

Ispitivanje zavarenog spoja NB.01-DI.22

Bučić, Natan

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:927653>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-04**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET
Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

ISPITIVANJE ZAVARENOG SPOJA NB.01-DI.22

Rijeka, rujan 2023.

Natan Bučić
0069076189

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

ISPITIVANJE ZAVARENOG SPOJA NB.01-DI.22

Mentor: Izv. prof. dr. sc. Sunčana Smokvina Hanza

Rijeka, rujan 2023.

Natan Bučić
0069076189

Rijeka, 10. ožujka 2022.

Zavod: **Zavod za materijale**
Predmet: **Ispitivanje materijala i analiza loma**
Grana: **2.11.03 proizvodno strojarstvo**

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Natan Bučić (0069076189)**
Studij: **Diplomski sveučilišni studij strojarstva**
Modul: **Tehnološko informatičko inženjerstvo**

Zadatak: **Ispitivanje zavarenog spoja NB.01-DI.22 / Testing of welded joint
NB.01-DI.22**

Opis zadatka:

Analizirati metode ispitivanja bez razaranja. Teorijski ih opisati, navesti prednosti i nedostatke pojedine metode te područja primjene. Prikazati trendove razvoja metoda ispitivanja bez razaranja. Analizirati karakteristične greške u zavarenim spojevima.

U eksperimentalnom dijelu rada, metodom ispitivanja bez razaranja ispitati zavareni spoj oznake NB.01-DI.22. Opisati postupak ispitivanja, korištenu opremu i pribor te prikazati rezultate ispitivanja. Dati odgovarajuće zaključke.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

Natan Bučić

Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:

prof. dr. sc. Sunčana Smokvina Hanza

Izv. prof. dr. sc. Sunčana Smokvina Hanza

Predsjednik povjerenstva za
diplomski ispit:

Kristian Lenić

Prof. dr. sc. Kristian Lenić

Ja, Natan Bučić, student završne godine diplomskog sveučilišnog studija strojarstva na Tehničkom fakultetu u Rijeci, izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svojoj obitelji na podršci i strpljenju tijekom studentskih godina te svojoj mentorici izv. prof. dr. sc. Sunčani Smokvina Hanza na pomoći tijekom pisanja diplomskog rada.

Sadržaj

1. UVOD.....	1
2. VIZUALNO ISPITIVANJE	2
2.1. Alati za vizualno ispitivanje.....	2
2.2. Prednosti i nedostaci vizualnog ispitivanja.....	3
3. ISPITIVANJE TEKUĆIM PENETRANTIMA.....	4
3.1. Postupak ispitivanja tekućim penetrantima.....	5
3.2. Oprema i pribor za ispitivanje tekućim penetrantima	6
3.3. Prednosti i nedostaci ispitivanja tekućim penetrantima	7
3.4. Primjena ispitivanja tekućim penetrantima	7
4. ISPITIVANJE MAGNETSKIM ČESTICAMA.....	8
4.1. Magnetsko polje	8
4.2. Magnetska permeabilnost.....	9
4.3. Magnetizacija	10
4.4. Postupak ispitivanja magnetskim česticama	14
4.5. Oprema i pribor za ispitivanje magnetskim česticama.....	17
4.6. Prednosti i nedostaci ispitivanja magnetskim česticama	18
4.7. Primjena ispitivanja magnetskim česticama	18
5. RADIOGRAFSKO ISPITIVANJE.....	20
5.1. Principi radiografije.....	20
5.2. Elektromagnetski spektar	21
5.3. Karakteristike radiografskog ispitivanja	22
5.3.1. Nastajanje rendgenskih zraka	22
5.3.2. Nastajanje gama zraka	24
5.3.3. Filmovi za radiografsko ispitivanje	24
5.3.4. Radiografske folije	26
5.4. Postupak radiografskog ispitivanja	27
5.5. Različiti oblici radiografskog ispitivanja	27
5.5.1. Kseroradiografija.....	27
5.5.2. Fluoroskopija.....	28
5.6. Prednosti i nedostaci radiografskog ispitivanja.....	28
5.7. Primjena radiografskog ispitivanja.....	29

6. ULTRAZVUČNO ISPITIVANJE	30
6.1. Svojstva ultrazvučnih valova	30
6.1.1. Valna duljina.....	30
6.1.2. Brzina vala.....	31
6.1.3. Akustična impedancija	32
6.2. Refleksija i prijenos zvučnih valova	33
6.3.1. Refleksija i prijenos pod pravim kutom upada.....	33
6.3.2. Refleksija i prijenos pri kosom upadu	34
6.3.3. Prvi i drugi kritični kut	35
6.4. Tehnike ultrazvučnog ispitivanja	36
6.4.1. Tehnika odjeka	36
6.4.2. Imerzijska tehnika ispitivanja.....	37
6.5. Oprema potrebna za ultrazvučno ispitivanje.....	37
6.5.1. Vrsta sondi.....	38
6.5.2. Metode kalibracije	39
6.6. Prednosti i nedostaci ultrazvučnog ispitivanja.....	41
6.7. Primjena ultrazvučnog ispitivanja.....	42
7. EKSPERIMENTALNI RAD	43
7.1. Predmet rada.....	43
7.2. Ispitna oprema	44
7.3. Kalibracija	45
7.4. Ispitivanje.....	52
7.5. Rezultati	52
7.5.1. Rezultati ispitivanja ultrazvukom.....	52
7.5.2. Rezultati ispitivanja radiografijom	55
8. ZAKLJUČAK.....	56
LITERATURA	57
POPIS SLIKA.....	60
POPIS TABLICA	63
SAŽETAK	64
SUMMARY	65

1. UVOD

Ispitivanje bez razaranja (NDT) je postupak ispitivanja ili ocjenjivanja kvalitete materijala, komponenti bez uništavanja komponente ili sustava. Drugim riječima, kada se ispitivanje završi, komponenta ili sklop se još uvijek može koristiti. Danas se moderna ispitivanja bez razaranja koriste u proizvodnji, inspekcijama tijekom rada kako bi se osigurala ispravnost proizvoda, cjelovitost i pouzdanost. Tijekom proizvodnje, NDT se koristi za osiguranje kvalitete materijala i procesa spajanja. Najčešće korištene metode ispitivanja bez razaranja jesu:

- vizualno ispitivanje (VT),
- ispitivanje tekućim penetrantima (PT),
- ispitivanje magnetskim česticama (MT),
- radiografsko ispitivanje (RT) i
- ultrazvučno ispitivanje (UT).

Za razliku od NDT-a, druga ispitivanja su destruktivne prirode i stoga se provode na ograničenom broju uzoraka. Destruktivna ispitivanja često se koriste za određivanje mehaničkih svojstava materijala kao što su otpornost na udarce, duktilnost, lomna žilavost, te vlačna i zamorna čvrstoća. [1]

U teorijskom dijelu diplomskog rada opisane su metode ispitivanja zavara bez razaranja koje se najčešće koriste: vizualno ispitivanje, ispitivanje tekućim penetrantima, ispitivanje magnetskim česticama, radiografsko ispitivanje i ultrazvučno ispitivanje.

U praktičnom dijelu stavljen je fokus na ultrazvučno ispitivanje zavara jer je ultrazvučnim ispitivanjem moguće otkriti nepravilnosti u čitavom volumenu materijala koji se ispituje.

2. VIZUALNO ISPITIVANJE

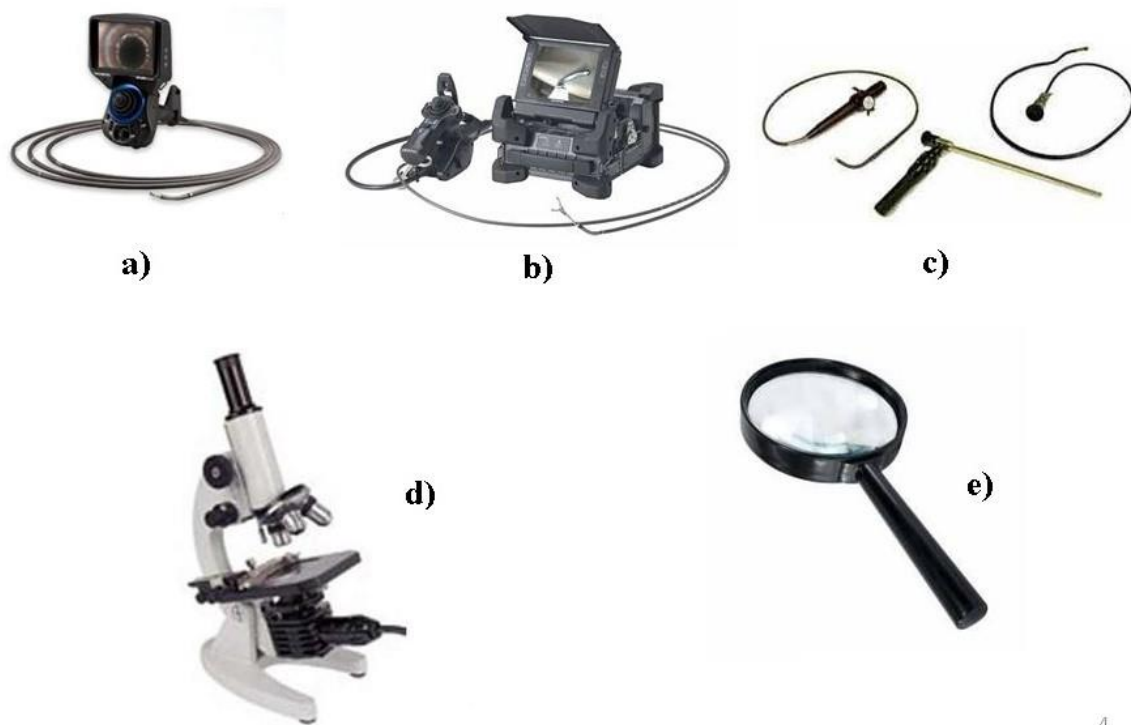
Vizualno ispitivanje je najčešća metoda ispitivanja materijala bez razaranja koja je primjenjiva na većini površina koje prethodno moraju biti pripremljene za ispitivanje odgovarajućim čišćenjem površine, na primjer, svaki kamenac ili staru boju je potrebno ukloniti. Može se primjenjivati za mjeriteljska i dimenzionalna mjerenja pomoću mehaničkih mjerila. Na slici 2.1. je prikazan vizualni pregled zavara. [2]



Slika 2.1. Vizualni pregled zavara [3]

2.1. Alati za vizualno ispitivanje

Ljudsko oko je najčešće korišteni alat za vizualni pregled. Osjetljivost ispitivanja može se povećati korištenjem povećala i mikroskopa. Pri vizualnom ispitivanju površina koja se ispituje mora biti osvijetljena prirodnim ili umjetnim bijelom svjetlom. Na slici 2.2. prikazani su uređaji i pribor za vizualno ispitivanje: a) videoskop, b) napredni videoskop, c) boroskop, d) mikroskop i e) povećalo. [2]



Slika 2.2. Uređaji i pribor za vizualno ispitivanje [4]

2.2. Prednosti i nedostaci vizualnog ispitivanja

Prednosti kod vizualnog ispitivanja su:

- ispitivanje može biti vrlo jednostavno te učinkovito bez zahtjeva za skupom opremom,
- iskusni operateri i napredna oprema omogućuju da vizualno ispitivanje bude vrlo osjetljivo,
- vrijeme obuke i stjecanje iskustva može biti kratko,
- svaka komponenta se može ispitati bilo gdje na površini i
- mogućnost pronalaska različitih nepravilnosti.

Nedostaci kod vizualnog ispitivanja su:

- mnoge tvrtke obraćaju malo pozornosti na odgovarajuću obuku operatera,
- u najgorem slučaju, potpuno se oslanja na ljudski faktor i
- nepravilnosti ispod površine se neće vidjeti. [1]

3. ISPITIVANJE TEKUĆIM PENETRANTIMA

Ispitivanje tekućim penetrantima je metoda ispitivanja koja se koristi za otkrivanje površinskih nepravilnosti otvorenih prema površini. Princip metode ispitivanja je uvlačenje tekućine kapilarno u nepravilnost te nakon toga nedostaci mogu biti vidljivi ljudskom oku. Da bi se postigla dobra vidljivost nepravilnosti, postoje obojeni penetranti, fluorescentni ili obojeno-fluorescentni. U prvom slučaju tekućina je crvene boje te se razvijena površina može promatrati na prirodnom ili umjetnom svjetlu, ali u drugom slučaju komponenta se mora promatrati pod ultraljubičastim svjetlom ako postoje indikacije nepravilnosti. [2]

Učinkovitost ispitivanja ovisi o:

- vrsti penetranta i opremi za ispitivanje,
- pripremi i stanju površine,
- vrsti materijala i nepravilnostima,
- temperaturi ispitne površine i
- vremenu penetriranja i razvijanja. [5]

Jedan od najranijih oblika ispitivanja tekućim penetrantima za otkrivanje pukotina u staklu bila je uporaba čađe na glaziranoj keramici. Na pukotini se zadržavala čađa, a samim time i njihov obris je bio lako vidljiv. Naposljetku se ta metoda koristila kao ukrasna metoda.

Danas je ispitivanje tekućim penetrantima važna industrijska metoda. Koristi se za označavanje prisutnosti nepravilnosti kao što su: pukotine, preklopi i zone površinskih poroznosti. Metoda je primjenjiva na gotovo svaku komponentu, bila ona velika ili mala, jednostavne ili složene konfiguracije. Koristi se za pregled kovanih i lijevanih proizvoda od željeznih te ne željeznih metala i legura, keramike i stakla. Na slici 3.1. je prikazana metoda ispitivanja tekućim penetrantima komponente zajedno s potrebnim kemijskim sredstvima. [2]



Slika 3.1. Ispitivanje tekućim penetrantima [5]

3.1. Postupak ispitivanja tekućim penetrantima

Postoji pet osnovnih koraka u metodi ispitivanja tekućim penetrantima:

- priprema površine čišćenjem,
- nanošenje penetranta,
- odstranjivanje viška penetranta,
- nanošenje razvijачa i
- praćenje razvijanja indikacija.

Kod pripreme površine sve komponente moraju biti temeljno očišćene i potpuno osušene prije nego što se krene s metodom ispitivanja. Važno je da sve komponente koje se ispituju budu očišćene od ulja, vode, masti ili drugih onečišćenja ako se želi postići uspješna indikacija.

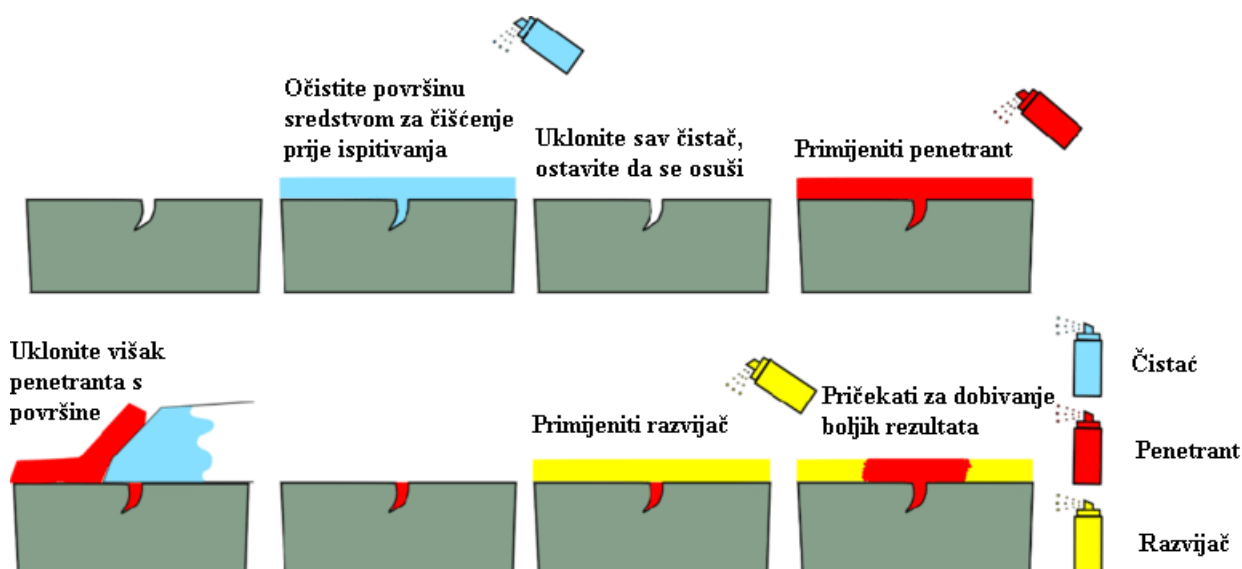
Nakon pripreme površine čišćenjem, potrebno je nanijeti tekući penetrant tako da se stvori sloj penetranta preko cijele površine komponente. Tekući sloj bi trebao ostati dovoljno dugo na površini da potpuno ispuni sve površinske nepravilnosti.

Za uspješno ispitivanje potrebno je odstraniti višak penetranta s površine komponente. Odstranjivanje viška penetranta se može napraviti na više načina:

- vodom perivim penetrantom (VPP),
- otapalom za odstranjivanje penetranta (OOP) i
- poslijeemulgirajućim penetrantom osjetljivosti (PEP).

Razvijач je obično vrlo fini jednolični prah krede. Nanosi se prskanjem površine prašinom od krede suspendiranoj u hlapljivoj tekućini. Penetrantska tekućina prisutna unutar nepravilnosti će se polako povlačiti kapilarnim efektom u pore krede, doći će do širenja penetranta unutar razvijачa te će se povećati prividna širina nepravilnosti. Kada se koristi obojani penetrant, njegova boja mora biti u oštrom kontrastu s bijelom površinom obojanom kredom.

Nakon što je omogućeno potrebno vrijeme razvijanja (10 do 30 min), površinu komponente potrebno je pregledati na indikacije penetranta u razvijачu. Na slici 3.2. prikazan je postupak ispitivanja tekućim penetrantima. [2]



Slika 3.2. Postupak ispitivanja tekućim penetrantima [6]

3.2. Oprema i pribor za ispitivanje tekućim penetrantima

Na slici 3.3. prikazana je potrebna oprema i pribor za ispitivanje tekućim penetrantima: a) Lux metar, b) UV metar, c) UV lampa i d) penetrantski sustav. [5]



Slika 3.3. Oprema i pribor za ispitivanje tekućim penetrantima [5]

3.3. Prednosti i nedostaci ispitivanja tekućim penetrantima

Postupak prodiranja tekućinom relativno je jednostavan zato što nisu prisutni elektronički sustavi, a potrebna oprema je jeftinija od one potrebne za druge metode ispitivanja bez razaranja. Uspostavljanje procedura i inspekcija standarda za specifične dijelove proizvoda, obično je jednostavnije nego za ostale metode. Metoda se može primijeniti za bilo koji materijal osim za porozni materijal, a u određenim slučajevima njegova je osjetljivost veća od metode ispitivanja pomoću magnetskih čestica. Inspekcija penetrantom prikladna je za virtualne komponente bilo kojih veličine ili oblika te se koristi za inspekciju kontrole kvalitete poluproizvoda i gotovih proizvoda.

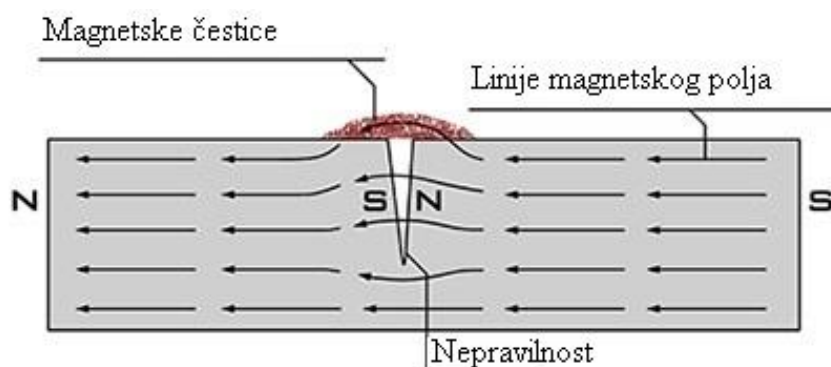
Glavni nedostatak sustava tekućih penetranta je moguće otkrivanje samo površinskih nepravilnosti. Podpovršinski nedostaci zahtijevaju dodatni pregled drugim metodama. Ostali čimbenici koji smanjuju učinkovitost ispitivanja tekućim penetrantima su površinska hrapavost i porozni materijali. Potonji, može proizvesti lažne rezultate jer će se svaka pora registrirati kao potencijalna nepravilnost. [7]

3.4. Primjena ispitivanja tekućim penetrantima

Raspon primjena ispitivanja tekućim penetrantima iznimno je široka i raznolika. Koristi se u zrakoplovnoj industriji kod kvalitete kontrole proizvodnje i od strane korisnika tijekom redovitog održavanja i sigurnosnih provjera. Tipične komponente koje se provjeravaju ovom metodom su: diskovi rotora turbine i lopatice, kotači zrakoplova, odljevci, kovane komponente i zavareni sklopovi. Puno automobilskih dijelova, posebno aluminijski odljevci i otkivci, uključujući klipove i glave cilindra, podvrgavaju se ovom obliku kontrole kvalitete prije sastavljanja. Ispitivanje tekućim penetrantima također se koristi za redovita ispitivanja u radu okretnih postolja željezničkih lokomotiva i željezničkih vozila u potrazi za zamorom pucanja. [7]

4. ISPITIVANJE MAGNETSKIM ČESTICAMA

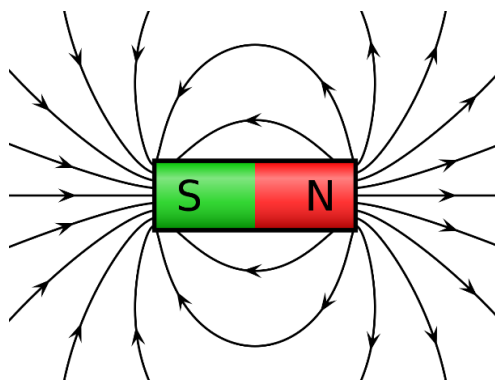
Ispitivanje magnetskim česticama koristi se za ispitivanje materijala koji se mogu magnetizirati (feromagnetni materijali). Ispitni uzorak se najprije magnetizira pomoću trajnog magneta ili električne struje kroz ili oko uzorka. Magnetsko polje koje se tako uvodi u uzorak sastoji se od magnetskih silnica. Kad god postoji nepravilnost koja prekida protok magnetskih silnica, neke od ovih silnica moraju izaći i ponovno ući u uzorak. Ove točke izlaza i ponovnog ulaska tvore suprotne magnetske polove. Sitne magnetske čestice posipane po površini uzorka privlače magnetski polovi za stvaranje vizualne indikacije približne veličine i oblika nepravilnosti. Na slici 4.1. prikazan je grafički prikaz ispitivanja magnetskim česticama. [2]



Slika 4.1. Ispitivanje magnetskim česticama [8]

4.1. Magnetsko polje

Magnetsko polje je prostor unutar i oko prirodnih i umjetnih magneta u kojem djeluju magnetske sile kao šta je prikazano na slici 4.2. Magnetsko polje postoji također u prostoru oko toka električne struje, pa se najčešće obrađuje kao elektromagnetsko polje. Razlikuje se magnetostatičko polje, na primjer u okolini stalnoga magneta, i magnetodinamičko polje, na primjer kod asinkronog električnoga motora. Općenito, magnetsko polje slično je električnom polju s obzirom na matematičku obradu, ali je bitna razlika u tome što ne postoje slobodni magnetski naboji kao što postoje slobodni elektroni. Magnetsko polje nastaje oko niza električnih nabojâ u gibanju, odnosno oko električnog vodiča kojim teče električna struja. [9]



Slika 4.2. Magnetsko polje [9]

4.2. Magnetska permeabilnost

Magnetska permeabilnost je elektromagnetska osobina materijala koja pokazuje intenzitet magnetizacije tijela kada su ona izložena vanjskom magnetskom polju. Magnetska permeabilnost se označava grčkim slovom μ .

Magnetska permeabilnost vakuuma ili univerzalna magnetska konstanta μ_0 je prirodna konstanta magnetske permeabilnosti za vakuum.

Relativna magnetska permeabilnost μ_r je fizikalna veličina koja opisuje magnetsku propusnost tvari u odnosu na magnetsku permeabilnost vakuuma. Računa se kao omjer magnetske permeabilnosti μ i magnetske permeabilnosti vakuuma μ_0 .

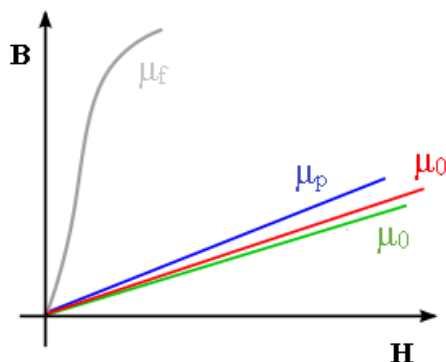
$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (4.1.)$$

Magnetska permeabilnost utječe na rezultat ispitivanja magnetskim česticama zbog utjecaja zaostalog magnetskog polja koji može biti pokazatelj prisutnosti ugljika i ostalih legiranih elemenata u materijalu. Poželjno je da materijal sadrži što manji sadržaj ugljika te će time materijal imati veću permeabilnost i manju količinu zaostalih magnetskih polja.

Permeabilnost magnetskih materijala osim o samoj vrsti materijala, ovisi i o strukturi, stupnju magnetiziranja i temperaturi. Dijamagnetični i paramagnetični materijali se u magnetskom polju ponašaju poput vakuuma, odnosno zraka, pa se takvi materijali ne koriste za magnetizaciju. Na slici 4.3. su prikazane krivulje magnetiziranja za različite materijale pri čemu su: [10]

- μ_f permeabilnost feromagnetika,

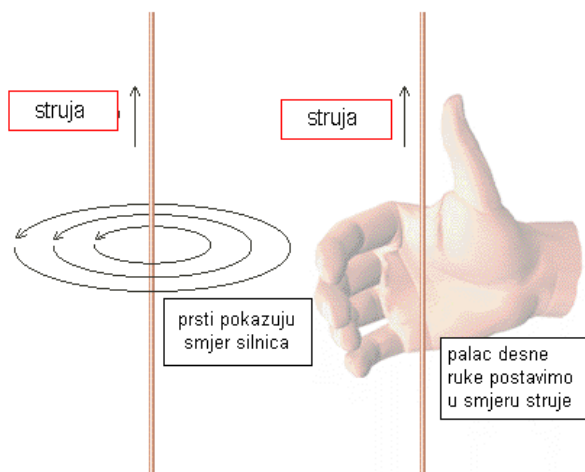
- μ_p permeabilnost paramagnetika,
- μ_0 permeabilnost vakuuma,
- μ_d permeabilnost dijamagnetika,
- B magnetska indukcija, T i
- H jakost magnetskog polja, A/m.



Slika 4.3. Krivulje magnetiziranja [10]

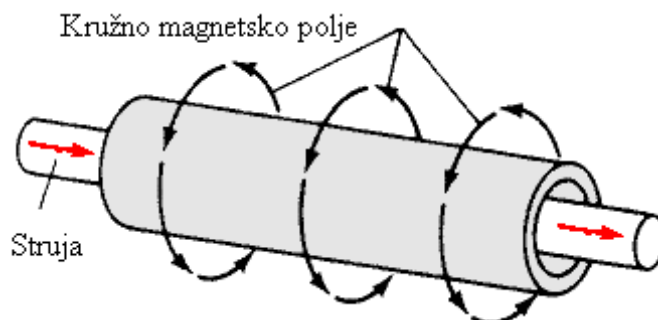
4.3. Magnetizacija

Magnetskim poljem u elektromagnetskom krugu upravlja se smjerom toka struje. Pravilo desne ruke opisuje odnos orijentacije magnetskih silnica i struje. Na slici 4.4. je prikazan odnos smjera magnetskih silnica i struje.



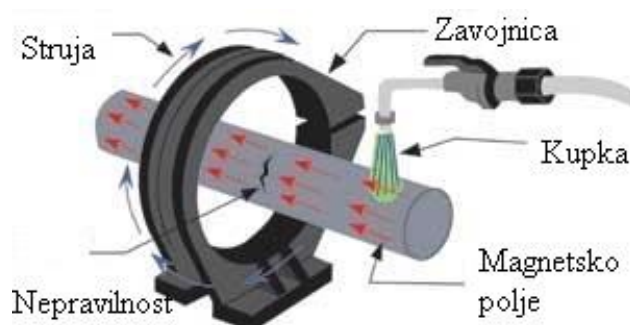
Slika 4.4. Pravilo desne ruke [5]

Struja koja prolazi kroz bilo koji ravni vodič kao što je žica ili šipka i stvara kružno magnetsko polje oko vodiča. Kada je vodič feromagnetski materijal, struja inducira magnetsko polje unutar vodiča kao i unutar okolnog prostora. Kružna magnetizacija prikazana je na slici 4.5. [7]



Slika 4.5. Kružna magnetizacija [11]

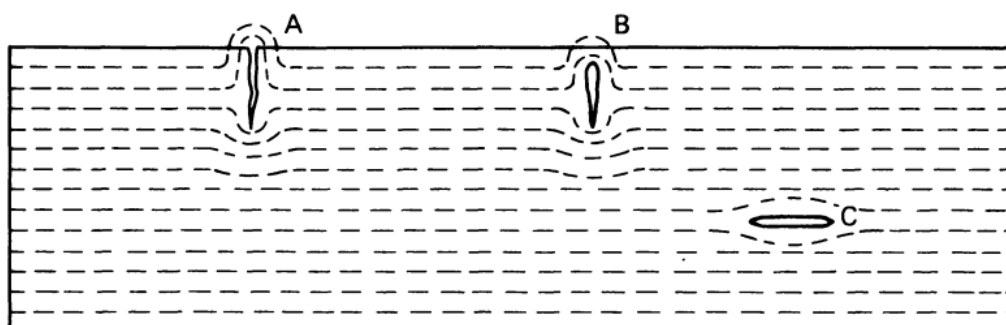
Električna struja također se može koristiti za stvaranje uzdužnog magnetskog polja. Kada struja prolazi kroz zavojnicu od jednog ili više namotaja koji okružuju komponentu, unutar komponente se stvara uzdužno magnetsko polje kao što je prikazano na slici 4.6.



Slika 4.6. Uzdužna magnetizacija [12]

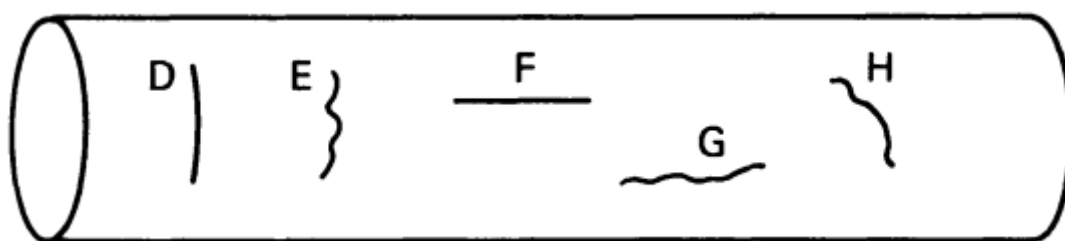
Učinkovitost indikacije nepravilnosti ovisit će o smjeru induciranog magnetskog polja te će bit najveća kada je nepravilnost okomita na magnetsko polje. Grafički prikaz prikazan je na slici 4.7. Nepravilnost A će dati jaku indikacija jer je površinska nepravilnost te je okomita na magnetsko polje. Dobit će se indikacija u odnosu na nepravilnost B jer je okomita na magnetsko polje, ali nepravilnost C neće biti uočena. Nepravilnost C je preduboko u materijalu da bi bila prepoznata, ali čak i da se takva nepravilnost nalazi na površini materijala, paralelnost s magnetskim poljem učinilo bi njezino otkrivanje malo vjerojatnim.

Općenito, kako bi se otkrila prisutnost svih nepravilnosti, potrebno je pojedinu komponentu magnetizirati više puta i iz različitih smjerova. [7]



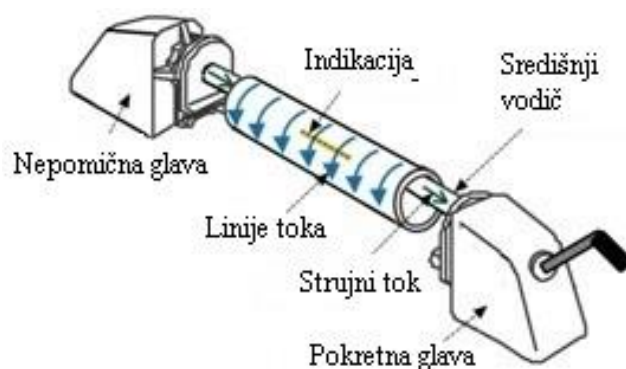
Slika 4.7. Utjecaj orijentacije nepravilnosti na mogućnost otkrivanja [7]

Slika 4.8. prikazuje šipku koja sadrži brojne nepravilnosti. Sve nepravilnosti moguće je otkriti ako se u postupku magnetiziranja koristi i kružna i uzdužna magnetizacija. Nepravilnost D neće dati indikaciju polja curenja s kružnom magnetizacijom dok nepravilnost E zbog svoje neravnosti može dati slabu indikaciju ako je jakost magnetskog polja dovoljno visoka. Međutim, kada je komponenta magnetizirana uzdužno i D i E bit će jasno naznačeni. Usporedno, nepravilnost F neće se moći otkriti korištenjem uzdužne magnetizacije, ali manje pravilna nepravilnost G može dati slabu identifikaciju. Nepravilnosti F i G će se jasno prikazati kružnom magnetizacijom. Pod određenim kutom, nepravilnost kao što je u slučaju H, trebala bi se vidjeti u oba slučaja magnetizacije. Kada je komponenta složenog oblika, inducirana magnetska polja bit će iskrivljena i često će rezultirati kombinacijom kružnog i uzdužnog magnetiziranja. [7]



Slika 4.8. Šipka s površinskim defektima [7]

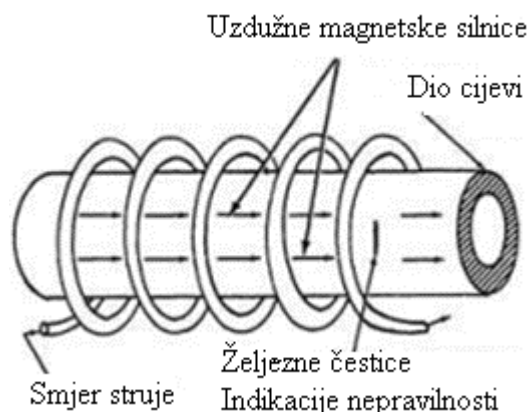
Inducirano magnetsko polje stvorit će se između dvoje električnih kontakata na svakom kraju komponente, tako da struja prolazi kroz cijeli njegov dio. Kružna magnetizacija propuštanjem struje prikazana je na slici 4.9. To je brza i pouzdana metoda vrlo pogodna za inspekciju relativno malih komponenti.



Slika 4.9. Kružna magnetizacija propuštanjem struje [13]

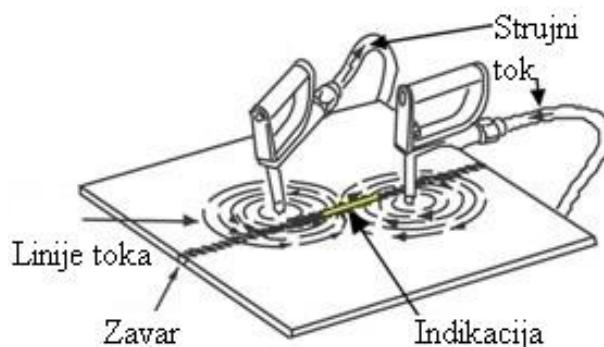
Komponente malih i srednjih veličina, kod kojih jedna dimenzija, odnosno duljina prevladava, mogu se lako magnetizirati uzdužnom magnetizacijom postavljanjem komponente unutar zavojnice prikazano kao na slici 4.10. Komponenta se mora postaviti centralno unutar

zavojnice kako bi se postigli najbolji rezultati. Ova metoda je osobito korisna za lociranje poprečnih nepravilnosti na predmetima kao što su osovine i radilice.



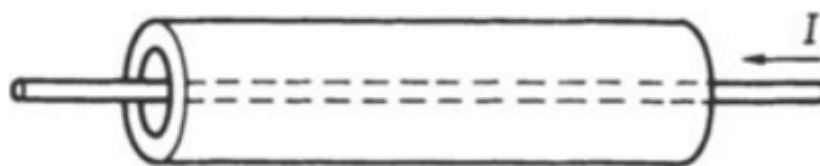
Slika 4.10. Uzdužna magnetizacija fleksibilnom zavojnicom [5]

Kružna magnetizacija kontaktnim elektrodama prikazana na slici 4.11. u širokoj je upotrebi za inspekciju velikih odljevaka i otkivaka. Kad se postave kontakti na suprotne krajeve velike komponente, cijeli komad će se magnetizirati te će pregled biti dovršen u kratkom vremenu. Međutim, u slučaju velikih dimenzija komponente potrebna je vrlo velika struja magnetiziranja, a to zahtijeva upotrebu skupe električne opreme visokog opterećenja. Kontakti mogu biti postavljeni relativno daleko jedan od drugoga kako bi se ispitalo malo područje komponente, a zatim se operacija ponavlja dok se cijela komponenta ne ispita. Vrijeme potrebno za ovaj oblik inspekcije će naravno biti dulje nego ako je cijela komponenta magnetizirana odjednom, ali je potrebna manja električna energija.



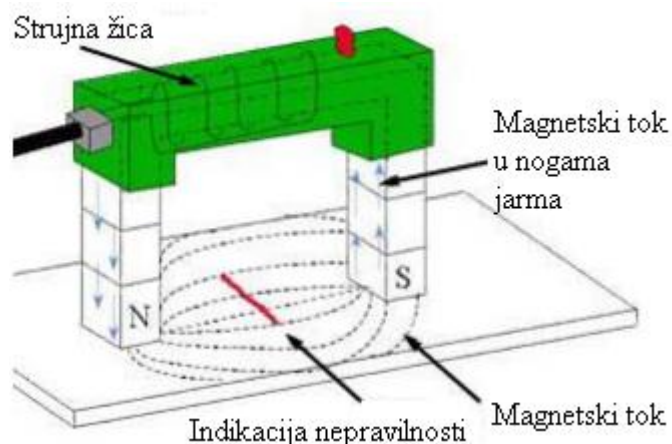
Slika 4.11. Kružna magnetizacija kontaktnim elektrodama [13]

Komponenta s neprekinutim otvorom može se magnetizirati napajanjem ravnog vodljivog kabela koji prolazi kroz otvor prikazan na slici 4.12. Ova metoda se često koristi u ispitivanju dijelova kao što su cijevni konektori, šuplji cilindri, zupčanici i velike matice.



Slika 4.12. Kružna magnetizacija centralnim vodičem [7]

Za određene vrste primjene inspekcije magnetskim česticama može se koristiti elektromagnetski jaram prikazan na slici 4.13. Prikladan je za ispitivanje različitih oblika. Primjer ove metode je traženje preklopa i drugih površinskih nepravilnosti. Može se postići dobra osjetljivost, ali je važno da jaram bude postavljen ispravno u odnosu na orijentaciju predviđenih nepravilnosti. Strujni izvor može biti napajan istosmjernom strujom (DC) ili izmjeničnom strujom (AC). Kada se koristi napajanje izmjeničnom strujom, magnetski tok koji se stvara unutar komponente je u velikoj mjeri ograničen na područje blizu površine materijala. Kod pobude istosmjernom strujom tok prodiranja u materijal je puno dublji. Jedna od prednosti korištenja izmjenične struje je ta što se komponenta lako demagnetizira nakon ispitivanja postupnim smanjivanjem razine na nulu. [7]



Slika 4.13. Uzdužna magnetizacija elektromagnetskim jarmom [5]

4.4. Postupak ispitivanja magnetskim česticama

Strojno obrađene dijelove treba odmastiti odgovarajućim otapalima. U obojenim dijelovima boju bi trebalo ukloniti kako bi se osiguralo odgovarajuće kontaktno područje.

Ispitni uzorak može se magnetizirati ovisno o svom obliku i konfiguraciji pomoću bilo koje metode navedene u radu. Mnoge komponente nisu jednostavnog geometrijskog oblika, ali

moгу biti sastavljene kombinacijama više jednostavnih oblika. U takvim slučajevima može biti više od jedne tehnike magnetiziranja potrebno za ispitivanje cijelog uzorka.

Osjetljivost detekcije nepravilnosti poboljšava se s razinom magnetizacije. Teoretski bi razina ispod granice zasićenja dala najosjetljivije rezultate, ali je nepraktično zbog niza nepravilnih oblika koji se susreću i stoga su u praksi niže razine magnetizacije sasvim primjerene.

Magnetske čestice dostupne su u crvenoj ili crnoj boji. Crvene magnetske čestice poboljšavaju vidljivost na tamnim površinama. Navedene magnetske čestice mogu se nanijeti na ispitni uzorak u suhom ili mokrom obliku. Ako se koristi suhi prah, treba ga nanijeti ravnomjerno na magnetiziranu komponentu. Mokre magnetske čestice najbolje je da se nanose tijekom magnetizacije. Prilikom korištenja mokre metode čestice su općenito sitnije nego kod onih u suhoj metodi te je mokra metoda osjetljivija za detekciju finih površinskih nepravilnosti. S druge strane nije tako osjetljiva kao kod korištenja suhe metode za otkrivanje nepravilnosti ispod površine.

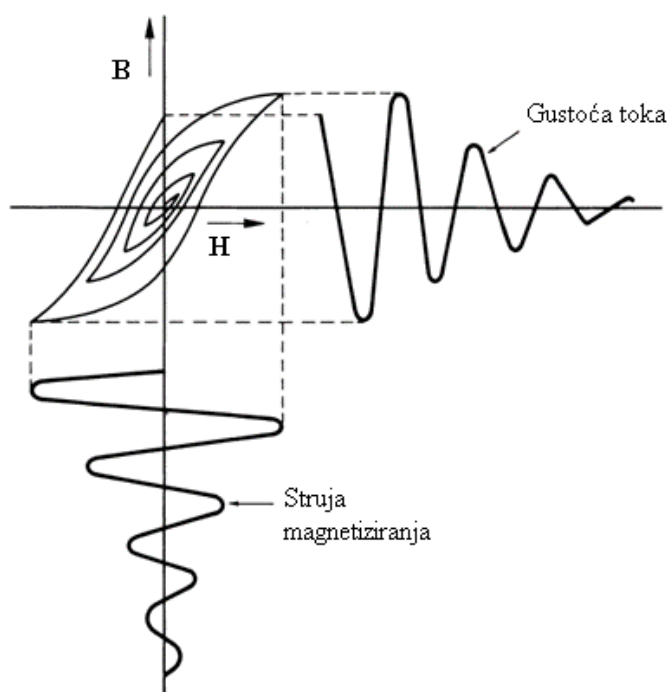
Potrebno je promatrati cijelu površinu koja se ispituje. Sumnjive indikacije su često očiglednije ako se komponenti ostavi da magnetske čestice djeluju određeno vrijeme. Pronađene indikacije mogu se označiti uljnom olovkom. Često je poželjno zabilježiti ne samo izgled indikacije, već i njihove lokacije. Za trajni zapis indikacija moguće ih je podignuti s ispitnog uzorka i pomoću ljepila prenijeti na bijeli papir. [2]

Količina magnetizma koja ostaje u feromagnetskom materijalu nakon inspekcija magnetskih čestica ovisit će o fizičkim karakteristikama materijala. Često će biti potrebno demagnetizirati komponentu nakon inspekcije magnetskih čestica. Komponenta može biti namijenjena za korištenje u području gdje će zaostalo magnetsko polje ometati rad ili točnost instrumenata koji su osjetljivi na magnetska polja. Drugi razlog je da se abrazivne čestice mogu privući na magnetizirane dijelove, kao što su površine ležajeva, klizne staze ležajeva i zupčanci, uzrokujući ubrzano oštećenje od trošenja. Čestice mogu prijanjati na magnetiziranu površinu i ometati naknadne operacije, kao što je bojanje ili galvanizacija. Ako se magnetizirani dio strojno obrađuje, čipovi bi mogli prijanjati uz obrađenu površinu i negativno utjecati na završnu obradu, dimenzije i vijek trajanja alata. Slika 4.14. prikazuje uređaj za demagnetizaciju.



Slika 4.14. Uređaj za demagnetizaciju [5]

Načelo demagnetizacije je podvrgavanje magnetizirane komponente čije magnetsko polje neprestano mijenja smjer i istovremeno se postupno smanjuje na nulu. Na slici 4.15. je prikazana krivulja histereze struje i gustoće toka tijekom demagnetizacije.



Slika 4.15. Krivulja histereze tijekom demagnetiziranja [7]

Kada je korištena oprema napajana izmjeničnom strujom za magnetiziranje komponenti za pregled, ista se oprema može koristiti i za demagnetizaciju. Pri završetku pregleda, struja magnetiziranja postupno se smanjuje na nulu s izratkom u mirovanju koji je stegnut između električnih kontakata ili je još uvijek smješten unutar zavojnice za magnetiziranje. Ako je početno magnetiziranje inducirano istosmjernom strujom, potrebna je dodatna oprema napajana izmjeničnom strujom za potrebe demagnetiziranja. Komponente velikih veličina poprečnog presjeka teško je u potpunosti demagnetizirati korištenjem padajuće izmjenične struje, budući da su izmjenični učinci obično ograničeni na površinske slojeve. U ovim slučajevima je uobičajeno kombinirati izmjeničnu i istosmjernu demagnetizaciju. [7]

4.5. Oprema i pribor za ispitivanje magnetskim česticama

Na slici 4.16. su prikazani glavni i pomoćni pribor za ispitivanje magnetskim česticama: a) Lux metar, b) UV metar, c) UV lampa, d) magnetni jaram, e) feromagnetske čestice, f) uređaj za demagnetizaciju i g) mjerac jakosti tangencijalnog magnetskog polja sa Hallovom sondom. [5]



Slika 4.16. Oprema i pribor za ispitivanje magnetskim česticama [5]

4.6. Prednosti i nedostaci ispitivanja magnetskim česticama

Inspekcija magnetskim česticama osjetljiva je metoda otkrivanja vrlo finih površinskih nepravilnosti i u određenim je situacijama superiornija od sofisticiranih metoda. Također je moguće dobiti indikacije iz nekih nepravilnosti koje ne probijaju površinu, ali pod uvjetom da su blizu površine materijala. Iako ispitivanje magnetskim česticama nije kvantitativni test, vješt i iskusen operater može dati procjenu širine i dubine nepravilnosti. Prednost inspekcije magnetskim česticama je ta što je oprema relativno jeftina te je potrebno malo pomoćne opreme.

Glavni nedostatak inspekcije magnetskim česticama je da je prikladna samo za feromagnetske materijale i da bi za najbolje rezultate inducirano magnetsko polje trebalo biti okomito na bilo koju nepravilnost, pa će stoga biti potrebno obaviti više magnetiziranja iz različitih smjerova. Pri pregledu komponenti velikih dimenzija potrebne su izuzetno velike struje te će biti potreban oprez kako bi se izbjeglo lokalno zagrijavanje i površinsko gorenje na točkama električnog kontakta. Indikacije opažene u pregledu magnetskih čestica mogu biti lako vidljive, ali je često potrebno osloniti se na vještinu i iskustvo operatera za ispravno tumačenje značaja indikacije. Osjetljivost inspekcije magnetskih čestica općenito je vrlo dobra, ali će se smanjiti ako je površina komponente prekrivena filmom od boje ili drugog nemagnetskog sloja. [7]

4.7. Primjena ispitivanja magnetskim česticama

Inspekcija magnetskim česticama koristi se na zavarenim spojevima. U općoj inženjerskoj praksi velik dio komponenti izrađen je od čelika ili željeza koji se mogu magnetizirati. To je pozitivno jer ova metoda testiranja nije skupa i može otkriti sve površinske nepravilnosti u dijelovima koji su podvrgnuti laganim naprezanjima i zamoru te u onima koji su lijevani, zavareni ili toplinski obrađeni tijekom izrade. [2]

Prometne industrije (cestovni, željeznički, zrakoplovni i brodski) održavaju planirane planove remonta u kojima se kritični dijelovi pregledavaju na nepravilnosti. Koljenaste osovine, okviri, zamašnjaci, kuke za dizalice, osovine, lopatice parne turbine i pričvrtni elementi su primjeri komponenti osjetljivih na kvar, posebno kvar uslijed zamora. Stoga postoji potreba za redovitim pregledom. [7]

Nepravilnosti uzrokovane neispravnim procesom toplinske obrade lako se pronalaze ispitivanjem pomoću magnetskih čestica. Takve se nepravilnosti mogu pojaviti tijekom

zagrijavanja ili kaljenja ciklusa i mogu biti proširenja od prethodnih stanja koja već postoje u komponenti.

Zamorne nepravilnosti nastaju tijekom rada pod ponavljanim promjenama napreznja. Nepravilnost gotovo uvijek počinje na visoko opterećenoj površini i širi se kroz odjeljak. Zamorna nepravilnost će početi prodirati tamo gdje dizajn ili stanje površine osiguravaju točku koncentracije napreznja. Oštri rubovi, loša obrada površine, šavovi, nepravilnosti od brušenja i druge slične nepravilnosti djeluju kao podizači napreznja i pomažu u početku pucanja uslijed zamora.

Sva ispitivanja magnetskim česticama prilikom uklanjanja šavova, inkluzija, rashladnih nepravilnosti, preklopa, poroznosti, nepravilnosti kod toplinske obrade i nepravilnosti kod brušenja su u svrhu sprječavanja zamora ili kvara nakon što je komponenta puštena u rad. Dosljedna uporaba ispitivanja magnetskih čestica kao i druga ispitivanja bez razaranja u dobro planiranom programu preventivnog održavanja može u mnogim slučajevima smanjiti servisni kvar zamora praktički na nulu. [2]

5. RADIOGRAFSKO ISPITIVANJE

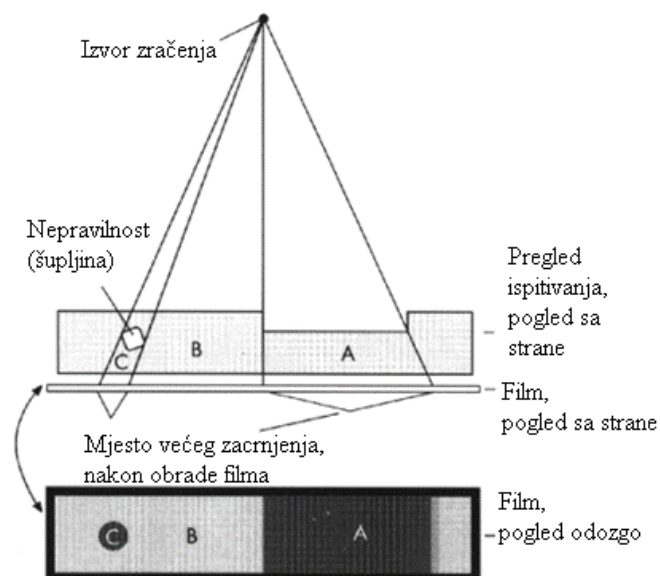
Elektromagnetsko zračenje vrlo kratkih valnih duljina će prodirati kroz čvrsti medij, ali će ga medij djelomično apsorbirati. Količina apsorpcije koja će se ostvariti ovisit će o gustoći i debljini materijala kroz koje zračenje prolazi, kao i o svojstvima zračenja. Zračenje koje prolazi kroz materijal može se detektirati i zabilježiti na filmu ili osjetljivom papiru. Pojam radiografija podrazumijeva proces u kojem se slika stvara na radiogramu. Kad se trajna slika proizvodi na papiru osjetljivom na zračenje, proces je poznat kao papirna radiografija. Sustav u kojem se stvara latentna slika na elektro-statički nabijenoj ploči i ta se latentna slika koristi za proizvodnju trajne slike na papiru koja je poznata kao kseroradiografija. Proces u kojem je prolazna slika proizvedena na fluorescentnim folijama naziva se fluoroskopija.

Nakon što se razvije eksponirani radiografski film, slika varira ovisno o količini primljenog zračenja na pojedinim mjestima od svjetlijih do tamnijih tonova. Na količinu apsorpcije također će utjecati prisutnost određenih nepravilnosti kao što su šupljine ili poroznost unutar materijala.

Korištenje radiografije i srodnih postupaka mora biti strogo kontrolirano jer izloženost ljudi zračenju može dovesti do oštećenja ljudskog tkiva. [7]

5.1. Principi radiografije

Osnovno načelo radiografskog ispitivanja je da komponenta koji se ispituje bude postavljena na putu snopa zračenja iz izvora rendgenskih zraka ili gama zraka. Medij za snimanje, obično radiografski film, postavlja se izvan i ispod objekta koji se ispituje kako je prikazano na slici 5.1. Rendgenske ili gama zrake ne mogu se fokusirati kao što se može fokusirati vidljiva svjetlost, a u mnogim će slučajevima zračenje dolaziti iz izvora u obliku stožaste zrake. Ako predmet sadrži nepravilnost koji ima različite apsorpcijske moći od materijala predmeta, količina zračenja koja izlazi iz objekta izravno ispod nepravilnosti razlikovat će se od one koja izlazi iz susjednih područja bez nepravilnosti. Kad se film razvije primjetljivo će biti područje različite gustoće slike koja odgovara nedostatku materijala. Tako će se nedostatak vidjeti kao sjena unutar razvijene radiografije. Ova sjena može biti manje ili veće gustoće od okolne slike, ovisno o prirodi oštećenja i njegove relativne apsorpcijske karakteristike.

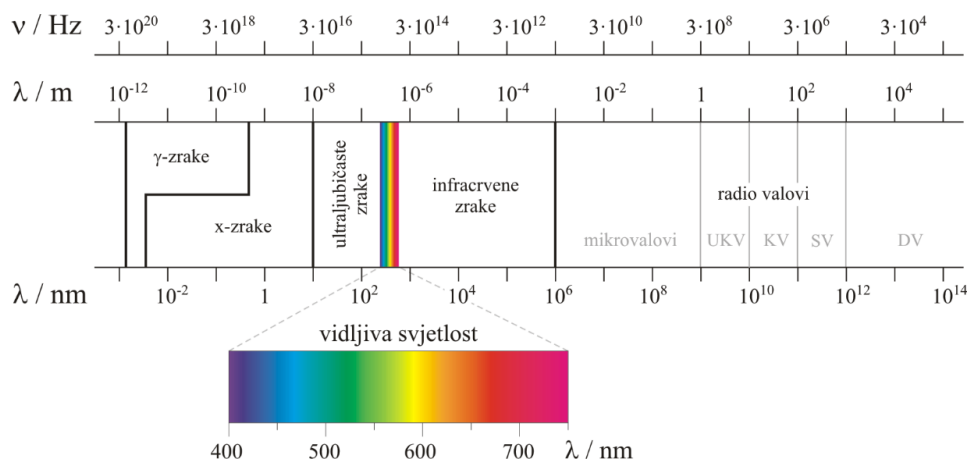


Slika 5.1. Radiografski sustav [14]

Položaj nepravilnosti unutar ispitivanog komada ne može se točno odrediti pomoću jedne radiografije, ali snimanjem nekoliko radiografija s snopom usmjerenim na objekt iz različitih kutova za svaku ekspoziciju, trebalo bi biti moguće odrediti točan položaj nepravilnosti u odnosu na debljinu predmeta. [7]

5.2. Elektromagnetski spektar

Dio elektromagnetskog spektra prikazan je na slici 5.2. Zračenje vrlo visoke frekvencije i kratke valne duljine, navedeno kao rendgenske zrake (x-zrake) i gama zrake (γ -zrake) su jedini oblik elektromagnetskog zračenja koji će prodrijeti kroz čvrstu tvar i neprozirni materijal. Elektromagnetski valovi mogu se smatrati nizom kvanta ili fotona, a energija fotona varira s frekvencijom zračenja.



Slika 5.2. Elektromagnetski spektar [15]:

Odnos između frekvencije i energije fotona povezana je Planckovim kvantnim odnosom. U Planckovom kvantnom odnosu parametri su:

- E energija fotona, J
- ν frekvencija, 1/s
- h Planckova konstanta, Js

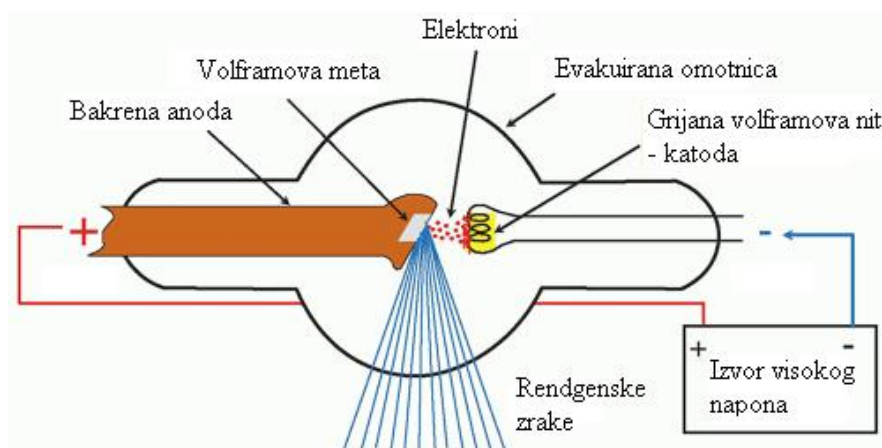
$$E = h \cdot \nu \quad (5.1.)$$

Jedina razlika između rendgenskih zraka i gama zraka je način njihova stvaranja. Rendgenske zrake nastaju bombardiranjem metalnog materijala sa snopom elektrona velike brzine unutar rendgenske cijevi. S druge strane gama zrake emitiraju se kao dio procesa raspadanja radioaktivnih tvari. [7]

5.3. Karakteristike radiografskog ispitivanja

5.3.1. Nastajanje rendgenskih zraka

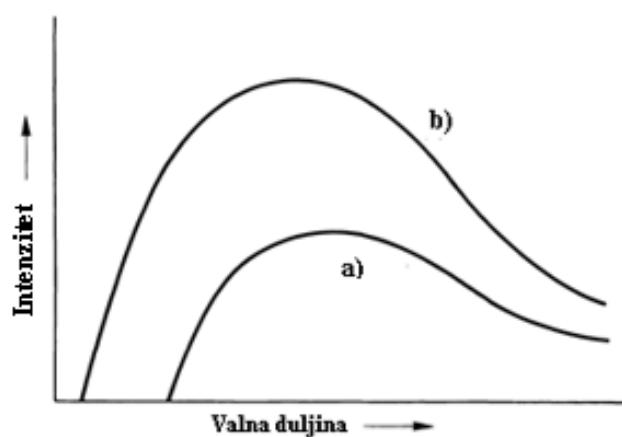
Kao što je ranije spomenuto, rendgenske zrake se proizvode bombardiranjem metalne mete sa snopom elektrona velike brzine. Takav se fenomen događa kod rendgenskih cijevi od kojih je jedna prikazana na slici 5.3. Rendgenska cijev se sastoji od staklenog omotača u kojem se nalaze dvije elektrode koje se nazivaju katoda i anoda. Katoda služi kao izvor elektrona. Elektroni se prvo ubrzavaju primjenom visokog napona preko katode i anode, a zatim se iznenada zaustavljaju čvrstom metom postavljenom u anodi. Naglo zaustavljanje elektrona koji se brzo kreću rezultira nastajanjem rendgenskih zraka, te se one emitiraju ovisno o obliku i dizajnu mete. [2]



Slika 5.3. Rendgenska cijev [16]

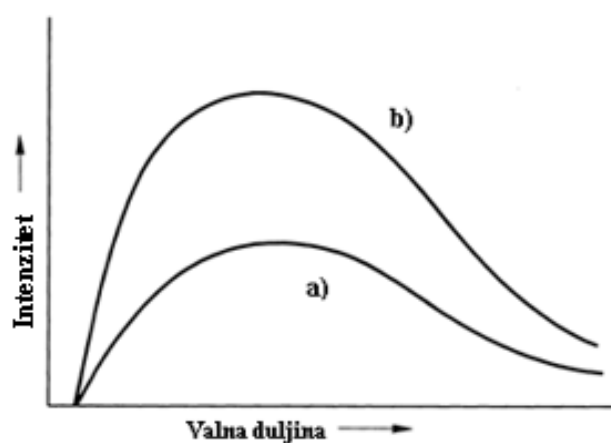
Intenzitet rendgenskih zraka ovisi o naponu i struji cijevi koji kontroliraju broj emitiranih elektrona koji pogađaju metu. Energija rendgenskih zraka uglavnom se kontrolira naponom koji se primjenjuje preko katode i anode.

Učinci promjena napona cijevi na spektar rendgenskih zraka i na intenzitet zračenja prikazan je na slici 5.4. Na slici je predstavljen: a) nizak napon cijevi i b) visok napon cijevi.



Slika 5.4. Utjecaj napona cijevi na promjenu intenziteta zračenja s valnom duljinom [7]

Jačina struje cijevi ne utječe na proširenje valnih duljina proizvedeno rendgenskim zrakama, ali ima utjecaj na intenzitet zračenja. Ovo je prikazano na slici 5.5. Na slici je predstavljena: a) mala struja cijevi i b) velika struja cijevi.



Slika 5.5. Utjecaj struje cijevi na varijaciju intenziteta X-zraka s valnom duljinom [7]

Postoji niz rendgenskih uređaja dostupnih za komercijalno radiografsko testiranje. Pojedini emitiraju rendgenske zrake u određenom smjeru, dok drugi mogu dati panoramski snop. Postoje strojevi koji imaju vrlo malu veličinu žarišne točke za radiografiju visoke razlučivosti.

Oni se nazivaju mikrofokusni strojevi. Neki strojevi su posebno dizajnirani da daju vrlo kratke, ali intenzivne impulse rendgenskih zraka. [2]

5.3.2. Nastajanje gama zraka

Za nastajanje gama zraka koriste se elementi koji su radioaktivni i emitiraju. Radij, prirodni radioaktivni element, koristio se kao izvor gama zraka za radiografiju, ali danas se koriste radioizotopi proizvedeni u nuklearnom reaktoru. Brojni radioizotopi se u načelu mogu koristiti za ispitivanjem radiografijom, ali samo se neki od njih smatraju praktičnim. [2]

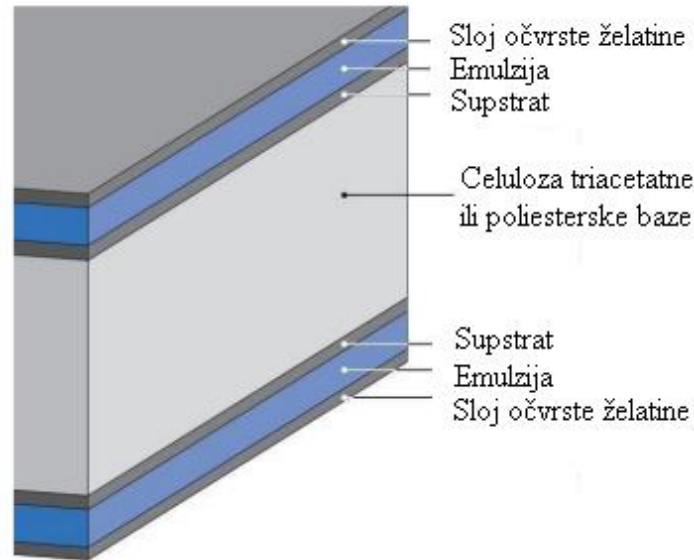
S obzirom na sva ova razmatranja radioizotopi koji se obično koriste u radiografiji zajedno s nekim od njihovih karakteristika su dati u tablici 5.1. [14]

Tablica 5.1. Karakteristike izvora gama zraka

Izvor	Srednji nivo energije, keV	Poludebljina u olovu, mm	Najveća debljina čelika, mm	Vrijeme poluraspada
Tulij Tm_{170}	72	0,4	< 5	128 dana
Iterbij Yb_{169}	200	0,88	12	31 dan
Selen Se_{75}	320	1	40	120 dana
Iridij Ir_{192}	450	5,5	70	74 dana
Cezij Cs_{137}	660	8,4	100	30 godina
Kobalt Co_{60}	1250	13	180	5,2 godine

5.3.3. Filmovi za radiografsko ispitivanje

Sustav detekcije koji se koristi u radiografskom ispitivanju je fotografski film koji se obično naziva radiogram. Film radiograma se sastoji od fleksibilne baze prozirne derivat celuloze ili sličnog materijala. Jedna ili obje strane ove baze su premazane sa svjetlosno osjetljivom emulzijom srebrnog bromida suspendiranog u želatini. Srebrni bromid je raspoređen kroz emulziju kao sićušni kristali te su izloženi zračenju kao što su rendgenske zrake, gama zrake ili vidljiva svjetlost. Slika 5.6. prikazuje prošireni prikaz općeg sastava filma.



Slika 5.6. Radiografski film [14]

Kako bi se zadovoljio vrlo širok raspon raznolike potražnje proizvode se različiti tipovi radiografskih filmova. Svaka vrsta filma dizajnirana je da zadovolji određene zahtjeve i oni su određeni okolnostima inspekcije kao što su:

- komad koji se ispituje,
- vrsta zračenja koje se koristi,
- energija zračenja,
- intenzitet zračenja i
- potrebna razina inspekcije.

Čimbenici filma koji se moraju uzeti u obzir pri odabiru su: brzina, kontrast, širina i zrnatost. Ove četiri karakteristike su blisko povezane, odnosno bilo koji od njih jest ovisna o ostalima. Tako filmovi s velikom veličinom zrna imaju veće brzine od onih s relativno malom veličinom zrna. Isto tako, filmovi visokog kontrasta obično su sitnije zrnati i sporiji od filmova niskog kontrasta. Zrnatost utječe na definiciju ili detalje slike. Za isti kontrast, mali zrnati film moći će razlučiti više detalja nego onaj koji ima relativno velika zrna. Filmovi se općenito koriste u sendviču između metalnih folija, obično od olova. Folije daju intenziviranije slike i tako pomažu da se smanji vrijeme izloženosti. [2]

5.3.4. Radiografske folije

Često se koriste za poboljšanje kontrasta i povećanje gustoće radiografske slike na filmu. Folije koje su postavljene u kontakt sa filmom tijekom ekspozicije mogu biti metalne ili fluorescentne. Najčešće korištena vrsta metalnih folija je olovna. Ponekad se koristi kombinacija oba tipa, fluoro-metalna folija.

Korištenjem olovnih folija moguće je poboljšati kontrast u radiografiji filtriranjem raspršenog zračenja te se smanjuje vrijeme izloženosti. Folije koriste vrlo tanke filmove od olova koji su zalijepljeni na tanku karticu ili plastiku. Debljina olova je obično 0,125 mm ili 0,25 mm, a folije se postavljaju unutar kontakta sa svake strane radiografskog filma.

Teški metal, poput olova, apsorbirat će nisku energiju zračenja puno lakše nego što će apsorbirati visokoenergetsku radijaciju. Raspršeno zračenje iz ispitnog uzorka uvijek je niže energije od upadnog zračenja te će ga folija gotovo u potpunosti apsorbirati, dok će veliki dio visokoenergetskog upadnog zračenja proći kroz filter olovne folije. Budući da olovne folije daju i učinak filtracije i učinak intenziviranja, postojat će neka kombinacija energije upadnog vala i čvrstoće materijala pri čemu ti učinci samo uravnotežuju jedan drugog..

Fluorescentne folije mogu se koristiti za poboljšanje učinkovitosti radiografije. Materijal folije koji se najviše koristi su kristali kalcijeva volframata na bazi tanke kartice. Ove folije su vrlo osjetljive na rendgenske zrake i fluoresciraju, dajući vidljivu svjetlost u plavom sektoru spektra. Međutim, ove folije ne smanjuju raspršenost i kao posljedica toga, kvaliteta slike nije tako kvalitetna kao ona koja se može dobiti korištenjem olovnih folija. Fluorescentne folije mnogo su manje osjetljive na gama zračenje nego na rendgenske zrake te daju pojačanje od nekih 20 do 40 puta. Zbog loše oštine fluorescentne slike na foliji, zajedno s općenito niskim kontrastom gama radiografije, ova se vrsta folije rijetko koristi u vezi s gama radiografijom.

Fluoro-metalne folije kombiniraju prednosti olovne i fluorescentne folije. Sastoje se od kombinacije fluorescentnog sloja i tankog sloja olova te se postavljaju tako da je fluorescentna strana u kontaktu s filmom. Olovo filtrira raspršeno zračenje, a fluorescentni dio pojačava sliku filma. Može se postići dobra kvaliteta slike, a vrijeme ekspozicije se može smanjiti znatno u usporedbi s vremenom koje bi bilo potrebno za film sa samo olovnom folijom. [7]

5.4. Postupak radiografskog ispitivanja

Ispitni uzorak se najprije pravilno očisti, vizualno pregleda te se zabilježe sve površinske nepravilnosti. Potrebno je odabrati film sa odgovarajućim karakteristikama, koji se obično postavlja u sendvič između pojačavajućih folija te je zatvoren u kasetu otpornu na svjetlo. Iz prethodno pripremljene karte izloženosti za materijal ispitnog uzorka, određuje se izloženost i energija zračenja koja će se koristiti. Nakon što je izvor zračenja isključen ili vraćen natrag u zaštitu, kazeta s filmom se uklanja i odvodi u mračnu sobu. U mračnoj sobi, pod sigurnim svjetlosnim uvjetima, uklanja se film s kasete i folije te se obrađuje. Obrada filma uključuje uglavnom četiri koraka. Razvijanje filma pretvara izloženi srebrni bromid kristal u crni metalik srebrni kristal čineći latentnu sliku vidljivom. Razvijanje obično traje 5 minuta na 20°C. Nakon razvijanja, film se fiksira pri čemu svi neeksponirani i nerazvijeni kristali filmske emulzije se uklanjaju. Eksponirana emulzija koja stvara sliku zadržava se na filmu. Učvršćivanje je učinjeno za otprilike 2 do 6 minuta. Film se zatim pere po mogućnosti u tekućoj vodi oko 20 do 30 minuta te se stavlja na sušenje. Na kraju se sa filma očitaju nepravilnosti te se sastavlja izvještaj. Izvješće uključuje informacije o ispitnom uzorku, korištenoj tehnici i nepravilnostima. Izvješće je potrebno da bude potpisano od strane odgovorne osobe. [2]

5.5. Različiti oblici radiografskog ispitivanja

5.5.1. Kseroradiografija

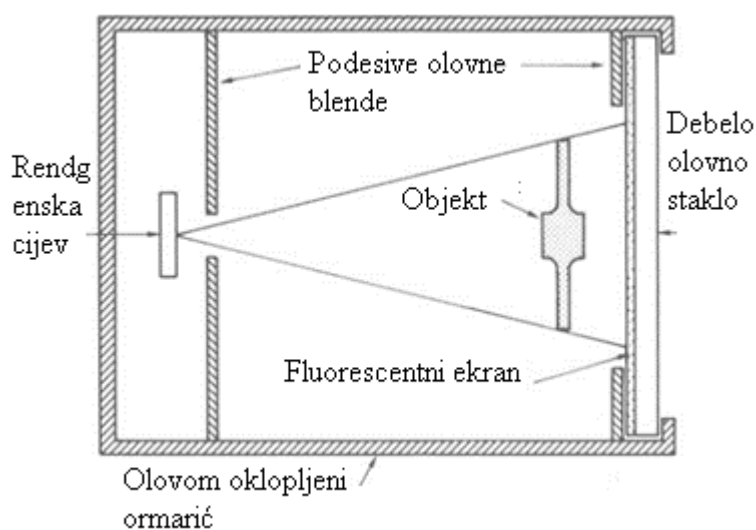
Ovim načinom latentna radiografska slika se proizvodi na metalnoj ploči na koju se stavlja tanki sloj selena. Ploča dobiva ukupni naboj, čak i naboj statične struje. Nabijena ploča ovog tipa vrlo je osjetljiva na svjetlost i rendgensko zračenje te se mora čuvati u držaču koji ne propušta svjetlo, sličnom kazeti za film. Kada rendgesne zrake udare u ploču, one će različito isprazniti površinu ploče proporcionalno količini zračenja primljenoj na različitim dijelovima ploče, stvarajući tako elektrostatsku latentnu sliku.

Izložena ploča u nedostatku svjetla razvija se izlaganjem u oblaku iznimno finog plastičnog praha ili tonera. Čestice praha tonera privlače nabijeni dijelovi ploče, stvarajući radiografsku sliku. Ta slika nije postojana jer prah na mjestu drži samo elektrostatički naboj. Trajna slika može se napraviti stavljanjem komada obrađenog papira. Prašak se prenosi na papir gdje se

pomoću topline može fiksirati na mjestu. Kseroradiografske slike obično mogu pokazati izvrsne detalje. [7]

5.5.2. Fluoroskopija

U fluoroskopiji se rendgenska slika ne snima na film, već zračenje koje prolazi kroz promatrani predmet, nailazi na zaslon sastavljen od kristala fluorescentnog spoja koji su vezani za tanku podlogu. Kristali fluoresciraju kada ih rendgenske zrake pogode te je intenzitet proizvedene fluorescencije najveći u onim dijelovima koji primaju najviše zračenja. Skica principa fluoroskopije je prikazana na slici 5.7. Izgled fluoroskopske slike je obrnuto od onoga što se vidi na razvijenoj radiografiji te nepravilnost kao što je poroznost koja bi se pokazala kao tamna mrlja na radiografiji, na fluorescentnoj foliji bi se pokazala kao svjetlija mrlja. Glavna prednost fluoroskopije je da se slika može vidjeti u stvarnom vremenu, pa je to korisna metoda za inspekciju velikih stavki.



Slika 5.7. Princip fluoroskopije [7]

Fluoroskopska slika obično je prilično nečista i treba je gledati u prostoriji s niskom razinom pozadinskog osvjetljenja. Svjetlija slika nastala nakon pojačanja manja je od originalne slika na zaslonu, ali je dovoljno svijetla da se može povećati sustavom optičkih leća. [7]

5.6. Prednosti i nedostaci radiografskog ispitivanja

Radiografija može vizualno prikazati veličinu i oblik nepravilnosti unutar izratka, tako da je lako odrediti prirodu oštećenja. Film se može koristiti kao izvorni zapis testa za istraživanje s

više strana i dugoročno očuvanje. Međutim, cijena radiografskog filma i druge opreme koja se troši ovom metodom je relativno visoka, a brzina pregleda je spora. Prikladan je samo za otkrivanje nedostataka volumena kao što su pore, uključci troske, labavost, što može biti kvalitativno, ali ne i kvantitativno te nije prikladno za upotrebu. Struktura šupljine, pregled kutnog zavara i T-spoja je nizak te je teško pronaći pukotine i nestopljene nepravilnosti kao što su mali razmaci i nepravilnosti unutrašnjeg raslojavanja otkivaka, cijevi i šipki. Osim toga, zračenje je štetno za ljudsko tijelo i potrebne su odgovarajuće zaštitne mjere. [17]

5.7. Primjena radiografskog ispitivanja

Radiografsko ispitivanje se uglavnom primjenjuje za otkrivanje nepravilnosti kao što su pukotine, poroznost, inkluzije, nedostatak prodiranja korijena, nedostatak fuzije, preklopi, šavovi, skupljanje i korozija. Nepravilnosti je moguće otkriti u odljevcima, u posudama pod tlakom, spremnicima za industrijske tekućine i plinove, cjevovodima, čeličnim mostovima, čeličnim i aluminijskim stupovima i okvirima, nuklearnim reaktorima, ciklusu nuklearnog goriva, kotlovskim cijevima, brodovima, podmornicama, zrakoplovima i naoružanju. U većini ovih slučajeva uključena je inspekcija zavara.

Radiografija se također intenzivno koristi za pregled odljevaka i otkivaka. Uzorci pravilnog oblika i jednolike debljine mogu se pregledati kao zavareni spojevi u pločama, dok je potrebno posebno razmotriti ispitivanje uzoraka različitih debljina. Obično se koristi tehnika dvostrukog filma pri čemu se za jednu ekspoziciju koriste dva filma različitih brzina. Na ovaj način točna gustoća se postiže ispod debelih dijelova na bržem filmu, dok sporiji filmovi snimaju ispravne slike tankih presjeka.

Radiografija se koristi u pregledu eksploziva koji se nalaze u zatvorenim čahurama kutije i opreme. U području elektronike koristi se za inspekciju tiskanih pločica i sklopova za provjeru ispravnosti priključaka. [2]

6. ULTRAZVUČNO ISPITIVANJE

Ultrazvučno ispitivanje je metoda ispitivanja bez razaranja u kojoj visoka frekvencija ultrazvučnih valova se uvodi u materijal koji se pregledava te se ultrazvuk koji izlazi iz ispitnog uzorka detektira i analizira. Provodi se na frekvencijama između 0,5 i 25 MHz znatno iznad raspona ljudskog sluha, koji je oko 20 Hz do 20 kHz. Ultrazvučni valovi su mehaničke vibracije čestica medija u kojem putuju. Valovi su predstavljeni jednadžbom sinusoidnog vala koja ima određenu amplitudu, frekvenciju i brzinu. Amplituda je najveći otklon od srednje vrijednosti. Frekvencija je broj ciklusa u sekundi, a duljina jednog ciklusa naziva se valna duljina. Odnos između frekvencije f , valne duljine λ i brzine v je dana sa izrazom:

$$v = \lambda \cdot f \quad (6.1.)$$

Postoje dvije glavne vrste ultrazvučnih valova. Longitudinalni valovi ili kompresijski valovi su oni kod kojih se izmjenjuju kompresija i razrjeđivanje zone nastale vibracijom čestica. Smjer osciliranja čestica je paralelan sa smjerom širenja valova. Ova vrsta vala može se širiti u krutim tvarima, tekućinama i plinovima. Druga glavna vrsta ultrazvučnih valova su transverzalni valovi. Kod transverzalnih ili posmičnih valova smjer pomaka čestica je pod pravim kutom na smjer širenja. Za sve praktične svrhe, transverzalni valovi mogu se širiti samo u čvrstim tvarima. To je zato što je udaljenost između molekula ili atoma toliko velika da privlačenje između njih nije dovoljno da jedan pomakne drugog te zbog toga valovi brzo slabe. [2]

6.1. Svojstva ultrazvučnih valova

6.1.1. Valna duljina

Ultrazvučni valovi će se reflektirati učinkovito samo od strane objekata koji imaju dimenzije jednake ili veće od valne duljine zračenja. Iz tablice 6.1. može se vidjeti da će ultrazvučne zrake s frekvencijom od 10 MHz biti sposobne detektirati nepravilnosti u aluminiju većih od 0,62 mm, ali ako se koristi frekvencija od 1,25 MHz mogu se primijetiti samo nedostaci veći od 4,95 mm.[7]

Tablica 6.1. Odnos između korištene frekvencije sa mogućnošću pronalaska nepravilnosti u nekim materijalima

Materijal	λ (mm)			
	1,25 MHz	2,5 MHz	5 MHz	10 MHz
Zrak	0,26	0,13	0,066	0,033
Voda	1,14	0,57	0,286	0,143
Ulje	1,39	0,70	0,35	0,175
Aluminij	4,95	2,48	1,24	0,62
Bakar	3,68	1,84	0,92	0,46
Magnezij	4,62	2,31	1,16	0,58
Željezo	4,65	2,32	1,16	0,58
Polietilen	1,87	0,94	0,47	/

6.1.2. Brzina vala

Brzina kojom se energija prenosi između dvije točke u mediju kretanjem valova poznata je kao brzina vala. Označava se malim slovom v . [18]

Brzina longitudinalnih kompresijskih valova v_c povezana je korijenom omjera adijabatske volumenske elastičnosti K_a i gustoćom ρ .

$$v_c = \left(\frac{K_a}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (6.2.)$$

Brzina kompresijskih valova v_c u čvrstim tvarima ovisi o modulu elastičnosti materijala E , Poissonovom koeficijentu ν i gustoći materijala ρ .

$$v_c = \left(\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu) \cdot \rho}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (6.3.)$$

Brzine longitudinalnih valova za neke medije pri atmosferskom tlaku i temperaturi od 15°C prikazane su u tablici 6.2..

Tablica 6.2. Brzine longitudinalnih valova u nekim medijima

Materijal	Brzina (m/s)
Zrak	330
Voda	1430
Ulje	1740
Aluminij	6190
Bakar	4600
Željezo	5810

Brzina transverzalnih valova v_s , unutar čvrstog tijela iznosi otprilike polovicu longitudinalne brzine vala te je određena korijenom omjera modula krutosti G i gustoće materijala ρ . [7]

$$v_s = \left(\frac{G}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (6.4.)$$

6.1.3. Akustična impedancija

Akustična impedancija je otpor koji se pruža širenju ultrazvučnih valova po materijalu. Ovisi o gustoći medija i brzini ultrazvučnih valova koji se prenose kroz medij. Označava se slovom Z , a određena je umnoškom gustoće materijala ρ i brzine vala v . [18]

$$Z = \rho \cdot v \quad (6.5.)$$

U tablici 6.3. prikazane su akustične impedancije za neke medije. [7]

Tablica 6.3. Akustične impedancije nekih medija

Materijal	Akustična impedancija (MPa s/m)
Zrak	$4,04 \cdot 10^{-4}$
Voda	1,43
Ulje	1,58
Aluminij	16,77
Bakar	41,08
Željezo	45,72

6.2. Refleksija i prijenos zvučnih valova

Ultrazvučna energija se može reflektirati, lomiti, raspršivati, apsorbirati ili prenositi u interakciji s drugim materijalom. Refleksija valova se odvija na isti način kao i kod svjetlosti, tj. upadni kut jednak je kutu refleksije. Između dva medija različitih akustičnih impedancija dolazi do neusklađenosti koja uzrokuje da se veći dio vala reflektira unatrag, a ostatak se prenosi. U tablici 6.4. prikazane su brzine zvuka u nekim materijalima. [2]

Tablica 6.4. Brzine zvuka u nekim materijalima

Materijal	Longitudinalna, m/s	Transverzalna, m/s
Aluminij	6320	3130
Mjed	4280	2030
Bakar	4660	2260
Zlato	3240	1200
Željezo	5900	3230
Čelik	5890	3240
Voda	1430	/
Ulje	1390	/
Zrak	330	/

6.3.1. Refleksija i prijenos pod pravim kutom upada

Kada ultrazvučni valovi padaju pod pravim kutom u granicu dva različita medija različitih akustičnih impedancija, neki od valova će se reflektirati, a neki će se prenositi preko granica. Količina ultrazvučne energije koja će se reflektirati ili prenositi ovisi o razlici između akustičnih impedancija dvaju medija. Ako je ova razlika velika onda će se većina energije reflektirati i samo mali dio će se prenositi preko granica. Dok za malu razliku u akustičkim impedancijama najveći dio ultrazvučne energije će se prenositi, a samo mali dio se reflektira unatrag. Pri upadu pod pravim kutom, koeficijent refleksije R , koji je omjer reflektiranog ultrazvučnog intenziteta I_r i upadnog ultrazvučnog intenziteta I_i je dan izrazom:

$$R = \frac{I_r}{I_i} = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \quad (6.6.)$$

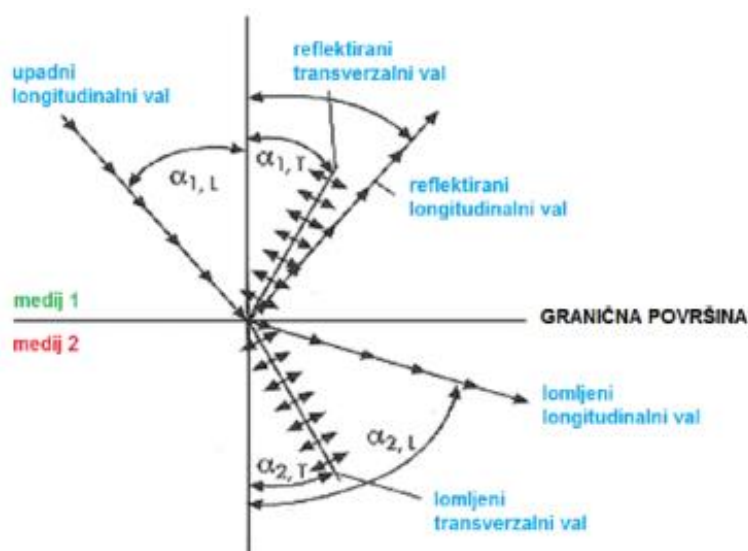
Ostatak energije prenosi se preko u drugi medij. Koeficijent prijenosa T je omjer prenesenog ultrazvučnog intenziteta I_t i upadnog ultrazvučnog intenziteta I_i te je dan izrazom:

$$T = \frac{I_t}{I_i} = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \quad (6.7.)$$

6.3.2. Refleksija i prijenos pri kosom upadu

Kada ultrazvučni val upadne na granicu dva medija pod kutom osim pravog, mora se uzet u obzir promjena u prirodi valovitog kretanja tj. uzdužno prema poprečnom i obrnuto. Svi mogući ultrazvučni valovi koji napuštaju točku sudara na granici dva različita medija prikazani su za upadni longitudinalni val na slici 6.1. Na slici se mogu razlikovati slijedeći valovi: [2]

- $\alpha_{1,L}$ kut refleksije longitudinalnog vala u prvom mediju,
- $\alpha_{1,T}$ kut refleksije transverznog vala u prvom mediju,
- $\alpha_{2,L}$ kut loma longitudinalnog vala u drugom mediju i
- $\alpha_{2,T}$ kut loma transverznog vala u drugom mediju.



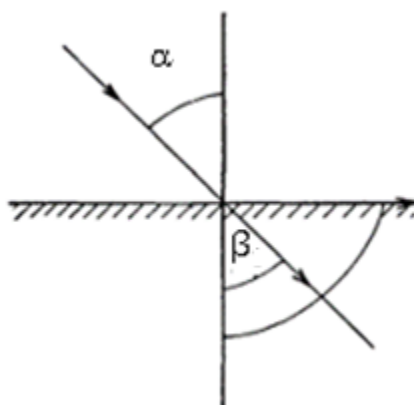
Slika 6.1. Refleksija, lom i konverzija ultrazvučnih valova [19]

Opći zakon koji za određeni sudar ultrazvučnog vala na granici dva različita medija, određuje smjerove reflektiranih i lomljenih valova poznat je kao Snellov zakon. Prema ovom zakonu omjer sinusa upadnog kuta α i sinusa kuta refleksije ili loma β jednak je omjeru brzine upada v_1 i brzine reflektiranih ili lomljenih valova v_2 . Snellov zakon je dan izrazom: [18]

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} \quad (6.9.)$$

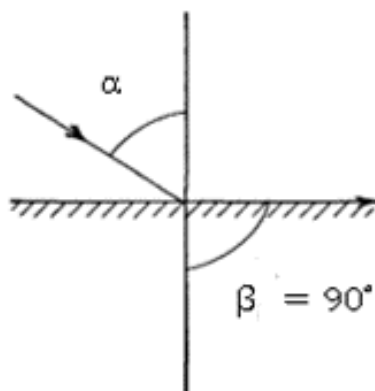
6.3.3. Prvi i drugi kritični kut

Ako je kut upada α malen, ultrazvučni valovi koji putuju u mediju prolaze kroz pretvorbe i refrakcije nailazeći na granicu s drugim medijem. To rezultira simultanim širenjem longitudinalnih i transverzalnih valova pod različitim kutovima loma u drugom mediju. Kako se upadni kut povećava, povećava se i kut loma β . Kada kut loma uzdužnog vala dosegne 90° , val izlazi iz drugog medija i putuje paralelno s granicom prikazano na slici 6.2. Kut upada pri kojem se pojavljuje refrakcijski longitudinalni val naziva se prvi kritični kut. [18]



Slika 6.2. Prvi kritični kut [18]

Ako se upadni kut α dodatno povećava, kut loma transverzalnog vala također se približava 90° . Točna vrijednost upadnog kuta α , za koji je kut loma β transverzalnog vala točno 90° , naziva se drugi kritični kut. Prikazano je na slici 6.3. Kod drugog kritičnog kuta pojavljuje se lomljeni transverzalni val iz medija te putuje paralelno s granicom. [18]

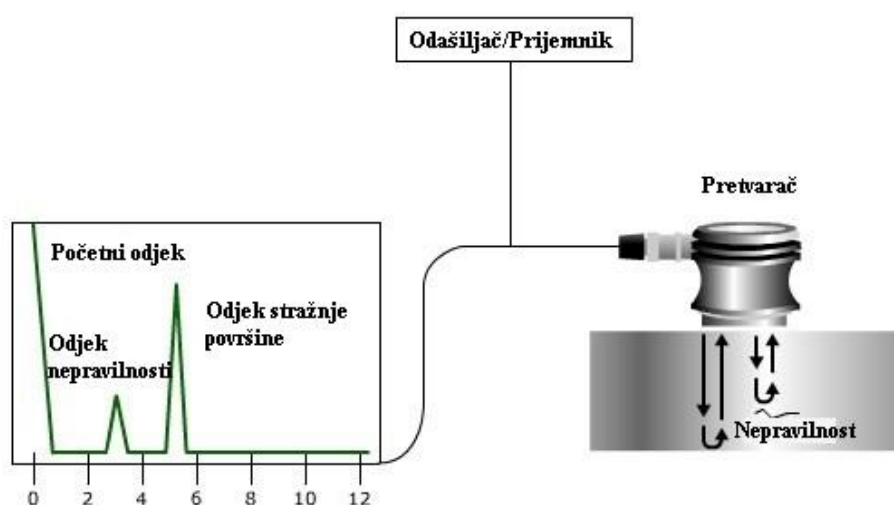


Slika 6.3. Drugi kritični kut [18]

6.4. Tehnike ultrazvučnog ispitivanja

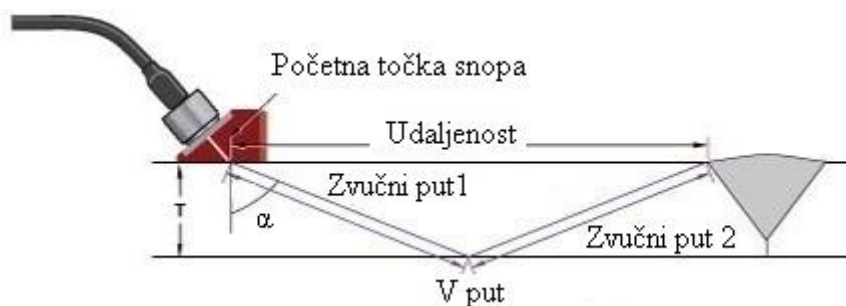
6.4.1. Tehnika odjeka

Najčešće korištena tehnika ultrazvučnog ispitivanja je tehnika odjeka ravnom sondom. U ovom slučaju odašiljač i prijemnik nalaze se na istoj strani kao i uzorak, a prisutnost nepravilnosti označena je odjekom prikazanim na zaslonu ispitnog uređaja. Obično jedna sonda istovremeno djeluje kao odašiljač, a zatim kao prijemnik. Načelo rada tehnike prikazano je grafički na slici 6.4. [2]



Slika 6.4. Tehnika odjeka ravnom sondom [20]

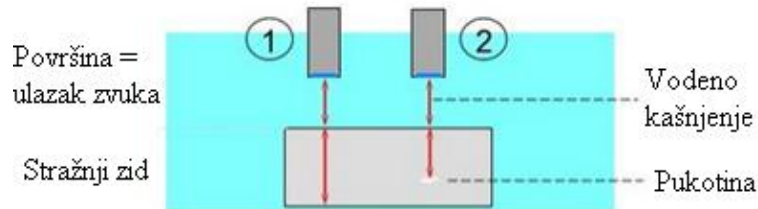
Postoje određene situacije testiranja u kojima nije moguće postaviti sondu pod pravim kutom u odnosu na nepravilnost. Problem se može riješiti upotrebom kutne sonde. Primjer tehnike upotrebe kutnih sondi je pregled zavora u pločama s paralelnim stranicama. Sonde odašiljača i prijemnika raspoređene su kao na slici 6.5. Ako postoji bilo kakva nepravilnost u zavoru to će uzrokovati redukciju jačine primljenog odjeka. Za potpuno skeniranje zavora, sonde treba pomicati po površini ploče. [7]



Slika 6.5. Tehnika odjeka kutnom sondom [21]

6.4.2. Imerzijska tehnika ispitivanja

Imerzijska tehnika ispitivanja je beskontaktna u kojoj se komponenta koja se ispituje uroni u spremnik s vodom te se ispitna sonda postavi iznad ispitnog komada, ali ispod površine vode. Grafički prikaz ispitivanja imerzijskom metodom prikazan je na slici 6.6.

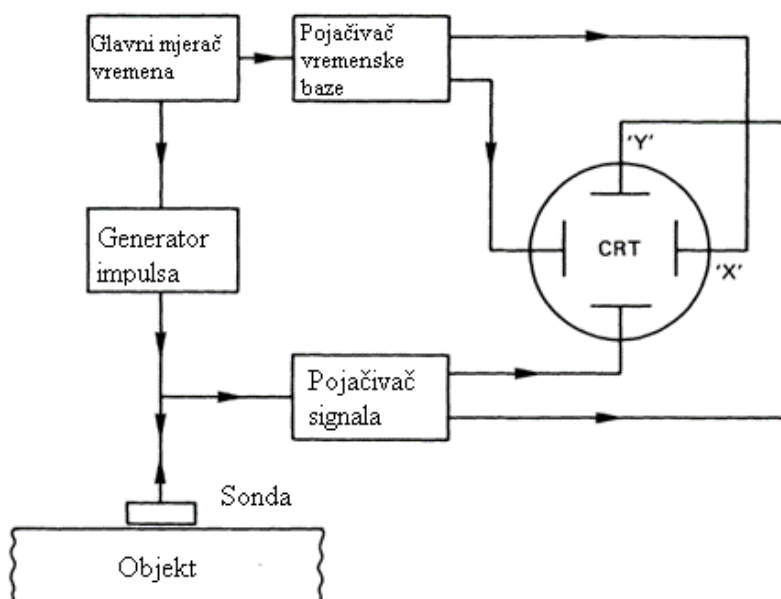


Slika 6.6. Imerzijska tehnika ispitivanja [20]

Ispitivanje uranjanjem idealno je za ispitivanje dijelova obrađenih ili gotovih dijelova u proizvodnom pogonu. Primjeri njegove upotrebe su kod inspekcija ploča prije nego što se strojno obradi za potrebe izrade zrakoplova, za pregled diskova plinske turbine, te za pregled kotača zrakoplova. [7]

6.5. Oprema potrebna za ultrazvučno ispitivanje

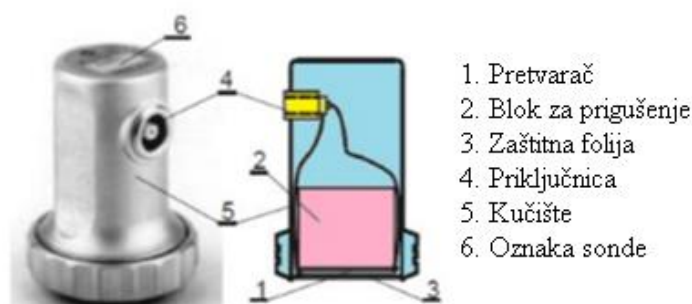
Oprema za ultrazvučno ispitivanje uglavnom se sastoji od detektora nepravilnosti, pretvarača te testnih ili kalibracijskih blokova. Na slici 6.7. grafički je prikazan blok dijagram tipičnog detektora nepravilnosti. Generator impulsa stvara impulse izmjeničnog napona koji pobuđuju kristale u sondi te se generira uzorak spajanjem sonde na njega. Valovi se odbijaju od granice ispitnog uzorka ili od bilo koje nepravilnosti unutar njega te ponovno dolaze do sonde. Ovdje se putem obrnutog piezoelektričnog efekta ultrazvučni valovi pretvaraju u naponske impulse i preko pojačala se dovode do katodne cijevi. Zatim se prikazuju na zaslonu kao impulsi određene amplitude i mogu se protumačiti kao odjeci sa stražnje stijenke ispitnog uzorka ili s nepravilnosti. [2]



Slika 6.7. Blok dijagram ultrazvučnog detektora nepravilnosti [7]

6.5.1. Vrsta sonde

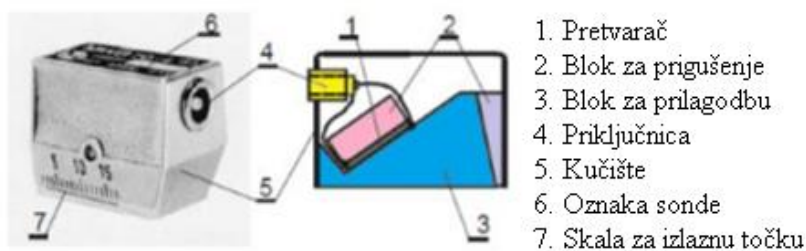
Ravna sonda dizajnirana je za prijenos vala kompresije u ispitni materijal pod pravim kutom u odnosu na površinu materijala. U nekim slučajevima površina kristala je nepokrivljena tako da se može postaviti izravno, putem uljnog ili vodenog filma, u kontakt s testnim materijalom. Kristal može biti zaštićen slojem metala, keramike ili pleksiglasa. Na slici 6.8. prikazan je grafički prikaz ravne sonde sa svim dijelovima. [7]



Slika 6.8. Ravna sonda [19]

Opća konstrukcija kutne sonde slična je konstrukciji ravnoj sondi s ugrađenim kristalom u oblikovani blok od pleksiglasa. Reflektirani val kompresije proizveden je na granici pleksiglasa i metala. Ovaj reflektirani val mogao se eventualno vratiti u kristal i dati zbunjujuće odjeke. Da bi se ovo izbjeglo, upijajući medij poput gume umetnut je u sondu. Alternativna metoda je oblikovati blok od pleksiglasa na takav način da se reflektirani val odbije nekoliko puta dok se

njegova energija ne rasprši. To je moguće jer pleksiglas ima visoki koeficijent apsorpcije. Na slici 6.9. grafički je prikazana kutna sonda sa svim dijelovima. [7]

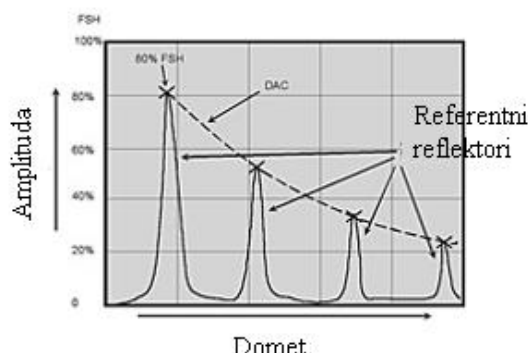


Slika 6.9. Kutna sonda [19]

6.5.2. Metode kalibracije

Prilikom odabira standardnih referentnih blokova postoji nekoliko varijabli koje je potrebno razmatrati. To uključuje prirodu sastavnog materijala i učinke toplinske i mehaničke obrade na akustična svojstva komponente materijala, oblika komponente i smjer ultrazvučne zrake, dubinu, varijaciju amplitude snopa te prirodu nepravilnosti koju treba otkriti. Za kalibraciju se obično koriste tri vrste standardnih ispitivanja DAC metoda, DGS metoda i test blokovi. [7]

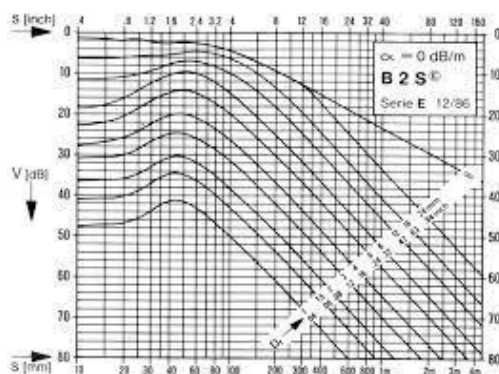
Korekcija amplitude udaljenosti (DAC) pruža način uspostavljanja grafičke osjetljivosti referentne razine kao funkcije udaljenosti prelaska na zaslonu. Akustični odjeci s iste reflektirajuće površine imat će različite amplitude na različitim udaljenostima od pretvornika. Najčešće će DAC dopustiti gubitak amplitude tijekom promjene dubine materijala, grafički na zaslonu, ali se to također može učiniti elektronički određenim instrumentima. DAC se može koristiti u uzdužnom i posmičnom načinu rada, kao i u tehnikama pregleda kontaktom ili uranjanjem. Na slici 6.10. prikazana je DAC metoda kalibracije. [22]



Slika 6.10. DAC metoda kalibracije [23]

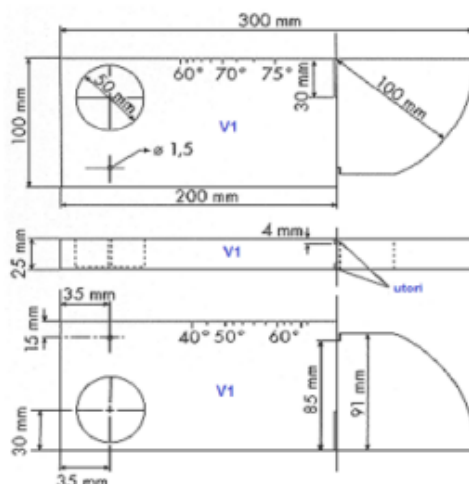
DGS/AVG je metoda dimenzioniranja koja povezuje amplitudu odjeka od reflektora s amplitudom ravnog dna na istoj dubini ili udaljenosti. To je poznato kao ekvivalentna veličina

reflektora. DGS je akronim za Distance/Gain/Size. Tradicionalno je ova tehnika uključivala ručno uspoređivanje amplitude odjeka s ispisanim krivuljama, no suvremeni digitalni detektori nepravilnosti mogu nacrtati krivulje nakon rutinske kalibracije i automatski izračunati ekvivalentnu veličinu reflektora. Generirane krivulje izvedene su iz izračunatog širenja snopa zraka danog pretvarača, na temelju njegove frekvencije i promjera elementa korištenjem jedne kalibracijske točke. Može se uzeti u obzir slabljenje materijala te varijacije spoja u kalibracijskom bloku i ispitnom uzorku. Primjer tipične DGS krivulje prikazan je na slici 6.11. Najgornja krivulja predstavlja relativnu amplitudu odjeka od ravnog pločastog reflektora, ucrtanu na različitim udaljenostima od pretvarača, a krivulje ispod predstavljaju relativnu amplitudu odjeka od progresivno manjih disk reflektora na istoj ljestvici udaljenosti. [24]



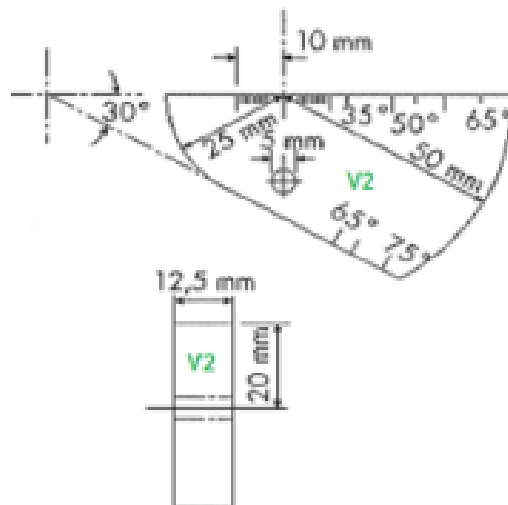
Slika 6.11. DGS metoda kalibracije [25]

Za kalibriranje ispitnih uređaja koriste se standardni kalibracijski blokovi. Postoji veliki izbor blokova koji se koriste za različite vrste inspeksijskih problema. Neki od najčešće korištenih su ovdje ukratko opisani. Testni blok prikazan na slici 6.12., može se koristiti za podešavanje osjetljivosti testa, kalibracije vremenske baze, provjeru linearnosti pojačala te provjeru detektora. Blok se naziva i V1 blok. [2]



Slika 6.12. Kalibracijski V1 blok [19]

V2 ispitni blok se uglavnom koristi s kutnim sondama za kalibraciju ispitnih uređaja. Na slici 6.13. prikazan je kalibracijski V2 blok. [2]



Slika 6.13. Kalibracijski V2 blok [19]

6.6. Prednosti i nedostaci ultrazvučnog ispitivanja

Glavne prednosti ultrazvučnog ispitivanja u odnosu na druge metode su: [2]

- vrhunska moć prodiranja koja omogućuje otkrivanje nepravilnosti duboko u materijal. Ultrazvučni pregled provodi se rutinski do dubine od oko 6 metra kod inspekcije dijelova kao što su duge čelične osovine i otkivci rotora,
- visoka osjetljivost koja omogućuje otkrivanje vrlo malih nepravilnosti,
- veća točnost od drugih metoda ispitivanja bez razaranja u određivanju položaja unutarnjih nepravilnosti, procjeni njihovih veličina te karakterizaciji orijentacije, oblika i prirode,
- samo jedna površina mora biti dostupna,
- nije opasno za rukovatelje ili osoblje u blizini i nema utjecaja na opremu i materijal u blizini,
- sposobnost volumetrijskog skeniranja, koja omogućuje pregled volumena metala koji se proteže od prednje površine do stražnje površine dijela i
- rad je elektronički, što daje gotovo trenutne indikacije nepravilnosti. Ovo čini metodu prikladnom za neposredno tumačenje, automatizaciju, brzo skeniranje, online praćenje proizvodnje i procesa kontrole. Kod većine sustava može postojati trajna evidencija rezultata inspekcije napravljenih za buduću upotrebu.

Nedostatci ultrazvučnog ispitivanja su: [26]

- male, grube, iznimno tanke materijale nepravilnog oblika teško je pregledati,
- mora biti pristupačna površina kako bi se mogao koristiti ultrazvuk,
- kod lijevanog željeza i drugih grubih materijala, slab prijenos ultrazvuka i visok šum odjeka ultrazvučnog ispitivanja otežavaju pregled,
- obuka i vještina potrebni za izvršavanje ispitivanja su opsežniji od drugih metoda ispitivanja bez razaranja,
- ultrazvučna zraka koja je paralelna s linearnim nepravilnostima može proći neotkrivena ultrazvučnim ispitivanjem,
- postoje referentni standardi potrebni i za kalibraciju opreme i za karakterizaciju nepravilnosti i
- ultrazvučno ispitivanje također je skuplje od ostalih metoda.

6.7. Primjena ultrazvučnog ispitivanja

Ultrazvučna metoda ispitivanja prikladna je za otkrivanje, identifikaciju i procjenu veličine širokog spektra površinskih i podpovršinskih nepravilnosti u metalnim materijalima, pod uvjetom da postoji pristup jednoj površini. Postoje automatizirani sustavi koji su prikladni za rutinsku inspekciju proizvoda u međufazi i završnoj fazi proizvodnje. Korištenje ručnih sondi, mnoge vrste komponenti mogu se testirati, uključujući ispitivanje na licu mjesta. Ova sposobnost čini metodu posebno privlačnom za rutinski pregled zrakoplova te cestovnih i željezničkih vozila u potrazi za početnim zamornim pukotinama. U inspekciji zrakoplova razvijene su specifične metode ispitivanja za svaku pojedinu primjenu te se moraju slijediti postupci navedeni u odgovarajućim priručnicima. U mnogim slučajevima sonda će biti posebno dizajnirana za specifičnu vrstu inspekcije. [7]

7. EKSPERIMENTALNI RAD

7.1. Predmet rada

Eksperimentalni rad obavljen je u tvrtki LBD d.o.o. u Rijeci. Cilj ispitivanja je bila provjera zavara ultrazvučnom metodom ispitivanja, dok je radiografska metoda poslužila samo kao kontrola dobivenih rezultata. Ispitivanje zavara ultrazvukom izvršilo se na atestnoj ploči izrađenoj od čelika S355 prikazanoj na slici 7.1. Dimenzije ploče su 351 mm x 381 mm x 30 mm. Ploče su najprije obrušene i očišćene te predane na zavarivanje. Priprema materijala za zavarivanje je odrađena u V obliku. Ploča je zavarena MAG postupkom koje se još naziva i CO₂ zavarivanje. MAG zavarivanje je vrsta elektrolučnog zavarivanja taljenjem u aktivnom zaštitnom plinu obično ugljikovom dioksidu.



Slika 7.1. Atestna ploča

7.2. Ispitna oprema

Za ispitivanje ultrazvukom korišten je uređaj Krautkrämer USM 100 koji je prikazan na slici 7.2.. Krautkrämer USM 100 je prijenosni, vrlo svestran detektor nepravilnosti koji se koristi za: [27]

- pregled zavara,
- kontrolu korozije,
- pregled kovanja i odljevaka,
- pregled tračnica,
- pregled kompozita i
- inspekciju nuklearnih postrojenja.



Slika 7.2. Ultrazvučni uređaj USM 100

Za ispitivanje je korištena kutna sonda MWB 60-4 prikazana na slici 7.3. Iz sonde izlazi zraka pod kutom od 60 stupnjeva i 4 MHz.



Slika 7.3. Kutna sonda MWB 60-4

7.3. Kalibracija

Prije samog početka ispitivanja ultrazvukom potrebno je kalibrirati uređaj za ispitivanje zavara za navedenu sondu. Kalibracija se započinje u meniju *Setup* kako je prikazano na slici 7.4.



Slika 7.4. Setup

Pošto se radi sa transversalnim valovima potrebno je namjestiti brzinu ultrazvuka na 3250 m/s kako je prikazano na slici 7.5.



Slika 7.5. Odabir brzine ultrazvuka

Na mjernoj skali potrebno je namjestiti računanje zvučnog puta kako je prikazano na slici 7.6.



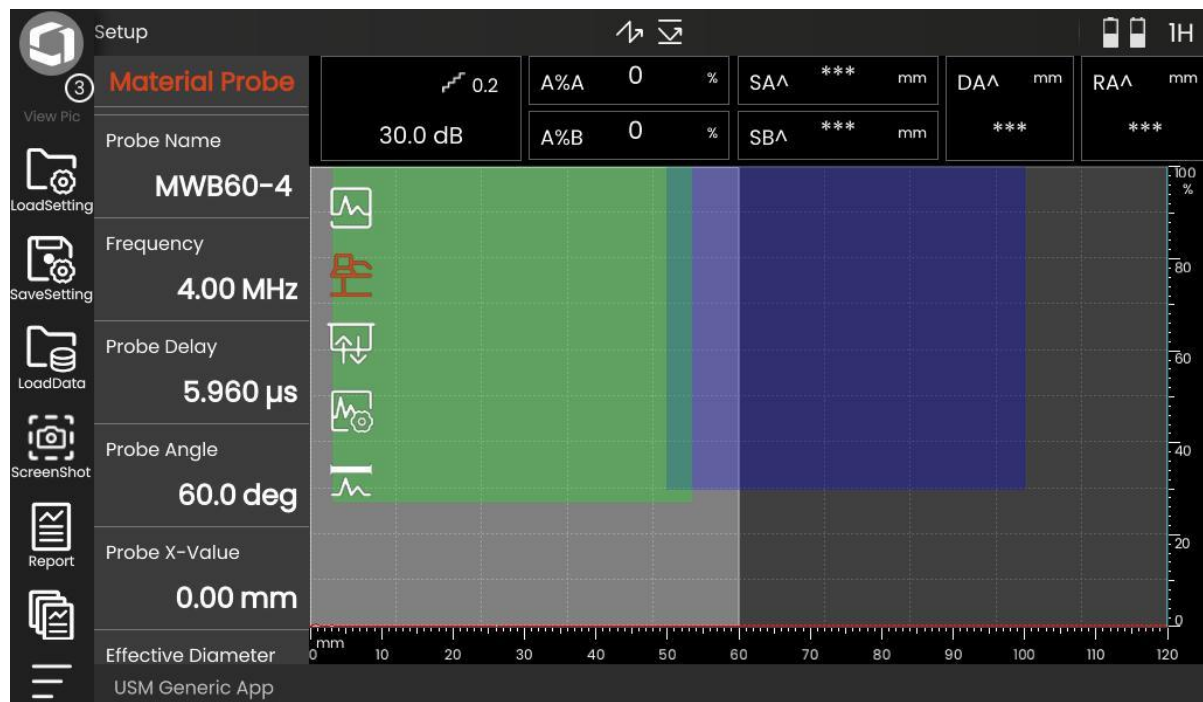
Slika 7.6. Odabir zvučnog puta

Potrebno je uključiti *Color leg* za lakšu vizualizaciju kako je prikazano na slici 7.7.



Slika 7.7. Uključivanje Color leg-a

Odabirom naziva sonde automatski se popunjavaju ostali podatci o njoj prikazano na slici 7.8.



Slika 7.8. Odabir sonde

Napon sonde potrebno je namjestiti na 120V kako je prikazano na slici 7.9.



Slika 7.9. Odabir napona sonde

Potrebno je postaviti tip kalibracije na *Multi step* s kojim se može jednostavno ustanoviti u kojem se koraku nalazi nepravilnost prikazano na slici 7.10.



Slika 7.10. Odabir Multi step-a

Mjerno područje određuje se pomoću debljine materijala T i kuta sonde α .

$$MP = \frac{2T}{\cos \alpha} = \frac{2 \cdot 30}{\cos 60} = 120 \text{ mm} \quad (7.1.)$$

Izračunatim mjernim područjem ekran bi prikazivao samo prvi i drugi polukorak ispitivanja zato je uzeto za mjerno područje 150 mm da bi bila vidljiva polovica trećeg polukoraka pri ispitivanju kako je prikazano na slici 7.11.



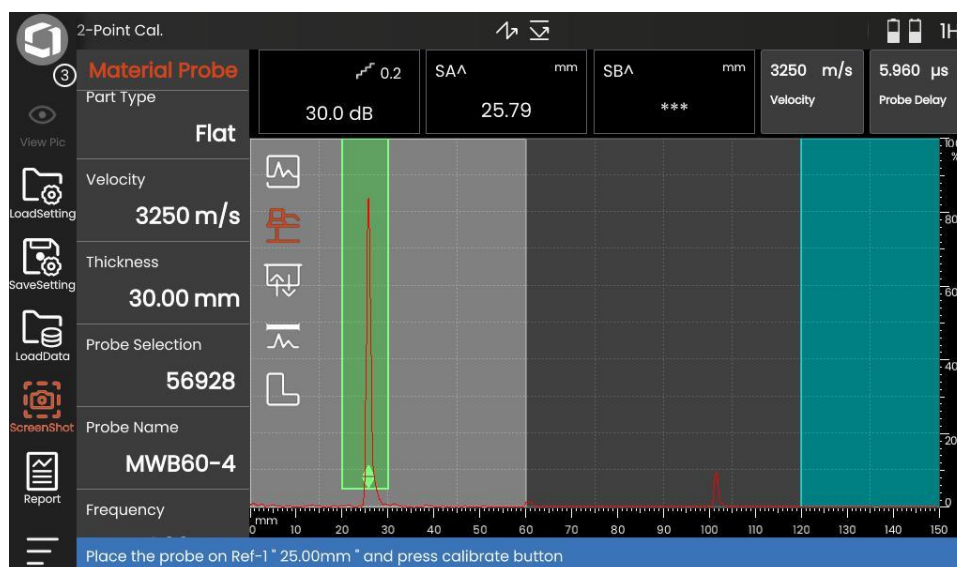
Slika 7.11. Odabir mjernog područja

Za potpuno kalibraciju sustava korišten je kalibracijski blok V2 prikazan na slici 7.12. Kalibracijski blok korišten je za kalibraciju udaljenosti prikazanu na x osi.



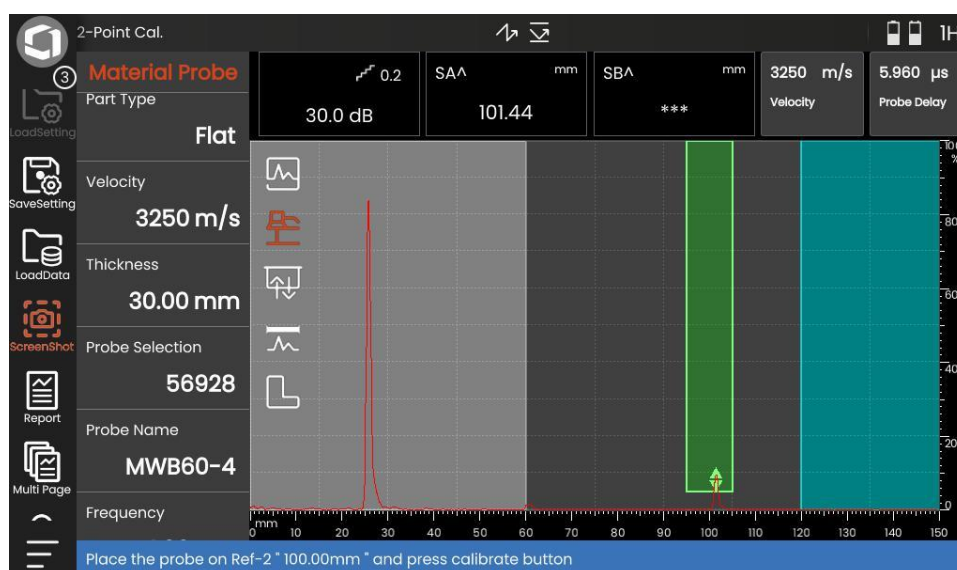
Slika 7.12. V2 blok

Kalibracija udaljenosti se podešava na temelju poznatih ultrazvučnih puteva u kalibracijskom bloku V2. Kalibracija pomoću kalibracijskog bloka se vrši tako da se sonda pomiče po njegovoj površini te se traži najjači odjek odbijanja od radijusa zaobljenja u prvom polukoraku koji predstavlja putanju od 25 mm zvučnog puta. Kada se pronađe najjači odjek potrebno je pritisnuti tipku *Calibrate* na uređaju za ispitivanje, vrijednost u tom trenutku postaje 25 mm kako je prikazano na slici 7.13.



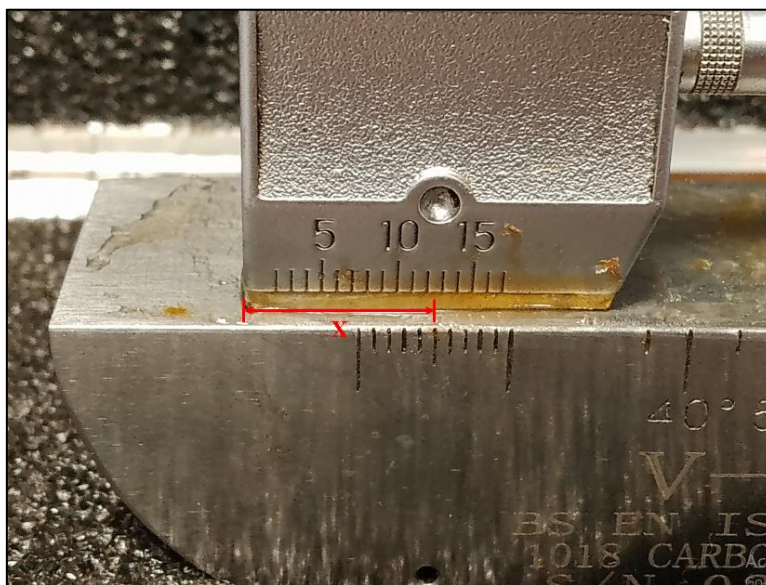
Slika 7.13. Odjek na 25 mm zvučnog puta

Kada se uređaj kalibrirao za duljinu zvučnog puta od 25 mm, potrebno je u istom položaju sonde kalibrirati uređaj za dobiveni odjek u drugom polukoraku koji predstavlja odbijanje od većeg radijusa zaobljenja te pritiskom na tipku *Calibrate* postaje vrijednost od 100 mm zvučnog puta kako je prikazano na slici 7.14.



Slika 7.14. Odjek na 100 mm zvučnog puta

Izlazna točka sonde *X value* izračunava se tako da se pomicanjem sonde po površini kalibracijskog bloka pronađe najjači odjek odbijen od manjeg promjera bloka. U položaju sonde gdje je pronađen najjači odjek potrebno je pogledati s kojom se crticom sonde poklapa središnja vrijednost na kalibracijskom bloku. *X value* predstavlja udaljenost od čela sonde do točke poklapanja dviju crta kako je prikazano na slici 7.15. Pošto se radi o novoj sondi njezina vrijednost je bila 12,5 mm kako je prikazano na slici 7.16.



Slika 7.15. Određivanje izlazne točke sonde

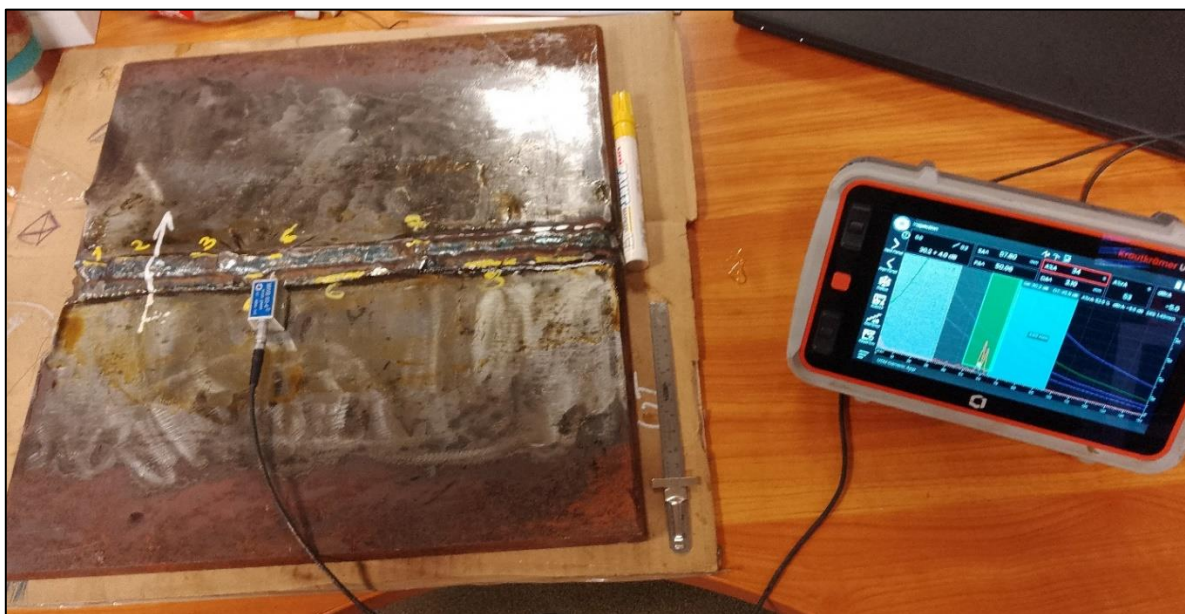


Slika 7.16. Odabir vrijednosti izlazne točke sonde

Osjetljivost kalibracije temelji se na osnovu pojačanja DGS/AVG krivulja. Pomoću njih moguće je odrediti točne dimenzije nepravilnosti u zavarenom spoju.

7.4. Ispitivanje

Nakon završene kalibracije uređaja za navedenu sondu i debljinu zavarenog materijala potrebno je ispitati kvalitetu zavara. Prvi korak pri ispitivanju je premazivanje površine gelom zbog boljeg kontakta sonde i površine po kojoj će se ispitivati. Ispitivanje se vrši tako da se sondom pomiče po površini materijala prema zavaru sa jedne i druge strane njegove dužine. Pronalazak nepravilnosti određuje se pomoću prisutnosti odjeka na ekranu ispitnog uređaja. Pomicanjem sonde prema ili od zavara određuje se lokacija nepravilnosti, tj. dubina na kojoj se nalazi i udaljenost od čela sonde. Duljina nepravilnosti može se odrediti pomicanjem sonde paralelno sa zavarom. Uljnom olovkom potrebno je zabilježiti mjesto na zavaru gdje je početak pojave odjeka, pa kroz cijelo njegovo prisustvo kako je prikazano na slici 7.17. Na taj način određuje se duljina nepravilnosti. Zavaru je potrebno prilaziti sondom pri različitim kutovima i na različitim udaljenostima.



Slika 7.17. Ispitivanje ultrazvukom

7.5. Rezultati

7.5.1. Rezultati ispitivanja ultrazvukom

Rezultati ispitivanja ultrazvukom prikazani su u tablicama 7.1. i 7.2.

Tablica 7.1. Opći podaci o ultrazvučnom ispitivanju

OPĆI PODACI O ULTRAZVUČNOM ISPITIVANJU							
Naručitelj:	LBD d.o.o.		Lokacija:	Rijeka, Croatia			
Korisnik:	Tehnički fakultet Rijeka		Projekt:	Atestna ploča			
Ugovor br.:	/		Dio objekta:	Zavareni spoj			
Radni nalog:	/		Nacrt:	/			
Opseg ispitivanja:	100% zavarenog spoja		Ispitni postupak:	4-1 PUT			
Materijal:	S355		Norma ispitivanja:	/			
Stanje površine:	Obrušeno, očišćeno		Kriterij prihvatljivosti:	/			
Područje i smjer skeniranja:	150 mm		Projekcija punog koraka (mm)	/			
Ispitni uređaj:	USM 100, Krautkrämer Ser. No. USM10022040045		Etaloni:	V-2, S/N 020201			
Kontaktno sredstvo:	GE UT couplant 50		Kablovi:	MPKLL-2, Krautkrämer Ser. No. 58791			
Sonde	Nominalna frekvencija (MHz)	Nominalni kut / Stvarni kut β	Referentni reflektor \varnothing (mm)	Referentno pojačanje (dB)	Radno pojačanje (dB)	Transfer gubici (dB)	MP (mm)
MWB 60° -4E 56928 – 84465 Krautkrämer	4	60°	1,5	30,2	+4	+3	150
<p>Ultrazvučnim ispitivanjem ispitana je zavareni spoj na objektu: Atestna ploča – 351mm x 381 mm x 30 mm.</p> <p>Ispitivanjem su uočene slijedeće indikacije: Šljaka, neprovvari, zajedi i gnijezda pora.</p>							
Ispitao:	Odobrio:		Nadzor:		Datum ispitivanja:		
N.Bučić	/		/		04.08.2023		

Tablica 7.2. Rezultati ultrazvučnog ispitivanja



Zavareni spojevi		Nalaz ispitivanja				Napomena:
Broj nepravilnosti	Tip nepravilnosti	Položaj:		Klasifikacija indikacija:		
		X/N	Δl	l	d	
1.	Šljaka	52	12	x		/
2.	Zajed	35	25	x		/
3.	Zajed	28	38	x		/
4.	Pore	57	10		x	/
5.	Neprovar	70	8	x		/
6.	Zajed	100	30	x		/
7.	Neprovar	158	15	x		/
8.	Zajed	205	32	x		/
9.	Zajed	252	30	x		/
10.	Zajed	3	36	x		/
11.	Zajed	160	20	x		/

Simboli:
X/N – Udaljenost od referentne točke (mm)
 Δl – Duljina indikacije
l – Linearna indikacija
d – Nelinearna indikacija

8. ZAKLJUČAK

Ispitivanje bez razaranja je skup metoda za ispitivanje kvalitete bez uništavanja komponente. Danas se moderna ispitivanja koriste u brojnim granama industrije kako bi se osigurala ispravnost komponente.

Najčešća metoda ispitivanja bez razaranja je vizualno ispitivanje, koje se provodi samostalno, a ujedno i prethodi ostalim NDT metodama. Ispitivanje tekućim penetrantima se koristi za pronalaženje nepravilnosti poput pukotina te raznih površinskih poroznosti. Materijali koji se mogu magnetizirati najlakše će se provjeriti i pronaći nepravilnosti koristeći metodu ispitivanja magnetskim česticama.

Ultrazvučnim i radiografskim ispitivanjem moguće je otkriti nepravilnosti po cijeloj dubini materijala koji se ispituje. Kod ultrazvučnog ispitivanja ultrazvučni valovi visoke frekvencije uvode se u materijal koji se ispituje. Pronalazak nepravilnosti se određuje pomoću prisutnosti odjeka na ekranu ultrazvučnog uređaja. Radiografsko ispitivanje podrazumijeva proces u kojem se stvara slika objekta na radiogramu sa kojeg se očitaju rezultati, odnosno nepravilnosti.

U praktičnom dijelu rada provedeno je ultrazvučno ispitivanje. Predmet ispitivanja je zavar atestne ploče izrađene od čelika S355. Dimenzije ploče su 351 mm x 381 mm x 30 mm. Priprema materijala za zavarivanje je odrađena u V obliku, a ploča je zavarena MAG postupkom zavarivanja.

Ispitivanjem ultrazvukom pronađeni su razne nepravilnosti kao što su šljaka, zajedi, pore i neprovari. Kao dodatna kontrola izvršeno je i ispitivanje radiografijom. Usporedbom dobivenih rezultata doneseni su slijedeći zaključci:

- Metoda ultrazvučnim ispitivanjem je jednostavna za korištenje, ali zahtijeva dodatnu educiranost ispitivača radi kompleksnosti očitavanja nepravilnosti.
- Prednost metode radiografskim ispitivanjem je točnost i preglednost dobivenih nepravilnosti prikazanih na radiogramu.

LITERATURA

- [1] Prasad, V.; Kumar, A.: „Non destructive testing“, Dundigal, Hyderabad.
- [2] TRAINING COURSE SERIES No. 9.: „Non-destructive Testing: A Guidebook for Industrial Management and Quality Control Personnel“, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna, 1999.
- [3] Canadian non destructive testing.: <https://www.cndti.com/pages/canadian-non-destructive-testing-and-inspection-services>, s interneta, 30. srpnja 2023.
- [4] Jefferson, A.: <https://slideplayer.com/slide/7227314>, s interneta, 30. srpnja 2023.
- [5] Smokvina Hanza, S.: „NERAZORNA ISPITIVANJA: ISPITIVANJE TEKUĆIM PENETRANTIMA, ISPITIVANJE MAGNETSKIM ČESTICAMA“, Tehnički fakultet, Rijeka, 2022.
- [6] Abdulkareem Muhsen, A.: https://www.researchgate.net/figure/Procedure-for-liquid-penetrant-test-10_fig1_355889692, s interneta, 30. srpnja 2023.
- [7] Hull, B.; John, V.: „Non destructive testing“, MACMILLAN EDUCATION, London, 1988.
- [8] The national board of boiler and pressure vessel inspectors.: <https://www.nationalboard.org/index.aspx?pageID=164&ID=377>, s interneta, 29. travnja 2023.
- [9] Wikipedija.: https://hr.wikipedia.org/wiki/Magnetsko_polje, s interneta, 29. travnja 2023.
- [10] Wikipedija.: https://hr.wikipedia.org/wiki/Magnetska_permeabilnost, s interneta, 29. travnja 2023.
- [11] Inspection connection.: <https://ndtinspect.com/introduction-to-magnetic-particle-testing/>, s interneta, 2. svibnja 2023.
- [12] Iowa State University.: <https://www.nde-ed.org/Physics/Magnetism/Magnetization.xhtml>, s interneta, 2. svibnja 2023.

[13] S interneta.:

https://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/print.php?page=5528&typ=html, 4. svibnja 2023.

[14] Smokvina Hanza, S.: „NERAZORNA ISPITIVANJA: RADIOGRAFSKO ISPITIVANJE“, Tehnički fakultet, Rijeka, 2022.

[15] Kemijski rječnik.:

<https://glossary.periodni.com/rjecnik.php?hr=elektromagnetski+spektar>, s interneta, 6. svibnja 2023.

[16] Radiology key.: <https://radiologykey.com/x-ray-production-tubes-and-generators/>, s interneta, 6. svibnja 2023.

[17] Haihao group.: <https://thepipefitting.com/principles-and-advantages-and-disadvantages-of-radiographic-inspection.html>, s interneta, 18. svibnja 2023.

[18] TRAINING MANUAL FOR NON-DESTRUCTIVE TESTING TECHNIQUES.: „ULTRASONIC TESTING OF MATERIALS AT LEVEL 2“, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna, 1988.

[19] Smokvina Hanza, S.: „NERAZORNA ISPITIVANJA: ULTRAZVUČNO ISPITIVANJE“, Tehnički fakultet, Rijeka, 2022.

[20] Inspection connection.: <https://ndtinspect.com/ultrasonic-testing-ut-handbook/>, s interneta, 20. lipnja 2023.

[21] OLYMPUS.: <https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/flaw-detection/weld-inspection/>, s interneta, 20. lipnja 2023.

[22] Iowa State University.: <https://www.nde-ed.org/NDETechniques/Ultrasonics/CalibrationMeth/calibrationmethods.xhtml>, s interneta, 24. lipnja 2023.

[23] The British institute of non destructive testing.: bindt.org/What-is-NDT/Index-of-acronyms/D/DAC/, s interneta, 24. lipnja 2023.

[24] OLYMPUS.: <https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/flaw-detection/dgs-avg/>, s interneta, 24. lipnja 2023.

[25] Certo, M.; Nardoni, G.: „AVG curve evaluation applied to Ultrasonic phased array testing“, s interneta, <https://www.ndt.net/article/aipnd2009/files/orig/67.pdf>, 24. lipnja 2023.

[26] Ugo, J.: „The Advantages and Limitations of Ultrasonic Testing“, s interneta, <https://medium.com/@saaswriter/the-advantages-and-limitations-of-ultrasonic-testing-68021dafd4f>, 25. lipnja 2023.

[27] Waygate Technologies.: <https://www.bakerhughes.com/waygate-technologies/ultrasonic-testing/portable-ultrasound-equipment-2/ultrasonic-flaw-detectors/krautkramer-usm100>, s interneta, 6. Kolovoz 2023.

POPIS SLIKA

Slika 2.1. Vizualni pregled zavara	2
Slika 2.2. Uređaji i pribor za vizualno ispitivanje	3
Slika 3.1. Ispitivanje tekućim penetrantima.....	4
Slika 3.2. Postupak ispitivanja tekućim penetrantima	6
Slika 3.3. Oprema i pribor za ispitivanje tekućim penetrantima.....	6
Slika 4.1. Ispitivanje magnetskim česticama	8
Slika 4.2. Magnetsko polje.....	9
Slika 4.3. Krivulje magnetiziranja	10
Slika 4.4. Pravilo desne ruke.....	10
Slika 4.5. Kružna magnetizacija	11
Slika 4.6. Uzdužna magnetizacija.....	11
Slika 4.7. Utjecaj orijentacije nepravilnosti na mogućnost otkrivanja	11
Slika 4.8. Šipka s površinskim defektima	12
Slika 4.9. Kružna magnetizacija propuštanjem struje.....	12
Slika 4.10. Uzdužna magnetizacija fleksibilnom zavojnicom	13
Slika 4.11. Kružna magnetizacija kontaktnim elektrodama	13
Slika 4.12. Kružna magnetizacija centralnim vodičem	14
Slika 4.13. Uzdužna magnetizacija elektromagnetskim jarmom.....	14
Slika 4.14. Uređaj za demagnetizaciju.....	16
Slika 4.15. Krivulja histereze tijekom demagnetiziranja	16
Slika 4.16. Oprema i pribor za ispitivanje magnetskim česticama	17
Slika 5.1. Radiografski sustav.....	21
Slika 5.2. Elektromagnetski spektar.....	21
Slika 5.3. Rendgenska cijev	22
Slika 5.4. Utjecaj napona cijevi na promjenu intenziteta zračenja s valnom duljinom	23

Slika 5.5. Utjecaj struje cijevi na varijaciju intenziteta X-zraka s valnom duljinom.....	23
Slika 5.6. Radiografski film	25
Slika 5.7. Princip fluoroskopije	28
Slika 6.1. Refleksija, lom i konverzija ultrazvučnih valova	34
Slika 6.2. Prvi kritični kut.....	35
Slika 6.3. Drugi kritični kut	35
Slika 6.4. Tehnika odjeka ravnom sondom.....	36
Slika 6.5. Tehnika odjeka kutnom sondom.....	36
Slika 6.6. Imerzijska tehnika ispitivanja.....	37
Slika 6.7. Blok dijagram ultrazvučnog detektora nepravilnosti.....	38
Slika 6.8. Ravna sonda.....	38
Slika 6.9. Kutna sonda	39
Slika 6.10. DAC metoda kalibracije	39
Slika 6.11. DGS metoda kalibracije.....	40
Slika 6.12. Kalibracijski V1 blok.....	40
Slika 6.13. Kalibracijski V2 blok.....	41
Slika 7.1. Atestna ploča	43
Slika 7.2. Ultrazvučni uređaj USM 100.....	44
Slika 7.3. Kutna sonda MWB 60-4.....	45
Slika 7.4. Setup	45
Slika 7.5. Odabir brzine ultrazvuka	46
Slika 7.6. Odabir zvučnog puta.....	46
Slika 7.7. Uključivanje Color leg-a.....	47
Slika 7.8. Odabir sonde	47
Slika 7.9. Odabir napona sonde	48
Slika 7.10. Odabir Multi step-a.....	48
Slika 7.11. Odabir mjernog područja.....	49

Slika 7.12. V2 blok	49
Slika 7.13. Odjek na 25 mm zvučnog puta	50
Slika 7.14. Odjek na 100 mm zvučnog puta	50
Slika 7.15. Određivanje izlazne točke sonde	51
Slika 7.16. Odabir vrijednosti izlazne točke sonde.....	51
Slika 7.17. Ispitivanje ultrazvukom	52
Slika 7.18. Radiogram zavarenog spoja.....	55

POPIS TABLICA

Tablica 5.1. Karakteristike izvora gama zraka.....	24
Tablica 6.1. Odnos između korištene frekvencije sa mogućnošću pronalaska nepravilnosti u nekim materijalima	31
Tablica 6.2. Brzine longitudinalnih valova u nekim medijima.....	32
Tablica 6.3. Akustične impedancije nekih medija	32
Tablica 6.4. Brzine zvuka u nekim materijalima	33
Tablica 7.1. Opći podaci o ultrazvučnom ispitivanju	53
Tablica 7.2. Rezultati ultrazvučnog ispitivanja.....	54
Tablica 7.3. Usporedba rezultata ispitivanja ultrazvukom i radiografijom	55

SAŽETAK

Svrha ovog diplomskog rada je ispitivanje, kontrola i analiza rezultata dobivenih različitim metodama ispitivanja bez razaranja zavarenog spoja. Važnost kontrole zavara je vrlo bitna jer je često povezana sa sigurnosti prometa i ljudi, najčešće kod zrakoplova, mostova velikih dimenzija i kapaciteta. U teorijskom dijelu objašnjene su najčešće metode ispitivanja, detaljno su prikazane njihove primjene, prednosti i nedostaci. U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je ultrazvučno ispitivanje atestne ploče izrađene od čelika S355 kutnom sondom od 60°. Dobivenim rezultatima utvrđeno je da je metoda ultrazvučnim ispitivanjem, kompleksna te zahtjeva dodatnu obučenost i stručnost ispitivača. Provedena je također metoda radiografskog ispitivanja za dodatnu provjeru dobivenih rezultata. Pokazala se kao detaljnija, točnija te jednostavna za izvršenje.

Ključne riječi: ispitivanja bez razaranja, zavar, ultrazvučno ispitivanje, nepravilnosti

SUMMARY

The purpose of this thesis is to test, control and analyze the results obtained by different test methods without destroying the welded joint. The importance of welding control is very important because it is often related to the safety of traffic and people, most often in the case of aircraft, bridges of large dimensions and capacities. In the theoretical part, the most common test methods are explained, their applications, advantages and disadvantages are presented in detail. In the experimental part of the work, an ultrasonic test of the test plate made of S355 steel was performed with an angle probe of 60°. The obtained results showed that the ultrasound examination method is complex and requires additional training and expertise of the examiner. A radiographic examination method was also carried out for additional verification of the obtained results. It proved to be more detailed, accurate and simple to execute.

Key words: non-destructive testing, weld, ultrasonic testing, irregularities