

**Факултет инжењерских наука Универзитета у
Крагујевцу**



Назив студијског програма: Аутомобилско инжењрство

Ниво студија: Основне академске студије

Предмет: Технологије спајања и монтаже

Број индекса: 801/2016

Вук П. Орловић

**Примена најважнијих метода
испитивања без разарања при
контроли различитих металних
делова и конструкција**

- завршни рад -

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Вукић Лазић - ментор

2. _____

3. _____

Датум
одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да:

1. Наведе преглед најважнијих метода испитивања без разарања,
2. Детаљно опише сваку од наведених метода и укаже на њену област примене и
3. Прикаже карактеристичне примере испитивања конструкција/узорака у одређеним фазама.

Препоручена литература:

1. М. Јовановић, В. Лазић, Д. Арсић, Наука о материјалима 1, универзитетски уџбеник, Универзитет у Крагујевцу, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2017.
2. Р. Прокић Цветковић, О. Поповић, Масински Материјали 1, универзитетски уџбеник, Универзитет у Београду, Машински факултет, Београд, 2012.
3. М. Јовановић, В. Лазић, Д. Арсић, Наука о материјалима 2 – Испитивање метала, одливака и заварених спојева, књига у рукопису, Универзитет у Крагујевцу, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2019.

У Крагујевцу,
25. 10. 2019.

Ментор:
Проф. др Вукић Лазић

Садржај

1. Увод	5
2. Преглед метода испитивања без разарања	6
2.1. Визуелна метода.....	7
2.2. Пенетрантна метода.....	7
2.3. Магнетна метода	8
2.4. Ултразвучна дефектоскопија	9
2.5. Радиографске методе	10
2.6. Испитивање херметичности заварених посуда.....	12
3. Визуелна метода	13
3.1. Опште напомене од визуелној методи.....	13
3.2. Ендоскопска метода.....	14
3.3. Бороскопска метода	15
3.4. Ласерска интерферометрија (оптичка холографија)	16
4. Пенетрантна метода	16
4.1. Опште напомене о пенетрантном испитивању	16
4.2. Принцип рада пенетрантне методе	19
4.3. Опис извођења методе.....	22
4.4. Примери изведене контроле пенетрантним течностима.....	27
4.5. Предности и недостаци пенетрантне методе	29
5. Магнетна метода	29
5.1. Опште напомене о магнетној методи	29
5.2. Принцип рада магнетне методе	30
5.3. Методе магнетних испитивања	31
5.4. Врсте намагнетисавања	32
5.5. Подела уређаја за магнетно испитивање	36
5.6. Примери испитивања магнетном методом у пракси	37
5.7. Предности и недостаци магнетне методе	38
6. Ултразвучна дефектоскопија	39
6.1. Опште напомене о ултразвучној дефектоскопији	39
6.2. Принцип рада ултразвучне методе.....	40
6.3. Методе испитивања ултразвучном дефектоскопијом	42
6.4. Примери испитивања ултразвучном методом у пракси.....	49
6.5. Предности и недостаци ултразвучне методе.....	51
7. Радиографске методе	51

7.1.	Опште напомене о радиографским методама	51
7.2.	Методе радиографских испитивања	52
7.3.	Примери испитивања радиографским методама у пракси	58
7.4.	Предности и недостаци радиографских метода.....	59
8.	Испитивање херметичности заварених посуда	60
8.1.	Опште о испитивању херметичности заварених посуда.....	60
8.2.	Методе испитивања херметичности заварених посуда.....	60
8.3.	Примери испитивања херметичности заварених посуда	63
9.	Закључак.....	66
10.	Литература	66

Резиме

Под методама испитивања без разарања подразумевају се све оне методе које не оштећују нити утичу на део или конструкцију која се испитује. Овим методама избегавају се додатни трошкови при изради и доради делова и конструкција до којих би дошло коришћењем метода испитивања са разарањем.

Уз брзи развој производних технологија, долази и до брзог развоја метода испитивања без разарања. Данас су ове методе широко распрострањене и налазе велику практичну примену. У овом раду су наведене и описане најважније и највише коришћене методе, као што су: визуелна, пенетрантна, магнетна, ултразвучна, као и радиографске методе и испитивање херметичности заварених посуда.

Кључне речи: методе без разарања, визуелна метода, пенетрантна метода, магнетна метода, ултразвучна дефектоскопија, радиографске методе, испитивање херметичности заварених посуда.

Abstract

Non-destructive testing methods are all methods that do not damage or destroy the part or the structure of tested sample. By using these methods avoid the additional costs of fabrication, alteration and reparation of parts and structures that would be incurred by using destructive testing methods.

With the rapid development of production methods and assembling technologies, there is a rapid development of non-destructive testing methods. Today, these methods are widely spread in application, and there are many of them. In this paper the emphasis is placed on several of the most important and widespread methods, namely: visual method, penetrant method, magnetic particle method, ultrasonic defectoscopy, radiographic methods, as well as hermetically testing the welded vessels.

Key words: visual method, penetrant method, magnetic particle method, ultrasonic defectoscopy, radiographic methods, as well as testing the hermetically welded vessels.

1. Увод

Методе испитивања без разарања представљају скуп метода за испитивање металних делова и конструкција којима се изводи физичка контрола производа, делова, односно материјала. Циљ испитивања овим методама је проналажење скривених грешака у основном материјалу делова и конструкција (насталих при процесу саме производње, као последица услова експлоатације или чак насталих у самом материјалу пре процеса производње), или материјалу шава при спајању два или више металних делова у једну конструкцију/систем. Под грешкама подразумевају се сви дефекти које ремете хомогеност материјала који се испитује, било да су на површини дела/конструкције или њиховој унутрашњости.

Предности метода испитивања ове групе је што се, у току испитивања материјал, део или конструкција који се испитују не оштећују, за разлику од других метода испитивања, а то су методе испитивања са разарањем.

Поред проналажења скривених грешака, ове методе користе се и за одређивање неких физичких величина и особина материја или дела који се испитује. Овим испитивањима се одређује квалитет и поузданост производа (дела, конструкције или материјала) који се испитује, могућност увођења нових материјала у циљу да се сам процес производње производа убрза и побољша, као и могућност спречавања већих материјалних губитака у случају да се испитивањем конструкција на време пронађу грешке и самим тим отклони опасност.

Данас је примена метода испитивања делова и конструкција без разарања широко распрострањена, али већина појединих метода испитивања без разарања је нешто старијег датума.

Најстарија метода је визуелна метода, која датира још од раних људских цивилизација. Почетком друге половине XIX века долази до проналаска магнетне методе, која је прво примењивана за проналажење пукотина у структури топова у Енглеској. Од раног XX века почиње се са применом радиографске методе испитивања помоћу x-зрака, мада се проналазак ових зракова за друге сврхе десио доста раније. Опажање деловања нехомогености материјала на ултразвучне таласе из 1928. довео је до стварања ултразвука и ултразвучне дефектоскопије неких десет година касније.

Временом, све ове методе су се побољшавале и унапређивале, док су се паралелно с тим развијале и нове методе (пенетрантске, радиографске γ – зрацима и др.), тако да су данас методе испитивања (без разарања) незаобилазне при испитивању одговорних радних делова и конструкција.

2. Преглед метода испитивања без разарања

Скоро сви материјали/метали и делови могу се испитивати методама са разарањем. Ипак, због саме природе ових метода које доводе до оштећења делова и конструкција, ове методе не дају потпуно прецизну слику о тренутном стању већ израђеног дела или конструкције. .

Како су оштећења било које природе непожељна, испитивању се мора прићи другим приступом, а то је испитивање методама без разарања. Овим методама добијају се жељени резултати, а испитивања се спроводе релативно брзо (у зависности од примењене методе), и што је најважније не долази до оштећења. Основне методе испитивања без разарања су:

- визуелна метода;
- пенетрантна метода;
- магнетна метода;
- ултразвучна дефектоскопија;
- радиографске методе;
- испитивање херметичности заварених судова.

Због различитости грешака које се могу јавити, нису све методе развијене тако да могу да открију све врсте грешака, што је додатно објашњено у табели 1.

Табела 1. Могућности испитивања појединим методама

Методе испитивања	Циљ испитивања										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Визуелна метода	●	●	●					○		○	
Пенетрантна метода	●	●									
Магнетна метода	●	●	●					○	○		
Ултразвучна дефектоскопија	●			●	●	●	○	●	●	○	○
Радиографске методе	●	●	○	●	●	○	●	○	●		○
1- Површинске пукотине 2- Површинска корозија 3- Смањење дебљине због корозије 4- Унутрашње пукотине 5- Порозност 6- Грешке недовољног спајања 7- Укључци 8- Величина грешке 9- Мерење дебљине 10- Микроструктура 11- Мерење заосталих напона ●-бољи резултати ○-лошији резултати											

2.1. Визуелна метода

Визуелна контрола примењује се пре свих осталих врста контрола без разарања. С обзиром на релативно ниску цену, не одузима много времена, а може дати кључне и врло важне информације о квалитету делова и конструкција које се испитују.

Визуелном методом одређује се и потреба за неком другом допунском методом испитивања. Визуелна контрола је метода која је дуго времена била занемаривана у индустријској примени, али је на ипак нашла своје место. Највеће ограничење визуелне методе је то што њоме можемо открити само површинске грешке.

Као помоћ код визуелне контроле, на понекад неприступачним местима могу се користити разни инструменти, а некад је довољно и само очни преглед. Инструменти који се користе зову се ендоскопи, а они могу бити:

- флексибилни (тежи приступ месту испитивања) и
- крути (лакши приступ месту испитивања).

2.2. Пенетрантна метода

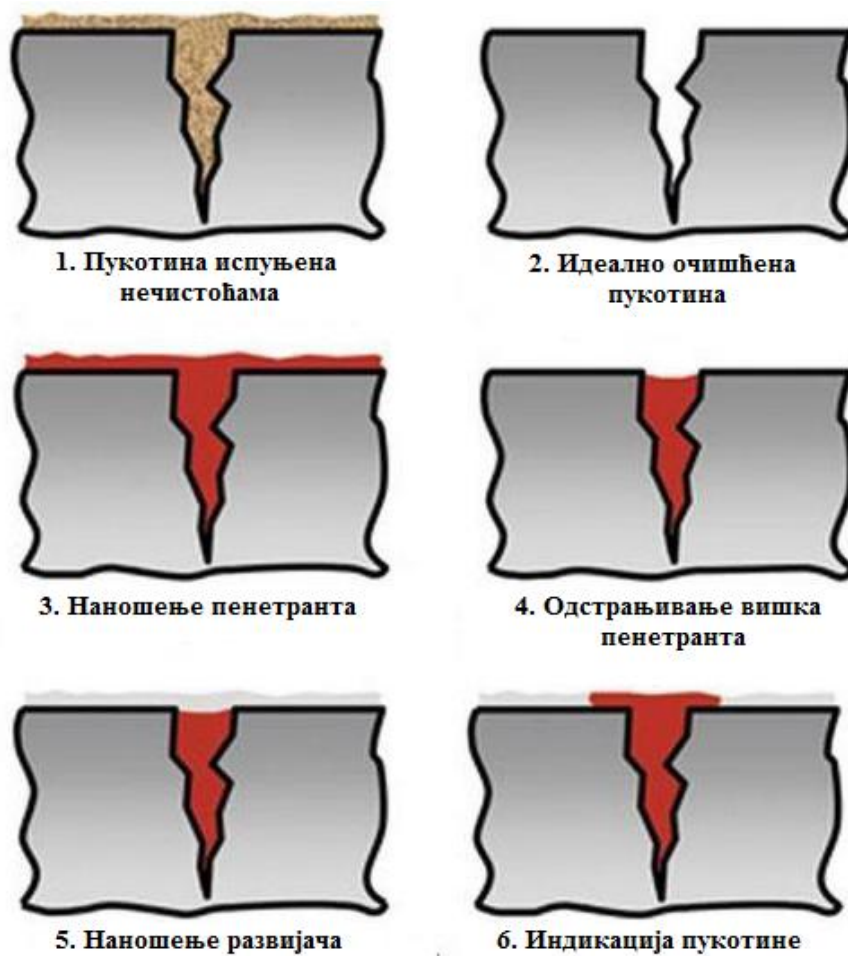
Пенетрантна метода је једна од најшире коришћених метода без разарања. Највише се примењује за откривање површинских неправилности материјала, јер се може применити на било ком магнетном или немагнетном материјалу. Исто тако погодна је за испитивање делова свих величина и облика. Велика предност ове методе што је опрема за испитивање лако преносива и што омогућава испитивања на забаченим и тешко доступним местима.

Основа ове методе је у коришћењу течности на бази лаких уља која називамо пенетранти, а која помоћу капиларних сила продире у површинске неправилности и испуњавају их. Капиларност је физичка појава увлачења течности у танке макро и микро поре или на „зидове“ пукотина.

Пожељна карактеристика доброг пенетранта је да с лакоћом продире у уске отворе, да се у њима задржи и да има добру способност квашења површине. Исто тако битна карактеристика је да се после одређеног временског периода лако уклања с површине предмета испитивања.

Поступак испитивања пенетрантском методом је релативно једноставан, и састоји се од следећих фаза (сл. 1):

1. Припрема површине за испитивање (предчишћење и сушење);
2. Наношење пенетранта и чекање да се пенетрант „распореди“;
3. Одстрањивање вишка пенетранта и сушење;
4. Наношење развијача и чекање да развијач делује;
5. Интерпретација резултата;
6. Завршно чишћење.



Слика 1. Поступак испитивања пенетрантном методом

2.3. Магнетна метода

Магнетна дефектоскопија или електромагнетно испитивање, служи за откривање ситних, голим оком невидљивих грешака у магнетном материјалу, као што су поре, шупљине или пукотине. Ове грешке доводе до промена у простирању магнетних линија у индукованом магнетном пољу.

Магнетна дефектоскопија или метода откривања грешака магнетним честицама у феромагнетном материјалу заснива се на магнетизацији околине сталним магнетом, електромагнетом или директним пропуштањем струје кроз испитивани део или конструкцију. Када је у испитиваном комаду успостављено потребно магнетно поље, у зависности од методе, врши се посипање намагнетисаног предмета магнетним честицама или се приступа регистровању заосталог магнетизма у испитиваном комаду, а у циљу откривања грешака (сл. 2). Основни услов за извођење овог поступка је тај да материјал дела који се испитује мора имати феромагнетне особине.

Постоји више подела метода магнетне дефектоскопије, а основна је на:

1. Мокри начин наношења честица и
2. Суви начин наношења честица.

1. Једносмерном струјом и
2. Наизменичном струјом

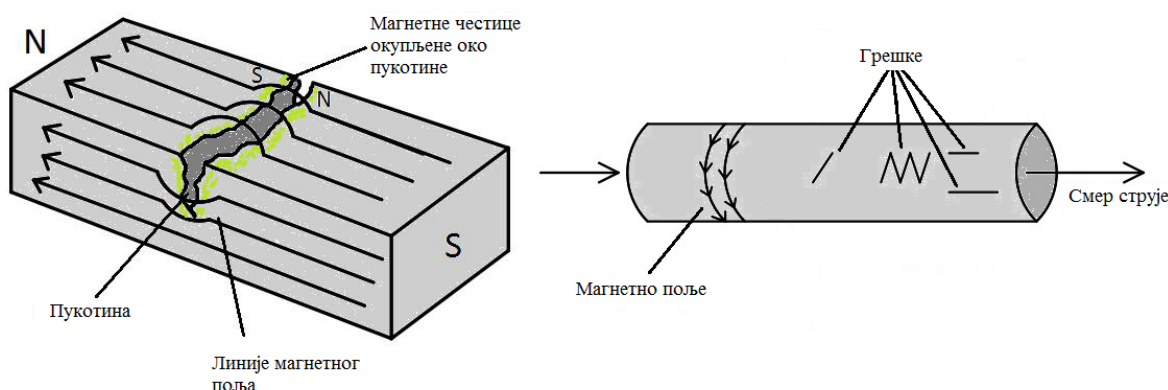
У односу на то како се врши намагнетисавање дела или конструкције која се испитује, постоји подела на:

1. Намагнетисавање сталним магнетом и
2. Намагнетисавање електромагнетом.

Даље, намагнетисавање електромагнетима може да се подели на:

1. Индиректно,
2. Директно,
3. Кружно и
4. Уздужно.

Општи поступак извођења испитивања магнетном методом састоји се од припреме дела/конструкције за испитивање, затим постизање одговарајуће магнетне индукције, регистровање излазног магнетног поља због провере могућих деформација линија магнетног поља, интерпретација добијених резултата и мерење грешке ако она постоји, и на крају размагнетисавања дела или конструкције која је испитивана.



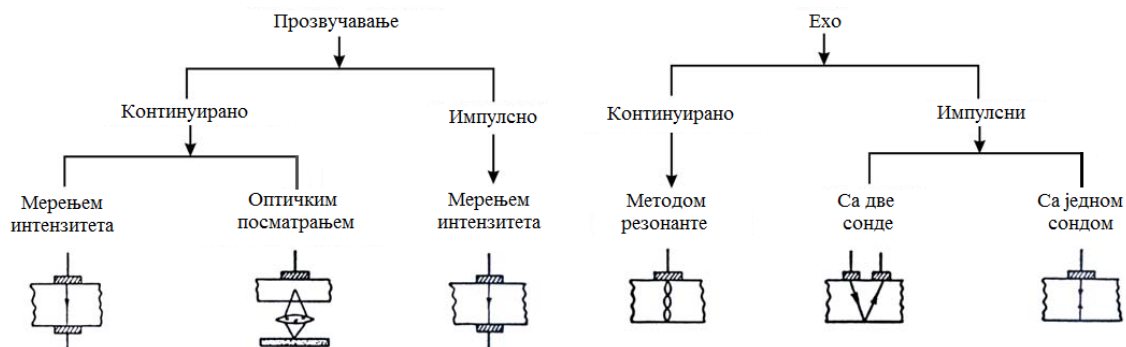
Слика 2. Испитивање магнетним методама прахом и електромагнетом

2.4. Ултразвучна дефектоскопија

Ултразвучно испитивање материјала темељи се на употреби ултразвука, односно звука чија је фреквенција изнад горње границе слуха људског уха. Метода функционише на принципу одбијања ултразвучних таласа о грешке и дефекте у делу или конструкцији која се испитује, и приказивању тих одбијених таласа. На основу тога, одређује се дубина на којој се талас рефлектује, односно указује на положај грешке у делу или конструкцији. При испитивању, најчешће се користе веома кратки ултразвучни импулси фреквенције од 0,1 MHz до 15 MHz, док се у неким посебним ситуацијама користе импулси фреквенције и до 50 MHz.

У модерно доба, све ултразвучне методе деле се у три главне групе, а то су (сл. 3):

- методе прозвучавањем,
- методе резонанце и
- импулсне – ехо методе.



Слика 3. Шема подела ултразвучних метода испитивања

Због велике прецизности у односу на остале методе испитивања без разарања, велике моћи распрострања у испитивани део/конструкцију, могућности откривања врло дубоких дефеката, због велике осетљивости на откривање и најмањих дисконтинуитета, ова метода примењује се у многим делатностима попут аеронаутике, аутомобилске индустрије и сл.

Користи се за испитивање делова и конструкција израђених од разних материјала почевши од челика, обојених метала и њихових легура, тако и других метала, композита, полимера, па све до дрвета и бетона.

2.5. Радиографске методе

Радиографска метода је метода испитивања делова или конструкција без разарања, намењена је првенствено за испитивање унутрашњих грешака у испитиваном делу. Ова метода користи својства електромагнетног зрачења x (рендгенским) и γ (радиоизотопним) зрацима који, за разлику од зрака светлости, продиру кроз све данас познате материјале. Поменути x -зраци и γ -зраци припадају делу електромагнетног спектра врло малих таласних дужина и високе фреквенције. Ови зраци су, са становишта електрицитетa, неутрални и не утичу својим деловањем на магнетно или електрично поље.

Шире се као праволинијски зраци одређене фреквенције, таласне дужине и брзине ширења таласа, па су и носиоци енергије високог степена. Пролазећи кроз испитивани део, зрачење остаје истог смера, али у зависности од одређених својстава материјала и његовој дебљини, бива више или мање пригушено, па стога на излазу има нижу енергију од оне на улазу у испитивани део или конструкцију. Степен апсорпције познат је и одређен за сваки материјал.

Дакле, ако се у неком материјалу налазе нехомогености, оне ће засигурно имати различита својства апсорпције, па ће се на излазу из испитиваног дела испред нехомогености јачина енергије зрачења разликовати од излазне енергије на осталим

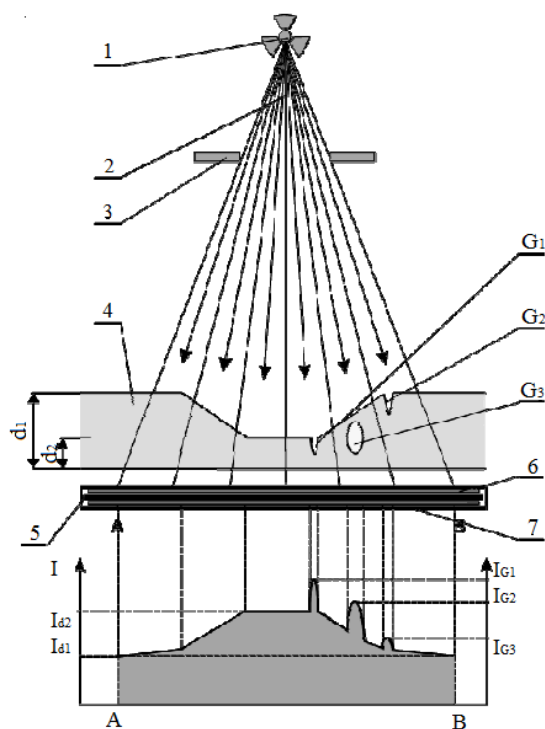
местима. Како би спровели радиографску методу, потребно је ову разлику излазног интензитета зрачења учинити видљивом или мерљивом.

Постоји више појединачних метода које спадају у групу радиографског испитивања, али су најучесталије: метода рендгенске цеви, компјутеризована томографија, радиоскопија, гамаграфија и неутронска радиографија.

Сам поступак састоји се од неколико фаза:

- припрема документације;
- припрема дела који се испитује;
- избор технике снимања;
- одређивање параметара снимања;
- снимање/прозрачивање;
- обрада материјала за регистрацију;
- интерпретација резултата испитивања;
- извештај.

Општи поступак извођења је да се објект на коме се врши испитивање постави у жељени положај. Са једне његове стране поставља се извор зрачења, док се са супротне стране поставља филм за регистровање зрачења које је прошло кроз испитивани део. Енергија зрачења се, при проласку кроз део који се испитује, добрим делом апсорбује у секцијама испитиваног дела са грешкама и нехомогеностима. Због овога, затамњеност на деловима филма директно испред нехомогености и грешака је другачијег интензитета од затамњености филма на осталим деловима (сл. 4).



Значење ознака:

- 1 - Извор зрачења
- 2 - Сноп зрачења
- 3 - Граничник
- 4 - Објект испитивања
- G_1, G_2, G_3 - Грешке и нехомогености
- 5 - Филм
- 6 - Фолије
- 7 - Касета

- I - Интензитет зрачења
- d_1, d_2 - Дебљина материјала
- A, B - Дужина снимка

Слика 4. Поступак и елементи испитивања радиографском методом

У случају да је густина на месту нехомогености мања од густине основног материјала (била то шупљина или укључак мање густине), интензитет зрачења приказан на филму испред те нехомогености биће већи од интензитета зрачења приказаног на остатку филма. Поред тога, свако смањење дебљине материјала на путу зрачења узроковаће повећање интензитета приказаног на филму.

У случају да зрачење пролази кроз нехомогеност веће густине од густине основног материјала дела који се испитује (метални или неметални укључак), интензитет зрачења приказан на филму испред те нехомогености биће мањи од интензитета на остатку филма. Повећани интензитет ће се на филму приказати као предео са повећаним затамњењем, док ће се смањени интензитет приказати као део са смањеним затамњењем.

2.6. Испитивање херметичности заварених посуда

Испитивање херметички заварених судова изводи се ради провере да ли се у шавовима или зидовима посуде налазе грешке, али се највише користе за проверу пропустљивости херметички заварених посуда.

Ово испитивање је јако битно извршити јер је остваривање потпуне непропустљивости неке посуде у пракси немогуће, па је зато потребно открити ниво пропустљивости. Овај ниво пропустљивости добијен испитивањем упоређује се са нивоом дозвољене пропустљивости, који је прописан још у конструисању посуде.

Испитивања пропустљивости врше се са неколико различитих метода, али се све заснивају на стварању притиска у испитиваној посуди (ретко стварању притиска око посуде) помоћу течности или гасова. Затим се врши преглед да ли течности односно гасови који су под притиском излазе из испитиване посуде, што ће показати место пропуштања и преко чега ће се одредити ниво пропустљивости.

3. Визуелна метода

3.1. Опште напомене од визуелној методи

Визуелна контрола је основна метода испитивања, и представља први контакт са објектом. Она се дели на визуелну контролу са и визуелну контролу без оптичких помагала. У помагала спадају лупе, микроскопи, еднoскопи, телескопи, бороскопи, а некада и телевизијске камере. Овом методом могу се открити како спољашње тако и унутршње грешке у делу или конструкцији која се испитује, али се највише користи за:

- проверу мера;
- откривања грешака услед експлоатације;
- утврђивања стања предмета;
- откривања технолошких грешака;
- утврђивања усклађености.

Провера димензија испитиваног дела један је од најзначајнијих делова визуелне контроле, и користи се у случају када се класичне и устаљене методе мерења не могу користити. За извођење испитивања визуелном методом потребна је интеракција светла и испитиваног дела, или у неким ситуацијама и референтни узорак. Такође, за извођење ове методе при мерењу малих помака и микропукотина користи се ласер, и ово представља подметоду визуелне методе, и зове се ласерска интерферометрија (или оптичка холографија).



Слика 5. Визуелно-димензионаална контрола угаоног шава дебљине 10 mm



Слика 6. Провера управности завареног елемента конструкције

3.2. Ендоскопска метода

Поред класичне визуелне контроле, највише се користе ендоскопска и бороскопска контрола, при чему је од набројаних најважнија едоскопска.

Ендоскопска контрола (за преглед недоступних површина) се састоји од камере (пречника 4-6 mm) која се путем оптичког кабла доводи до места испитивања. Камера снима место испитивања и истовремено је спојена са рачунаром, чиме се на екрану може пратити снимање и имати увид у евентуалну грешку. Прецизност мерења је велика, а слика се може повећати и детаљно прегледати (сл. 7).



Слика 7. Ендоскоп

Принцип испитивања састоји се у посматрању и снимању грешке са две одвојене камере. Ендоскопским мерењем могу се утврдити све димензије било каквих дефеката или оштећења насталих у експлоатацији, као и одступања од

задатих димензија, без обзира на положај грешке. Могућности примене ендоскопске контроле у поређењу са осталим методама без разарања приказане су у таб. 2.

Табела 2. Могућност примене ендоскопске контроле у поређењу са осталим методама без разарања

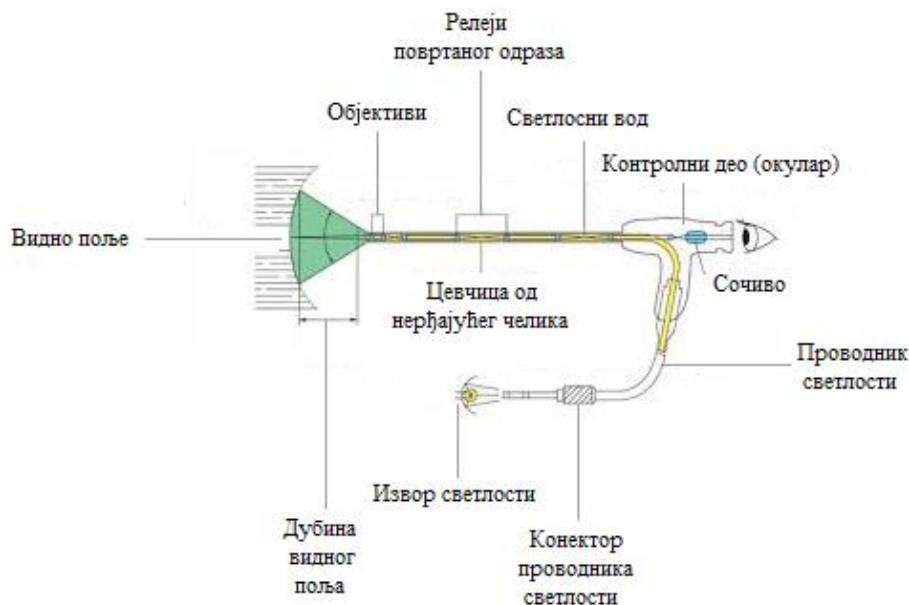
Типови	Грешке	Методе испитивања без разарања					
		Визуелна	Ендоскопска	Прозрачивање	Прозвучавање	Магнетна испитивања	Пенетранти
Пукотине	Мање површинске	(+)	(+)	-	(+)	+	+
	Веће површинске	+	+	(+)	+	+	+
	Подповршинске	-	-	(+)	+	(+)	-
Порозности	Површинске	+	+	+	(-)	+	(+)
	У завару	-	-	+	+	-	-
Укључици		-	-	+	+	-	-
Недовољна провареност	Спољашња	+	+	+	(+)	+	+
	У завару	-	-	+	+	(-)	-
Остало		+	+	-	-	(-)	(-)
+ добра могућност контроле				(+) могућност условљена величином и положајем			
- непримењива контрола				(-) врло ограничена примена која се не препоручује			

3.3. Бороскопска метода

Бороскопска метода, као једна од најпримењиванијих визуелних метода, слична је ендоскопској методи. Разлика је у томе што се камера уређаја поставља директно испред предмета испитивања, а повратна информација (видео приказ дела предмета који се испитује) добија се на самом уређају. Овај уређај састоји се објектива, релеја повратног одраза, светлосног вода као и окулар, односно контролног дела (сл. 8).

За коришћење овог уређаја није потребно посебно усавршавање, али се мора обратити пажња на што веће смањивање могућности субјективне грешке оператора. То се постиже праксом у коришћењу овог уређаја, доброј припреми површина које се испитују као и довођење одговарајућег извора светлости.

Највећи ефекат коришћења ове методе је ако постоје очекивана одступања и грешке које се траже, али то у пракси није увек изводљиво.



Слика 8. Делови бороскопа

3.4. Ласерска интерферометрија (оптичка холографија)

Ласерска интерферометрија спада у делимично визуелну методу. Користи се за мерење малих помака испитиваног предмета, разних величина предмета као и просторног положаја.

Ова метода се највише користи за мерење малих помака који су последица напрезања материјала, површинских или подповршинских грешака насталих због удара. Главна намена ове методе је за благовремено откривање микропукотина.

Метода холографије функционише тако што се стварају два ласерска снопа светлости. Један је усмерен ка површини предмета који се испитује, док се други користи као референтни. Рефлектовани снап првог зрака светлости садржи информације о стању површине предмета који се испитује. Ова два снопа дају холограм тако што се споје интерферометријом. Пропуштањем кохерентне светлости кроз холограм постиже се реконструкција предмета у простору.

Овако добијени холограм садржи потребне информације о промена на површини предмета, док се мере тих промена садрже у распореду и ширини пруга холограма, као и у његовој фреквенцији.

4. Пенетрантна метода

4.1. Опште напомене о пенетрантном испитивању

Пенетрантна метода, као врста испитивања и контроле без разарања, једна је од најранијих метода испитивања ове врсте. Ова метода нашла је широку примену због релативно лаког извођења овог испитивања, мале цене као и брзих резултата. Ова метода, и ако се сврстава у засебну групу, на одређен начин сматра се као наставак и „надоградња“ визуелне методе. До ових констатација се долази јер се уочавање грешке изводи визуелно, али су грешке уочљивије због пенетраната који се користе у овој методи, па је самим тим преглед и лакши и бржи.

Коришћењем ове методе могуће је открити површинске пукотине, биле оне микро пукотине или макро пукотине, као и порозност и шупљине у делу или конструкцији који се испитују, али само у случају да те шупљине и порозности унутар дела имају излази (отвор) на површини са којим су повезане. Поред пукотина, шупљина и порозности, ова метода даје могућност откривања могућих повезаности између шупљина унутар зидова дела који се испитује. Овакве повезаности откривају се наношењем течног пенетранта на површину коју испитујемо. Пенетрант продире кроз пукотине и шупљине унутар зида дела и долази до његовог истицања на другој површини, или другом делу испитиване површине. Овакав облик методе испитивања највише се користи за испитивање пропусности зидова делова, цеви, резервоара, посуда итд.

Принцип функционисања ове методе заснива се на капиларним силама које се јављају између слободних простора у које пенетранти продиру приликом испитивања (прслина, шупљина, порозности) и самих пенетраната. Грешке које је могуће открити овом методом су дужине од 0,1 mm и ширине од 0,3÷0,5 mm.

Пенетрант се, при испитивању, наноси на површину дела који се испитује и он продире у могуће прсле и пукотине. Да би пенетрант успео да продре, изузетно је важно да су, како могуће прсли и пукотине, тако и сама површина на коју се пенетрант наноси потпуно чисте. Због тога се посебна пажња обраћа на темељно и потпуно чишћење дела или површине на којој се испитивање врши. Ово се постиже применом посебних средства за чишћење који отклањају све нечистоће (сл. 9).



Слика 9. Неки од чистача који се примењују при испитивању пенетрантном методом

У зависности од конкретне примене ове методе (испитивање постојања површинских грешака или испитивање повезаности пукотина у зидовима испитиваног дела), различито је и време које је потребно пенетранту да продре у пукотине, порозности и шупљине. Такође, у случају испитивања пропусности делова или конструкција, време ће додатно зависити и од дебљине зидова делова који се испитују, као и од материјала од ког је испитивани део израђен.

Након времена потребног за продирање пенетранта, мора се извршити брисање вишка пенетранта са површине на коју је пенетрант нанет. При овом кораку, битно је обратити пажњу да не дође до отклањања пенетранта који се налази у унутршњости грешака. Највећи број пенетраната могуће је отклонити водом, али постоје и неке врсте пенетраната (нпр. постемулгујући пенетранти) који су водоотпорни. За њихово одстрањивање користе се додатна средства.

Након чишћења вишка пенетранта, ако је овај корак изведен како треба, пенетрант сада остаје задржан само у пукотинама и површинским грешкама. Пенетрант тада излази на површину из грешака у којима је остао задржан. До ове појаве долази услед настајања адхезионих сила између материјала дела који се испитује и заосталог пенетранта. Овај процес подстиче се наношењем развијача на испитивану површину која је очишћена од вишка пенетранта. Наношењем развијача такође се подстиче и лакше уочавање пенетранта који излази на површину. Уочавање пенетранта се појачава и додатним осветљавањем испитиване површине.

Траг пенетрант који се појављује након наношења развијача назива се пенетрантска индикација. Иза речи „индикација“ у овом називу стоји чињеница да је задржавање пенетранта могло бити проузроковано површинском грешком у којој се пенетрант задржао, али је могуће да се пенетрант задржао и на неправилностима насталим услед храпавости површине дела који се испитује, или да је задржан услед заостале нечистоће. Због наведених могућности задржавања пенетранта, ако дође до појављивања пенетрантске индикације, потребно је касније установити да ли постоји грешка која је пронађена, или је до индикације дошло из неког другог разлога.

Након завршетка испитивања, са испитиваног дела/конструкције отклања се сваки заостали траг или индикација пенетранта што се постиже датаљним чишћењем испитиваног предмета.

Сваки од споменутих корака је потребан за правилно извођење испитивања предмета овом методом, и сваким од тих корака постиже се одређени жељени резултат (Таб. 3).

Табела 3. Кораци и резултати корака при извођењу испитивања пенетрантима

Редослед корака	Опис корака	Резултата корака
Корак 1	Чишћење површине и отклањање нечистоћа	Површина је припремљена за наношење пенетранта
Корак 2	Наношење пенетранта на испитивану површину	Продирање пенетранта у пукотине
Корак 3	Одстрањивање вишка пенетранта са површине	Пенетрант остаје само у пукотинама уз добијање чисте површине
Корак 4	Наношење развијача на испитивану површину	Подстицање излажења развијача из пукотина и стварање пенетрантских индикација
Корак 5	Осветљавање испитиване површине	Боља видљивост пенетрантских индикација
Корак 6	Чишћење свих остатака пенетранта на делу	Добијање потпуно чистог дела спремног за даља испитивања/експлоатацију

Класификација пенетраната, чистача површина, као и развијача изводи се према одређеним стандардима, и може и бити у односу на бројне параметре. То може бити у односу на боју пенетранта, врсту чистача, метод одстрањивања пенетранта, развијаче као и многе друге критеријуме, али је најзаступљенија основна подела ових средстава (Таб. 4).

Табела 4. Основна класификација средства за извођење испитивања пенетрантима

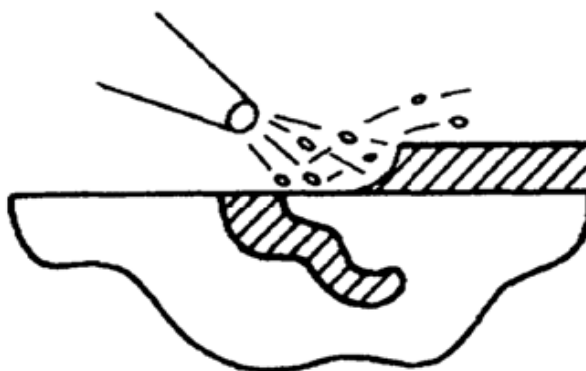
Основа за класификацију	Класификација	Карактеристика класе
Пенетранти	Тип 1	Флуоресцентни
	Тип 2	Видљиви (обојени)
Флуоресцентна осетљивост	Ниво ½	Врло слаба
	Ниво 1	Слаба
	Ниво 2	Средња
	Ниво 3	Јака
	Ниво 4	Врло јака
Средства за чишћење	Класа 1	Халогенирана (незапаљива)
	Класа 2	Нехалогенирана (запаљива)
Уклањање вишка пенетранта	Метода 1	Прање водом
	Метода 2	Липофилним емулгатором (на бази уља)
	Метода 3	Брисање растварачем
	Метода 4	Хидрофилни емулгатор (на бази воде)
Развијачи	Форма 1	Суви прах
	Форма 2	Раствориви у води
	Форма 3	Нераствориви у води
	Форма 4	Неакватни (на бази растварача) флуоресцентног тип
	Форма 5	Неакватни (на бази растварача) видљивог типа

4.2. Принцип рада пенетрантне методе

Први корак при испитивању методом пенетрантата је наношење пенетранта на површину која се испитује. Пенетрант је у течной форми, и на његов ток утиче више параметара, а то су:

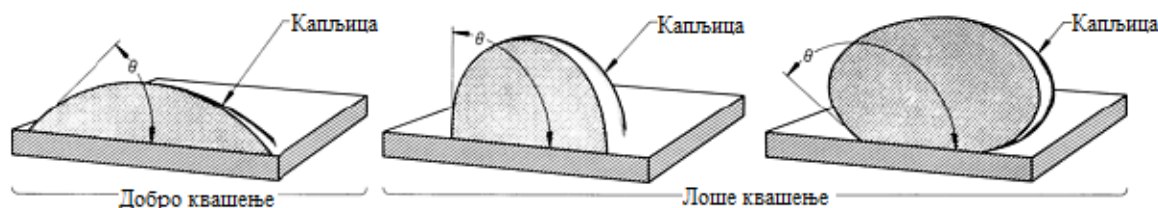
- чистоћа површине;
- чистоћа пукотине;
- површински напон течности;
- контактни угао течности;
- способност течности да кваси површину;
- величина отвора пукотине;
- конфигурација пукотине.

Физички принцип рада пенетрант, у простом облику, састоји се од нанонешања пенетранта на површину која се испитује, при чему пенетрант тече по површини и продире у пукотине (сл. 10).



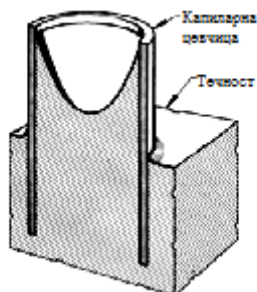
Слика 10. Принцип рада пенетранта

Физички принцип рада пенетранта при овој врсти испитивања почива на томе да се између молекула течности, услед сила кохезије, изазивају површински напони. Због њих, капљица пенетранта тежи ка сферном облику. Овим површинским напонима супротставља се хидростатички притисак течности, као и силе адхезије које се јављају између површине с којом је капљица у контакту и капљице. Те адхезионе силе одређују контактни угао који се обележава грчким словом θ . Овај угао може бити мањи од 90° , може бити тачно 90° или може бити већи од 90° . Само први случај је пожељан и назива се добро квашење, док су друга два случаја непожељна и називају се лоше квашење (сл. 11).



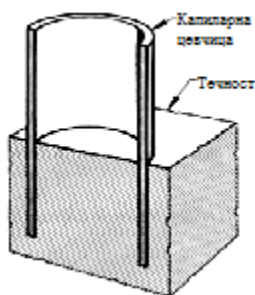
Слика 11. Добро и лоше квашење пенетрантом

Контактни угао који капљица гради са површином на којој се налази такође утиче и на још један битан сегмент испитивања пенетрантима, а то је капиларност. Ако је контактни угао мањи од 90° , пенетрант капиларним силама улази у прслине (капиларе), ствара конкавни облик на својој површини, и течност се подиже до крајева капилара у који је зашла (сл. 12).



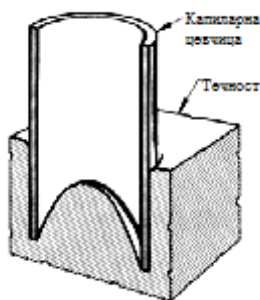
Слика 12. Контактни угао мањи од 90°

Ако је контактни угао између капљице пенетранта и површине на којој се налази једнак углу од 90° , до капиларног ефекта неће доћи (сл. 13).



Слика 13. Контактни угао једнак 90°

У случају да је контактни угао између капљице и површине мањи од 90° , течност (пенетрант) неће кvasити зидове капилара, на површини пенетранта креираће се конвексан облик, а сам пенетрант ће се спуштати низ капиларе (сл. 14).



Слика 14. Контактни угао већи од 90°

Када пенетрант уђе у капиларне цевчице, он ствара силу која делује вертикално на доле, и која је изазвана тежини стуба течности (пенетранта) који се налази у капиларној цевчици и пропорцијална јој је. Ова сила зависи од специфичне густине пенетранта ρ , убрзања земљине теже g као и висине на којој се стуб течности налази h . Сама сила деловања једнака је:

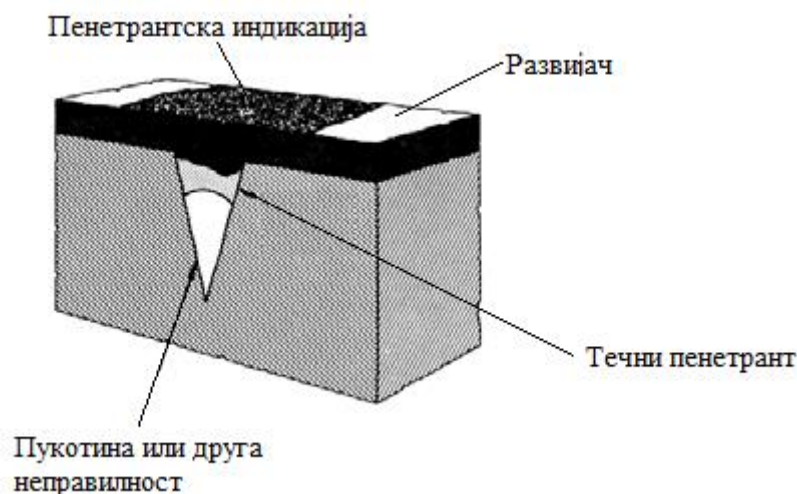
$$F_d = 2\pi r^2 h g \rho \quad (4.1)$$

Супротно овој сили делује сила вертикално навише, која зависи од површинских напона и обима капиларне цевчице. Њена формула је:

$$F_u = (T \cos \theta) 2\pi r, \quad (4.2)$$

при чему је словом T означена тангента.

Када је пенетрант нанесен, и дато му је довољно времена да зађе у све неправилности и пукотине, на површину која се испитује (а тиме и на пенетрант) наноси се развијач. Његов задатак је да формира фини порозни површински слој, чиме се постиже упијање пенетранта (осталог у пукотинама) у развијач и појачава се визуелизација грешке (сл. 15).



Слика 15. Нанет развијач на површину која се испитује

4.3. Опис извођења методе

Метода испитивања пенетрантима је релативно лака и једноставна метода за извођење. Састоји се од 6 фаза, а то су:

- припрема испитиване површине;
- наношење пенетранта;
- одстрањивање пенетранта с површине;
- наношење развијача;
- преглед индикација и записивање резултата;
- чишћење.

Сваки од ових корака, како је раније у раду објашњено, има одређен циљ који мора да се испуни. Због тога је сваки од ових корака и обавезан.

Припрема испитиване површине

Основни задатак који мора да буде задовољен да би испитивање пенетрантима било могуће је да пенетрант има могућност и услове да продре у пукотине на испитиваном делу, односно површини. То се постиже одговарајућом припремом површине.

Темељном припремом површине постижу се две битне ствари. Прва је да се ствара могућност пенетранту да продре у пукотине, као и да несметано тече по површини која се испитује. Друга ствар која се постиже је стварање боље основе за уочавање могућих грешака касније у току процеса испитивања.

Сам поступак припремања површине за испитивање састоји се из темељног чишћења и одмашћивања дела који се испитује. Први корак при припреми површине је отапање масних супстанци и прљавштине са дела. То се постиже отапањем при повишеним температурама, конкретније потапањем површине (или целог испитиваног дела) у органске супстанце (најчешће алкохол и ацетон) које разграђују масти, или разградњом у отапаоцима на воденој бази. Ове супстанце су углавном на температури од 60°C до 100°C. Даље, врши се чишћење хемијским једињењима за отклањање продуката корозије као и чишћење средствима предвиђеним за припрему површина за испитивање (сл. 16).



Слика 16. Припрема / чишћење површине

Наношење пенетранта

После темељног чишћења, прелази се на други корак, а то је наношење пенетранта на испитивану површину, односно испитивани део. Пенетрант затим, помоћу капиларних сила, продире у пукотине и порозности са површинским отворима (сл. 17).



Слика 17. Наношење пенетранта

За продирање пенетранта потребно је одређено време, различито за различите материјале, величине површина које се испитију, ако и дебљину материјала у одређеним ситуацијама. Ово време назива се време пенетрације. Да би испитивање било валидно и правилно спроведено, потребно је сачекати да од наношења пенетранта до следећег корака у испитивању прође бар време пенетрације (таб. 5).

Табела 5. Време пенетрације за одређене материјале

Материјал	Време пенетрације, min
Алуминијум	10
Магнезијум	10
Бронза	10
Пластика	10
Челик	10
Стакло	10
Специјални челици	15
Керамика	20
Титанијум	20

Одстрањивање пенетранта са површине

Након времена пенетрације, наставља се са испитивањем прелажењем на следећи корак, а то је одстрањивање пенетранта с површине. Овај корак је потребно извршити да би се обезбедио контраст између пенетрантсе индикације и самог дела који се испитује (сл. 18).

Посебну пажњу у овом кораку потребно је обратити на начин одстрањивања вишка пенетранта. Одстрањивање се, првенствено, мора извршити одговарајућим

средством. То могу бити вода, емулгтаори различитих база, или растварачи. Средство које се употребљава у овом кораку зависи од тога које је врсте пенетрант, јер све пенетранте није могуће уклонити свим средствима.

Друга ствар на коју је потребно обратити пажњу је јачина притиска при чишћењу, као и време чишћења пенетранта. Овај аспект битан је због пенетранта који треба да остане унутар пукотина или порозности у површини која се испитује, чиме је постигнуто валидно испитивање. Чишћење мора бити такво да се очисти сав вишак пенетранта са површине, и не очисти пенетрант који се налази унутар порозности и пукотина тако да преостали пенетрант касније изађе на површину у виду пенетрантске индикације.



Слика 18. Одстрањивање вишка пенетранта с површине

Наношење развијача

Након одстрањивања вишка пенетранта, силама адхезије између површине испитиваног дела и пенетранта у пукотинама и порозностима, пенетрант излази на површину и ствара трагове, односно пенетрантске индикације. Пенетрантске индикације показују положај, облик као и величу грешке у испитиваној површини.

Подстицање излажења пенетранта из пукотина, а самим тим и стварање пенетрантских индикација подстиче се наношењем развијача. Развијач је потребно нанети у танком слоју по целој испитиваној површини. Ако је претходни корак извршен правилно, пенетрант ће се појавити само изнад пукотина и грешака. Потребно је нагласити да ће се, ако је развијач правилно нанесен, пенетрант такође појавити и на ободу грешке, па ће индикација увек бити већа него стварна грешка (сл. 19).

Развијачи који се користе су у форми течности или финог прашка. Било да су у форми прашка или течности, развијачи су беле боје. Разлог је подстицање контраста потребног за лакше и боље уочавање пенетрантских индикација.



Слика 19. Наношење развијача

Преглед индикација и записивање резултата

Након наношења развијача, пенетранти остали у пукотинама, порозностима или унутрашњим прелинама са излазом на површину појављују се на површину у облику пенетрантске индикације. Свака пенетрантска индикација мора бити детаљно проверена, јер се може створити у случају да постоји пукотина (или грешка у другој форми), али се може створити и у ситуацији да је постојала заостала нечистоћа након чишћења или у случају да је постојала евентуална храпавост површине (сл. 20).

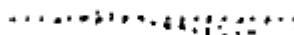
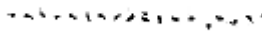
Било да је пенетрант остао у пукотини, порозности, на нечистоћи или се нашао у евенталној неправилности површине у облику храпавости, он ће се појавити на површини због сила адхезије. Оне настају због међусобног деловања очишћене испитиване површине и заосталог пенетранта.



Слика 20. Појављивање пенетрантске индикације

Иако је сваку пенетрантску индикацију потребно додатно испитивати, у зависности од њене форме и облика, могуће је претпоставити о којој врсти грешке се ради (таб. 6).

Табела 6. Карактеристичне пенетрантске индикације

Опис грешке	Пенетрантска индикација грешке
Порозност – Концентрација тачкица	
Континуирана велика пукотина – Неиспрекидана линија	
Ситна пукотина – Сломљена линија од тачака	
Пукотине настале замарањем материјала – Неправилна линија од тачака	

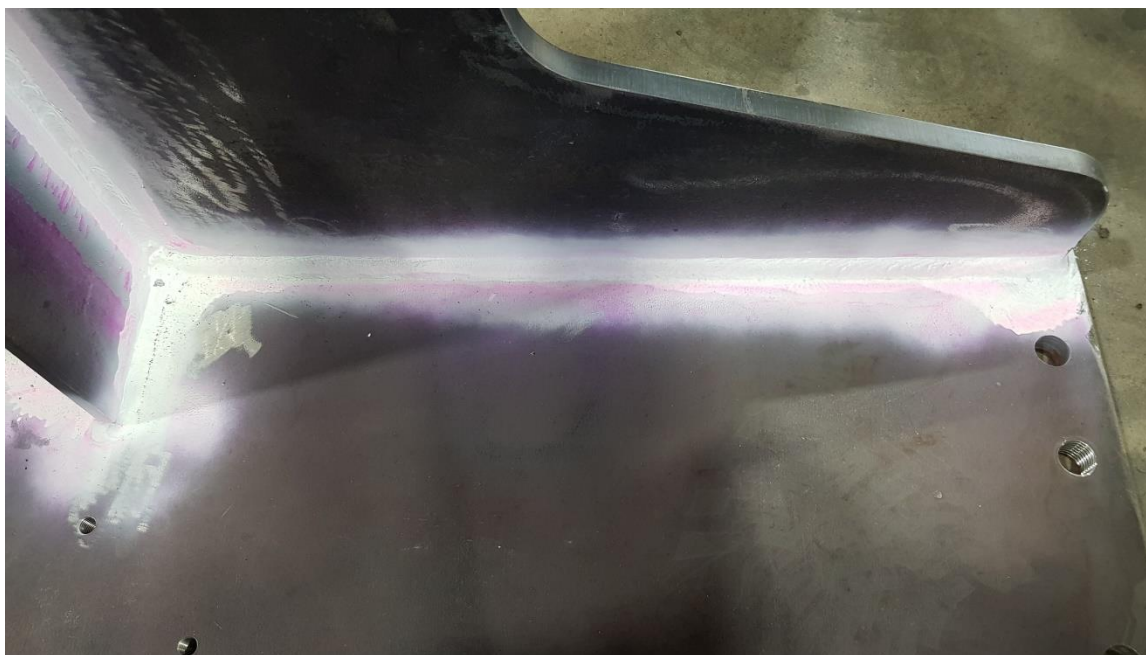
После детаљног прегледа пенетрантних индикација приступа се записивању добијених информација. Уз овај запис такође се врши фотографисање добијених индикација.

Чишћење

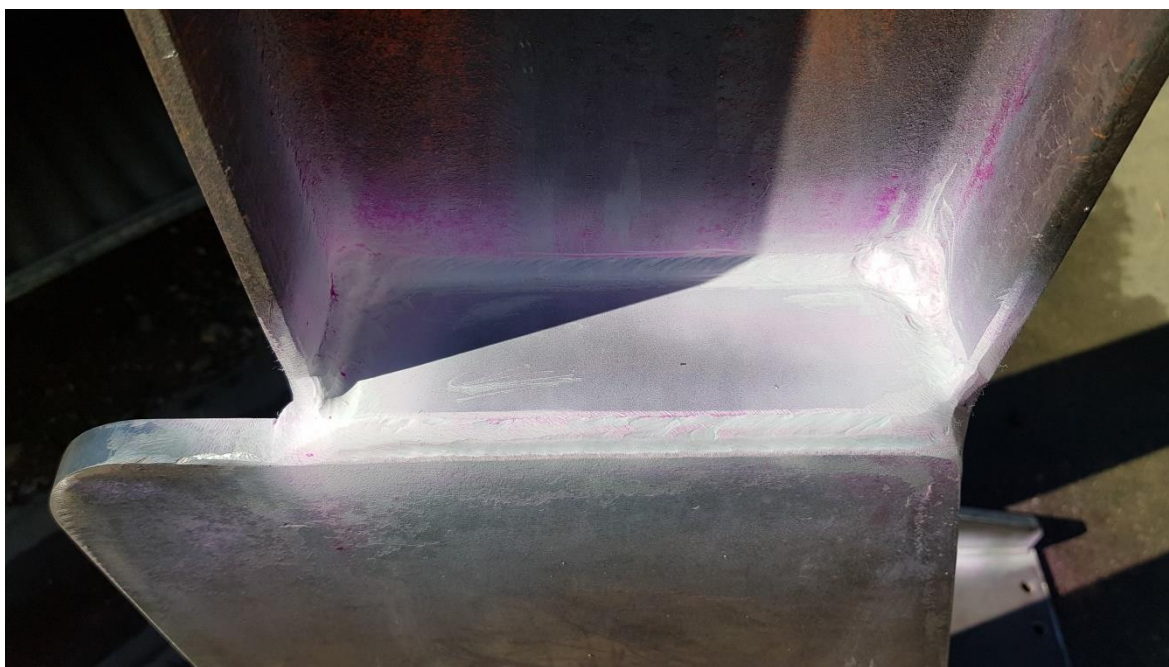
Коначно чишћење испитиваног дела врши се након завршетка бележења добијених индикација. Сам поступак чишћења зависи од врсте пенетранта као и од експлоатационих карактеристика испитиваног дела.

4.4. Примери изведене контроле пенетрантним течностима

У овом поглављу ће бити приказани поједини примери контроле заварених спојева на реалним конструкцијама применом пенетрантних течности. На сликама 21 и 22 су приказани испитани спојеви без откривених индикација.

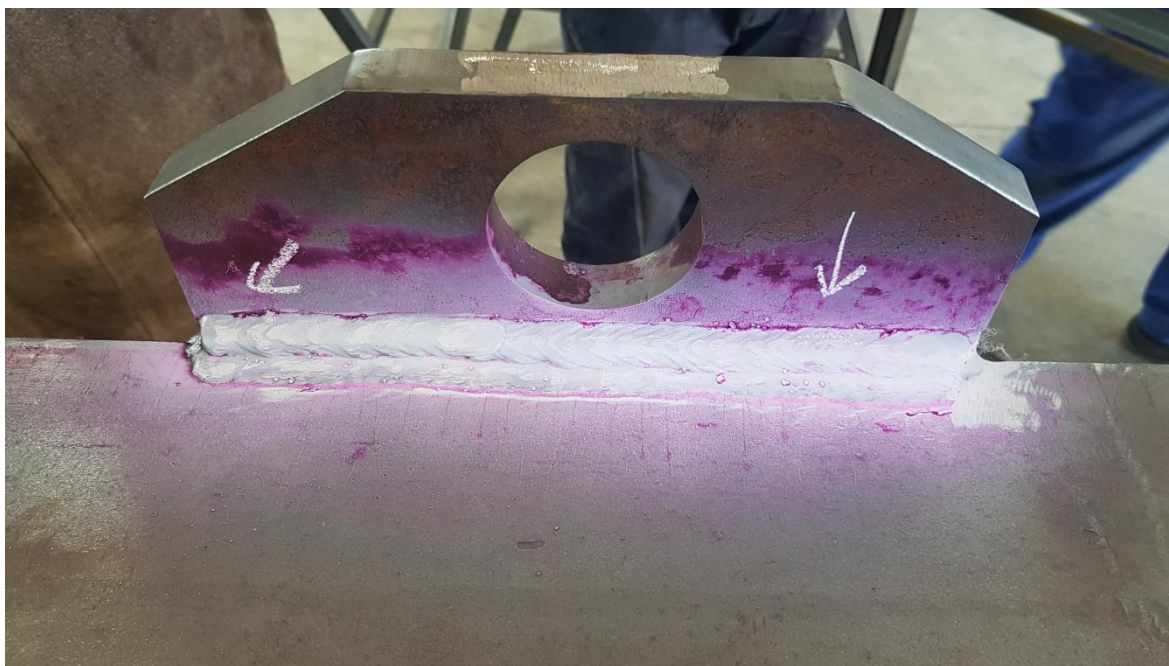


Слика 21. Контрола угаоних спојева завареног носећег стуба

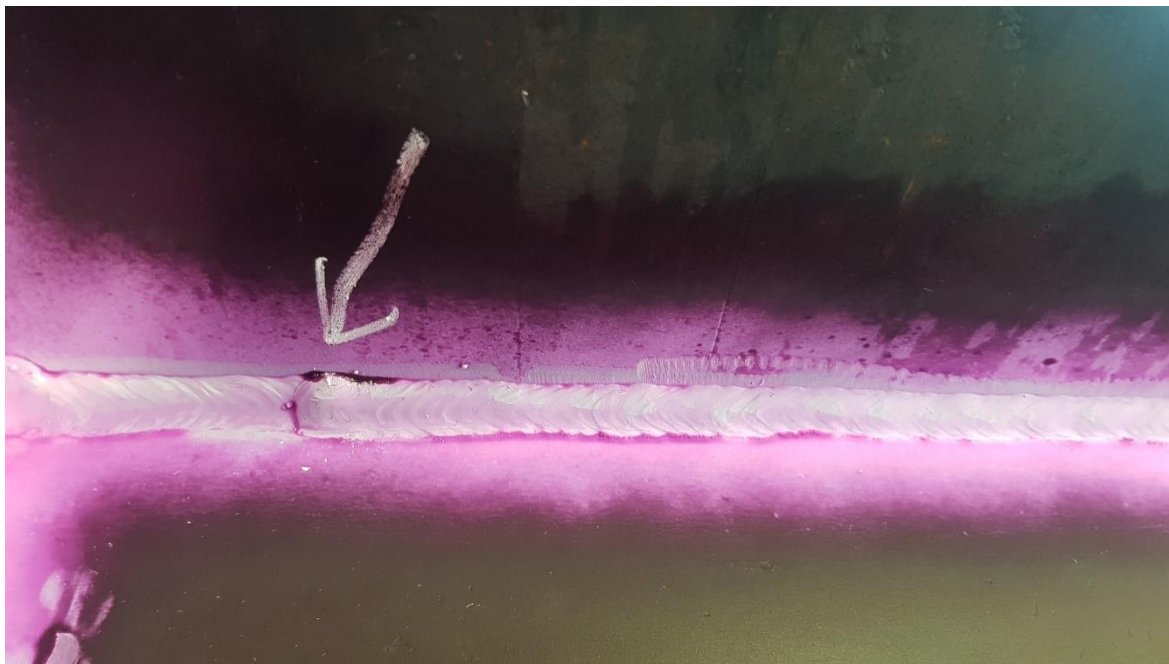


Слика 22. Контрола угаоних спојева завареног I профила

На сликама 23 и 24 су приказани испитани спојеви са видљивим индикацијама грешака.



Слика 23. Пенетрантно испитивање вишеслојног завареног споја са видљивом индикацијом грешке типа заједа



Слика 24. Пенетрантно испитивање вишеслојног завареног споја са видљивом индикацијом грешке типа налепљивања на наставку завареног споја

После утврђених индикација и процене њиховог типа, приступа се уклањању грешака (најчешће механички-брушењем) и поновног заваривања на тим местима. После поновног заваривања обавезна је поновна пенетрантна контрола.

4.5. Предности и недостаци пенетрантне методе

Пенетрантна метода као, и свака метода, има како своје предности тако и мане. И предности и мане треба имати у виду при одабиру одговарајуће методе за испитивање жељеног дела или конструкције. Неке од предности пенетрантске методе су што је једноставна за примену, добра у откривања грешака јако малих величина, примењива је на скоро сви материјалима, сложена геометрија делова који се испитују не захтева специјалан приступ, метода је погодна за теренска испитивања како због малог броја потребних средстава, тако и због чињенице да за испитивање овом методом није потребно имати приступ електричној енергији.

Ипак, ова метода има и одређене недостатке. Између осталих, ту је чињеница да је њена примена немогућа на порозним материјалима, потребно је обратити пажњу на завршну обраду дела који се испитије, сваки корак при испитивању мора бити изведен са великом пажњом, скоро да је немогуће извршити аутоматизацију ове методе, као и то да је поузданост резултата добијених овим испитивањем у великој мери зависи од испитивача и његовог искуства.

5. Магнетна метода

5.1. Опште напомене о магнетној методи

Магнетна метода испитивања делова или конструкција, као метода испитивања без разарања, једна је од најефикаснијих метода за коришћење.

Ова метода, позната као и магнетна дефектоскопија или електромагнетно испитивање, користи се за откривање јако малих и голим оком невидљивих грешака као што су шупљине, поре или прслине унутар материјала. Ова метода заснива се на чињеници да свака нехомогеност у материјалу ремети простирање магнетних линија приликом индужевања магнетног поља у испитивани предмет.

Магнетна дефектоскопија се, уопштено речено, врши намагнетисавањем предмета испитивања сталним магнетом, електромагнетом, или пропуштањем електричне струје кроз испитивани део. Након успостављања магнетног поља у испитиваном предмету, прелази се на један од два могућа корака (у зависности од одређене магнетне методе), а то су:

- посипање магнетним прахом и
- приступање регистрању заосталог магнетизма у делу.

Основна подела магнетне методе је на:

- контролу феромагнетних материјала (метала) и
- контролу неферомагнетних материјала (метала или неметала).

Имајући у виду да је магнетна метода испитивања јако широко примењена, логично је закључити да постоје бројне технике извођења ове методе које се међусобно разликују. Ове технике разликују се по питању смера и јачине магнетног поља, али све имају за циљ да се откривање грешака учини што једноставнијим и што јефтинијим могућим. Због учесталог коришћења неких од тих техника, оне су често стандардизоване и долазе уз препоруку о начину њихове примене.

Грешке које је могуће открити овом методом су пукотине, укључци или зарези.

Као принцип рада ове методе врши се намагнетисавање испитиваног дела, некада локално а некада и целокупно (у зависности од потребе и циља конкретног испитивања). Овом методом могуће је открити површинске грешке као и потповршинске грешке у материјалу испитиваног дела, али под условом да се те грешке не налазе на великој дубини (између 2,5 mm и 3 mm). Најчешће се користи на феромагнетним материјалима. Грешке, односно пукотине или укључци које је могуће открити коришћењем ове методе морају имати ширину не мању од 0,01 mm.

У случају да у испитиваном комаду постоје грешке, било површинске или у унутрашњости испитиваног дела, оне ће створити промене у индуженом магнетном пољу у виду „кривљења“ магнетног поља, стварајући тада локална магнетна поља на местима грешака. Те промене у магнетном пољу ће довести до скупљања честица магнетног праха на површини испитиваног дела.

Приликом намагнетисавања испитиваног предмета мора се обратити пажња да се линије магнетног поља усмеравају тако да буду у нормалном положају у односу на очекиване грешке. Овај услов обезбеђује се уздужним, кружним или комбинованим магнетним пољем.

Намагнетисавање испитиваног предмета могуће је извршити на неколико различитих начина, као што су: сталним магнетом, електромагнетима једносмерне или наизменичне струје, соленидима итд.

Уређаји који се користе за извођење испитивања овом методом могу да буду преносиви или стационарни, уз могућност регулације јачине електричне струје, као и њене врсте.

5.2. Принцип рада магнетне методе

Испитивање магнетном методом темељи се на извођењу одређених корака у циљу проналажења могућих грешака на површини или унутар испитиваног дела. Постоји пет основних корака у извођењу ове методе, независно од примењене технике, а то су:

- припремање објекта за испитивање магнетном методом;
- магнетизација испитиваног дела;
- проналажење промена у магнетном пољу услед постојања грешки;
- интерпретација и мерење пронађених грешки;
- размагнетисавање испитиваног објекта и његова припрема за даља испитивања/експлоатацију.

Основни начин регистровања пронађених грешки у испитиваном делу је коришћењем феромагнетних честица. Феромагнетне честице се, након намагнетизовања испитиваног дела, посипају по испитиваном делу при чему се оне скупљају и групишу на месту на ком постоји грешка, као и по њеном ободу.

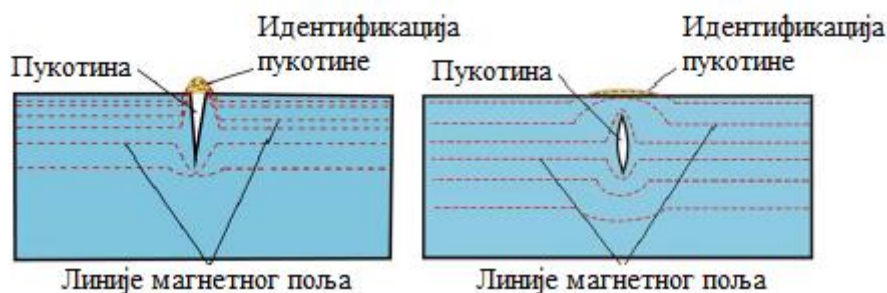
Ради лакшег и бољег уочавања индикација, потребно је направити контраст између испитиваног дела и честица. Контраст се постиже на два начина, од којих је први коришћењем обојених феромагнетних честица. Боју честица треба бирати у зависности од боје испитиваног дела, а са циљем постизања што већег контраста. Други начин је коришћењем феромагнетних честица које су флуоресцентне. Ове честице не стварају јак контраст када се посматрају на дневном светлу, али стварају врло јак контраст када се посматрају користећи UV светлост.

Други начин регистровања пронађених грешака је бележењем магнетних индикација снимањем на магнетној траци. Овај начин регистровања грешака користи се у магнетографији.

Струја која се користи при намагнетисавању испитиваног дела електромагнетима може бити једносмерна или наизменична. Она, ипак, мора бити одговарајућег таласног облика, који зависи од предмета који се испитује и од очекиваних грешки. Најефикаснији начин намагнетисавања је коришћењем два магнетна поља која имају одговарајуће оријентације. Тиме је могуће постићи магнетно поље жењеног смера, при чему више није битна оријентација самих грешака.

Највећа осетљивост ове методе је на површинске грешке, док се са повећањем дубине на којој се налази грешка смањује могућност регистровања исте користећи магнетну методу. Разлог за мању осетљивост са порастом дубине на којој се налази грешка је простирање промене магнетног поља узроковане том грешком (сл. 25). Приликом испитивања у лабораторији, стварањем идеалних услова за извођење конкретног испитивања на конкретном комаду који се испитује могуће је откривање грешке на дубини и до 20 mm. Ипак, због велике тежине постизања идеалних услова,

у пракси се сматра да је грешке испитивањем магнетном методом могуће открити на дубини не већој од 2 mm до 3 mm.



Слика 25. Разлика при регистравању пукотине у зависности од њене дубине

5.3. Методе магнетних испитивања

У зависности од начина наношења феромагнетних честица и у зависности од врсте електричне струје којом се врши намагнетисавање испитиваног предмета могуће је направити класификацију магнетних метода.

Са аспекта наношења феромагнетних честица:

- мокри начин наношења честица и
- суви начин наношења честица.

Са аспекта врсте електричне струје:

- пропуштање једносмерне струје и
- пропуштање наизменичне струје.

Мокри начин наношења честица

При испитивању магнетном методом коришћењем мокрог начина наношења честица, испитивани комад се или прска смешом, или урања у смешу врло финих феромагнетних честица и минералних уља. У овој методи, најчешће се користе флуоресцентне феромагнетне честице, јер се њима постиже највећи контраст у односу на испитивани део (користећи UV светлост). Мокрим начином наношења честица најчешће се испитују предмети мањих габарита из два главна разлога:

- неће доћи до расипања честица и
- испитиване узорке је могуће потопити у смешу честица и уља.

Суви начин наношења честица

Код овог начина извођења магнетног испитивања, феромагнетне честице се посипају по испитиваном делу. Финоћа честица које се користе у овом начину испитивања је мања него при испитивању мокрим поступком. Овај поступак првенствено се користи за откривање грешака испод површине у испитиваном комаду, и најчешће се користи у комбинацији са преносивим магнетним уређајима за испитивање. Суви начин наношења честица, због осетљивости на унутрашње

грешке, посебну примену је нашао у испитивању заварених спојева магнетном методом.

Независно од тога да ли се користи мокри начин наношења честица или суви начин наношења честица, потребно је обратити пазити на квалитет феромагнетних честица (праха) које се користе. Особине праха на које треба посебно обратити пажњу су магнетне особине праха, величина коришћених честица, облик честица, садржај праха у раствору праха и уља, као и какав утицај магнетна поља имају на тај конкретни прах.

5.4. Врсте намагнетисавања

Да би се извршило испитивање магнетном методом, прво је потребно намагнетисати испитивани део. То се може извршити трајним магнетима, или електромагнетима. Електромагнети даље могу бити са једносмерном електричном струјом или наизменичном електричном струјом.

Намагнетисавање се може поделити и на основу смера магнетног поља. У зависноти од смера магнетног поља постоје:

- кружно магнетно поље;
- уздужно (лонгитудинално) магнетно поље;
- комбиновано магнетно поље;
- континуирана техника (преглед и интерпретација резултата за време стварања магнетног поља);
- техника перманентног (заосталог) магнетизма (испитивање се заснива само на заосталом магнетизму у испитиваном делу).

Намагнетисавање трајним (природним) магнетом

Магнетни полови природног магнета повезују се са испитиваним делом. Између места на којима су полови магнета повезани, посипају се феромагнетне честице којима се откривају грешке. У случају да се испитују делови већих димензија, врши се посипање честица између места на којима су полови повезани са испитиваним делом, проналазе се грешке, а затим се везе магнетних полови са делом померају за дужину размака између полови. Онда се честице поново посипају. Овај поступак се понавља све док се цео предмет не испита.

Намагнетисавање електромагнетима

Магнетно поље испитиваног предмета може бити кружно или уздужно. Кружно магнетно поље се темељи на томе да се линије магнетног поља, које пролазе кроз испитивани део, формирају у унутрашњости испитиваног предмета, и крећу се кружно по његовој периферији. Уздужно магнетно поље заснива се на томе да кроз испитивани део пролази магнетно поље створено са његове спољашње стране. Линије магнетног поља крећу се паралелно са подужном осом испитивани део.

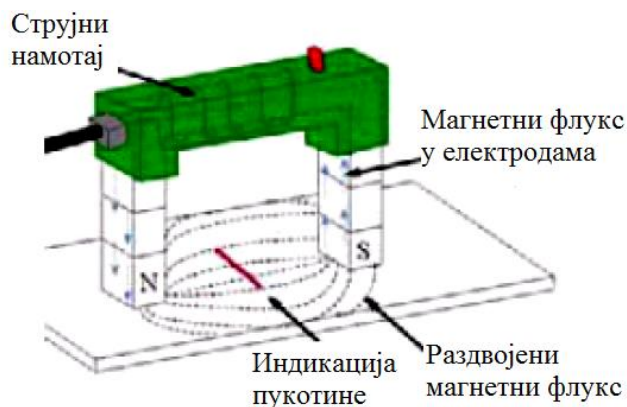
Поред ове поделе, намагнетисавање електромагнетима може се поделити и на директну намагнетисавање и индиректно намагнетисавање.

Индиректно намагнетисавање електромагнетима

При намагнетисавању испитиваног предмета овом методом, магнетно (електромагнетно) поље се ствара коришћењем две електроде. Приликом коришћења ове конкретне методе, одједном је могуће испитати само део предмета између те две електроде (сл. 26).

Овој методи је за рад потребна струја ниског напона. То се ради из више разлога:

- у случају лошијег контакта испитиваног предмета и електрода неће доћи до електричног лука који би био пропраћен локалним прегревањем и
- у случају да електрода склизне са испитиваног дела, не може да повреди оператера.

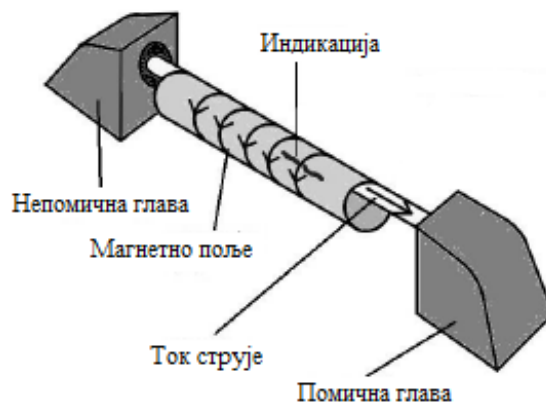


Слика 26. Индиректна магнетизација

Директно намагнетисавање електромагнетом

Директно намагнетисавање изводи се тако што се на кроз испитивани део проводи електрична струја. Пропуштањем електричне струје кроз узорак постиже се стварање магнетног поља (сл. 27). Највидљивије грешке при коришћењу ове методе биће оне које су у таквом положају да су нормалне на линије магнетног поља, док ће све грешке које су под углом у односу на линије магнетног поља бити мање видљиве (видљивост грешке зависиће од угла). Грешке које су истог смера као линије магнетног поља неће бити видљиве.

Већина уређаја за испитивање директним намагнетисавањем је већих димензија и стационарна је. Разлог овога је што се метода највише користи за масовно испитивање дугачких делова (цеви, шипке, профили итд.) индустријске сврхе.

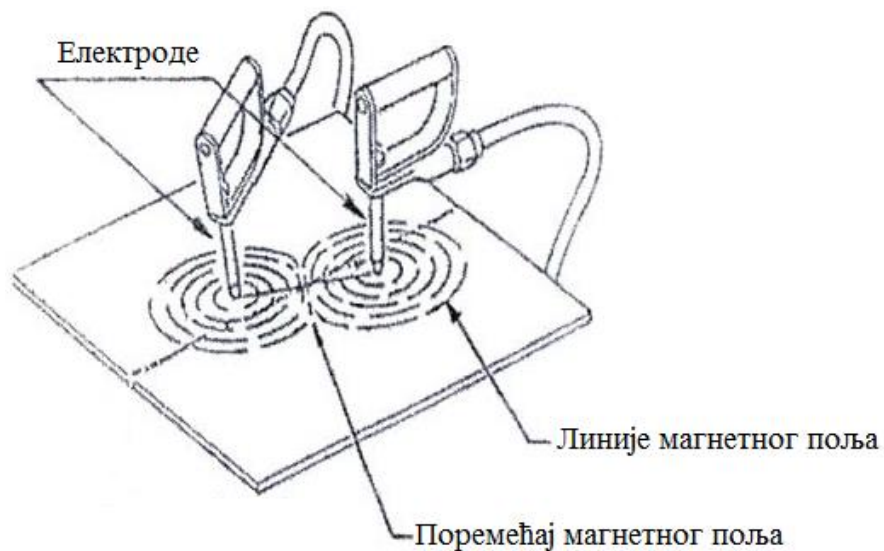


Слика 27. Директно намагнетисавање

Кружно намагнетисавање

Коришћењем ове методе, линије сила магнетног поља формирају се унутар самог испитиваног дела. За то се употребљавају електроде у облику шипки преко којих пролази електрична струја кроз њима ограничену површину испитиваног предмета. На тај начин ствара се електромагнетно поље. Струја се може доводити преко електрода или директно на испитивани део.

Пошто струја пролази са једне електроде на другу, у испитиваном предмету не ствара се магнетни ток константног пресека, већ се ствара магнетно поље које у средини размака електрода достиже максималну ширину. У том делу најмања је густина линија магнетног поља, па се због тога мора водити рачуна о размаку између електрода (сл. 28).



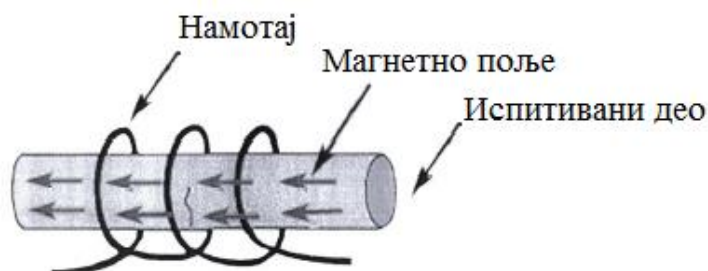
Слика 28. Кружно намагнетисавање

Уздужно намагнетисавање

Користећи уздужно намагнетисавање, испитивање се спроводи тако што се око предмета/дела који се испитује поставља калем. Кроз тај калем пролази једносмерна или наизменична струја. За проналажења нехомогености и грешки у

фино обрађеним машинским комадима користи се наизменична струја, док се за испитивање ливених делова и заварених спојева користи једносмерна струја (сл. 29).

За испитивање делова који су већих дужина, намотај који се налази око испитиваног дела помера се уздуж испитиваног узорка.

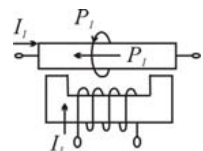
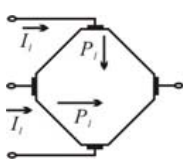
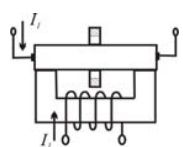


Слика 29. Уздужна магнетизација

За проналажење дисконтинуитета испод површине у одливцима и завареним спојевима уобичајено се употребљава истосмерна струја, а за испитивање фино обрађених машинских диелова наизменична струја. За сваки поступак намагнетисавања такође постоје и основне шеме које су прописане (Таб. 7).

Табела 7. Основне шеме намагнетисавања

Врста намагнетисавања	Начин намагнетисавања	Струја намагнетисавања	Шема намагнетисавања
Уздужна	Магнет	- Једносмерна - Наизменична - Полуталасно исправљена - Импулсна	
	Електромагнет		
	Завојница		
Кружна	Струја кроз предмет испитивања	- Једносмерна - Наизменична - Полуталасно исправљена - Импулсна	
	Струја кроз централну вођицу		
	Струјом контактом		
	Индуковање тока		

Комбинована	Струја кроз објект испитивања и електромагнет	Комбинације: - Једносмерна - Наизменична - Полуталасно исправљена - Импулсна	
	Струја кроз објект у два нормална смера		
	Индукција тока и струја кроз вођицу		

5.5. Подела уређаја за магнетно испитивање

Уређаји за извођење испитивања магнетном методом су врло разноврсни, али је њихова основна подела у 3 групе:

1. Преносни уређаји

Преносни уређаји се одликују лакоћом и конструкцијом која омогућава ширу примену. Најпознатији преносни уређај је магнетни јарам, који може бити израђен од трајног магнета или електромагнета. Испитивани предмет се намагнетише магнетним пољем које се затвара између полова магнета, тзв. стопа, прислоњених на испитивани предмет. Ради постизања што бољег преноса магнетног поља треба остварити што бољи контакт са испитиваним предметом. У ту сврху, магнетни полови, тзв. стопе јарама, су помичне, а обликом и прикладним додацима прилагођене разним облицима површине. Размак стопа се назива „дужина стезања“, будући да се предмети често испитују стезањем између стопа јарма. Дужина стезања не сме бити већа од предвиђене поступком испитивања, јер јачина магнетног поља зависи од дужине стезања. Хомогеност унешеног магнетног поља у испитивани предмет биће већа што је дужина стезања мања. Техника испитивања јармом се користи само за површинске грешке, јер су магнетна поља слабија. Основна предност електромагнетног јарма у односу на јарам сталног магнета је јачина магнетног поља која се може постићи.

Основне предности јарма у односу на друге врсте магнетних уређаја су :

- једноставно руковање;
- могућност детекције грешака свих смерова;
- добра осетљивост на површинске грешке;
- нема опасности од искрења и оштећења контактне површине;
- нижа цена.

Основни недостаци јарма у односу на друге врсте магнетних уређаја су :

- немогућност испитивања предмета сложене геометрије;
- слаба осетљивост на потповршинске грешке;
- најчешће немогућности регулисања јачине поља;
- дуготрајност испитивања, када се ради о великом предмету.

2. Превозни уређаји

Превозни уређаји су по карактеристикама слични преносним, само су уграђени већи распони јачина и могућности контроле параметара испитивања. На тржишту постоји цели низ уређаја у распону јачина до 15 000 А излазне електричне струје, а импулсним намагнетисавањем се могу постићи и веће вредности. Предности и недостаци ових уређаја су подударни са преносним уређајима.

Употребљавају се за испитивање већих делова и конструкција. Намагнетисавање може бити делимично (помоћу електрода) и се ствара кружно магнетно поље.

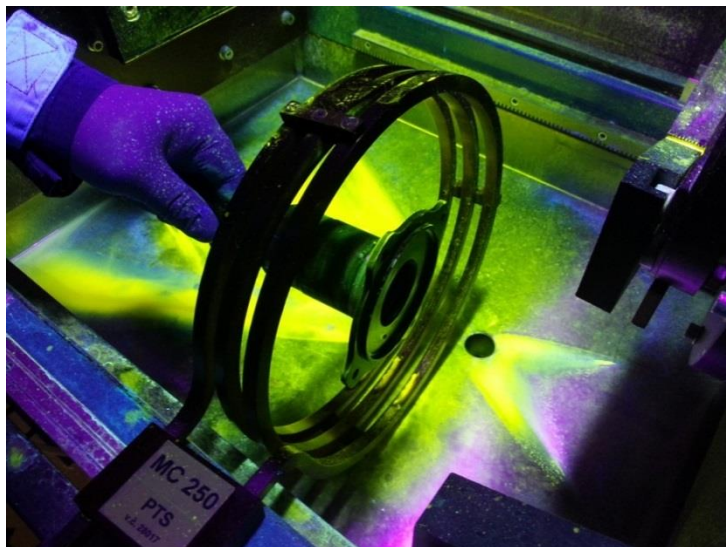
3. Стационарни уређаји

Најчешће су предвиђени за рад мокром методом, па зато имају уређај за константно мешање смеше која се користи за испитивање, пумпу и прскалицу која осигурава једнако посипање предмета смешом. Стационарни уређаји садрже, поред склопова за намагнетисавање (електромагнет, завојница, генератор), додатне уређаје за расвету, чување, доток и наношење смеше, разне склопке и мерне инструменте, као и уређај за размагнетизовање. Магнетно поље се у већини случајева постиже јармом, који је у овом случају великих димензија. Ови уређаји су најчешће укључени у полуаутоматску или аутоматску контролу у производним линијама. Једна од основних предности стационарних уређаја је испитивање објекта у целости, одједном.

Употребљавају се углавном у масовној производњи за тестирање дугих производа. Могу бити изведени да се испитивани производ ураћа у смешу уља са магнетним честицама у току испитивања.

5.6. Примери испитивања магнетном методом у пракси

Најчешћу примену у пракси имају магнетне методе намагнетисавања калемом и намагнетисавања електромагнетом, за које су представљени примери из праксе (сл. 30 и сл. 31).



Слика 30. Одређивања грешака у магнетном пољу методом намагнетисавања калемом



Слика 31. Одређивања грешака у магнетном пољу методом намагнетисавања електромагнетом

5.7. Предности и недостаци магнетне методе

Метода магнетно испитивања данас је рако развије и врло широко примењивана. Главни разлози за то, а уједно и главне предности ове методе, су што је овај поступак испитивање релативно једноставан, релативно брз и јефтин (у случају уређаја који се користе за појединачно испитивање делова).

Ипак, главни недостатак ове методе је у томе што се овом методом може открити само да ли постоје грешке или неправилности у испитиваном делу, као и њихов положај на делу. Било која димензија откривених неправилности (грешака) је готово немогућа за тачно и прецизно одређивање.

6. Ултразвучна дефектоскопија

6.1. Опште напомене о ултразвучној дефектоскопији

Ако дође до промене физичког стања у материјалу, и ако се та промена шири од извора промене одређеном брзином, она се може чути у неком облику (звук, прасак или шум), у зависности од правилности титрања. Под титрањем сматра се периодична промена стања чија учесталост се мери у херцима (Hz). Титрање има своју фреквенцију, и у зависности од те фреквенције човек може да чује или не чује титрање. Подела учесталости по фреквенцији је на:

- инфразвук (до 16 Hz);
- чујни звук (од 16 Hz до 20 kHz);
- ултразвук (преко 20 kHz).

Ултразвучни таласи кроз гасове и течности могу се кретати само у облику лонгитудиналних (уздужних) таласа, док се кроз тела у чврстом агрегатном стању крећу у облику трансверзалних таласа. Ако ултразвучни талас дође до границе или краја чврстог тела, он ће се, по правилу таласног кретања, одбити, ломити, доћи ће до његове дифракције или до неке друге врсте међусобног деловања ултразвучне енергије и тела. Управо ове особине ултразвучних таласа искоришћене су за стварање методе испитивања ултразвуком, односно ултразвучне дефектоскопије.

Користећи извор ултразвучних таласа у облику сонде, која се прислања на сами предмет испитивања или урања у течност у којој се налази испитивани предмет, кроз испитивани део пропуштају се ултразвучни таласи. Таласи се стварају активним делом унутар сонде који се назива претварач, и који титра стварајући ултразвучне таласе. Како се ултразвучни таласи кроз течност (у случају урањања сонде) као и кроз гас (у случају прислањања сонде уз испитивани део) крећу само праволинијски, први додиру ултразвучних таласа са испитиваним делом у чврстом стању, они ће променити свој облик, чиме ће се добити границе испитиваног дела. Исто тако, у случају да ултразвучни таласи, док се крећу кроз испитивани део, наиђу на неправилност унутар самог дела, доћи ће до промене њиховог облика кретања (услед одбијања о границу неправилности), при чему ће се јавити јасна индикација да неправилност постоји.

Ако се добијене индикације у промени ултразвучне енергије правилно интерпретирају, могуће је одредити тачно стање материјала испитиваног дела, као и параметре откривене неправилности.

Настајање звучних и ултразвучних таласа може бити разнолико и темељи се на два принципа. Први принцип је магнетострикцијски принцип, док је други пиезоелектрични принцип. Бољу и ширу примену у испитивању делова и конструкција без разарања ултразвучним (као и акустичним) методама нашао је пиезоелектрични принцип.

Ултразвук, као и било који други облик титраја, ствара своје поље које је одређене снаге. У зависности од снаге тог поља, ултразвук се дели на две главне целине, а то су:

- ултразвук велике снаге, до 10 kW (користи се за заваривање, чишћење, у медицини итд.);
- ултразвук мале снаге, од 0,001 W до 1 W (користи се за контролу и мерење, аларме, у медицинској дијагностици итд.).

При извођењу ултразвучне дефектоскопије, мора се обратити пажња на 5 основних параметара који утичу на ток и резултат испитивања. То су фреквенција ултразвука, интензитет ултразвука, звучни притисак, импеданса испитиваног материјала као и брзина ултразвука при простирању кроз испитивани материјал. Поред ових основних параметара, постоји велики број величина које утичу на испитивање, а које су везане за ултразвучну енергију, као и физичке величине које се односе на технику рада, предмет који се испитује, па и опрему која се користи.

Поред величина везаних за ултразвучну енергију, као и физичких величина које утичу на ток испитивања, треба обратити пажњу и на акустичне величине које су дефинисане акустичним својствима материјала испитиваног дела. Пошто акустична својства материјала произилазе из његовог метарулшког стања као и структуре, треба имати у виду да до промена акустичних својства може доћи и због нехомогености унутар саме структуре материјала, а не само због промене материјала кроз који звук пролази.

6.2. Принцип рада ултразвучне методе

Да би метода испитивања била успешно извршена, потребно је кроз испитивани део непосредно (директним додиром сонде) или посредно (ураћањем у течност) прво пропустити ултразвучне таласе кроз испитивани део, а затим примити излазну ултразвучну енергију, тако да је могуће уочити промене у ултразвучним таласима.

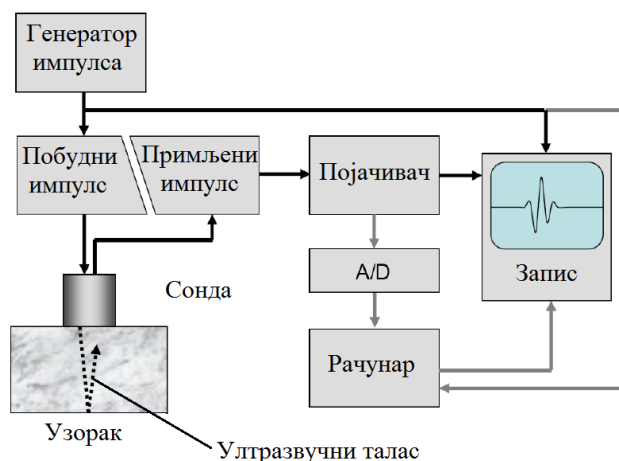
Пријем и одашиљање ултразвука кроз испитивани део врши се помоћу сонди, при чему је једна сонда предајник ултразвучних таласа, а друга пријемник излазних ултразвучних таласа. Уређај који ствара ултразвучне таласе мора бити у могућности да активирна сонду предајник, што се врши слањем електричних импулса, као и да изврши пријем електричних импулса из сонде пријемника о променама у електричној енергији и промени кретања таласа ултразвука. Ултразвучни уређај добијене промене мора бити у могућности да прикаже кориснику.

Делови уређаја за ултразвучну дефектоскопију се деле у две целине:

- Делове за стварање и пријем електричних импулса који обухватају електричне склопове за напајање, генерисање импулса, синхронизацију, појачавање, као и друге функције и
- Електрични склопови задужени за обраду података добијених кроз електричне импулсе сонде пријемника, као и за приказивање добијених информација кориснику уређаја.

У стандардној техници фреквенција ултразвучног импулса је најчешће у распону од 0,5 MHz до 15 MHz. Фреквенција ултразвучног импулса одређена је избором сонде. Када генератор импулса побуди електричним импулсом сонду, у сонди се генерише ултразвучно титрање. Довођењем сонде у контакт са делом (или

течношћу у коју је део уроњен), кроз испитивани део се шири ултразвук. Ултразвучни таласи, емитовани у предмет испитивања, шире се кроз предмет до његог краја (или до краја посуде са течносту у коју је део уроњен), одбијају се и враћају назад. Сonda прихвата ултразвук, претвара га у електронски импулс на претварачу и води преко појачивача и исправљача на хоризонталне отпорске плочице катодне цеви. Оне дају електронском сигналу отпор. Сваки отпор електронског снопа видљив је на катодној цеви као сигнал (сл. 32).

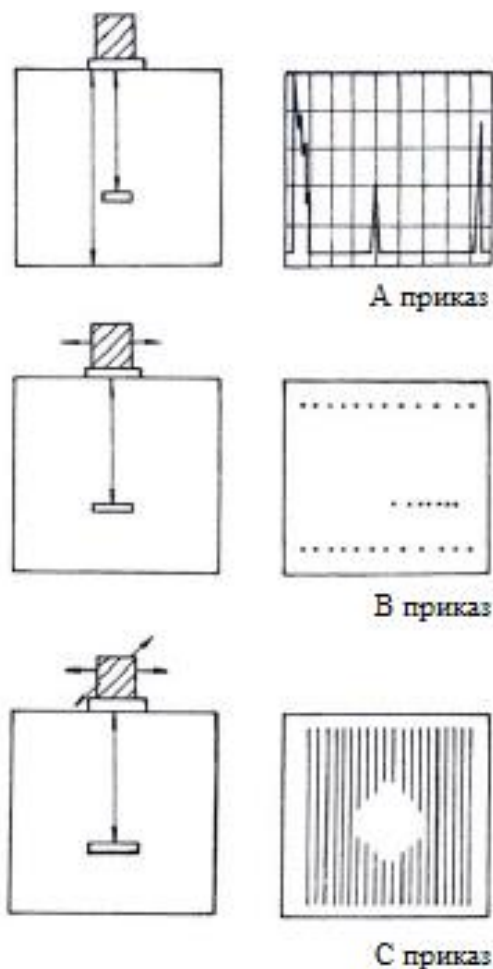


Слика 32. Ултразвучна метода

Динамички отпор материјала кретању ултразвучног таласа кроз материјал, назива се акустична импеданса. Она је позната за сваки материјал и константна је, али је различита за различите материјале. Разлика између акустичне импедансе метала и течности или гасова је врло велика па ће се при ултразвучној дефектоскопији дела који садржи неку нехомогеност (пукотину, укључак итд.) ултразвук у значајној мери одбити о ту нехомогеност, откривајући тиме да је наишао на препреку, односно грешку.

Ако је позната акустична импеданса за материјал од ког је израђен испитивани део, врло једноставно се може одредити удаљеност пронађене грешке (рефлектора таласа) од извора и пријемника таласа. Висина одјека таласа биће податак о величини нехомогености, односно грешке.

Приказ који се користи у испитивању делова и конструкција ултразвучном методом је А приказ. У овом приказу, таласи одбијени од нехомогености приказују се на катодној цеви у облику вертикалних импулса. Поред А приказа, постоје и В и С приказ, који се највише користе у медицини (сл. 33).



Слика 33. Начини приказивања резултата ултразвучних испитивања

6.3. Методе испитивања ултразвучном дефектоскопијом

Ултразвучна дефектоскопија дели се на већи број метода од којих свака има своју примену, неке ужу а неке ширу. Данас се ипак користи подела метода ултразвучне дефектоскопије која издваја три основне групе метода испитивања:

- методе прозвучавања;
- методе резонанце;
- импулсне – ехо методе.

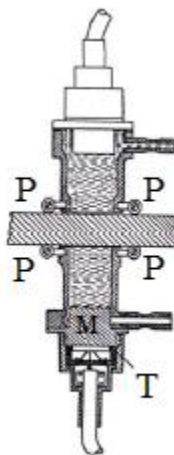
Метода прозвучавања

Испитивање прозвучавањем се може применити на основу мерења интензитета таласа, који су прошли кроз испитивани предмет или на основу претварања ултразвучне слике у оптичку слику унутрашњости предмета.

Интензитетна метода се заснива на мерењу интензитета таласа који су прошли кроз испитивани предмет. Овом методом, грешка се може уочити само онда ако је пад интензитета услед грешке већи од пада интензитета при прелазу са

предајне сонде на материјал и са материјала на пријемну сонду, односно при акустичном преносу енергије са сонде на средину и обрнуто.

Питање преноса ултразвучне енергије са сонде на средину простирања код свих ултразвучних апарата представља проблем и о њему се увек води рачуна. Међутим, код интензитетне методе и уопште код свих метода прозвучавања, овај проблем има посебан значај јер се мерења баш заснивају на мерењу интензитета таласа који су прошли кроз испитивани предмет. За додирне средине највише се користе течности у танком слоју. Оне треба да спрече појаву ваздушног међупростора између додирних површина сонде и предмета. При томе важну улогу игра величина притиска и додирна површина налегања. Пошто су то све фактори субјективне природе код ручне манипулације испитивања, ова метода има практичан значај само код механизованог испитивања, где се могу остварити исти притисак и иста додирна површина налегања, а и аутоматско довођење контактне течности. То је постигнуто применом посебних сонди (сл. 34).

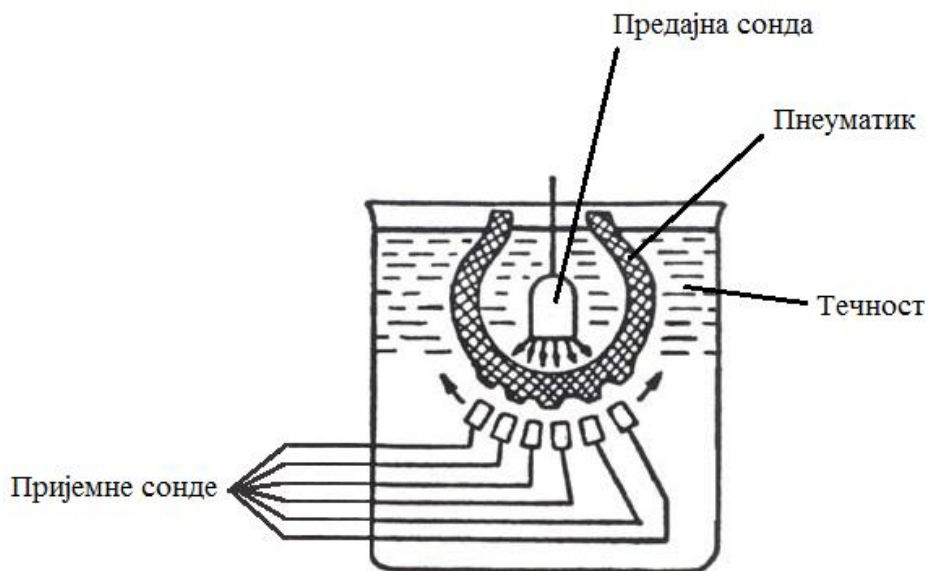


Слика 34. Пресек сонде за испитивање интензитетном методом прозвучивања

Ултразвучна енергија се преноси између испитиваног дела и сонде помоћу воде. Вода стално дотиче и отиче због синхроних покрета обе сонде. За време спровођења испитивања, сонде су везане за ваљке Р, при чему су оне стационарне, а део који се испитује котрља се преко тих ваљака и помера. Побуда ултразвучним таласима врши се преко кварце плоче Т која је везана за металну плочу М. Преко ње се врши пренос таласа на воду, а они се одатле даље простиру на испитивани део. Таласи даље путују кроз испитивани део, преносе се на воду и прелазе на пријемну сонду, која добијене информације претвара у електричне импулсе. Потребно је спречити и стварање стојећих таласа, што се постиже фреквентном модулацијом основне учесталости.

Други начин извођења интензитетне методе испитивања ултразвуком је потпуним потапањем испитиваног предмета, као и сонди, у посуду са течномљу (најчешће је то вода). Овакав принцип највећу примену има у испитивању пнеуматика моторних возила. Пнеуматици се потапају у течност, при чему се предајна сонда поставља у њихову унутрашњост. Положај сонде је такав да се ултразвучни таласи које она производи крећу у нормалној равни у односу на зид пнеуматика. Са спољашње стране пнеуматика постављене су пријемне сонде. На свакој од тих сонди налази се појачивач као и индикатор о пријему ултразвучних таласа (индикатор је најчешће у облику сијалице). У току испитивања пнеуматик се

окреће око своје осе, а тачан положај предајне сонде је такав да се налази тачно у оси пнеуматика (сл. 35).



Слика 35. Уређај за испитивање аутомобилских гума

Регистровање грешке приликом испитивања интензитетном методом условљено је у великој мери величином грешке коју је потребно открити. Она мора имати одређену дебљину у правцу простирања ултразвучних таласа да би регистровање грешке било могуће, односно како би се довољно ултразвучне енергије рефлектовало од ње. Код учесталости од 5 MHz, при испитивању материјала са грешко величине $d=10^{-7}$ mm, количина енергије која се рефлектује од грешке је 20%, док код грешке величине $d=10^{-6}$ mm тај проценат расте на 95%.

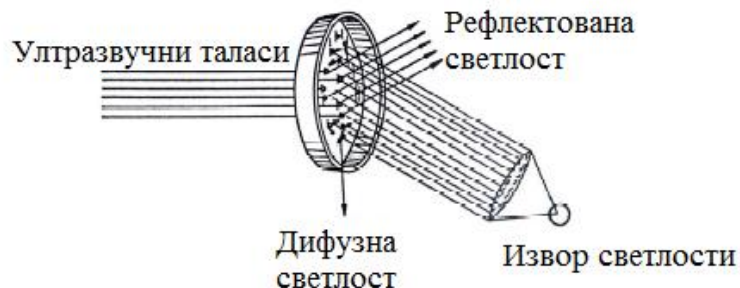
Због наведеног недостатка, као и због чињенице да је на испитивање утиче не само величина већ и положај грешке, (имајући виду потребу за сузбијањем стојећих таласа) примена интензитетне методе је данас јако уска и ова метода користи се само у специјалним случајевима.

Оптичка метода је још једна метода која спада у интензитетне методе испитивања ултразвуком. Темелј ове методе је у Полмановој завеси (по научнику Полману који је смислио овај метод испитивања). Полманова завеса састоји се од једне посуде, обично кружног облика. Зид посуде чини прстен, ширине 10 - 20 mm. Страна посуде, на коју падају ултразвучни таласи, начињена је од танке, ултразвучно пропустљиве, мембране. Друга страна је од провидног материјала (стакла или плексигласа). У посуду се налази мешавина течности ксилола и ситних алуминијумских листића реда величине неколико микрометара. Ако је пречник ових листића много мањи од таласне дужине течности, а однос пречника према дебљини листића велики (пречник листића око 20 μm , дебљина листића око 1,5 μm), онда ће се овај листић у ултразвучном пољу кретати под дејством таласа и поставиће се паралелно са челом таласа.

На местима где се таласи простиру, листићи ће бити управни у односу на страну Полманове завесе, а на местима где нема таласа, листићи ће бити у најразличитијим положајима. Када се овакав застор прикладно осветли, управни листићи ће рефлектовати светлост у паралелном снопу, а на местима где листићи

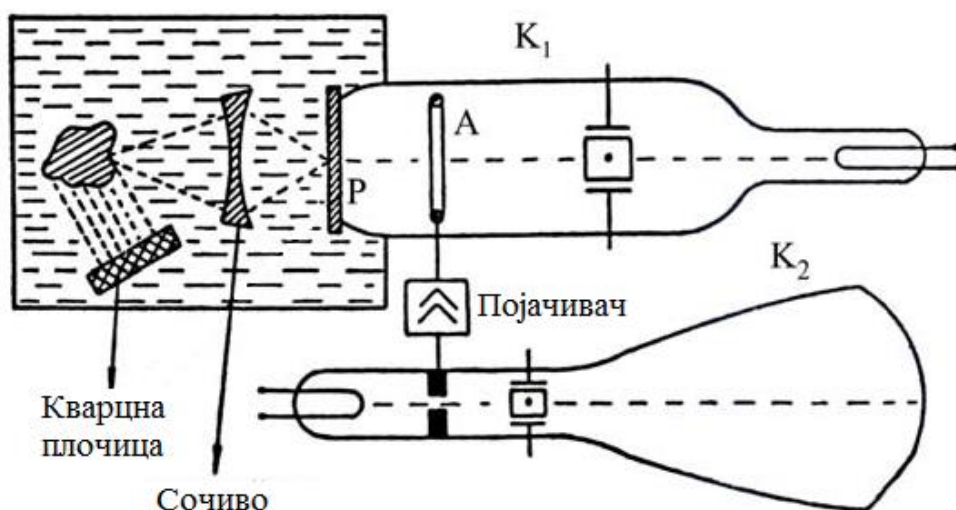
нису управни (где нема ултразвучних таласа), јавиће се дифузна светлост. На тај начин ће се видети слика коју носе ултразвучни таласи према њиховом распореду интензитета по површини пресека снопа таласа (сл. 36).

Пренос ултразвучних таласа на Полманову завесу постиже се његовим потапањем у воду кроз коју се простиру ултразвучни таласи који су претходно прошли кроз испитивани предмет.



Слика 36. Принцип рада Полманове завесе

Користећи се овим принципом, осмишљен је и направљен ултразвучни микроскоп. Он се састоји од посуде са водом у коју се поставља предмет на ком се врши испитивање. Унутар ове посуде налазе се кварцна плочица која ствара ултразвучне таласе и шаље их ка испитиваном делу, као и сочиво које прикупља и усмерава одбијене таласе од испитиваног дела ка плочи Р чија је једна страна такође потопљена у посуду. Плоча је направљена од кристала кварца, на њој се ствара ултразвучна „слика“ о предмету који се испитује и на њеној другој страни ствара се електрично поље које одговара добијеној ултразвучној „слици“. Како је ова плоча саставни део катодне цеви K_1 , електрично поље удара у њу. Катодна цев испушта електроне у зависности од облика електричног поља, које прикупља анода А која се налази у катодној цеви K_1 . За сваку тачку на аноди добијају се одговарајући сигнали, који се појачавају у појачивачу и шаљу у катодну цев K_2 . Овим се добија појачана слика дела површине испитиваног предмета, која се посматра ултразвучним сочивом (сл. 37).



Слика 37. Ултразвучни микроскоп

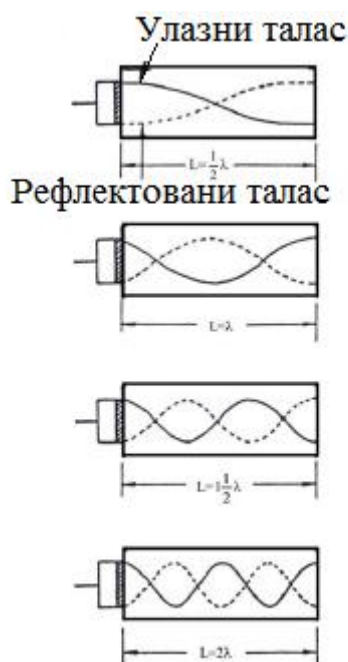
Метода резонанце

Резонанца се пре свега користи за одређивање дебљине материјала у случају да је немогуће приступити обема странама материјала. У специјалним ситуацијама користи се се и за проналажење грешака унатар испитиваног дела.

Резонанца се односи на физичку величину неког материјала. У случају ултразвука, резонанца на основној учесталости постићи ће се у случају да је учесталост ултразвука f_1 пропорционална брзини простирања ултразвучних таласа кроз испитивани материјал c_L , а обрнуто пропорционална двострукој дебљини испитиваног материјала d :

$$f_1 = c_L / 2d \quad (6.1)$$

Између стојећих таласа и појаве резонанце постоји веза. Кад се појаве стојећи таласи у материјалу чија дебљина износи производ неког целог броја и половине таласне дужине, онда је тај систем у резонанци. Стојећи таласи се могу јавити и на растојању које не износи цели број половина таласних дужина. Када се непрекидно шаље талас у средину коначних димензија, онда ће он доћи до краја средине и рефлектовати се назад према извору. Међутим, ако се и даље талас шаље у простор, рефлектовани таласи ће се враћати. После извесног времена, успоставиће се равнотежно стање, тј. послати талас ће се сабрати са рефлектованим. Појава која настаје после успостављања равнотеже, назива се стојећим таласима (сл. 38).

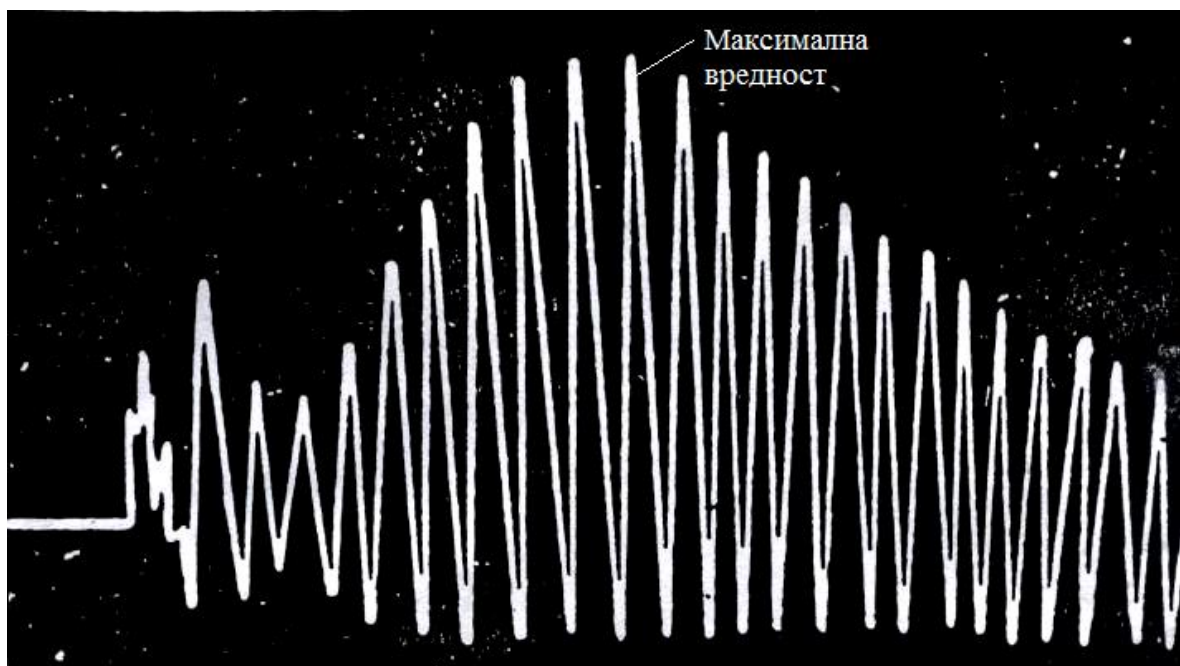


Слика 38. Стојећи таласи у делу који се испитује

Индикација резонанце изводи се на један од два основна начина. Први је на основу дејства на електрични генератор који побуђује сонда, где предмет испитивања највише енергије троши на одржавање повећаних ултразвучних таласа. Други је на основу дејства на ултразвучне таласе, односно ултразвучни талас који је послат у испитивани део се рефлектује и прима назад.

Први систем је врло једноставан. Овај систем се у основи састоји од једног осцилатора променљиве учесталости. Високофреквентни напон се доводи на плочицу од пиезоелектричног кристала (обично кварца). Када је кристал у додиру са металном плочом, преко танког слоја уља или неке друге течности погодне за акустични пренос, у металној плочи ће се произвести ултразвучни талас. Променом учесталости тражиће се појава резонанце. Ако осцилатор може да се подеси на учесталост која ствара у дотичном металу цели број половина таласних дужина, тада ће се десити појава резонанце која ће се манифестовати у повећаним амплитудама треперења у делу испод плочице кристала. Ако се одржавају ова појачана треперења повећаним амплитудама, биће потребно више електричне енергије коју треба да да осцилатор. Дакле, појава резонанце ће се одразити у порасту анодне струје на инструменту.

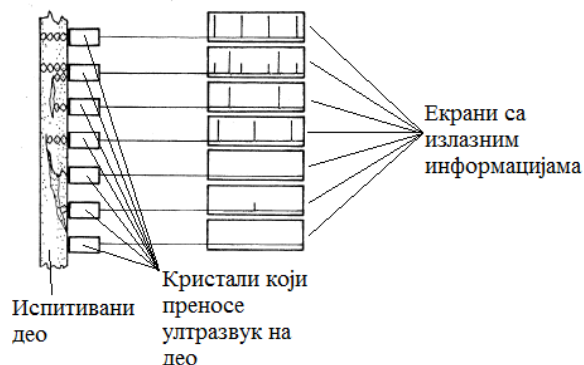
Други систем се ретко користи у специјално израђеним апаратима за извођење овог испитивања, већ користи комбинацију апарата на принципу еха и додатног осцилаторног кола. Предајни део апарата шаље ултразвучне таласе у испитивани део, са константним бројем импулса у секунди. Таласи пролазе кроз део, рефлектују се од његовог краја, и враћају се назад. Број рефлектованих таласа који се одбио назад и стигао до пријемника, у једној секунди времена, зависиће од дебљине испитиваног дела. Додатно осцилаторно коло подешава се на учесталост рефлектованих импулса, при чему се на уређају добија крива учестаности. Резонантна крива са највишим максимумом показује да је при том подешавању додатног кола учестаност рефлектованих сигнала и осцилаторног кола иста (сл. 39). Пошто учестаност рефлектованих импулса зависи од дебљине испитиваног дела, баждарењем осцилаторног кола при овим подешавањима може се добити тачна величина испитиваног дела у јединицама дужине.



Слика 39. Приказ резонантних кривих при подешавању додатног осцилаторног кола

Метода резонанце ултразвучног испитивања делова се, поред наведених примена, може користити и за откривање дисконтинуитета унутар испитиваних делова (најчешће плоча и лимова). Метода се заснива на слању ултразвучних таласа

кроз испитивани део и читања и правилног тумачења добијених рефлектујућих таласа представљених на екрану катодне цеви. У случају да нема дисконтинуитета унутар испитиваног дела, ултразвучни таласи ће се без сметњи простирати до краја испитиваног дела, при чему ће се рефлектовани талас несметано вратити. Ако постоји било који дисконтинуитет унутар испитиваног дела, рефлектовани таласи неће се вратити са истом енергијом или у одговарајућој учестаности (сл. 40).



Слика 40. Испитивање дисконтинуитета методом резонанце

Импулсна-ехо метода

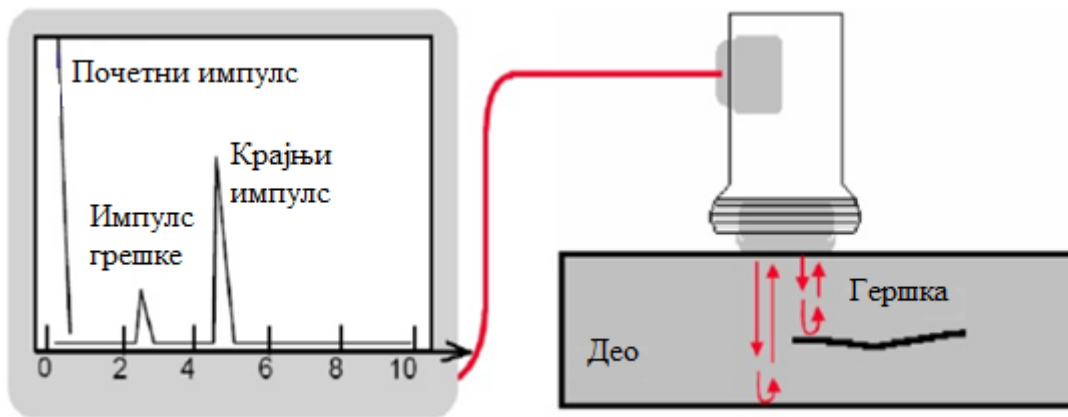
Ова метода је данас врло развијена, користи се за контролу готових машинских делова и конструкција. Брз развој методе узрокован је предностима и широком спектру примене које ова метода пружа у пракси. Њом се могу испитивати како делови и конструкције малих деимензија, тако и предмети и конструкције великих габарита, чак и у случајевима где је то немогуће било којом другом методом без разарања.

Овом методом испитује се хомогеност делова и конструкција, при чему је то могуће извести на два начина:

- методом са две сонде (једна је пријемна, друга предајна);
- методом са једном сондом (у исто време је и пријемна и предајна).

Модерни уређаји за испитивање импулсном-ехо методом могу вршити испитивање и на један и на други поменути начин, у зависности од потребе.

Принцип коришћења импулсне-ехо методе (независно од броја сонди / врсте методе) је да се кроз испитивани део / конструкцију пропуштају ултразвучни таласи. Када пуштени талас крене да се креће кроз испитивани предмет, на екрану катодне цеви појављује се импулс који се назива почетни импулс. Талас путује кроз испитивани део до његовог краја, одбија се и враћа назад, при чему се на екрану појављује импулс који се назива крајњи импулс. У случају да је талас наишао на препреку у току свог кретања кроз испитивани предмет, његов део који је „ударио“ у препреку одбиће се назад и појавити у облику слабијег импулса између почетног и крајњег импулса. Пошто се ултразвучни импулси 50 или више пута шаљу у материјал и исто толико пута рефлектовани примају и региструју, на екрану катодне цеви добија се утисак мирне слике из које се може оценити хомогеност или квалитет испитиваног предмета (сл. 41).



Слика 41. Импулна-ехо метода

Овом методом могу се регистovati јако мале нехомогености у испитиваном делу / конструкцији (ако рефлектују 5% и више одаслане ултразвучне енергије). Удаљеност грешке и њен положај готово не играју улогу, пошто импулна-ехо метода може да региструје нехомогеност чак и на 10m раздаљине. Једино на шта треба обратити пажњу је на могуће грешке које се налазе јако близу сонде. За челик се границе на којој почиње могућност проналажења грешки обично узима као вредност од 1 cm.

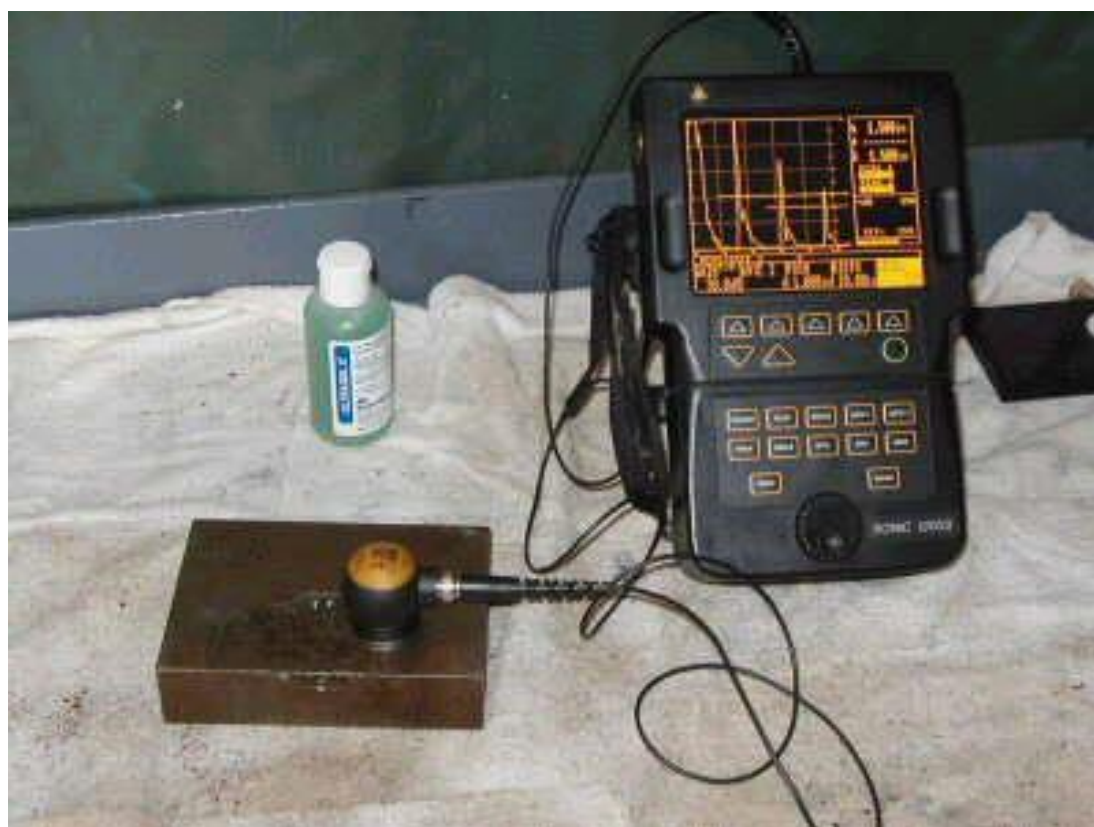
На тачност испитивања немају велики утицај ни субјективни фактори, као ни проблем контакта испитиваног дела / конструкције, већ само прецизност апаратуре. Додатну пажњу при испитивању треба обратити једино у случају испитивања јако сложених конструкција, због појаве вишеструких рефлексија, преламања као и трансформације таласа. Распон фреквенције који се користи код ове методе креће се од 25 kHz до 10 MHz.

6.4. Примери испитивања ултразвучном методом у пракси

Због брзине извођења испитивања, као и због јако високог ниво прецизности и ширине примене неких од ултразвучних метода (импулна-ехо метода), испитивање ултразвуком је јако често у пракси (сл. 42, сл. 43).



Слика 42. Аксијално испитивање металних шипки ултразвуком



Слика 43. Испитивање металне плоче ултразвуком у пракси

6.5. Предности и недостаци ултразвучне методе

Предности ултразвучне методе су:

- метода је релативно неосетљива на околне услове (влага, ветровитост, итд.);
- спровођење контроле је безопасно и не захтева заштитна средства;
- подручје дебљина испитиваног предмета је неограничено;
- уређај и прибор су мали, лагани и лако преносиви;
- довољан је приступ предмету контроле само с једне стране;
- осетљивост методе је релативно висока.

Недостаци методе су:

- сложенији облици конструкције могу бити врло непогодни за извођење ове методе;
- интерпретација налаза контроле врло зависи од знања, искуства и савесности испитивача;
- обука је дуготрајна за сложенија испитивања, чиме се повећава и цена;
- поуздано одређивање грешака могуће је једино приступом грешки с више страна, што често није могуће, а захтева и значајан утрошак времена;
- осим детаљно писаног извештаја (који се саставља након контроле), метода не оставља никакав траг за неке накнадне провере.

7. Радиографске методе

7.1. Опште напомене о радиографским методама

Метода радиографије је у пракси назив под којим се најчешће мисли на рендгенографију или гамаграфију. Често се називом рендгенограм и гамаграм жели нагласити врста извора којим је постигнут радиограм.

Радиографском контролом могу се установити грешке различитих технолошких поступака, као и грешке услед експлоатације производа или конструкције. Ради тако широко примењиве методе контроле и велике разлике између производа унутар којих се спроводи откривање грешки, развијен је низ техника радиографисања од којих треба у сваком поједином случају одабрати најповољнију.

Радиографске методе се, углавном, користе за утврђивање хомогености металних предмета или њихових спојева. Код испитивања се користе x и γ зраци, који на радиографском филму стварају слику предмета и евентуалних грешки, обично у природној величини. Зраци x и γ су електромагнетни таласи веома малих таласних дужина, који се при проласку кроз тврде материјале делом апсорбују. Основни принципи ове методе свode се на следеће: ако се извор x и γ зрачења постави са једне стране узорка, а са друге стране узорка постави се радиографски

филм, тада се на филму појави радиографска слика, значајна за узорак и евентуално присутне грешке.

Ова техника се доста користи у пракси за откривање унутрашњих грешака у завареним спојевима, одливцима и машинским конструкцијама. Извори зрачења при радиографској контроли су рендгенске цеви или палета изотопа.

Рендгенски уређаји су високонапонске цеви до 300 kV. Коришћењем виших напона повећава се пенетрација зрачења кроз материјал, али и димензије опреме. Користе се рендгенски уређаји од 20 kV до 20 MV, што омогућава прозрачивање челика и до 500 mm дебљине.

Као извор γ - зрака, углавном, користе се изотопи Кобалт–60 и Иридијум–192, Цезијум–137, Тантал–170. За специјалне случајеве испитивања могу да се користе и други изотопи.

Да би се добила добра радиографска слика на филму, препоручљиво је користити изворе зрачења са малим пречником и зато се извори зрачења крећу у пречнику од 1 до 4 mm. После одређеног временског излагања радиографског филма извору зрачења, филм се обрађује (развијање, прање, фиксирање, прање, сушење) и на светлосном екрану се добијени радиограм прегледа.

Рад са изворима зрачења захтева посебну пажњу и обученост, тако да се испитивачи обавезно школују кроз курсеве или у специјалним школама (овладавање техником испитивања и мерама заштите).

Филмови за радиографска испитивања су релативно скупи, што поскупљује коришћење ових метода.

У радиографске методе спадају:

- радиографија;
- радиоскопија;
- гамаграфија;
- неутронска радиографија.

7.2. Методе радиографских испитивања

Радиографија

У индустријској пракси је у најширој примени метода радиографије. Та метода темељи се на регистровању разлике интензитета јонизирајућег зрачења које је прошло кроз предмет испитивања, узроковане различитом апсорпцијом у појединим деловима објекта. Зрачење се, ради интерпретације резултата, региструје стварањем сталне слике, тј. радиограма. Радиограм се може добити на радиографски осетљивом филму, папиру или на електростатички осетљивом материјалу.

Квалитет радиограма или рендгенограма је лакше постићи с обзиром да се на рендгенском уређају могу финије подешавати параметри снимања, док је код рада с гама уређајима подешавање ограничено врстом извора. Врста извора, односно изотоп, има дефинисано зрачење и продорност које не мора увек бити прикладно за дебљину снимања. Мере заштите и цена ограничавају кориштење већег броја извора, чиме би се постигла већа могућност прилагођавања извора предмету испитивања. С

друге стране, практичност примене и независност од спољашњег извора енергије даје гамаграфији широку примену на теренским испитивањима.

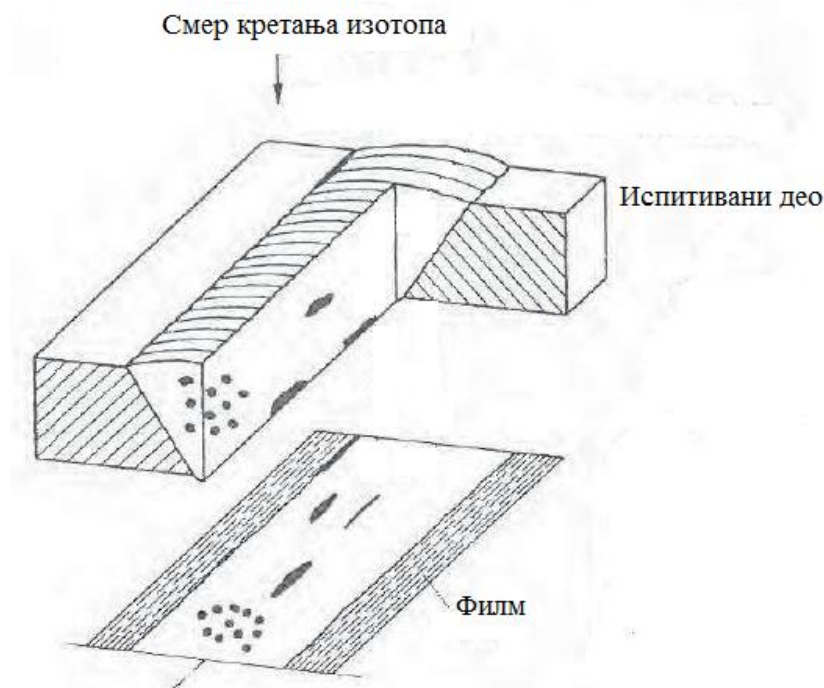
По начину прозиравања и/или регистровања зрачења, радиографија може бити ручна, полуаутоматска или аутоматска. Рендгенски уређаји се обично означавају и волтажом рендгенске цеви. Што је већи напон, то је продорност зрачења већа и омогућава испитивање, односно радиографирање већих дебљина материјала. Напон на рендгенској цеви индустријских уређаја се креће у подручју од 50 kV до приближно 400 kV, односно до 20 MV на линеарним акцелераторима. Највећа дебљина која се може снимити са задовољавајућом осетљивошћу радиограма достиже 500 mm за челика или еквивалентна дебљина у случају других материјала. Гамаграфија се најчешће служи гама изворима Иридиј–192 за мање дебљине материјала, односно изотопом Кобалт–60 у случају већих дебљина или материјала веће апсорпције.

Радиографском контролом могу се установити грешке различитих технолошких поступака, као и грешке настале експлоатацијом производа или конструкције. Ради тако широко примењиве методе контроле и знатне различитости производа за које се проводи откривање грешака, развијен је низ радиографских техника од којих треба у сваком поједином случају одабрати најповољнију. Међутим, радијационе методе су скупе методе испитивања без разарања, јер је цена филма висока, а други већи недостатак је нужност заштите од јонизујућег зрачења. Већ дуже време радиографија је у многим случајевима успешно замењена ултразвучном методом контроле.

Извор зрачења се налази с једне стране објекта, а на супротној страни уз објекат је приљубљен филм за регистровање пролазног зрачења.

Зрачење се, при пролазу кроз предмет испитивања, апсорбује и то у већој мери на местима веће дебљине, због чега долази до промене интензитета пролазног зрачења. Промена интензитета пролазног зрачења узрокује различита зацрњења филма, и те разлике у зацрњењима називају се радиографски контрасти.

Интензитет пролазног зрачења зависи од дебљине предмета испитивања на посматраном месту и од коефицијента апсорпције материјала кроз које је зрачење прошло. Неправилности које се очекују у предмету су најчешће празнине, као и метални и неметални укључци. Интензитет зрачења након пролаза кроз неправилности густине мање од основног материјала биће већи од интензитета зрачења које пролази кроз пресек предмета без неправилности. Осим тога, свако смањење дебљине на путу зрачења ће такође за резултат имати већи интензитет пролазног зрачења на месту стањења у односу на интензитет зрачења које пролази кроз окружење веће дебљине. На филм ће деловати зрачење различитог интензитета, тј. на филм ће се пресликати овај, у зависности одположају, промењиви интензитет (сл. 44).



Слика 44. Радиографија испитиваног дела

Свака нехомогеност у материјалу (пукотине, поре, укључци) показује се на филму као различито зацрњење.

Квалитет снимка (добар контраст) зависи од:

- јачине (интензитета) рендгенских зрака;
- фокусног растојања;
- величине секундарног зрачења;
- накнадној обради филма.

Накнадна обрада се састоји од развијања, фиксирања и сушења филма. Након тога се анализира добијени снимак.

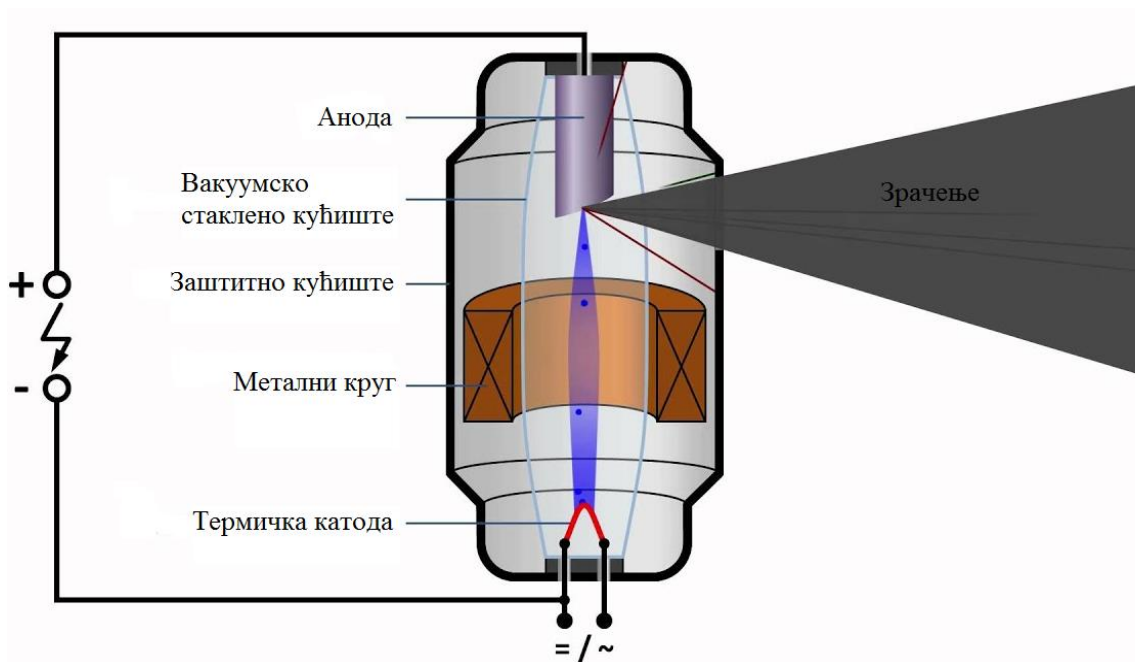
Технике испитивања које спадају у методу испитивања радиографијом су:

- рендгенска цев;
- дигитална радиографија;
- томографија;
- компјутеризована томографија.

Рендгенска цев користи се као један од метода испитивања радиографијом, и за стварање радиограма (испитивање) користи x -зраке. Ови зраци су мале таласне дужине, и врло су продорни.

При извођењу испитивања, постоје три групе елемената потребни за извођење ове методе. То су рендгенска цев, елементи потребни за функционисање редгентске цеви и елементи за заштиту испитивача/корисника од зрачења.

Рендгенска цев састоји се од аноде и термичке катодe (катода са жарном нити) које се налазе унутар вакуумског стакленог кућишта. Вакуум је потребан да би се обезбедио несметан пролаз електронима који се емитују између електрода, као и за заштиту жарне нити од оксидације. Због пролажења струје кроз катоду, долази до отпуштања електрона из ње услед њеног загревања. Ови емитовани електрони се помоћу високих, позитивних електричних напоном усмеравају ка аноди. Они се крећу обрзано и приликом судара са анодом, долази до наглог кочења електрона при чему се емитује зрачење. Сам облик кућишта одређен је електричним кругом унутар стакленог кућишта, као и наменом цеви. Око стакленог кућишта налази се заштитно кућиште (сл. 45).



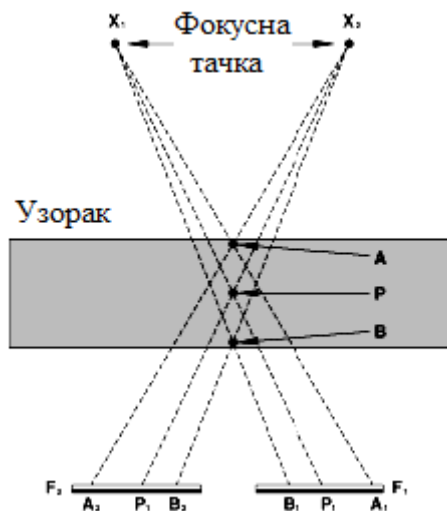
Слика 45. Изглед рендгенске цеви

Дигитална радиографија заснива се на томе да се радиограф предмета ствара линеарним низом дикретних детектора дуж испитиваног предмета. За ову намену користе се CCD сензори, Flat-panel детектори и TFT-panel детектори.

CCD сензори имају доста недостатака, али су доста јефтинији од других детектора. Они захтевају оптичку конверзацију због разлике у величини пројектоване слике и сензора, а такође долази до стварања термалног шума услед загревања сензора.

Flat-panel детектори, као радиографски детектори x -зрака, могу да буду директни (x -зраци се директно претварају у електрични импулс), а могу да буду и индиректни (x -зраци се претварају у видљиву светлост коришћењем најчешће цезијум јодида или гадолинијум оксисулфида).

Томографија је слабије примењивана метода, која се заснива на томе да је слика само једног слоја испитиваног дела „оштра“, док су слике осталих слојева замућене (сл. 46).



Слика 46. Томографија

Компјутеризована томографија је савремена метода испитивања, која се заснива на неким старим методама (употреба x -зрака, техника томографског снимања) и савременим техничким достигнућима (употреба рачунара).

Филм је замењен системом детектора који са великом прецизношћу претварају x -зраке у светлосне или електричне импулсе који се даље преносе у рачунар.

Дефинитивна слика се региструје на магнетној плочи и приказује на монитору, а онда снима на рендгенском филму у више нивоа.

Ова метода користи се у индустрији, мада је ипак највећу примену нашла у медицини.

Радиоскопија

Заснована је на способности рендгенских зрака да пролазе кроз материјал и да их он апсорбује. Део који се испитује озрачава се x -зрацима и, зависно од материјала, он апсорбује одређену количину x -зрака. Неапсорбовани део продужава даље кретање, удара у фотографску плочу и на њој ствара слику. Када у комаду материјала постоји нека шупљина, на том месту рендгенски зраци ће бити мање апсорбовани и на фотографској плочи ће та места бити тамнија. Помоћу ових фотографија могуће је тачно одредити место и положај шупљина у материјалу, али не и њихову дубину. Продорност рендгенских зрака може се регулисати њиховом таласном дужином (што им је задана дужина мања, продорност је већа).

Гамаграфија

Гама зраци настају приликом распада природних или вештачких радиоактивних материјала, а имају исте особине као и рендгенски зраци. Они такође продиру кроз материјал у коме се апсорбују у већој или мањој мери, у зависности од тога да ли пролазе кроз хомогени материјал или наилазе на неке грешке. Међутим, њихова таласна дужина је мања од таласне дужине рендгенских зрака (износи између 10^{-10} и 10^{-11} cm), па због тога гама зраци имају већу моћ продирања. У односу на примену рендгенских зрака прозрачивање гама зрацима (гамаграфија) има следеће предности:

- радиоизотопи и уређаји који служе за прозрачивање материјала (дефектоскопи) лакши су и мање осетљиви на начин руковања и транспорт, тако да су практичнији при теренској контроли;
- димензије гама радиокативних извора могу да буду врло мале, тако да је могуће прозрачивање неприступачних делова;
- гама зрацима је могуће прозрачити предмете већих дебљина него помоћу рендгенских зрака;
- рад са изотопима није везан за извор електричне енергије, мерне инструменте ни трансформаторе;

Недостаци коришћења радиоактивних изотопа су:

- контрасти на радиограму су нешто слабији од контраста на рендгенограму;
- због сталног зрачења радиоизотопа, дефектоскоп се мора држати у посебном склоништу;
- време прозрачивања је дуге;
- оператер може бити на линији деловања зрачења;
- треба имати на располагању неколико гама извора, да би се у датом моменту могао изабрати изотоп најпогодније енергије гама зрачења.

Наиме, при избору гама извора треба водити рачуна о врсти и дебљини испитиваног материјала. За прозрачивање дебљих узорака, тежих делова (нпр. челични лив), бирају се радиоизотопи са већом енергијом гама зрачења, док се за прозрачивање тањих узорака лакших делова (нпр. алуминијум) користе изотопи са нижом енергијом гама зрачења.

У индустријској гамаграфији највећу примену су нашли изотопи иридијум (Ir–192), цезијум (Cs–137) и кобалт (Co–60). Искуство је показало да је изотоп Ir–192 најпогоднији за прозрачивање танких узорака дебљине до 20 mm, Co–60 за прозрачавање дебљих узорака.

Радиоактивни изотопи се испоручују у виду коцкица или цилиндара нормираних пречника.

Још један фактор који треба имати у виду је фактор еквиваленције. То је фактор који представља односу апсорпције одређеног материјала у односу на неки други (најчешће челик). Апсорбција се мења како за различите материјале, тако и за промене енергије зрачења (Таб. 8).

Табела 8. Фактори еквиваленције

	х-Зраци, kV					х-Зраци, MV			γ-Зраци			
Мат.	50	100	150	200	400	1	2	15-30	¹⁷⁰ Tm	¹⁹² Ir	¹³⁷ Cs	⁶⁰ Co
Mg	0,03	0,06	0,12	0,18	0,22	0,23	0,24	0,19	0,16	0,22	0,23	0,23
Al	0,05	0,08	0,16	0,25	0,32	0,34	0,34	0,26	0,29	0,34	0,34	0,34
Ti	0,35	0,37	0,42	0,50	0,54	0,57	0,57	0,50	0,52	0,56	0,57	0,57
Č	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Ni	1,44	1,39	1,35	1,27	1,18	1,15	1,15	1,21	1,22	1,15	1,15	1,15
Cu-Sn	1,52	1,46	1,39	1,29	1,15	1,11	1,11	1,21	1,21	1,11	1,11	1,11
Zn	1,35	1,28	1,12	1,09	0,95	0,90	0,90	1,00	1,00	0,91	0,90	0,90
Mo	4,51	4,42	3,79	2,65	1,62	1,29	1,26	1,66	2,14	1,31	1,29	1,26
V	-	-	27,8	18,6	6,75	2,83	2,47	4,04	10,6	4,96	4,21	3,21
Pb	-	-	21,1	14,1	4,94	2,15	1,95	2,51	7,32	3,85	3,28	2,23

Неутронска радиографија

За разлику од претходних метода, неутронска радиографија темељи се на диференцијалној апсорпцији неутрона приликом проласка кроз испитивани део, а не електромагнетног зрачења. Извођење методе заснива се на томе да се кроз испитивани део пропуштају електрони који се на излазу из испитиваног објекта региструју, и помоћу њих ствара се или радиограф или електронска слика испитиваног дела.

Између апсорпције електромагнетног зрачења и апсорпције неутрона постоји значајна разлика, а она је што се неутрони првобитно апсорбују са језгрима атома услед судара са њима.

Нискоенергетске неутроне, који се још називају и неутрони „споре енергије“ (мања од 0,025 eV) у значајној мери апсорбују кадмијум, водоник, као и гадолинијум, док је апсорпција у челику, алуминијуму и олову мања. Неутрони боље продиру кроз металне материјале.

7.3. Примери испитивања радиографским методама у пракси

Иако је испитивање радиографским методама доста скупо, и може бити потенцијално опасно по корисника/испитивача (у случају да се не оствари потребна заштита корисника), оно је доста примењено у пракси и користи се за проверу хомогености и тражење могућих грешки при испитивању бројних делова и конструкција (сл. 47 и сл. 48).



Слика 47. Испитивање цеви радиографском методом



Слика 48. Извођење испитивања радиографском методом

7.4. Предности и недостаци радиографских метода

Предности радиографских метода су:

- откривају површинске и унутрашње недостатке;
- могу се прегледати и недоступна места конструкција које се испитују;
- припрема делова пре испитивања је минимална;
- преносиви уређаји су малих димензија.

Недостаци радиографских метода у односу на друге методе испитивања без разарања:

- радиографија је скупа, посебно ако се ради стационарним уређајима са филмом;
- испитивање на терену може трајати дуго, пошто је потребно дуже време за експозицију филма (посебно код дебелих зидова испитиваних делова);
- извори зрачења морају бити малог интензитета ради заштите особља;
- преносивом радиграфском опремом могуће је продирање у челик дубине до 75 mm;
- неке грешке се не могу открити (микропорозност, уске пукотине, издужени укључци);
- зрачење је опасно по човека, јер α и γ зраци уништавају ћелије људског организма.

8. Испитивање херметичности заварених посуда

8.1. Опште о испитивању херметичности заварених посуда

Испитивање херметичности заварених посуда врши се ради провере пропустљивости зидова испитиване посуде, као и шавова на посуди.

Испитивања се изводе коришћењем флуида (у ширем смислу), биле то течности, гасови, или комбинација течности и гасова. При испитивању посуда, у пракси се јављају два типа испитивања, а то су:

- испитивање притиском и
- испитивање пропусности.

8.2. Методе испитивања херметичности заварених посуда

Испитивање херметички заварених посуда врши се одмах након завршене производње посуда. Посуде се испитују са више метода, од којих је прва испитивање притиском, а затим следи испитивање пропусности посуде.

Испитивање притиском

Ова метода испитивања обавља се одмах након завршених заваривачких радова, прегледа и топлотне обраде израђене посуде. То прво испитивања спроводи се у складу са прописаним стандардом. Прво испитивање спроводи произвођач, док сва касније испитивања изводи корисник (била то нека фирма или појединац).

Испитивање притиском може да се обави помоћу:

- течности под притиском;
- гасова под притиском;
- комбинације течности и гасова.

Испитивање течностима врши се упумпавањем течности (најчешће воде), под притиском у испитивану херметички заварену посуду, где се након тога приступа прегледу посуде.

С обзиром да се у херметичкој посуди ствара притисак, потребно је одредити колики притисак течности посуда мора да буде у могућности да издржи. То се одређује релацијом између радног притиска посуде (P_r) и испитног притиска (P_i):

$$P_i = 1,3 \cdot P_r \quad (8.1)$$

Испитивани притисци мере се у барима, и то мерење врши се помоћу најмање два манометра (сл. 49). Тачност манометара је одређена у односу на испитиване притиске, при чему тачност манометра за радне притиске до 40 bar мора бити 1,6%, а тачност манометра за испитивање притисака преко 40 bar мора бити 1,0%. Такође је потребно обратити пажњу на распон скале манометра, при чему скала мора бити бар 50% веће бројне вредности од највишег радног притиска посуде која се испитује.



Слика 49. Манометар

Испитивање се врши коришћењем течности на температураи између 10°C и 50°C, при чему се посуда мора налазити под притиском довољно дуго да се изврши преглед, али не краће од 10 минута.

Испитивање гасом под притиском користи се у ситуацијама када је немогуће напунити испитивану посуду течностима уз потпуно испуштање ваздуха из ње, или када присуство течности унутар посуде није дозвољено због услова употребе посуде.

Приликом примене овог поступка, због могућих последица, мора се спречити појава кртог лома па је обавезно:

- извршити контролу без разарања у обиму од 100% неким другим методом без разарања (радиографско или ултразвучно испитивање);
- проверити да се експанзијом гаса из извора са вишим притиском не охлади метал посуде испод температуре која је за 25°C виша од прелазне температуре;

- предузети све мере за заштиту људи и околине

Притисак гаса у тренутку испитивања у односу на радни притисак посуде је у односу:

$$P_i = 1,1 \cdot P_r \quad (8.2)$$

Притисак гаса у посуди постепено се подиже до испитиваног притиска, задржава се на том притиску 5 минута, а затим се притисак смањује на радни притисак посуде, при ком се врши преглед.

Испитивањем притиском не постиже се провера пропусности суда, већ се траже снажи разарања, деформација или појаве истицања било на зидовима или шавовима посуде.

Након изведеног испитивања, прави се записник који је саставни део документације о квалитету посуде.

Испитивање пропусности

Испитивање пропусности изводи се одмах након испитивања притиском. Мора се напоменути да потпуна непропусност не постоји, независно од квалитета основног материјала посуде или квалитета шавова зава. Уместо тога, тачнији израз је ниво дозвољене пропусности, од кога ће и зависити одабир метода испитивања.

Коректна метода мерења/утврђивања пропусности бира се из одређених података које је прво потребно одредити, а то су:

1. Правац истицања - може се јавити излазак течности / гасова из посуде, или улазак течности / гасова у посуду;
2. Дозвољени ниво пропустљивости – дефинише се у фази пројектовања и завис од неколико фактора:
 - a. Материјални губици – истицања течности или гасова може бити основ за одабир нивоа пропустљивости (нпр. резервоар за гориво)
 - b. Контаминација система или околине – може доћи до оштећења система унутар херметички затворених посуда у случају уласка течности/гаса у њу, а може доћи и до загађивања околине у случају истицања течности или гасова из посуде;
 - c. Поузданост система – пропусност неке посуде у одређеном систему може угрозити функционисање целокупног система (нпр. реакторски канал за нуклеарни реактор);
3. Потребни ниво испитивања – приликом испитивања пропусности могуће је испитивати величине пропусности (мерење губитака) и/или места проточности, што је потребно одредити пре испитивања.

За утврђивање пропусности и/или за њено мерење, као и утврђивања места пропусности постоји разрађен низ метода. Међутим, њихов избор опредељује, поред већ наведених елемената, и осетљивост метода, потребно време за испитивање, укупни трошкови испитивања и преносивост опреме за испитивање.

Методe за извођење испитивања деле се на три основне групе, које имају своје подгрупе:

1. Методe промене притиска – врло једноставна и даје добре резултате; посуде се пуне гасом под притиском до 10% радног притиска посуде, а пропусност се региструје на основу пада/пораста притиска;
2. Акустична метода – заснива се на ултразвучним таласима који настају услед истицања гаса из испитиване посуде под притиском; недостатак методe је што може доћи до лажних индикација;
3. Методe обележивача – врло распрострањена метода због једноставности примене; дели се на:
 - a. Методe испитивања течним обележивачем – принцип је на стварању притиска течности унутар посуде; дели се на:
 - i. Испитивање воденим притиском – пуњење посуде водом под притиском;
 - ii. Испитивање пенетрантским течностима – пуњење посуде течним пенетрантом под притиском;
 - b. Методe испитивања гасним обележивачем – стварање притиска гасану испитиваној посуди; дели се на:
 - i. Испитивање притисцима гаса – посуда се пуни гасом под притиском и потапа у воду (за мање посуде) или премазује раствором сапунице (за велике системе посуде); прати се појава мехурића;
 - ii. Хемијска метода – притисак у посуди ствара се упумпавањем гаса са малим процентом амонијака (1% до 10%), при чему се на спољашњу страну посуде постављају траке натопљене са 5% фенолфталеина; прати се појава љубичастих мрља на тракама;
 - iii. Радијациона метода – у посебној комори ствара се гасни притисак коришћењем Kr-85 (криптон), и у њу се ставља испитивана посуда; касније се пропустљивост региструје Г-М бројачима;
 - iv. Метода пламена халида – посуда се пуни неким халогеним елементом (бром, хлор, јод, флуор) под притиском, и преко ње се превлачи усисно црево на чијем је крају горионик; прати се промена пламена горионика услед могућег сагоревања халогених елемената;
 - v. Метода откривања халогених елемената – у посуду се убацује мешавина ваздуха и халогених елемената под притиском, која излази из посуде на месту пропуштања што се открива анализатором;
 - vi. Метода масене спектрометрије – метода се заснива на мерењу радијуса путање честица у магнетном пољу; откривање гаса-обележивача јер се детекција елемената врши на основу њихове масе; ова метода је најпоузданија али је апаратура најскупља.

8.3. Примери испитивања херметичности заварених посуда

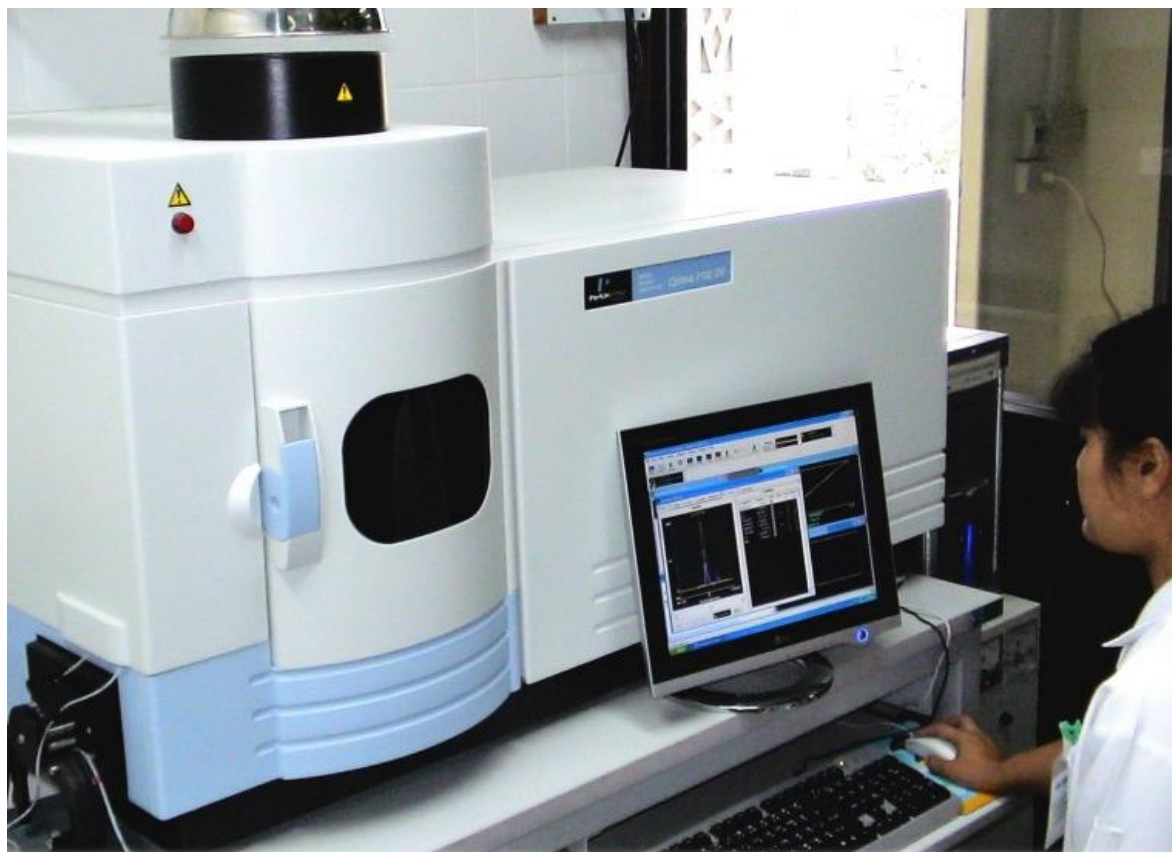
Због јако велике примене херметички заварених посуда, ако и због тога што је обавезно испитивање посуда одмах након производње, методе испитивања херметичности заварених посуда нашле су широку примену у пракси (сл. 50-52).



Слика 50. Тестирање воденим притиском



Слика 51. Припрема за тестирање гасним притисцима



Слика 52. Тестирање масеним спектрометром

9. Закључак

Процеси производње и експлоатација појединих делова и конструкција данас су врло компликовани и сложени. Имајући у виду ове чињенице, сасвим је логично доћи до закључка да је појава грешака у деловима или конструкцијама готово неизбежна. Грешке се могу појавити унутар самог материјала/метала при примарној преради, али и у току процеса производње и саме експлоатације.

Због ових чињеница, потребно је располагати поузданим методима контроле како би се откриле све евентуалне грешке, како на површини тако и у унутрашњости дела. Тада, методе испитивања без разарања постају незаменљиве. Постоји велики број ових метода и свака од њих има своје карактеристике у погледу ефикасности откривања грешака.

Визуелном методом готово је немогуће открити било коју грешку унутар дела или конструкције која се испитује. Ипак, ово је једна од најпримењиванијих метода, јер је најјефтинија и најбржа.

Пенетрантском контролом је могуће открити само површинске грешке и потребна је темељна припрема површина испитиваног дела односно појединих површина конструкције (нпр. заварени спојеви). Наведена напомена важи и за методу магнетног испитивања. Обе методе налазе широку примену при испитивању материјала, одливака и заварених спојева.

Испитивање ултразвучном методом захтева специфичну и скупу опрему. Такође захтева и добро обучени стручни кадар за коришћење опреме. Са друге стране, овом методом је могуће открити све грешке како на површини тако и у унутрашњости испитиваних предмета. Уз то, испитивање је потпуно безопасно за корисника/испитивача, а резултати који се добијају су веома поуздани.

Радиографске методе су веома компликоване и скупе и захтевају висок ниво обучености стручног кадра. У случају непажње или лоше заштите, ове методе могу бити врло опасне по корисника и његову околину. Ове методе спадају у најјефикасније методе контроле без разарања којима се поуздано могу открити унутрашње грешке, као и њихов положај, облик и величина.

Испитивање херметички заварених посуда (резервоари, цевоводи, цистерне за превоз опасних материја и сл.) се изводи поред наведених метода и применом других метода, које укључују пробе на притисак и заптивеност.

Узимајући у обзир критеријум прихватљивости грешака, потребно је одабрати конкретну методу контроле или их комбиновати при испитивању сваког појединачног дела или конструкције у зависности од њихове намене. Правилним одабиром се постижу тачни, релативно брзи и врло прецизни резултати.

Имајући у виду све наведено, савремену индустрију није могуће замислити без било које од ових метода испитивања без разарања.

10. Литература

1. В. Ђорђевић, М. Вукићевић, Машински материјали, практикум за лабораторијске вежбе, Универзитет у Београду, Машински факултет, Београд, 1990.
2. М. Јовановић, В. Лазић, Технологија ливења и заваривања, универзитетски уџбеник, Универзитет у Крагујевцу, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2015.
3. М. Јовановић, В. Лазић, Д. Арсић, Наука о материјалима 1, универзитетски уџбеник, Универзитет у Крагујевцу, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2017.
4. Р. Прокић Цветковић, О. Поповић, Масински Материјали 1, универзитетски уџбеник, Универзитет у Београду, Машински факултет, Београд, 2012.
5. М. Оруч, Р. Сунулахпашић, Испитивање металних материјала 2, Универзитет у Зеници, Факултет за металургију и материјале, Зеница, 2012.
6. <https://www.nationalboard.org/Index.aspx?pageID=164&ID=374> (приступљено септембра 2019.)
7. http://www.tedndt.com/cat/liquid_penetrant_materials_penetrant_classification_system.php (приступљено септембра 2019.)