски процесори су веома скупи и требало би да постоји довољна количина радиограма који се треба обрадити како би био исплатив. Кључ успешне обраде филма аутоматским процесори је одржавање. Аутоматски процесор се мора често чистити. Ваљак-систем се мора уклонити и пажљиво одржавати, у супротном ће доћи до многих проблема. Чак и најбоља техника која је способна да произведе најквалитетније радиографске слике може да произведе грешку услед неадекватне примене.

10.6. Густина

Ако се филм обрађује и није био изложен светлости или зрачењу, то ће бити практично јасно. Филм који има нулту густину је потпуно јасан и има читавање густине филма нула. Ако је филм изложен и резултирајућа густина филма је један, количина светлости за пролазак кроз филм је 10% упадне светлости. За густину филма од 2,0, само 1% пролази кроз светло. Густина филма од 3,0 дозвољава 0,1% упадне светлости за пролаз, густина филма 4,0, 0,01%, и тако даље. Већина спецификација захтева да густина филма у подручју интереса буде између 2,0 и 4,0. Постоје и друге спецификације које се мало разликују, али генерално, распон густине од 2,0 до 4,0 је прилично уобичајен. Густина филма мери се дензитометром (слика 47) [1].



Слика 47 – Дензитометар

Важно је да се дензитометри калибришу пре сваке употребе, како би се осигурало тачност читавања. У прошлости су траке густине филма коришћене за поређење познатих густина са густинама у подручју од интереса.

Као што је раније споменуто, основна густина радиографије утврђује се узимањем читавања густине кроз пенетраметар. Распон густине у подручју за које се занима не сме да варира од процента те основне густине. Није необично да постоји потреба за опсегом густине за подручје од интереса од +30% до -15% од основне густине утврђене кроз пенетраметар. Квалитет нива радиографске технике утврђује се сликом пенетометра и тиме је утврђено је да ће се тај ниво квалитета такође применити на дефинисани опсег густине. Табела 5 приказује читања густине и распон од + 30 / – 15%. Битно за запазити је то да за читавање основне густине од 3,0 (тј., густина кроз

пенетраметар), максимална густина која се узима у обзир прихватљива у подручју од интереса би била 3,9, а минимална густина 2,55. Већина кодова и спецификација захтевају да чак и уз примену овог распона, густине веће од одређеног максимума (обично 4,0) и минималне (обично 2,0) не смеју бити премашене. Очитавање густина у подручју које треба да се узму у обзир треба узети насумично област. Очитавања густине не смеју се узимати кроз подручје које садржи дисконтинуитет. Па треба имати на уму да је густина мерило утврђивања да ли је коришћена исправна изложеност.

Табела 5 - Густине филма

Густина	30%	-15%
1,5	1,95	1,28
1,6	2,08	1,36
1,7	2,21	1,445
1,8	2,34	1,53
1,9	2,47	1,615
2	2,6	1,7
2,1	2,73	1,785
2,2	2,86	1,87
2,3	2,99	1,955
2,4	3,12	2,04
2,5	3,25	2,125
2,6	3,38	2,21
2,7	3,51	2,295
2,8	3,64	2,38
2,9	3,77	2,465
3	3,9	2,55
3,1	4,03	2,635
3,2	4,16	2,72
3,3	4,29	2,805
3,4	4,42	2,89
3,5	4,55	2,975
3,6	4,68	3,06
3,7	4,81	3,145
3,8	4,94	3,23
3,9	5,07	3,315
4	5,2	3,4

11. Радиографска процена

Коначни корак у радиографском процесу, и далеко најважнији, је процена радиографске слике. Понекад је радиографска интерпретација означена као спој уметности и науке. Наука укључује сву физику и принципе који су укључени у производњу радиографске слике. Интерпретација слике у одређеној мери укључује уметност. Интерпретација радиограма не може се учити у учионици, мада би то био добар темељ у учењу. За то су потребни сати прегледа и разумевања различитих врста слика и разна стања која преовладавају у индустријској радиографији. Постоје појединци који деценијама оцењују радиографске слике и признају да још увек постоје ствари које треба научити како би тумачили сваку додатну слику [1].

Након завршетка читавања густине филма следећи корак у оцењивању радиограма је да се свеобухватно прегледа изглед радиографске слике, као и стање самог филма. Овај почетни изглед ће генерално указивати на општи квалитет. Након тога, нивои квалитета треба да се потврде посматрањем слика и уверење да је битна рупа на пенетрометру, или жица на жичаном промерачу, јасна и видљиво приказана.

Радиографски преводилац увек мора носити платнене рукавице (по могућности памучне) када се вреднује радиографија. То спречава да се на површини радиографије ставе отисци прстију и мрље. Након што је успостављен ниво квалитета, тада је прикладно прегледати радиографску слику ради артефаката. Постоји велике број артефаката који се могу појавити на радиографији. Артефакти, или лажни показатељи, јесу класификовани на основу када су формиране, тј. пре обраде, током обраде, или након обраде.



Слика 48 - Интерпретација радиографије са илуминатором високог интензитета

11.1. Процена артефакта

Артефакти на филму или лажне индикације узроковане пре обраде укључују:

- ознаке главног екрана,
- статичке марке,
- огреботине филма,
- изложеност светлости,
- магла због ниског нивоа светлости и
- ознаке притиска.

Артефакти који настају током обраде филма укључују:

- ознаке притиска (са ваљка у аутоматском процесору),
- хемијске и одложне флеке,
- пи линије (у аутоматским процесорима),
- хемијске тачке и
- прљавштина.

Артефакти настали након обраде укључују:

- пре свега су у облику огреботина и отисака прстију. Отисци прстију могу бити минимализирани употребом памучних рукавица.

11.2. Процена дисконтинуитета

Након што се радиографска слика процењује на артефактима, коначно је време за процену дисконтинуитета. Услови дисконтинуитета који се обично налазе у заварима укључују ону следећим пододељцима, који су наведени редоследом тежине [1].

11.2.1. Пукотине

Постоји много различитих врста пукотина које су класификоване према својој оријентацији и локацији. Увек ће се појавити као тамни, неправилни, линеарни показатељи на радиографији и јесу најозбиљније од свих дисконтинуитета. Генерално су уске и нису увек препознатљиве радиографијом, осим ако је њихова оријентација некако у истој равни као правац светлости. Најчешће врсте пукотина су оне које су оријентисане уздужно (по дужини вара). Други се могу појавити као обрасци у облику звезде, обично на крају пролаза за заваривање. Неки ће повремено бити попречни дужини вара. Пукотине се такође појављују на врху нога вара или на ивици коренског прелаза. Пукотине испод трупа обично имају угаони облик, који се протеже од зоне фузије.

11.2.2. Недостатак фузије

Овај озбиљни дисконтинуитет резултат је одсуства металуршке фузије, било између прелаза за заваривање и основног материјала (припрема ивице заваривања) или између два узастопна пролаза за заваривање. Недостатак фузије је обично врло узак,

линеаран и обично је ранији од пукотине. На њеним крајевима стање се „пера“ све до необично оштре ивице. У многим случајевима слика недостатка бочног зида или недостатка фузије делује некако равно уз једну ивицу и благо таласаста с друге стране.

11.2.3. Непотпуна пенетрација

Тај дисконтинуитет је одсуство метала заваривања или област „нефузије“ у кореновом пролазу вара. Изглед је врло раван, таман и обично оштар. Може бити кратак, али обично има значајну дужину.

11.2.4. Укључивања (густа и мање густа)

Укључивања су у основи материјали који су убачени у завар који не припадају тамо. Имаће различите облике и димензије, у распону од кратких и изолованих до линеарних и бројних. Укључивања светлије густине резултираће тамнијом сликом на радиограф и гушће инклузије, попут волфрама, као светлије слике.

11.2.5. Порозност

Када је гас заробљен у завареном металу, назива се начин стварања празнине гаса или порозност. Порозност се добија у различитим облицима (глобуларна, ребраста, издужена) и дистрибуцијама (линеарно поређани, груписани, изоловани, распршени). Порозност ће се увек појавити тамнија, пошто су напуњена гасом и најлакша је од свих дисконтинуитета заваривања.

11.2.6. Геометријски услови

Постоје и геометријски услови који се могу појавити код завара који се могу уочити на радиографији и који би требало да буду решени визуелним прегледом и проверавањем димензија. Када је могуће, ове услове треба мерити механичким мерачима. Ови геометријски услови укључују следеће.

Конкавност - конкавно стање у корену завара што резултира тањим делом кроз пресек заваривања. Слика конкавности на радиографији је обично лако идентификовати пошто је то широка индикација са постепеном променом густине у поређењу са наглом променом повезаном са непотпуном пенетрацијом.

Конвексност - обично се сматра супротно конкавности јер је ово стање са дебљим испупчењем на пролазу корена. Настаје због прекомерног депоновања коренског прелаза и понекад се назива прекомерним продором. У екстремним случајевима метал прегорева и могу се формирати капљице које се називају иконе. Огледа се као нагла промена контуре и могућност заокретања протока у цеви услед избочења додатног завареног метала.

Подрез - депресија која настаје на ивици вара, тамо где се улила у лежиште основног метала на спољашњој или унутрашњој површини. То је попут незнатне „долине“ која се наставља дуж дужина вара и варира у дубини. Дубина је мерљива димензија која одређује њену озбиљност.

Допуњавање - понекад се тумачи као подрез јер се може појавити у истој регији заваривање. У ствари, другачије је стање које се догађа када жлеб за заваривање није у потпуности испуњен металним заваривањем. Такође, за разлику од подреза, контура дна овог стања је више у облику латиничног слова V или уреза у поређењу са генерално широком постепеном конфигурацијом подреза.

Прекомерно ојачавање - ово стање је резултат превеликог таложења метала на спољашњој површини вара. Ојачање је геометријска промена која може створити стање узлазног напона на спољној површини где су напони обично већи за дизајн.

11.3. Прекиди ливења

Дисконтинуитети који се јављају код ливења се могу открити радиографски укључују следеће [1].

Вруће сузе и пукотине - озбиљне пукотине или пукотине које се обично јављају у изолованој зони због великих напрезања које настају током хлађења одливака. Вруће сузе се обично формирају током почетног хлађења и пукну касније, обично на или близу собне температуре. На радиографији су оба стања линеарна и гранасти и највероватнија су или близу подручја за промену дебљине, где различите брзине хлађења узрокују напрезања за изградњу.

Стезање - обично у облику зоне ситних пукотина као резултат напрезања током хлађења. Скупљање долази у различитим облицима. Сунђерасто скупљање има „сунђераст“ изглед и може да буде изоловано, раштркано или значајно у варијацијама величине и густине.

Укључивања шљаке и песка - узрокују је накупљање инклузивних материјала и песка, који ће имати неправилне облике и варијације густине због природе укључења материја.

Гасне празнине и порозност - за разлику од инклузија, гасне празнине и порозност су једноличнијег изгледа, обично глобуларне и тамне боје. У ствари, ови дисконтинуитети само изгледају попут празнина, обично их је лако открити.

Хладни затварачи - веома уски дисконтинуитети који настају када површина која се почела очвршћивати долази у контакт са другим растопљеним металом док је ливење у току. Обично је присутан танки филм оксида који спречава тоталну металуршку фузију. Веома је тешко дисконтинуитет открити радиографијом због чврстог стања и угаоне оријентације.

12. Услови за ефективно испитивање без разарања

Постоје многе променљиве повезане са тестовима без разарања које морају бити контролисане и оптимизоване. Следећи су главни фактори који се морају узети у обзир да би недеструктивни тест био ефикасан [1].

Производ мора бити "тестабилан" - Постоје ограничења која су својствена сваком од метода без разарања и од суштинског је значаја да та ограничења буду позната, тако да се примени одговарајући метод заснован на променљивама које су повезане са објектом испитивања. На пример, било би веома тешко обезбедити значајан ултразвучни тест на малом одливку са веома сложеним облицима и грубим површинама. У овом случају би било много прикладније размотрити радиографију. У другом случају, објекат може бити екстремно густ, што радиографију чини непрактичном. Ултразвучно испитивање с друге стране, може бити веома делотворно.

Морају се поштовати одobreне процедуре - Неопходно је да се сва испитивања без разарања врше у складу са процедурама које су развијене у складу са захтевима или спецификацијама које се примењују. Поред тога, неопходно је квалификовати или доказати процедуру како би се осигурало да ће открити примењиве дисконтинуитете или услове и да се део може испитати на начин који ће задовољити захтеве. Након што је процедура квалификована, сертификовано лице за осигурање квалитета треба да правилно процени адекватност поступка и да га одобри.

Опрема ради исправно - Сва опрема која се користи мора бити у добром стању. Поред тога, контролне провере треба да се обављају периодично да би се обезбедило да опрема и прибор исправно функционишу. Годишње калибрације су обично потребне, али је потребна функционална провера предуслова за стварне перформансе теста.

Документација је завршена - Неопходно је да се уради одговарајућа документација о испитивању на крају испитивања. Ово би требало да обухвати све кључне елементе укључујући податке о калибрацији, опрему и опис дела, поступак који је коришћен, идентификација дисконтинуитета ако се открију, итд. То су сви кључни елементи. Осим тога, документација о испитивању треба да буде читљива. Било је случајева где је испитивање извршено на одговарајући начин и ипак је документација била тешка за тумачење да је бацила сумњу на резултате и довела до забринутости у погледу ваљаности читавог процеса.

Особље је квалификовано - Пошто је тестирање без разарања практична технологија и увелико зависи од способности појединаца који обављају прегледе, особље мора бити не само квалификовано, већ и правилно одабрано. Квалификација укључује и формализовану планирану обуку, тестирање и дефинисано искуство.

12.1. Сертификација особља

Ефикасност испитивања без разарања првенствено зависи од квалификација особа који обавља прегледе. Већина недеструктивних тестова захтева темељну анализу и контролу многих променљивих повезаних са овим прегледима. Квалификација

особља је била тема многих расправа, дебата око неколико питања деценија. Постоји много различитих ставова у вези са сигурношћу да је стручњак квалификован [1].

Најчешћи приступ је да се користи неки облик сертификације. Различити ставови у вези са овом веома осетљивом темом резултовало је развојем низа различитих програма сертификације. Термин квалификација се генерално односи на вештине, карактеристике и способности појединца који врши прегледе, а који се постижу уравнотеженом мешавином тренинга и искуства. Сертификација је дефинисана као нека врста документације или сведочења које потврђује квалификацију појединца. Дакле, очигледан процес који је укључен у постизање нивоа сертификације захтева да појединац на задовољавајући начин заврши одређене нивое квалификације (обука комбинована са искуством) као предуслов за сертификацију. У ствари, једноставан начин да се повеже са овим системом је да се размотре кораци који су укључени у то да се постане лиценцирани возач. Кандидат за возачку дозволу мора проћи кроз низ практичних вежби у учењу како маневрисати и контролисати моторним возилом и временом, потребно је да прегледа и разуме различите прописе бавећи се возилом. Када се прописи проуче и схвате, и по завршетку стварне праксе вожње возила, појединац је спреман. Већина земаља и држава захтева да кандидат прође и писмене и визуалне прегледе, као и да демонстрирају своју способност за рад и управљање моторним возилом. Када се ти испити заврше, кандидату се издаје сертификат у облику возачке дозволе. Само поседовање возачке дозволе не гарантује да неће бити грешака. Очигледно је да постоје особе које носе возачке дозволе, али нису нужно квалификоване за сигурну вожњу. Жалосно је што се иста ситуација дешава у испитивању без разарања. Пошто је хиљаде сертифициковано од стране њихових послодаваца, постоје велике варијације у оквиру датог нивоа сертификације међу практичарима методе без разарања. Земље које су усвојиле неки облик централизованог сертификата не доживљавају ове варијације у истом степену као и оне које још увек користити приступе за сертификацију послодаваца.

13. Предности и недостаци радиографске методе

НДТ метода сликања зрачењем има предност у односу на многе друге НДТ методе у томе што је сликовита и тумачење је до неке мере интуитивно (табела 6). Анализирање и тумачење слика захтева вештину и искуство, али обичан корисник услуга снимања зрачењем лако може препознати предмет који се снима и често може препознати дисконтинуитет без стручног оспособљавања. На пример, на рендгенским сликама руке X-зрацима не мора се бити стручни радиограф за разликовање тврдог ткива (кости) и меког ткива (меса). Овај једноставан пример открива потенцијал радиографских техника за преглед или карактеризацију објеката (од људи до блокова мотора) за интерне детаље. Такође, рендгенска НДТ метода није ограничена на врсту материјала који може проучавати, за разлику од других НДТ метода [2].

Табела 6 - Предности и недостаци радиографских НДТ метода

Предности	Недостаци
Визуелна метода Унутрашња детекција Може дати материјал, густину и дебљину Може испитати скоро све материјале Релативно брзо испитивање	Опасна Скупа Арфекти слике могу довести да анализа буде тешка Захтева високо квалификоване оператере Не могу се открити затворене пукотине

Упркос својим предностима, методе зрачења стварају озбиљне проблеме у погледу безбедности. Не само да је радијација опасна, већ је потребан високи напон да се генерише, највише X-зраци јер су најопаснији, као и тешкоћа у употреби тешког заштитног материјала. Такође, радиографија је ограничена у употреби за откривање пукотина. Затворена пукотина се не може детектовати коришћењем зрачења. Поред тога, чак и када је пукотина готово отворена, тада ће генерално бити само детектовани одређени делови. Идеално је дуга димензија пукотине паралелна са правцем зрачења, тј. максимизира интеракцију зрачења-пукотина. Оштећења на површини често је тешко разликовати са 2Д радиографијом. На крају, рендген машине, посебно ЦТ системи, су веома скупи и дуготрајни и захтевају употребу високо обучених сигурносних инжењера, научника или техничари.

Предности испитивања без разарања укључују још и:

- део се не мења или мења и може се користити након прегледа,
- сваки предмет или велики део материјала може се испитати без штетних последица,
- материјали се могу испитати за услове унутар и на површини,
- делови се могу прегледати док су у употреби,
- многе су преносиве и могу се пренети на предмет који треба испитати и
- испитивање без разарања је исплативо.

Ограничења испитивања без разарања укључују још и :

- обично зависи од оператера,
- неке методе не пружају трајну евиденцију о испитивању,
- генерално не дају квантитативне податке,
- оријентација дисконтинуитета се мора узети у обзир,
- евалуација неких резултата теста је субјективна,
- иако је већина метода финансијски ефикасна, неке, као што је радиографија, могу бити скупе и
- дефинисане процедуре које су квалификоване су од суштинског значаја.

Очигледне су користи од тога што захтевају и недеструктивно и деструктивно тестирање. Свака је способна да пружи изузетно корисне информације, и када се употребљавају заједно могу бити веома корисне, посебно када се разматра корисни век и примена.

13.1. Утицај зрачења на човека

Деловање зрачењем може се вршити на два начина:

- директно - путем соматских ефеката и
- индиректно - генетским ефектима.

13.1.1. Соматски ефекти (директни)

Човек може бити изложен јонизационим зрачењем на два начина:

- зрачењем из неког спољног извора (природног) на тела и
- уношењем радиоактивних изотопа у тело тако да зрачење делује константно унутар организма.

По времену појављивања повреда после озрачења могу се разликовати рани и касни соматски ефекти.

Рани ефекти се појављују врло брзо после зрачења. Ови ефекти су повезани за високе апсорбиране дозе које се могу видети у терапијама или акцидентима. Код Х зрака и гама зрака који имају велику продорност они могу доћи и до крвотока и изазвати сметње и смањење броја црвених и белих крвних ћелија. Смањење броја тромбоцита може у организму изазвати унутрашње крварење. У лимфним ткивима зрачење може изазвати смањење броја лимфоцита.

Кожа која је озрачена има следећи редослед симптома. Прво постане црвена, па сјајна, осетљива, сува и затегнута тако да се изгубе бразде на њој. После се појављују пликови или брадавице или карциномске ране које тешко зарастају. После тога се на кожи појављује радиодерматитис, депигментација, губитак отисака прстију, нестајање длачица. После прекомерне изложености овим зрацима може се појавити и карцином коже. На очима се може јавити упала рожњаче и катаракта.

Касни соматски ефекти у времену локализоване јаке дозе могу, осим краткорочних соматских ефеката, уродити и дугорочним последицама. Још један начин изазивања дугорочних последица је акумулирање малих доза кроз дуги низ година.

Акумулирању припада унутрашња контаминација радиоактивним изотопима. То долази путем удисања, гутањем или упијањем кроз кожу радиоактивних супстанци.

Овде се ради о радиоактивним прашинама, парама, течностима или гасовима. Дужина озрачења у случају контаминације организма зависи од периода полураспада изотопа, као и његовим метаболизмом у телу.

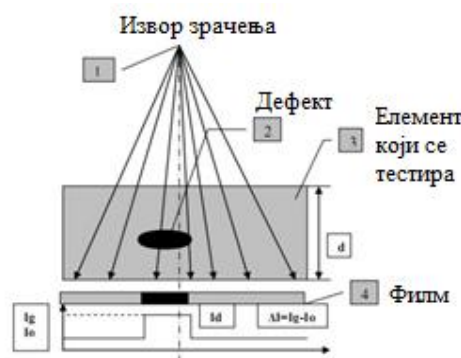
Радиоактивни еклекменти нису опасни само због зрачења већ и због отровности, тако да мере заштите морају истовремено водити рачуна о заштити од зрачења. Повреде могу настати код унутрашњег зрачења.

Рак плућа може настати као последица удисања супстанци које шаљу алфа честице. Најпознатији су плутонијум, полонијум и радијум. Радијум има време полураспада од 1620 година, он се таложи у костима и његове алфа честице бомбардују коштану срж.

Степен повреда зависи од хемијских састава радиоактивних супстанци, њихове топивости, апсорпције, времена полураспада, брзине излучивања из организма, од количине и величине честице ако се ради о прабини [4].

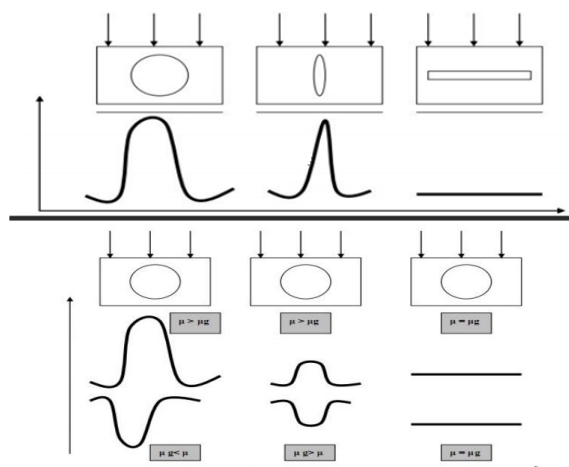
14. Практични примери примене радиографских испитивања

Да би се представили практични примери примене радиографске методе, најпре би требало поновити сам поступак тестирања (слика 49). Са једне стране се налази извор зрачења који је у овом случају X или гама зрачење. Са друге стране налази се филм на коме се осликава сенка континуитета и дисконтинуитета елемента који се испитује и који се налази између ова два дела. На елементу који се испитује тамном сенком представљан је дефект који се испитује [4].



Слика 49 – Шематски приказ радиографског испитивања

Да би се сам дефекат што боље представио, треба још једном објаснити како се сам тај дефект изражава на филму (слика 50). У зависности од димензија и облика дефекта разликоваће се и сенка која се оцрта на филму приликом зрачења.



Слика 50 – Расподела густине зрачења при појави дисконтинуитета

14.1. Практични примери у медицини

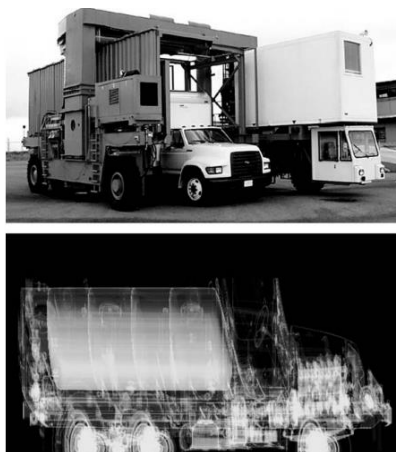
Ова врста испитивања опште је позната као метода која се највише користи у медицини. Са њом се сусреће при снимању прелома костију, зуба или уопште при снимању било ког дела тела (слика 51). Оно што се преко ових слика може закључити, а што је и раније већ поменуто, јесте да се при различитој густини или дебљини материјала који се испитује и сама сенка на филму представља другачијом нијансом. Па је тако месо најсветлије, кост средње светлине а метали су најтамнији [4].



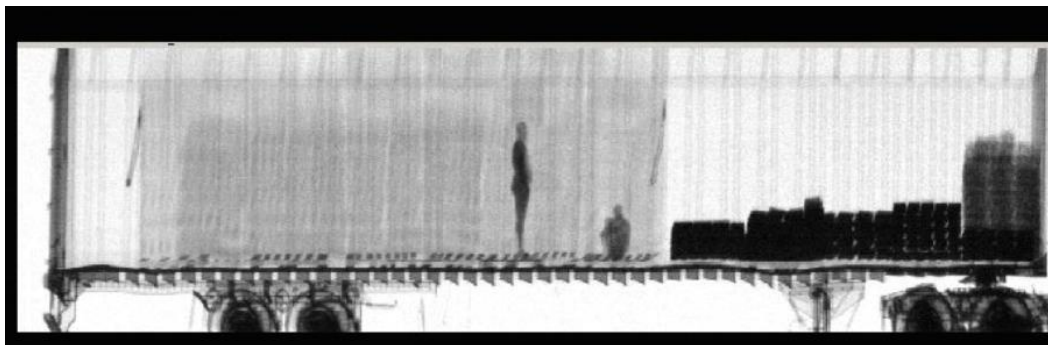
Слика 51 – Примери радиографије у медицини

14.2. Практични примери испитивања возила

Радиографско испитивање сусреће се на многим станицама, аеродромима, при преласку граница, при техничким прегледима возила и атеста машина. На слици 52 приказан је радиографски филм возила који је испитиван X зрацима, а затим и гама зрацима (слика 53) [8, 10].



Слика 52– Испитивање возила X зрацима



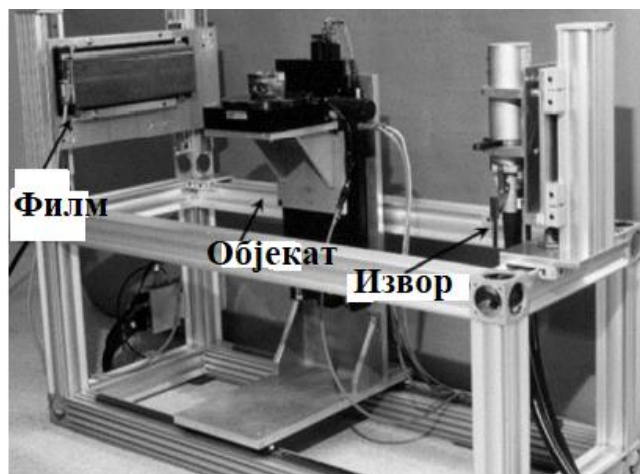
Слика 53 – Испитивање возила гама зрацима

14.3. Практични примери при испитивању машинских елемената

Као што је већ напоменуто, само радиографско испитивање има велику примену у машинству и испитивању машинских елемената. Ова врста испитивања највише се користи код заварених спојева и одливака. X зраци као и гама зраци основно су средство које помаже да се открију дефекти, њихове димензије и дубине и да помогну да се нађе начин како се се исти у будуће санирају или уклоне или како да се нађе начин да до истих више не долази.

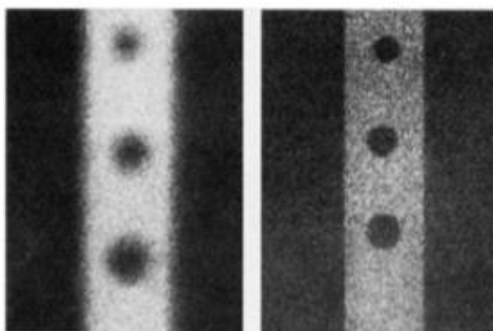
Радиографска техника испитивања примењује се у медицини, машинству, грађевини, бродоградњи, авиоградњи, код аутомобила, код цевовода и на многим местима где је ова врста испитивања неопходна.

Сам поступак испитивања који се обавља у лабораторијама приказан је на слици 54. Са једне стране елемента налази се извор, са друге стране детектор зрака [1].



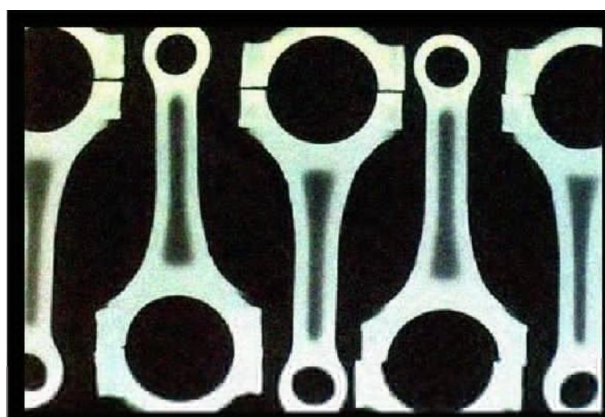
Слика 54 – Поступак испитивања

Изглед радиографског филма неке стандардне металне плоче са отворима приказана је на слици 55. На слици се тачно види да су места где су отвори представљени као тамна сенка што представља да се у материјалу налази прекид континуитета материјала.



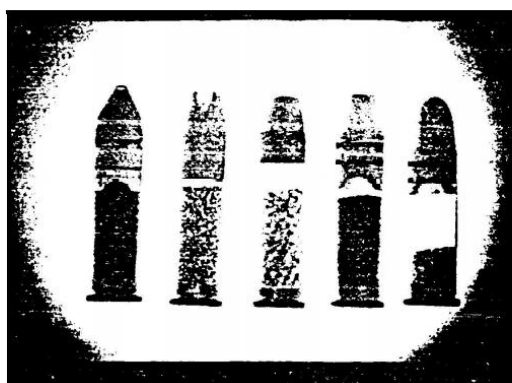
Слика 55 – Метална плоча и њен радиографски снимак

Изглед радиографског филма гама зрацима при снимању клипњача приказан је на слици 56. Са радиографског филма јасно се види облик саме клипњаче као и сваки отвор, усек, жлеб или присуство неке друге врсте материјала [10].



Слика 56 – Радиографски снимак гама зрацима

Радиографски снимак X зрацима различитих врста метка приказан је на слици 57.

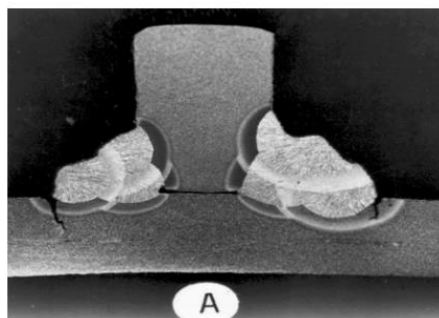


Слика 57 – Радиографски снимак метка X зрацима

Из претходне две слике јасно се види да је снимање гама зрацима квалитетније и визуелно педантније приказано.

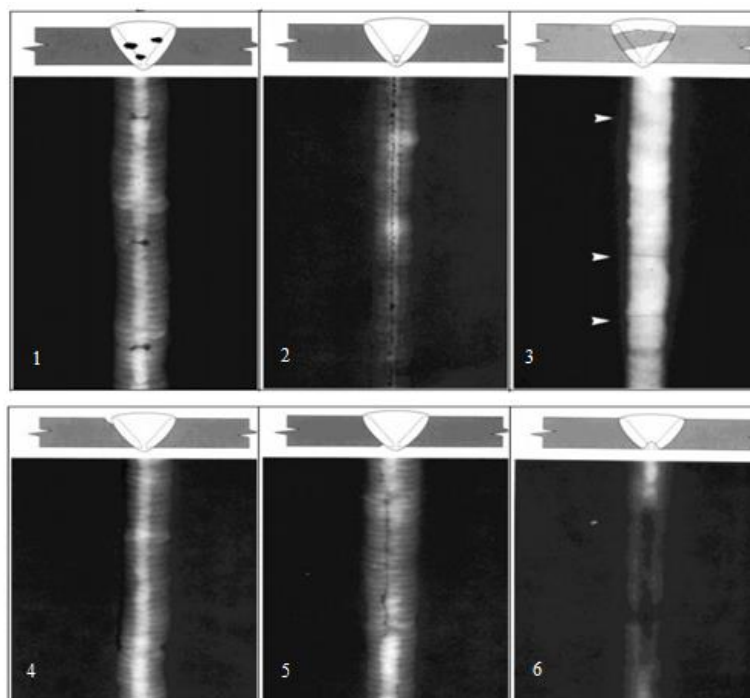
14.4. Испитивање заварених спојева

Неки од примера радиографије и радиографских снимака заварених спојева и дефеката представљен је на слици 58. Заварени спојеви јесу јако осетљива места на било којој конструкцији. За саму поузданост овог споја не може се никада гарантовати док се не изврши нека безразорна метода испитивања. Радиографски снимак јасно показује сваку шупљину, пукотину или неметални укључак у завару који се може јавити и ометати поузданост и сигурност завара а самим тим и конструкције [4, 12].



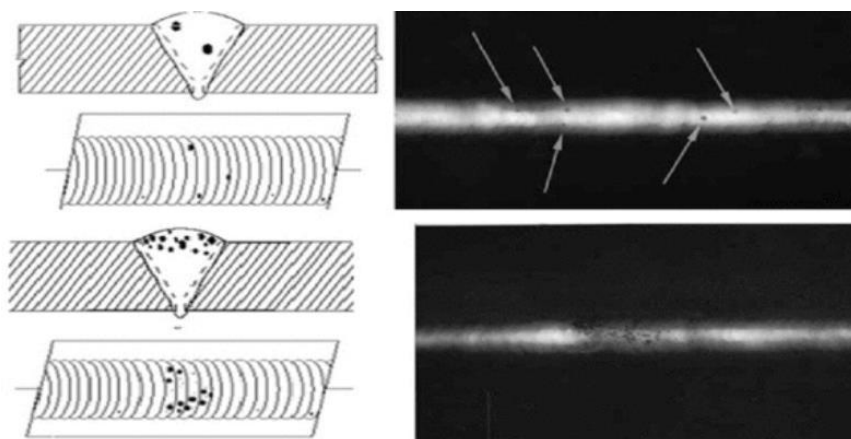
Слика 58– Радиографски снимак завареног споја

Прслине у завару (слика 59) јесу посебан вид прслина који се јавља и који је увек потребно проверити, испитати и доказати. Прслине могу бити различитог типа, облика и димензија и јављају се услед различитих узрока и на различитим местима у завару.



Слика 59 – Прслине у завару : 1-Укључци трошке у пролазу, 2- Линејска прслина, 3- Попречна прслина, 4- Спољно подсецање завара, 5- Подсецање у корену, 6- Удубљење од скупљања

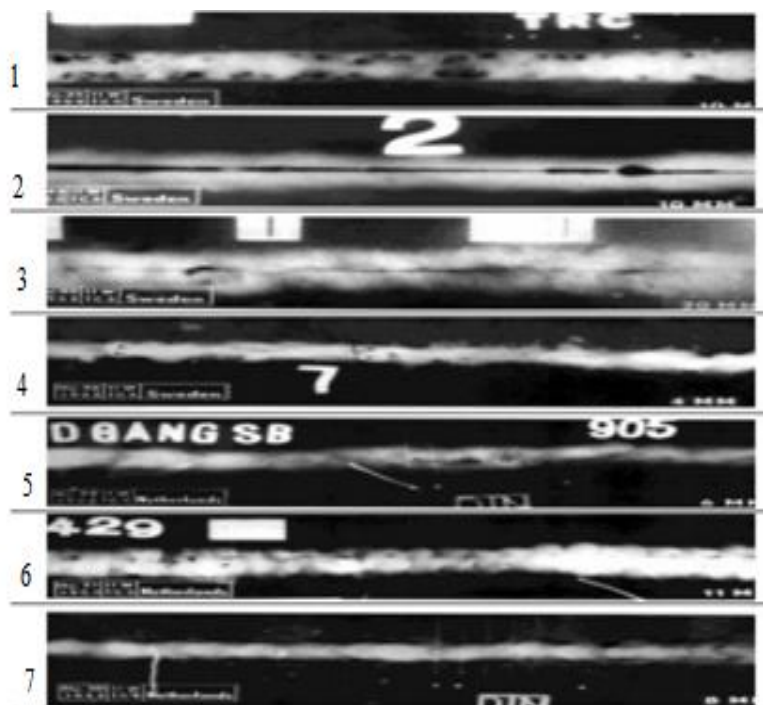
На слици 60 такође су представљени још неки радиографски снимци заvara при испитивању на појаву пукотине, прозорности или нежељених укључака у материјалу.



Слика 60 – Радиографски филм при снимању грешака у завару

На слици 61 је стрелицама приказано место тамнијих сенки. Тамне сенке заправо представљају присуство нежељених укључака, односно присуство нежељених честица које могу утицати на правилност заvara. Различита концентрација нежељених честица приказује и различити распоред сенки на радиографском филму.

Недостатак заvara је још једна грешка која се код заваривања елемената може пронаћи и испитати применом радиографске технике. Недостатак заvara представља одсуство растапања материјала, па се у том случају појављују празнине између страница елемената.

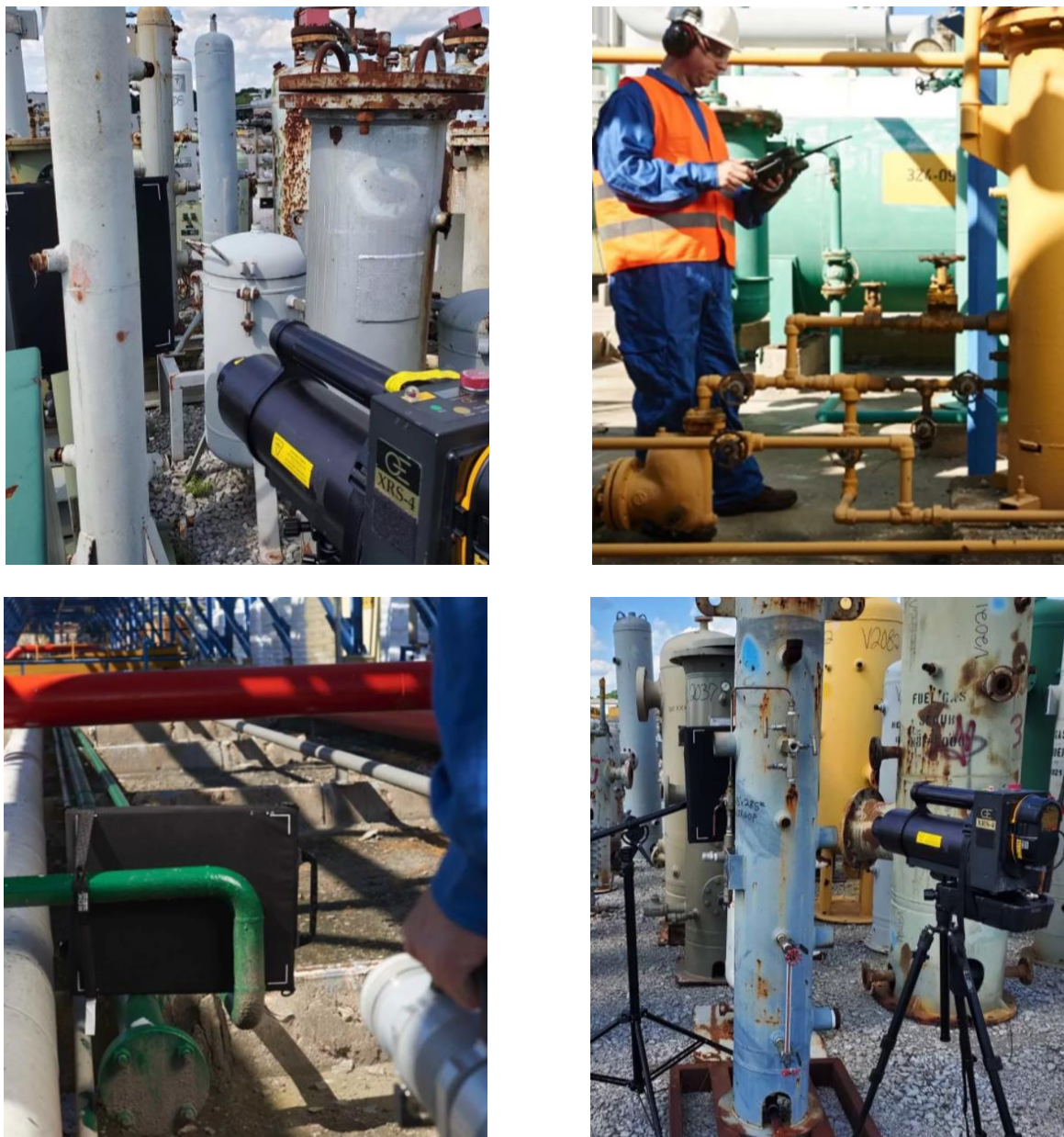


Слика 61 – Примери откривања грешака у завару: 1-гасни мехур, 2-недостатак заvara, 3-уздужне прслине, 4-попречне прслине, 5-гасни мехур у цевоводу, 6-трошка у линији, 7-подсецање

14.5. Снимање ценовода

Што због саме производње цеви, њиховог спајања и због употребе и експлоатације истих, цеви се обрађају у једну од најризичнијих елемената који се углавном испитују посредством радиографске технике.

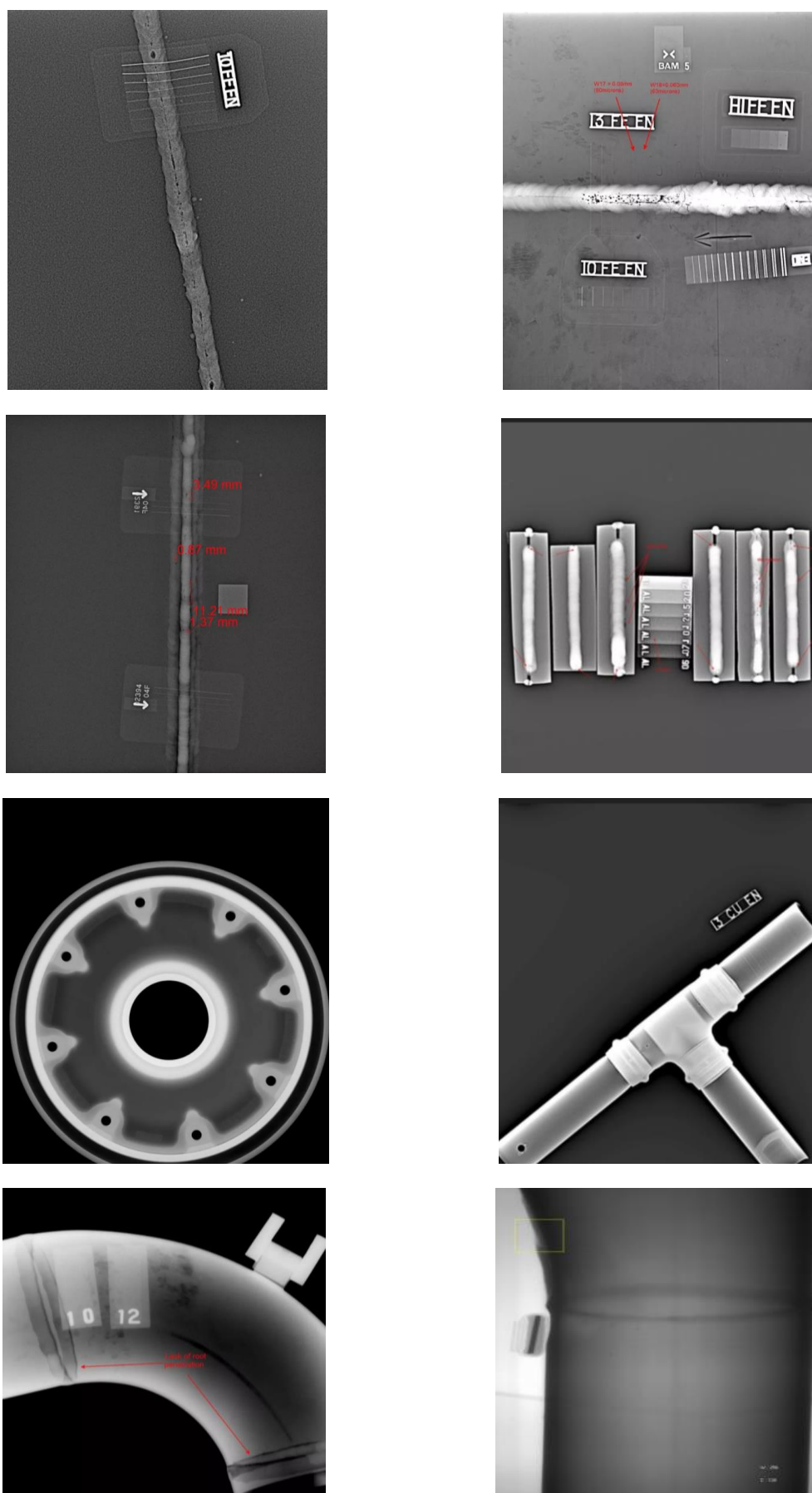
На слици 62 представљен је начин испитивања овом техником ван лабораторије, тачније на самом градилишту у спољним условима [11].



Слика 62 – Испитивање цеви у условима градилишта

На свим претходним сликама јасно се виде услови рада, опрема и прибор који су потребни, као и заштита коју је потребно предузети при оваквим условима.

Резултати снимака представљени су на слици 63.



Слика 63 - Радиографски снимци цевовода

На свим претходно представљеним сликама јасно се виде све грешке и недостаци у самом рендгенском филму. Било да је грешка у материјалу настала, при савијању цеви, при протицању течности, нафте или гаса или у завару приликом спајања цеви, сваки од тих елемената видљив је на снимку. Оно што се још може запазити на овим снимцима јесте и лакоћа ишчитавања димензије и облика грешке као и употреба неопходног примера како би се исте очитале, забележиле, означиле и приказале.

14.6. Упоредивање рендгенских снимака услед различитих зрачења

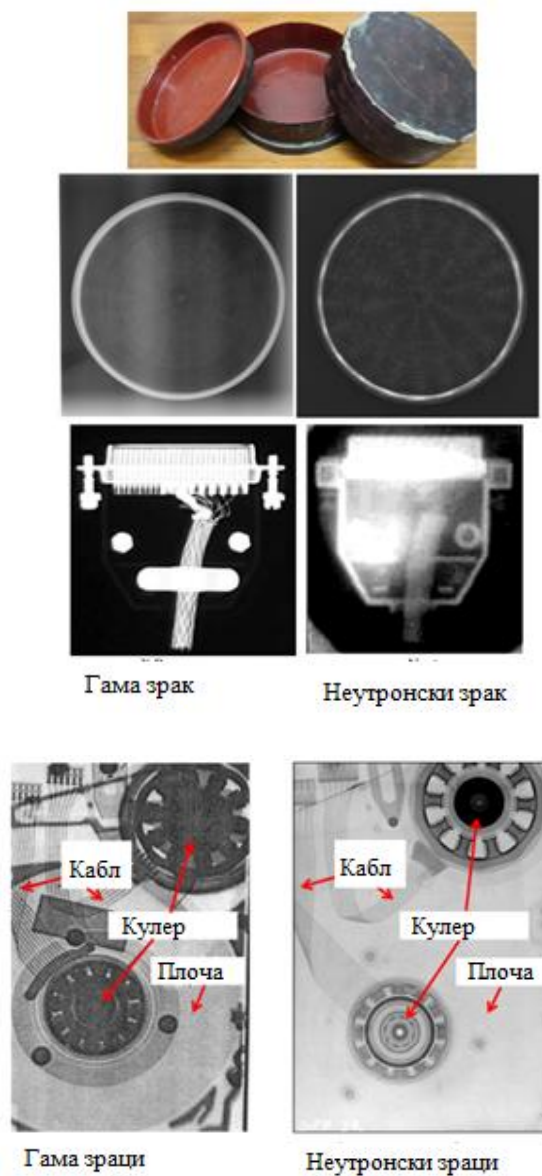
Оно што се на самом почетку мора напоменути јесте да је филм снимљен гама зрацима увек јаснији и видљивији од оног који је снимљен X зрацима, због саме пенетрације зрака. Па је тако сликом 64 извршено упоређивање тих снимака [13].



Слика 64 – Упоредивање радиографског снима снимљеног X и гама зрачењем

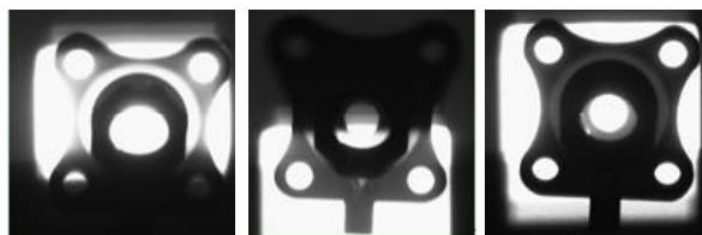
На претходној слици представљени су радиографски снимци Флопи диска и УСБ прикључка.

Поред тога на слици 65 представљено је и упоређивање снимка одрађеног неутронским и гама зрачењем.



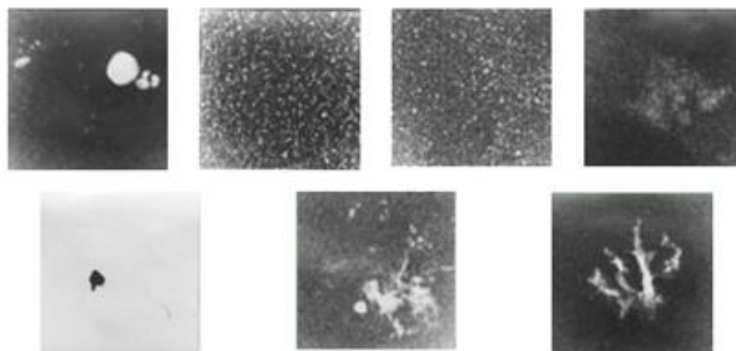
Слика 65 – Снимци при испитивању неутронским и гама зрачењем

Оно што је још јако битно напоменути, јесте да и различита концентрација зрачења даје другачији изглед филма. Па је тако на слици 66 представљен и различити изглед рендгенског филма при различитој јачини зрачења. При овоме је наравно јако битно рећи да је и битна удаљеност извора зрачења од елемента који се испитује.



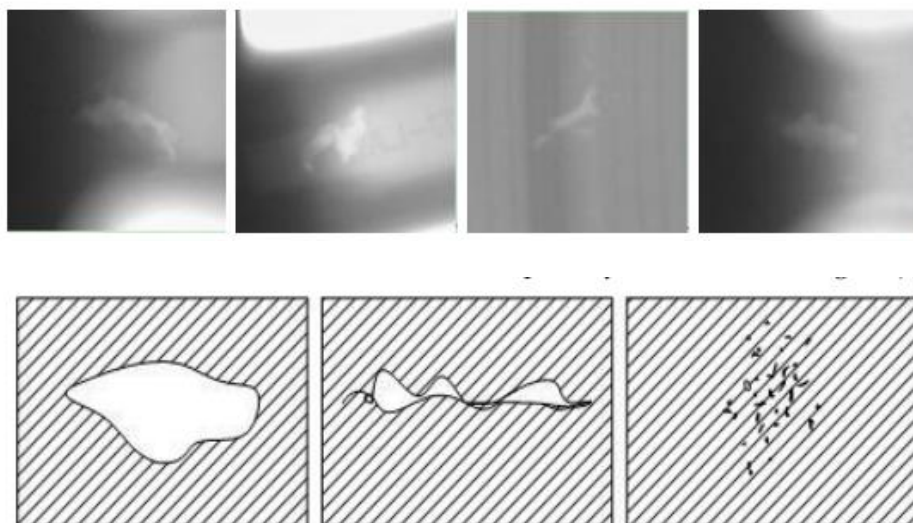
Слика 66 – Снимци настали при испитивањима различитом волтажом зрака (110 kV, 105 kV, 75 kV) са концентрацијом зрачења од 1,5 mA

Још једна битна ставка коју треба напоменути јесте и та чињеница да исти материјал, исти облик неког елемента при истој експлатацији и употреби неће доживети и поседовати исте грешке, што се на наредним снимцима и може видети (слика 67).



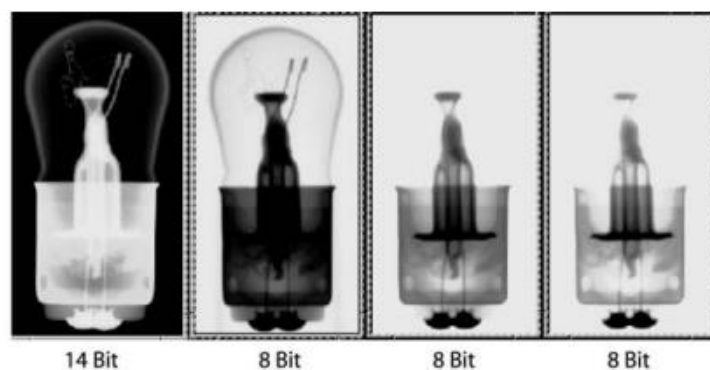
Слика 67 – Различите грешке уочене радиографским испитивањем на истим елементима

На слици, уочено је да се на елементима који су од истог материјала и који су подлежни истим утицајима могу уочити различите грешке. Различите димензије, облици самим тим воде и различите карактеристике и утицај на остатак конструкције. Из овога следи да се испитивање једног елемента никада не може водити као испитивање за целу конструкцију, већ се сваки елемент мора испитати за себе. Још неки од оваквих дефекта приказани су на слици 68.



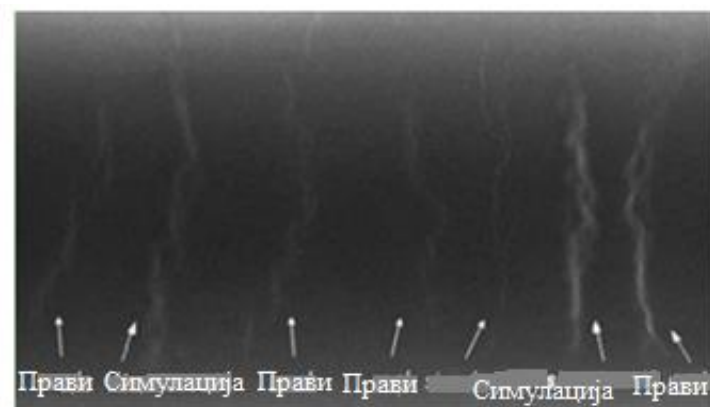
Слика 68 – Различити дефекти на елементима истог материјала

Код радиографског испитивања где се резултати испитивања приказују дигиталним путем, тачније путем екрана, јако је битно и која камера се користи, тачније камера које јачине. На слици 69 је представљено упоређивање слика насталих кроз испитивања камером различите јачине [1].



Слика 69 – Упоређивање снимака насталих различитом камером

Још један битан податак јесте и упоређивање реалног изгледа дефекта и какав је он када се рефлектује на рендгенски филм, што је приказано на слици 70.



Слика 70 – Симулиран дефект и реалан изглед

15. Закључак

Као што је већ представљено, општа дефиниција недеструктивног тестирања или тестирања без разарања је тестирање која се врши на било којој врсти објекта без промене тог објекта на било који начин. Само испитивање врши се како би се утврдило одсуство или присуство услова или дисконтинуитета који могу имати утицај на функционалност или употребљивост тог објекта. Постоји неколико различитих метода у оквиру ове врсте испитивања која се користи и свака поседује одређене карактеристике по којима је препознатљива. Постоји неколико нивоа да би се одабрала одговарајућа НДТ метода за одређену апликацију. Главни фактор при избору методе јесте да се изабере она која највише повећава вероватноћу откривања недостатка уз разматрање економских, регулаторних и других фактора.

Радиографија јесте једна од најранијих НДТ метода. У индустрији, због здравствених и сигурносних разлога, за одређене ситуације, ова метода сврстана је у други план и алтернативне методе је замењују. Свакако, радиографија, и поред што већег избегавања, остаје једна од две главне НДТ методе. Главна карактеристика ове методе јесте та што врши испитивање без разарања елемента који се испитује и што се њоме могу испитивати било који материјали са било каквим ефектима.

Сам њен настанак и развој започиње са откривањем X и гама зрака, преко којих се уствари и врши ово испитивање. Сам процес испитивања креће преко усмеравања концентрације зрачења на мерни објекат. Проласком зрака кроз објекат на радиографском филму се са друге стране оцртава сенка која јасно показује где се грешка у мерном објекту налази.

Постоји много техника и начина примене ове методе данас, сходно условима у којима се истражује. Након добијања снимка на филму следи цео процес ишчитавања и анализе грешке која се добила. На прво гледање филма, на местима где је сенка светлија представља се онај део материјала који је веће густине, док је на местима где је тамнија представљено оно место које је ређе. Након тога следи низ радњи како би се израчунала сама дубина и ширина грешке. Све ово има један циљ - представљање грешке како би се са сигурношћу предузеле потребне мере за њено санирање, ублажавање или спречавање да се опет догоди.

Наравно, услед многих предности, постоји и одређени број мана при овој врсти испитивања. Наиме, зрачење које се код ових метода користи је веома радиоактивно, што изазива многе здравствене проблеме код човека и оставља последице по околину. Уз то сама метода и поступак је скуп, па се ова врста испитивања ређе користи и бирају се алтернативне методе. Како и сам поступак изгледа јако једноставно, он то свакако није и изискује опремљена стручна лица, сертификате и стручну опрему да би испитивање било валидно.

Радиографска техника испитивања данас има примену у многим секторима као што су медицина, машинство, грађевина и са развојем саме технике и константним радом на смањењу недостатака које поседује, планира се и све чешћа њена примена.

Литература

- [1] Charles J. Hellier; Handbook of nondestructive evaluation; first edition; Mc Graw Hill Professional; United States of America; 2003.
- [2] Peter J. Shull; Nondestructive Evaluation Theory, Techniques, and Applications; The Pennsylvania State University Altoona, Pennsylvania; New York; Basel; 2002.
- [3] <https://www.scribd.com/document/117847459/radiografija>, приступљено април 2021.
- [4] Драгослав Д. Живановић; Радиографско испитивање заварених спојева; Машински факултет Универзитета у Нишу, Ниш; 2014.
- [5] Robert A Smith, Non-Destructive Testing NDT – Guidance Document: An Introduction to NDT Common Methods, The British institute of Non-destructive testing, Britain, 2015.
- [6] <https://nardus.mpn.gov.rs/bitstream/id/5661/Disertacija4177.pdf>, приступљено април 2021.
- [7] <https://www.weldingandndt.com/radiography-testing/>, приступљено април 2021.
- [8] <https://dokumen.tips/documents/univerzitet-u-zenici-masinski-fakultet-u-zenici-predmet-ispitivanje-proizvoda.html>, приступљено април 2021.
- [9] <https://www.scribd.com/document/252380626/Radiografsko-ispitivanje>; приступљено април 2021.
- [10] <https://slidetodoc.com/univerzitet-u-zenici-masinski-fakultet-katedra-za-automatizaciju/>, приступљено април 2021.
- [11] <https://vidisco.com/ndt-solutions/>, приступљено април 2021.
- [12] <https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/e78bfca5-654d-4dcc-b431-7b505feb6fa4/kemija-1/m02/j03/index.html>, приступљено април 2021.
- [13] <https://www.scribd.com/presentation/169650500/Radiography-testing>, приступљено април 2021.