

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

Viktor Mihljević

Zagreb, 2007

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Dubravko Majetić

Viktor Mihljević

Zagreb, 2007

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

Detekcija zavora u metalnim šavnim cijevima

Viktor Mihljević

Zagreb, 2007

Izjava

Izjavljujem pod punom moralnom odgovornošću da sam diplomski rad izradio samostalno, isključivo znanjem stečenim na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, služeći se navedenim izvorima podataka i uz stručno vodstvo mentora prof. dr. sc. Dubravka Majetića, kome se još jednom srdačno zahvaljujem.

U Zagrebu, prosinac 2007.

Zahvale

Zahvaljujem svom mentoru, prof. dr. sc. Dubravku Majetiću na ukazanom povjerenju i pruženoj pomoći tijekom izrade diplomskog rada.

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Damiru Markučiću i Miroslavu Omeliću na pruženoj pomoći i savjetima tijekom izvođenja preliminarnih mjerenja.

Također se zahvaljujem kolegama i prijateljima dipl. ing. Tomislavu Štaroveškom, dr. sc. Danijelu Pavkoviću i dipl. ing. Domagoju Liblu na pruženoj pomoći i podršci tijekom izrade diplomskog rada.

Od srca zahvaljujem svojoj obitelji na pruženoj potpori tijekom studija.

Sažetak

Ovim radom se ukazuje na moguće postupke za detekciju zavara u metalnim šavnim cijevima.

Šavne cijevi u neobrađenom stanju se u većini slučajeva koriste kao poluproizvodi nad kojima treba izvršiti određene tehnološke operacije prije nego budu spremne za daljnju upotrebu. Time se za određene tehnološke operacije, poput savijanja, nameće potreba za poznavanjem položaja zavara kod šavnih cijevi. Potreba za detekcijom proizlazi iz činjenice da je područje zavara kritično mjesto na cijevi zbog promjene (pogoršanja) mehaničkih odnosno tehnoloških svojstava u odnosu na ostatak cijevi.

Stoga, ovaj rad, u svojoj suštini, izdvaja i razmatra moguće industrijski primjenjive postupke za detekciju zavara, ali u ovisnosti o dostupnosti sredstava neophodnih za njegovo izvođenje.

Naglasak rada je više na preliminarnim mjerenjima i ne bavi se sa konkretnim rješenjima odnosno izvedbom metoda u praktične svrhe. Jedan od razloga je i opseg problema i ograničeno vrijeme za izradu rada.

Rad je koncipiran u nekoliko cjelina. U uvodu je ukratko opisana zona zavarenog spoja, značajke koje ju karakteriziraju, kao i odabir mogućih metoda za detekciju. U drugoj cjelini nalazi se pregled odabranih postupaka. Treća cjelina nosi rezultate probnih mjerenja odnosno ispitivanje u svrhu detekcije zavara prethodno odabranim metodama. Nakon svakog mjerenja dan je zaključak o pojedinoj metodi tj. izdvojene su prikladne metode. Na kraju je dan osvrt na diplomski rad u cjelini.

SADRŽAJ

1. Uvod	1
1.1. Zona zavarenog spoja	1
1.1.1. Značajke zone zavarenog spoja	2
1.1.2. Testni uzorci šavnih cijevi	3
1.2. Postupci za detekciju zavora	5
2. Pregled postupaka za detekciju zavora	7
2.1. Ultrazvučna metoda	7
2.1.1. Ultrazvuk	7
2.1.2. Fizikalne osnove ultrazvuka.....	8
2.1.2.1. Rasprostiranje ultrazvuka	8
2.1.2.2. Akustična impedancija	8
2.1.2.3. Atenuacija	9
2.1.3. Ultrazvučna metoda za ispitivanje materijala.....	13
2.1.3.1. Princip rada ultrazvučne metode	13
2.1.3.2. Načini prikaza primljenog (reflektiranog) signala (odziva).....	14
2.1.3.3. Prednosti i nedostaci ultrazvučne metode.....	17
2.2. Radiografska metoda	19
2.2.1. Uvod u elektromagnetsko zračenje kratkih valnih duljina (radijacija)	19
2.2.1.1. Koeficijent linearne atenuacije.....	21
2.2.1.2. Newtonov zakon inverznog kvadrata.....	21
2.2.2. Rendgensko zračenje	21
2.2.2.1. Nastanak rendgenskih zraka	21
2.2.3. Gama zračenje.....	23
2.2.4. Radijacijske metode.....	24
2.2.4.1. Rendgensko ispitivanje.....	25
2.3. Elektromagnetske i magnetske metode	28
2.3.1. Osnovni principi elektromagnetizma	28
2.3.1.1. Osnovni zakoni električkog strujanja	28
2.3.1.2. Magnetizam	32
2.3.2. Metoda vrtložnih struja	36
2.3.2.1. Uvod	36
2.3.2.2. Vrtložne struje i ispitivanja vrtložnim strujama.....	36
2.3.2.3. Prikaz odziva mjerenja	37
2.3.2.4. Vanjski faktori koji utječu na odziv EC sonde.....	38
2.3.2.5. Raspodjela vrtložnih struja unutar materijala	39
2.3.2.5. Izvedbe sonde za EC metodu.....	41
2.3.2.6. Prikaz i indikacija rezultata testiranja.....	44
2.3.2.7. Primjena metode.....	44
2.3.3. Metoda rasipanjem magnetskog toka	45
2.3.3.1. Princip MFL-a	45
2.3.3.2. Ispitivanje MFL metodom	46
2.3.3.3. Ispitivanje cijevi.....	46

2.3.3.4. MFL detektor.....	47
2.4. Sustav strojnog vida u detekciji zavara	50
2.4.1. Uvod.....	50
2.4.1.1. Osnovne definicije	50
2.4.1.2. Struktura sustava strojnog vida	51
2.4.1.3. Obrada slike.....	52
2.4.1.4. Analiza slike	52
2.4.2. Uzimanje uzorka slike	53
2.4.2.1. Uvod	53
2.4.2.2. Kontrast	53
2.4.2.3. Kratki pregled izvora svjetlosti i tehnika osvjetljivanja	53
2.4.2.4. Kamere u primjeni strojnog vida u industriji.....	57
2.4.3. Postupci za detekciju zavara vizijskim sustavom	58
2.4.3.1. Konvolucijske maske	58
2.4.3.1. Detekcija rubova objekata	59
2.4.3.2. Gradijentni postupci.....	60
2.4.3.3. Canny metoda detekcije rubova	62
2.4.3.4. Houghova transformacija.....	63
3.1. Rezultati detekcije radiografskom metodom.....	65
3.1.1. Opis mjerenja	65
3.1.2. Oprema i parametri mjerenja	65
3.1.3. Rezultati snimanja.....	65
3.1.4. Osvrt na postupak.....	65
3.1.5. Zaključak	66
3.2. Rezultati detekcije metodom vrtložnih struja.....	67
3.2.1. Opis mjerenja	67
3.2.2. Oprema i parametri mjerenja	67
3.2.3. Rezultati mjerenja	67
3.2.4. Osvrt na mjerenje.....	67
3.2.5. Zaključak	67
3.3. Rezultati detekcije MFL metodom	68
3.3.1. Opis mjerenja	68
3.3.2. Oprema i parametri mjerenja	68
3.3.3. Rezultati mjerenja	68
3.3.4. Osvrt na mjerenje.....	69
3.3.5. Zaključak	70
3.4. Rezultati detekcije zavara vizijskim sustavom.....	71
3.4.1. Opis ispitivanja	71
3.4.2. Oprema	71
3.4.3. Rezultati prepoznavanja zavara	71
3.4.4. Osvrt na detekciju zavara	74
3.4.5. Zaključak	74
4. Zaključak	75
5. Literatura	76

POPIS SLIKA

Slika 1.1. Elementi zavara	2
Slika 1.2. Testni uzorci šavnih cijevi od konstrukcijskog čelika	3
Slika 1.3. Razmatrane metode za detektiranje zavara	5
Slika 2.1. Frekvencijska područja zvuka	7
Slika 2.2. Primjer atenuacije (slabljenja) signala	9
Slika 2.3. Refrakcija zvuka (ultrazvuka)	10
Slika 2.4. Snellov zakon	11
Slika 2.5. Refleksija i transmisija upadnog vala	12
Slika 2.6. Jednostavna blok shema uređaja za ultrazvučnu kontrolu na principu impulsa/odjek	13
Slika 2.7. Shematski prikaz ultrazvučne metode	14
Slika 2.8. A i B prikaz	15
Slika 2.9. P-prikaz zavarenog spoja sa tri projekcije	17
Slika 2.10. Uređaj za ultrazvučnu kontrolu	18
Slika 2.11. Elektromagnetski spektar	20
Slika 2.12. Jednostavna shema rendgenskog uređaja	22
Slika 2.13. Rendgenska cijev	22
Slika 2.14. Shematski prikaz radiografske metode	25
Slika 2.15. Radiogrami zavarenog spoja	26
Slika 2.16. Primjer radiograma zavara	27
Slika 2.17. Strujni krug sa zavojnicom spojen na izmjeničnu struju	28
Slika 2.18. RL spoj i vektorski dijagram napona istruja	29
Slika 2.19. Magnetsko polje permanentnog magneta	33
Slika 2.20. Magnetsko polje zavojnice (svitka) protjecane strujom	33
Slika 2.21. Pravilom desne ruke određuje se smjer magnetskog polja	34
Slika 2.22. Induciranje vrtložnih struja u materijalu	36
Slika 2.23. Plan impedancija ; Utjecaji raznih parametara na impedanciju sustava	37
Slika 2.24. Raspodjela vrtložnih struja po presjeku materijala	39
Slika 2.25. Ovisnost dubine prodiranja o frekvenciji za različite materijale	40
Slika 2.26. Apsolutni i diferencijalni tipovi sonde u mosnom spoju	42
Slika 2.27. Primjer EC sonde u presjeku	43
Slika 2.28. Primjer <i>eddy current</i> sonde	43
Slika 2.29. Rasipanje silnica oko pukotina	45
Slika 2.30. Ispitivanje MFL metodom	46
Slika 2.31. Ispitivanje cijevi MFL metodom	47
Slika 2.32. Shematski prikaz MFL detektora	47
Slika 2.33. Primjeri oblika MFL signala	48
Slika 2.34. Hallov efekt	48
Slika 2.35. Vidljivi, UV i IR spektar elektromagnetskog zračenja	53
Slika 2.36. Podjele izvora svjetlosti	55
Slika 2.37. Tehnike osvjjetljenja	56
Slika 2.38. Primjer prostornog filtriranja slike konvolucijskom maskom dimenzija 3x3	58
Slika 2.39. Rezultati filtriranja Gausovim filtrom maskama različitih dimenzija	59

Slika 2.40. Prva i druga derivacija funkcije $f(t)$	60
Slika 2.41. Slike dobivene u različitim fazama Canny-evog postupka	63
Slika 2.42. Primjer Hough-ove transformacije za pravce.....	64
Slika 2.43. Primjer Hough-ove transformacije za pravce u polarnim koordinatama.....	64
Slika 3.1. Radiogrami cijevi.....	65
Slika 3.2. Slike postava i mjerenja MFL metodom.....	68

POPIS TABLICA

Tablica 3.1. Rezultati mjerenja MFL metodom	69
Tablica 3.2. Rezultati detekcije zavara vizijskom metodom	72
Tablica 3.3. Detekcija brojanjem piksela na slici	73

1. Uvod

U metalnoj industriji šavne cijevi od konstrukcijskog čelika imaju raznoliku primjenu, prije svega kao poluproizvod koji ide u daljnu strojnu obradu. Primjenjuju se u raznim granama industrije poput automobilske industrije, industrije transportnih sredstava, građevinarstvu, te za izradu namještaja, instalacija za provođenje fluida, čeličnih konstrukcija itd.

Određeni tehnološki procesi u industriji, u kojima se kao poluproizvodi koriste šavne cijevi, u nekim slučajevima zahtijevaju određivanje položaja zavora.

Potreba za detekcijom zavora proizlazi iz činjenice da su u području zavora šavne cijevi najosjetljivije zbog utjecaja topline prilikom zavarivanja, pri čemu dolazi do promjene mehaničkih i tehnoloških svojstava u području zone zavarenog spoja. Takve promjene mogu dovesti do povećanog produciranja škarta prilikom određenih tehnoloških procesa. Poznavanje položaja zavora često se zahtijeva u operacijama poput savijanja cijevi, pri kojim postoji mogućnost da zavar bude izložen naprezanju većem od dopuštenog. To može dovesti do oštećenja cijevi u području zavora.

Detekcija zavora na šavnim cijevima je postala nužnost kod strojeva za savijanje u automatiziranim pogonima (npr. u prešama za hidro oblikovanje pri CNC savijanju automobilskih dijelova, poput ispušnih cijevi automobila[1]). Osim kod savijanja, detekcija zavora je potrebna i kod laserskog rezanja cijevi, oblikovanja cijevi, bušenja cijevi [1]. Dobar primjer je i proizvodnja cijevi koje se zavaruju elektrootpornim postupkom (eng. *ERW tubes*), kod kojih je potrebno ultrazvučno ispitati zavar na gotovoj cijevi. Za taj proces potrebno je zavar na cijevi pozicionirati točno u sredinu između dvije ultrazvučne sonde koje vrše testiranje[1].

Izbjegavanje slučajeva oštećenja cijevi u području zavora vrši se prije svega otkrivanjem mjesta zavora na šavnoj cijevi i orijentiranjem cijevi u povoljan položaj odnosno u područje gdje je naprezanje zavora čim manje.

1.1. Zona zavarenog spoja

U ovom odlomku dati su osnovni pojmovi i činjenice u vezi zavora kao objekta promatranja.

Zavar (šav) je mjesto spajanja, predstavlja očvrnuti rastopljeni metal koji je stvoren prilikom zavarivanja (u jednom ili više prolaza)[2], a u ovisnosti o postupku zavarivanja, sastoji se od osnovnog i dodatnog materijala ili samo od osnovnog materijala.

Zavareni spoj (Z) se sastoji od zone taljenja ZT i zone utjecaja topline ZUT (ZUT se naziva i "prijelazna zona") [2].

Zona taljenja (ZT) je onaj dio zavarenog spoja koji je za vrijeme zavarivanja bio rastaljen i u kojem je došlo do pojave rekristalizacije i do skrućivanja. Može se sastojati od samo osnovnog materijala ili mješavine osnovnog i dodatnog materijala[2].

Zona utjecaja topline je dio osnovnog materijala, koji se nalazi neposredno uz rastaljenu zonu, a gdje dolazi do promjene kristalne strukture i mehaničkih svojstava

zbog topline unešene zavarivanjem[2]. ZUT teorijski obuhvaća područje osnovnog materijala, u kojem se osnovni materijal nije talio za zavarivanja, ali u kojem je došlo do promjene mikrostrukture, mehaničkih, korozivskih ili drugih svojstava zbog unošenja topline zavarivanjem[2].

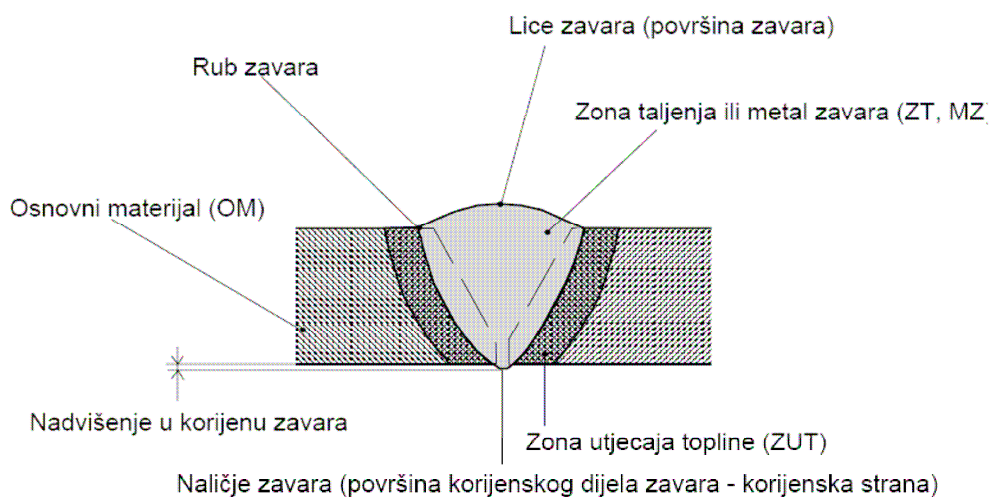
Širina ZUT ovisi o toplinskom inputu i iznosi najčešće 2 - 8 mm.

Osnovni materijal (OM) je materijal koji se zavaruje.

Dodatni materijal (DM) je materijal koji se dodaje u zoni taljenja pri zavarivanju.

Zavarivanje znatno utječe na promjene kemijskog sastava (ZT) i strukture (ZT i ZUT), a time obično dolazi do pogoršanja mehaničkih i antikorozijskih svojstava zavara[2].

Konstruktivski čelici su u području ZUT-a skloni prokaljivanju i pogrubljenju strukture.



Slika 1.1. Elementi zavara

Slika 1.1. prikazuje osnovne dijelove zavarenog spoja. Iz slike se mogu izdvojiti neke karakteristike zavara, kao što su nadvišenja u korijenu i na licu zavara, kao i označenu zonu utjecaja topline i zonu taljenja.

Čelične šavne cijevi mogu se zavarivati raznim postupcima, npr. indukcijskim postupkom (zavarivanje visokofrekventnom strujom), TIG postupkom, MIG i MAG postupkom itd.

1.1.1. Značajke zone zavarenog spoja

Obilježje svakog objekta, pa tako i zavara, su njegove značajke prema kojima ga se raspoznaje.

Prije izlaganja o značajkama zavara potrebno je dati neke definicije da bi se dobio uvid u pojam značajki i način njihovog određivanja, pa tako prema [26] :

“Za razlikovanje jednog oblika od drugoga nije potrebno promatrati sva svojstva pojedinih objekata – dovoljno je promatrati samo neke njegove značajke, i to prije svega one, koje drugi objekt nema”.

Izdvajanje značajki zavara predstavlja bitan čimbenik pri detekciji zavara. Zato je potrebno obaviti analizu zavara, odnosno područja zone zavarenog spoja i izdvojiti značajke koje će omogućiti što efikasniju i precizniju detekciju položaja zavara. Što su neke značajke zavara izraženije u odnosu na osnovni materijal (ostatak cijevi), detekciju bi trebalo biti lakše i pouzdanije izvesti. Zato su u nastavku teksta izdvojene značajke na osnovu kojih se može opisati i detektirati zavar.

1.1.2. Testni uzorci šavnih cijevi

Slika 1.2. prikazuje primjere testnih uzoraka šavnih cijevi od konstrukcijskog čelika, na kojima su izvršena ispitivanja.



Slika 1.2. Testni uzorci šavnih cijevi od konstrukcijskog čelika

Prema slici 1.2. može se vidjeti da je zavar odnosno zona zavarenog spoja na sve tri cijevi različito izražena.

Isto tako, vidi se površina cijevi u različitim stanjima, od korodirane površine do svijetle glatke površine. Bitno je primijetiti da se na nekim cijevima zavar bolje vidi odnosno vizualno je izražen. Prva cijev (cijev br. 1) je po površini korodirala pa je teže vizualno razlikovati mjesto zavara od ostatka cijevi. Ali sa unutrašnje strane cijevi vidi se izbočen korijen zavara.

Druga cijev (cijev br. 2) djelomično je korodirala, ali kod nje se zavar vizualno ističe i sa vanjske i sa unutrašnje strane. Kod treće cijevi (cijev br. 3) zavar je izražen

u obliku nadvišenja u korijenu zavara, ali vidi se da nadvišenje nije jednako veliko cijelom dužinom zavara.

Gore su navedene neke značajke zavara koje se mogu primijetiti vizualno.

Postoje i one koje se ne mogu uočiti vizualno, a uzrok im je promjena mikrostrukture materijala prilikom unošenja topline zavarivanjem, navedene pod [2] i [3].

Naime, poznato je da se u području ZUT-a mijenjaju svojstva zavara i prema [2] je navedeno da dolazi do promjene mehaničkih svojstava i strukture materijala u ZUT-u.

Prema [3], navedeno je kako veličina zrna i gustoća dislokacija utječu na magnetska svojstva materijala :

“U nežarenom zavaru gustoća dislokacija se vrlo oštro (naglo) povećava od osnovnog materijala u zonu spoja (taljenja), u tolikoj mjeri da dolazi do promjene magnetskih svojstava, uzrokujući pad permeabilnosti od zone OM do zone spoja. U žarenom zavaru, to naglo povećanje u gustoći dislokacija od OM prema zoni spoja nije prisutno, a pritom utjecaj veličine zrna dominira, što uzrokuje lagano ili umjereno povećanje permeabilnosti od zone OM prema zoni spoja.”

Također prema [4] i [5] pokazana je primjena i utjecaj toplinske obrade odnosno žarenja pri uklanjanju zaostalog stresa (naprezanja) unutar materijala, i kakav utjecaj ima na promjenu magnetske permeabilnosti.

U slučaju zavarivanja kao i kod žarenja može se zaključiti da unešena toplina u materijal mijenja svojstva materijalu u području gdje se unos dogodio.

Konačno, prema izloženom, značajke možemo podijeliti na:

- površinske odnosno one koje se ističu svojom bojom, ili fizički u obliku nadvišenja u korijenu zavara ili pak grublje površine na mjestu zavara
- unutrašnje strukturne – one koje se odnose na promjenu mikrostrukture materijala u području zavarenog spoja, i gdje je nazočna promjena raznih svojstava materijala poput mehaničkih, magnetskih, električkih, akustičkih.

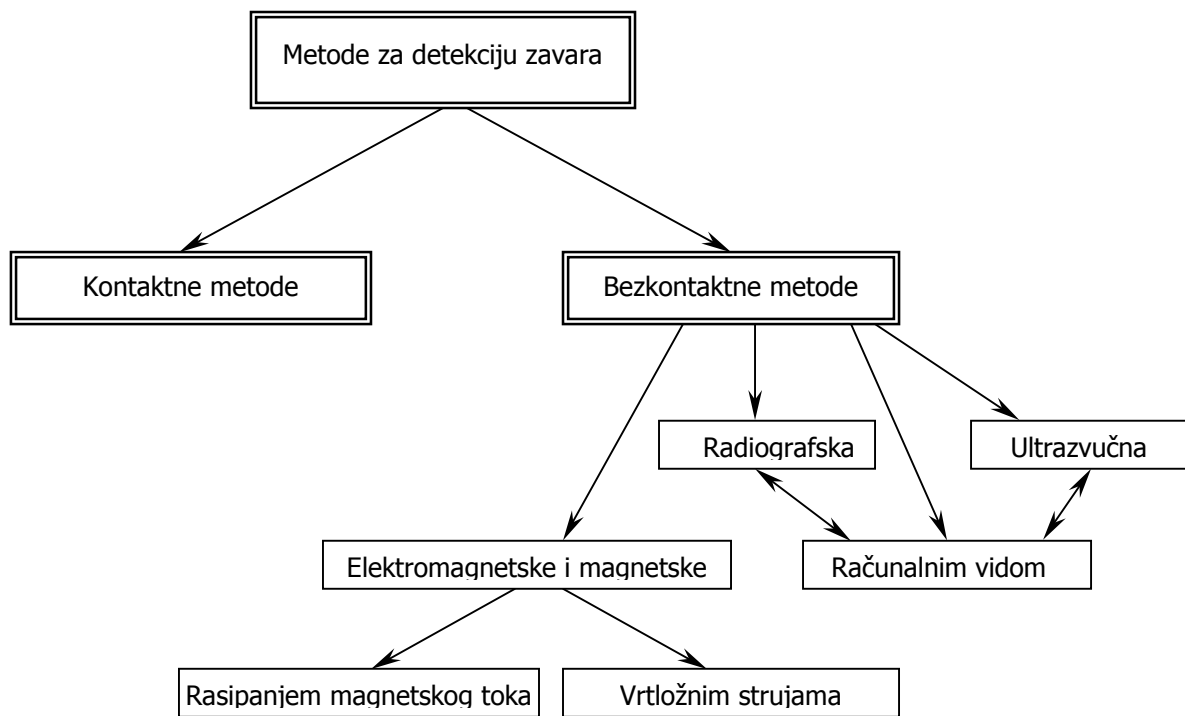
(Napomena; U radu se razmatraju šavne cijevi od konstrukcijskog čelika (npr. Č0361, Č0362) koje su podložne raznim vanjskim utjecajima (koroziji , nečistoćama itd.)).

1.2. Postupci za detekciju zavara

Prema izloženom o značajkama i svojstvima zavara u prošlom potpoglavlju može se zaključiti vezano uz mogućnost detekcije zavara sljedeće:

1. zavar je moguće detektirati vizualno - prema promjeni površinskih svojstava odnosno prema vidljivim promjenama (značajkama) na mjestu zavara
2. zavar je moguće detektirati prema promjeni svojstava u području zone zavarenog spoja (ZUT-a), i to:
 - ▶ prema promjeni mehaničkih svojstava
 - ▶ prema promjeni magnetskih i električkih svojstava
 - ▶ prema promjeni akustičkih svojstava

Iz gore navedenog odabrane su metode, koje su prikazane slikom 1.3.



Slika 1.3. Razmatrane metode za detektiranje zavara

Svaka od navedenih metoda zasniva se na drugačijim principima što omogućava da se iskoriste različite značajke zavara.

Iz nekoliko odabranih metoda prikazanih na slici 1.3. potrebno je izdvojiti naprikladniju, i zato za odabir prikladnog postupka za detekciju mjesta zavara uzeti su u razmatranje sljedeći kriteriji :

- pouzdanost (misli se na točnost detekcije zavara),
- cijenu (troškove izvođenja pojedinog postupka),
- kompleksnost izvedbe (potrebna oprema, vanjski utjecaji i zahtjevi na opremu),
- operacijsko vrijeme (približno vrijeme potrebno za detekciju zavara)
- mjere sigurnosti (opasnost metode po okolinu - kao što je radijacija ili buka)
- ponovljivost procesa

Treba naglasiti da u industriji već dugo egzistiraju uređaji koji vrše detekciju zavara uz dodatnu opciju pozicioniranja cijevi. Zato je pri odabiru gore navedenih metoda uzeta je u obzir i ta činjenica. Te naprave posjeduju senzore koji se zasnivaju na nekoliko principa odnosno rade na osnovu nekoliko metoda poput : rasipanjem magnetskog toka, vrtložnim strujama, senzor na bazi lasera, vizijskim sustavom.

2. Pregled postupaka za detekciju zavara

U drugoj cjelini dan je pregled odabranih postupaka koji se nalaze na slici 1.3. Iz razloga ograničenosti vremenom i opsežnosti zadatka nije bilo moguće ići u detaljnu analizu odabranih metoda.

2.1. Ultrazvučna metoda

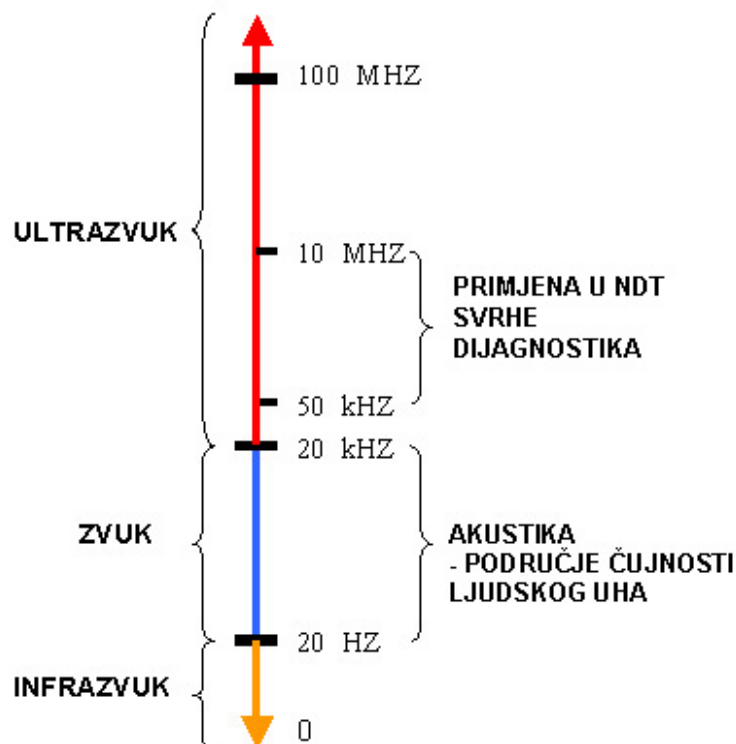
Na početku ultrazvučnih metoda dane su ukratko osnovne definicije i specifičnosti ultrazvuka, kao i fizikalni zakoni koji su osnova za razumijevanje ultrazvučne metode.

2.1.1. Ultrazvuk

Ultrazvuk je dio zvučnog spektra, čija je frekvencija iznad područja čujnog ljudskom organizmu, dok zvuk predstavlja vremenski promjenjivo mehaničko titranje čestica kroz medij. Ultrazvuk, kao i zvuk, je definiran s tlakom i brzinom gibanja čestice u prostoru .

Ultrazvučni valovi su u većini slučajeva longitudinalni tlačni valovi. Najčešća frekvencijska područja uporabe ultrazvuka su između 20 kHz i 10 MHz., a kod testiranja materijala najčešće se koriste frekvencije između 50 kHz i 10 MHz . Ultrazvuk se kroz određeni medij širi na dva osnovna načina - kao logitudinalni val ili kao tranverzalni val.

Ultrazvuk se može proizvesti mehaničkim putem (npr. različitim "sviralama"), ali najčešći i efikasniji način je elektromehaničko stvaranje ultrazvuka odgovarajućim pretvaračima. Oni najčešće rade na magnetostriksijskom ili piezoelektričkom principu, i napajani su iz odgovarajućih elektroničkih generatora.



Slika 2.1. Frekvencijska područja zvuka

2.1.2. Fizikalne osnove ultrazvuka

2.1.2.1. Rasprostiranje ultrazvuka

Unutar čvrstih tijela valovi se mogu rasprostirati na četiri načina u ovisnosti o načinu titranja čestica. Ultrazvuk se može rasprostirati kao longitudinalni val, transverzalni val, površinski val i kod vrlo tankih metala kao tzv. pločasti val (eng. *plate wave*).

Longitudinalni i transverzalni valovi se najčešće koriste pri ultrazvučnom ispitivanju materijala. Kod longitudinalnih valova čestice titraju u smjeru širenja vala, dok se kod transverzalnih valova čestice gibaju okomito na smjer širenja vala. Za efektivno širenje transverzalnih valova potrebno je akustički čvrsto (kruto) tijelo, dok se transverzalni šire kroz sva tri agregatna stanja tvari.

Brzine širenja zvučnih valova se bitno razlikuju u različitim materijalima. Brzina širenja vala ovisi o svojstvima materijala i temperaturi.

2.1.2.2. Akustična impedancija

Akustična (specifična) impedancija definira se kao produkt gustoće materije i brzine rasprostiranja ultrazvuka. Računa se prema izrazu:

$$Z = \rho \cdot c = f \cdot \omega, \quad (2.1)$$

isto tako vrijede i sljedeći izrazi:

$$d = c \cdot t \quad ; \quad \lambda = \frac{c}{f} \quad ; \quad c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (2.2)$$

gdje su:

Z akustična impedancija [kg/m² s]

c brzina rasprostiranja zvuka u mediju [m/s]

ρ gustoća (kg/m³)

λ valna duljina [m]

dudaljenost od objekta od kojeg se reflektirao ultrazvučni val [m]

Emodul elastičnosti [Pa=N/m²]

tvrijeme [s]

Akustična impedancija važna je pri [6]:

1. određivanju akustične transmisije i refleksije na granici dvaju materijala različitih akustičnih impedancija.
2. konstrukciji ultrazvučnih pretvornika (sondi)
3. procjeni apsorpcije zvuka unutar medija

Pojmovi transmisije, refleksije i apsorpcije nalaze se u točki 2.1.2.4.

2.1.2.3. Atenuacija

Atenuacija (prigušenje) je pojava koja se događa pri prolasku zvuka kroz materiju. Naime, signal se reducira po svojoj amplitudi (intenzitetu) tj. njegova se vrijednost smanjuje s udaljenosti (slika 2.2.[6]). Kako se vidi prema donjem izrazu, smanjuje se eksponencijalno :

$$A = A_0 \cdot e^{-\alpha z}, \quad (2.3)$$

gdje je :

A_0amplituda rasprostirućeg vala u određenoj točki [dB]

Areducirana amplituda nakon što je val prevalio udaljenost z od početne udaljenosti [dB]

αkoeficijent atenuacije putujućeg vala u z -smjeru [dB/MHz * m]

Isto tako možemo pisati i za intenzitet vala:

$$I = I_0 \cdot e^{-\alpha z}, \quad (2.4)$$

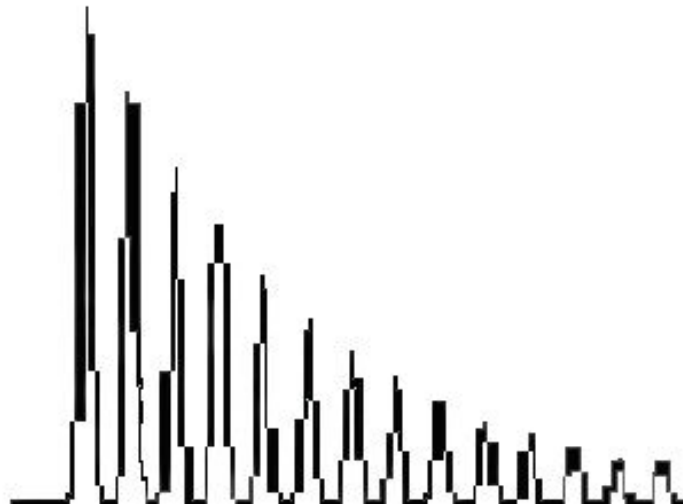
gdje je :

I_0intenzitet rasprostirućeg vala u određenoj točki [W/m²]

Iintenzitet nakon što je val prevalio udaljenost z od početne udaljenosti [W/m²]

αkoeficijent atenuacije putujućeg vala u z -smjeru [dB/MHz * m]

Atenuacija je linearno ovisna o frekvenciji ultrazvučnog vala. Atenuacijski koeficijent α može se definirati kao mjera prigušenja prilikom prolaska ultrazvuka kroz određeni materijal. Svaki materijal ima različitu vrijednost atenuacijskog koeficijenta.



Slika 2.2. Primjer atenuacije (slabljenja) signala

2.1.2.4. Zakoni raspostiranja ultrazvuka

Zakon refleksije

Zbog različitih akustičkih impedancija sredstava dio energije se reflektira na granici dva sredstva, a dio prenosi u drugi materijal.

Intenzitet reflektiranog vala računa se prema izrazu [9]:

$$I_r = \left| \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right|^2 \cdot I_i, \quad (2.5)$$

gdje je :

I_rintenzitet reflektiranog vala [W/m²]

I_iintenzitet upadnog vala [W/m²]

Z_1akustička impedancija materijala upadnog vala [kg/m² s]

Z_2akustička impedancija materijala prenesenog vala [kg/m² s]

Koeficijent refleksije definira se kao odnos zvučnog pritiska reflektiranog i prolaznog vala prema zvučnom pritisku upadnog vala. Računa se prema izrazu [9]:

$$r = \frac{I_r}{I_i} = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)^2, \quad (2.6)$$

gdje je :

r koeficijent refleksije

I_rintenzitet reflektiranog vala [W/m²]

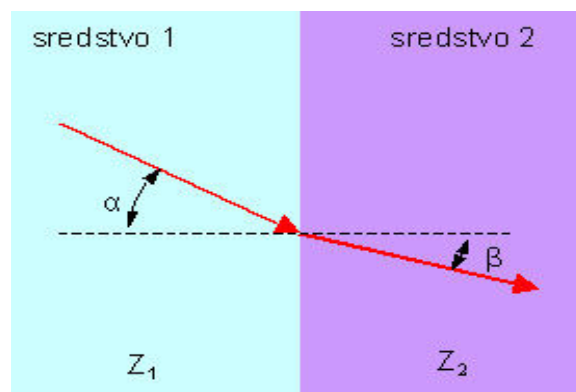
I_iintenzitet upadnog vala [W/m²]

Z_1akustička impedancija materijala upadnog vala [kg/m² s]

Z_2akustička impedancija materijala prenesenog vala [kg/m² s]

Zakon refrakcije

Ultrazvučni valovi se lome pri prijelazu iz jednog sredstva u drugo.



Slika 2.3. Refrakcija zvuka (ultrazvuka)

Pri tomu vrijedi izraz [9]:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{Z_1}{Z_2}, \quad (2.7)$$

gdje je:

α kut upadnog vala [°]

βkut reflektiranog vala [°]

Z_1akustička impedancija materijala upadnog vala [kg/m² s]

Z_2akustička impedancija materijala prenesenog vala [kg/m² s]

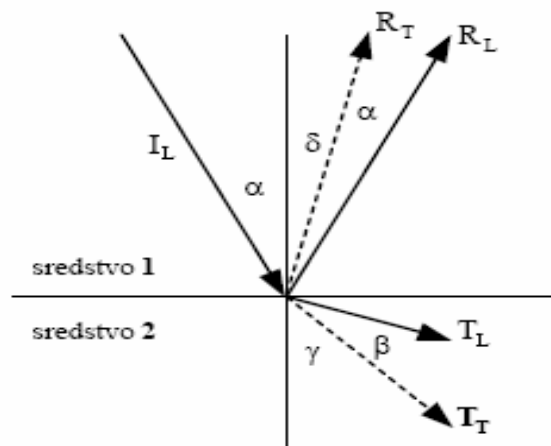
Snellov zakon

Veza između kuteva i brzine širenja ultrazvučnih određena je Snellovim zakonom, i pri čemu vrijedi [8]:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2}, \quad (2.8)$$

odnosno za longitudinalni i transverzalni (reflektirani i preneseni) val[8]:

$$\frac{c_{L1}}{\sin \alpha} = \frac{c_{L2}}{\sin \beta} = \frac{c_{T1}}{\sin \gamma} = \frac{c_{T2}}{\sin \delta}, \quad (2.9)$$



Slika 2.4. Snellov zakon

Zakon transmisije (prijenosa)

Pri prijelazu ultrazvuka iz jednog materijala u drugi dolazi do djelomične refleksije ultrazvuka ako mediji nisu jednake impedancije, a dio će se ultrazvučne energije prenijeti u drugi materijal.

Definicija koeficijenta transmisije istovjetna je definiciji koeficijenta refleksije i računa se prema izrazu[10] :

$$d = \frac{I_r}{I_i} = 1 - r, \quad (2.10)$$

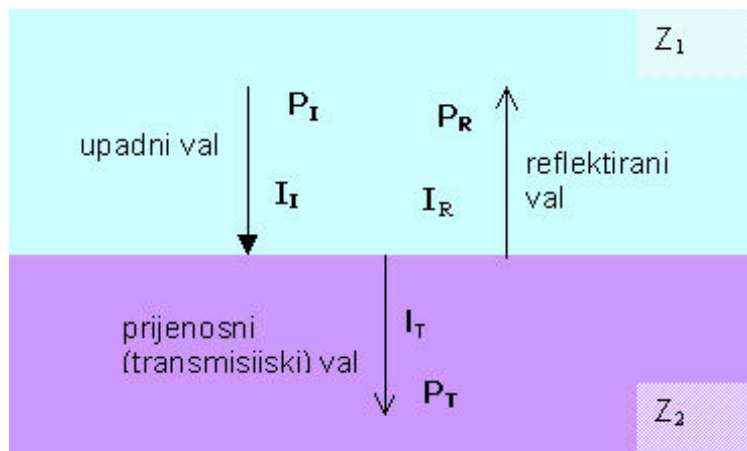
gdje je :

d koeficijent transmisije

I_rintenzitet reflektiranog vala [W/m²]

I_iintenzitet upadnog vala [W/m²]

r koeficijent refleksije



Slika 2.5. Refleksija i transmisija upadnog vala

Difrakcija (ogib) valova

Kada ultrazvučni val dođe na rub prepreke ili na otvor (rupu) na prepreci koja se nalazi na putu vala, dolazi do difrakcije vala oko ruba ili otvora prepreke. Što je odnos između dimenzije prepreke i valne duljine vala manji, to je difrakcija veća.

Zakon apsorpcije

Apsorpcija ultrazvuka je proces u kojem ultrazvuk slabi pri prolasku kroz neko sredstvo[4]. Prilikom apsorpcije veći se dio energije pretvara u toplinu tj. zvuk se u nekom materijalu apsorbira tako da se pretvori u drugi oblik energije i onda u toplinu. Kad ultrazvučni val udari u neku plohu postavljenu na čvrstu podlogu, jedan dio zvučne energije se reflektira, a ostatak se apsorbira. Za materijale se određuje koeficijent apsorpcije (α), koji je definiran kao odnos apsorbirane i upadne zvučne energije.

Koeficijent apsorpcije može se računati prema izrazu [10]:

$$\alpha = \frac{I_a}{I_u} \quad \text{ili} \quad \alpha = 1 - r^2, \quad (2.11)$$

gdje je:

I_aintenzitet apsorbiranog vala [W/m^2]

I_uintenzitet upadnog vala [W/m^2]

r koeficijent refleksije

2.1.3. Ultrazvučna metoda za ispitivanje materijala

Za ultrazvučno testiranje koriste se visoke frekvencije energije zvuka u svrhu provođenja testa i mjerenja. Ultrazvučna metoda ima široku primjenu. Koristi se za detekciju (procjenu) pukotina unutar materijala, ispitivanje zavarenog spoja, mjerenje dimenzija, karakterizaciju materijala itd.

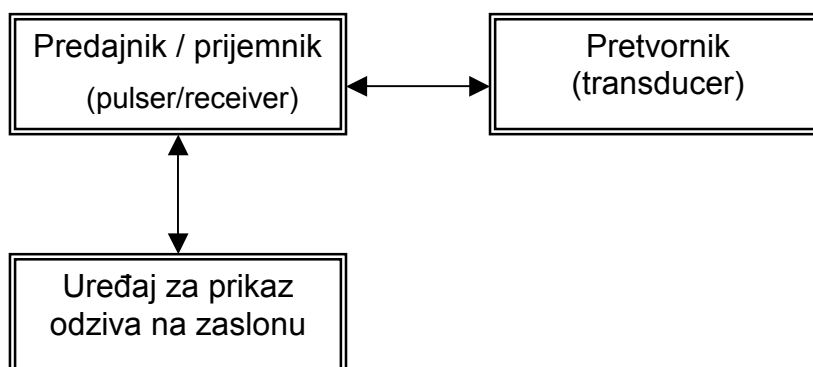
U svrhu ultrazvučne kontrole (ispitivanja) koriste se dvije metode:

- metoda impulsa i odjeka - temelji se na mjerenju reflektiranih valova i vremena između slanja i primanja signala
- metoda transmisije (prozvučavanja) - temelji se na mjerenju slabljenja signala (UZ valova)

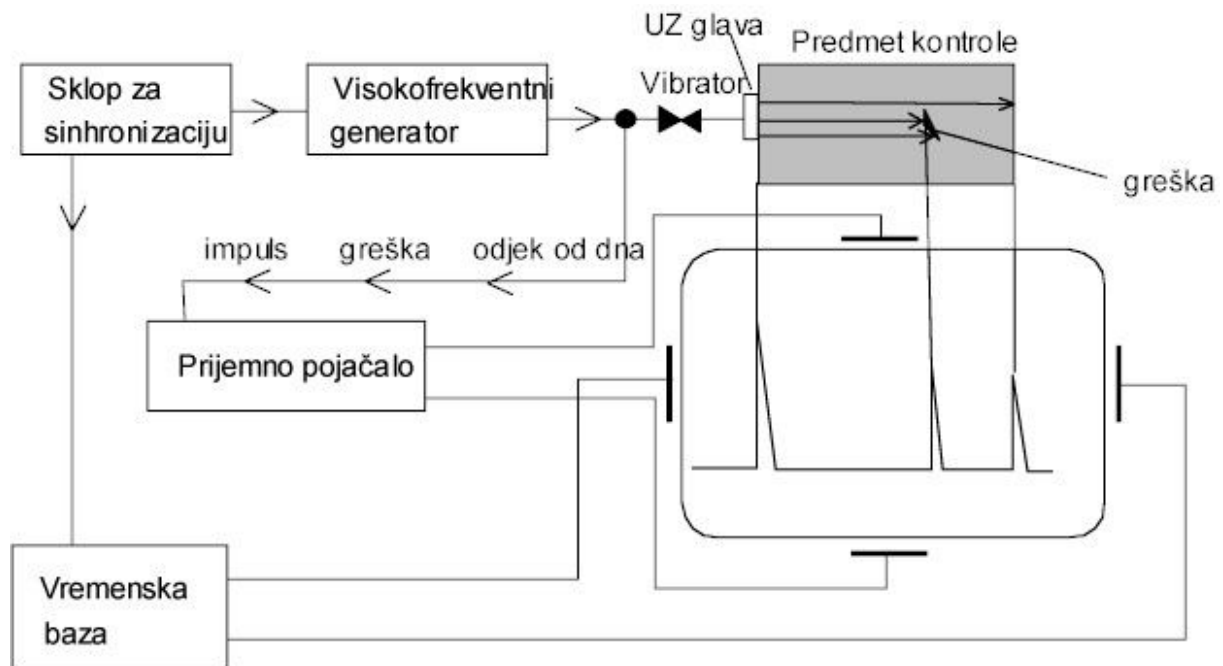
2.1.3.1. Princip rada ultrazvučne metode

Princip rada ultrazvučne metode može se objasniti na jednostavnom primjeru ultrazvučne inspekcije na principu impulsa i odjeka (eng. *pulse/echo*). Za tu metodu potreban je uređaj koji generira impulse (ultrazvučne valove) i prima reflektirane impulse (eng. *pulser/receiver*), pretvornik (eng. *transducer*) i uređaj za prikaz odziva. Pogonjen pulserom (davač impulsa), pretvornik generira ultrazvučnu energiju visoke frekvencije. Energija zvuka se unosi i širi kroz materijal u obliku vala. Kada signal dođe do neke vrste diskontinuiteta (npr.pukotine, ili granice materijala različitih akustičkih impedancija) dio energije signala će se reflektirati natrag od površine (npr. pukotine ili drugog materijala.). Reflektirani ultrazvučni signal se zatim pretvara u električni signal i šalje na obradu i na uređaj za prikaz odziva. Za utrazvučne pretvornike koriste se materijali koji imaju piezoelektrička svojstva.

Kod ultrazvučne metode važno je održavati kontinuirani kontakt između sonde i testnog uzorka.



Slika 2.6. Jednostavna blok shema uređaja za ultrazvučnu kontrolu na principu impuls/odjek



Slika 2.7. Shematski prikaz ultrazvučne metode

Osnovna oprema za ultrazvučno testiranje :

- Elektronički generator signala
- Sonda koja emitira ultrazvučne valove
- Fluid (eng. *couplant*) za prijenos energije iz(u) sondu
- Sonda za prihvaćanje reflektiranih valova
- Pojačalo / demodulator
- Uređaj za prikaz signala (npr. računalo, osciloskop)
- Elektronski referentni sat

2.1.3.2. Načini prikaza primljenog (reflektiranog) signala (odziva)

Dobiveni rezultati ultrazvučnog testiranja mogu se prikazati na nekoliko načina u ovisnosti o informacijama koje želimo prikupiti prilikom testiranja.

A-prikaz

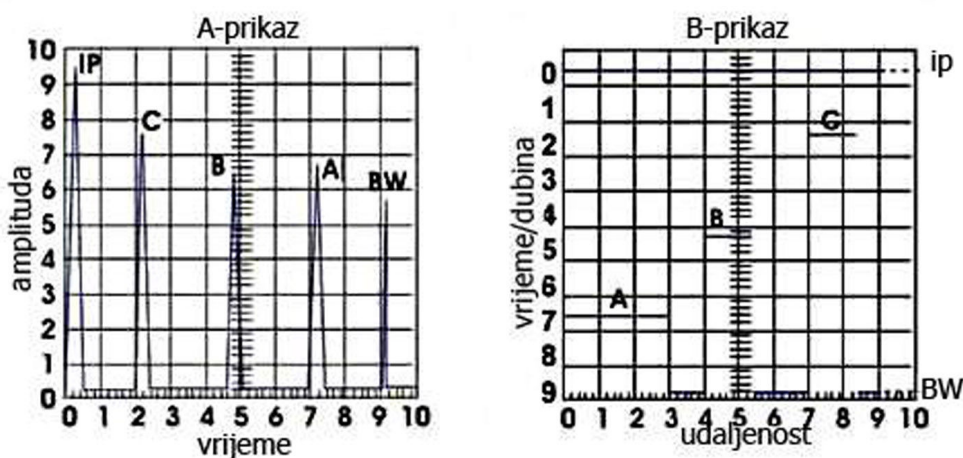
A- prikaz je grafički prikaz koji se zasniva se na analizi amplitude primljenog signala. Kod A-prikaza amplituda reflektiranog signala je funkcija dubine i razlike u impedancijama. A –prikaz se može koristiti npr. za ispitivanje zavarenih spojeva feritnih i neferitnih materijala na tlačnim spremnicima, cjevovodima, rezervoarima, mostovima [11].

U slučaju kada je struktura materijala gruba, metoda daje samo kvalitativnu ocjenu i nepouzdana rezultate [11].

B-prikaz

B- prikaz je dvodimenzionalni grafički prikaz u pravokutnom kordinatnom sustavu, gdje je vrijeme putovanja ultrazvučnih impulsa prikazano kao pomak duž jedne osi (x-osi), a gibanje pretvornika (sonde) je prikazano kao pomak duž druge osi (y-osi). B-prikazom dobije se dubina na kojoj se nalazi reflektor, i njegove približne dimenzije u smjeru ispitivanja. B-slikom se inače prikazuje poprečni presjek testnog uzorka.

Reflektirani valovi predstavljeni su kao točke različitog intenziteta, a funkcije su amplitude.



Slika 2.8. A i B prikaz

Pomicanjem sonde po testnom uzorku u vremenskoj domeni, pojavljuju se na zaslonu signali od pojedinih diskontinuiteta, kako je prikazano na slici 2.8[6]. Zato prema slici 2.8. za A – prikaz imamo slijedeće signale :

- IP** - inicijalni impuls, približno u nultoj sekundi
- A** - signal od diskontinuiteta koji se nalazi na nekoj dubini **d**
- B** - signal od diskontinuiteta na nekoj dubini manjoj od **d**
- C** - signal od diskontinuiteta na dubini manjoj od **d**, ali i onoj od signala C
- BW** - signal od stražnje plohe uzorka

Prema slici 2.8. za B – prikaz imamo slijedeće signale :

- IP** - inicijalni impuls, približno u nultoj sekundi
- A** - signal od diskontinuiteta koji se nalazi na nekoj udaljenosti **r** od početka skeniranja, dužine **l**, na dubini **d** u vremenu **t**
- B i C** - isto kao i A , ali su diskontinuiteti na manjim dubinama , većoj udaljenosti i kraći su
- BW** - signal od stražnje plohe uzorka

C-prikaz

C-prikaz je dvodimenzionalni grafički prikaz, u kojem su diskontinuiteti u testnom uzorku prikazani u pogledu odozdgo na gornju površinu testnog uzorka. C-prikaz se dobije projekcijom geometrije diskontinuiteta u objektu na horizontalnu ravninu testnog uzorka. C-prikaz daje nam informaciju o položaju i veličini indikacije (diskontinuiteta). C-prikaz je sličan standardnom radiografskom snimku.

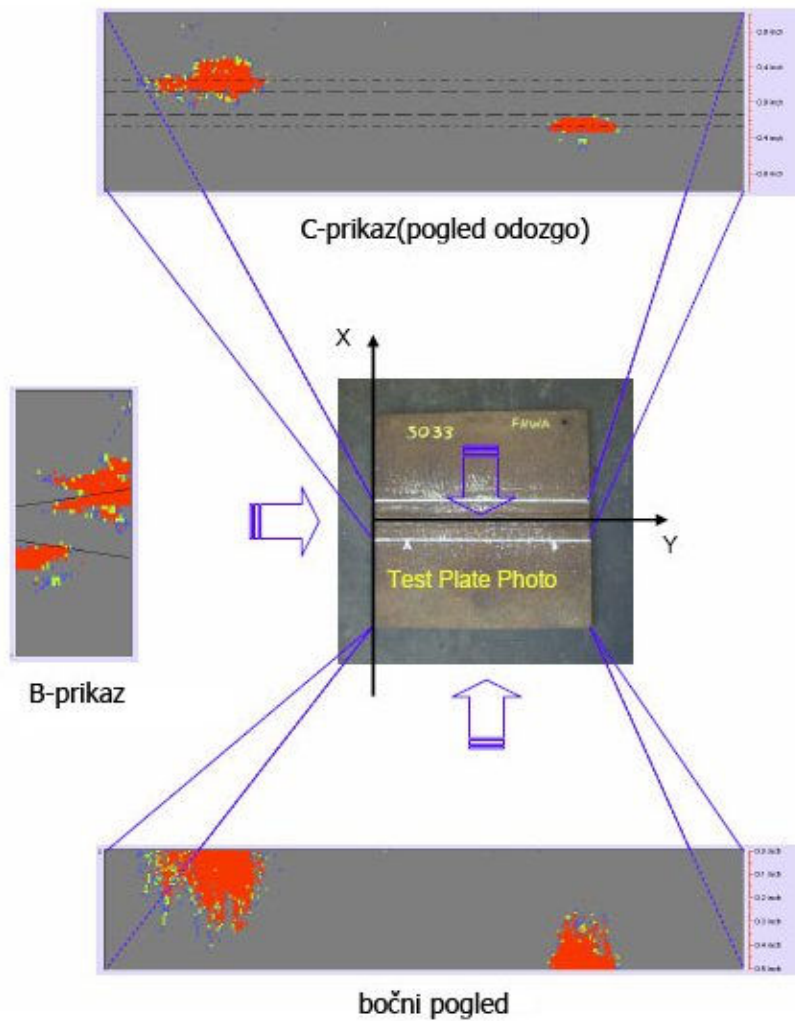
Ispitivanje sa C-prikazom koristi se najčešće za detektiranje grešaka nastalih u proizvodnji, pri eksploataciji proizvoda i otkrivanje grešaka u osnovnom materijalu.

D-prikaz

D-prikaz je dvodimenzionalni grafički prikaz sličan C-prikazu, ali daje i informaciju o dubini na kojoj se nalazi diskontinuitet. Da bi se dobila informacija o dubini na kojoj se nalazi diskontinuitet potrebna je informacija o protečenom vremenu između slanja UZ vala (početnog impulsa) sa predajnika (eng. *pulser*) i primljenog reflektiranog UZ vala (eha) od strane prijemnika (eng. *receiver*).

P-prikaz

P-prikaz prikazuje geometriju diskontinuiteta u materijalu u tri dimenzije. P-prikaz je projekcija rezultata B-prikaza koja je izvedena u pogledu odozgo na testni uzorak, na bilo koju stranu testnog uzorka. Upotrebljava se za 3D vizualizaciju defekata ili korozije. Na slici 2.9. [12] prikazan je P-prikaz koji se sastoji od tri projekcije : C-prikaza (pogled odozgo), B-prikaza (stražnji pogled) i bočnog pogleda.



Slika 2.9. P-prikaz zavarenog spoja sa tri projekcije

2.1.3.3. Prednosti i nedostaci ultrazvučne metode

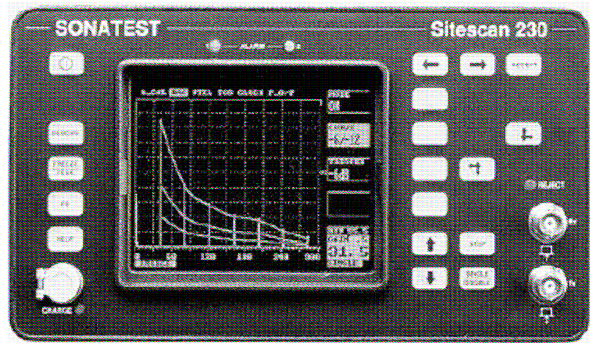
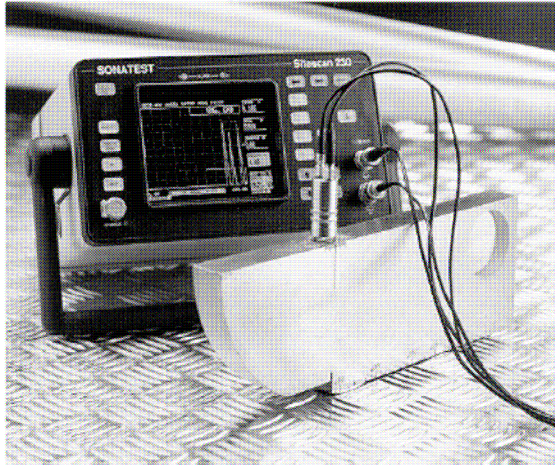
Prednosti ultrazvučne metode su :

- velika preciznost u određivanju lokacije objekta refleksije i procjeni veličine objekta
- velika preciznost otkrivanja orijentacije i oblika diskontinuiteta
- detaljnost prikaza (P-prikaz)
- relativno laka obrada signala dobivenih od prijemnika (eng. *receiver*)
- elektronička oprema pruža trenutno dobivanje rezultata testiranja
- prenosivost opreme za testiranje

Nedostaci ultrazvučne metode su:

- osjetljivost na nečistoće (npr. u cijevi)
- teškoće pri ispitivanju materijala koji imaju grubu i nepristupačnu površinu

- teškoće pri ispitivanju materijala koji su vrlo tanki, maleni i nepravilnog oblika
- teškoće pri ispitivanju nehomogenih materijala
- potreban je fluid (eng. *couplant*) za prijenos energije zvuka u testni uzorak
- potreba za etalonima i referentnim uzorcima pri kalibraciji ultrazvučne opreme i provjere karakteristika opreme



Slika 2.10. Uređaj za ultrazvučnu kontrolu

2.2. Radiografska metoda

U svrhu boljeg razumijevanja metoda koje se zasnivaju na radijaciji ukratko su dane osnove elektromagnetskog zračenja, a zatim je detaljnije opisano rendgensko i gama zračenje.

2.2.1. Uvod u elektromagnetsko zračenje kratkih valnih duljina (radijacija)

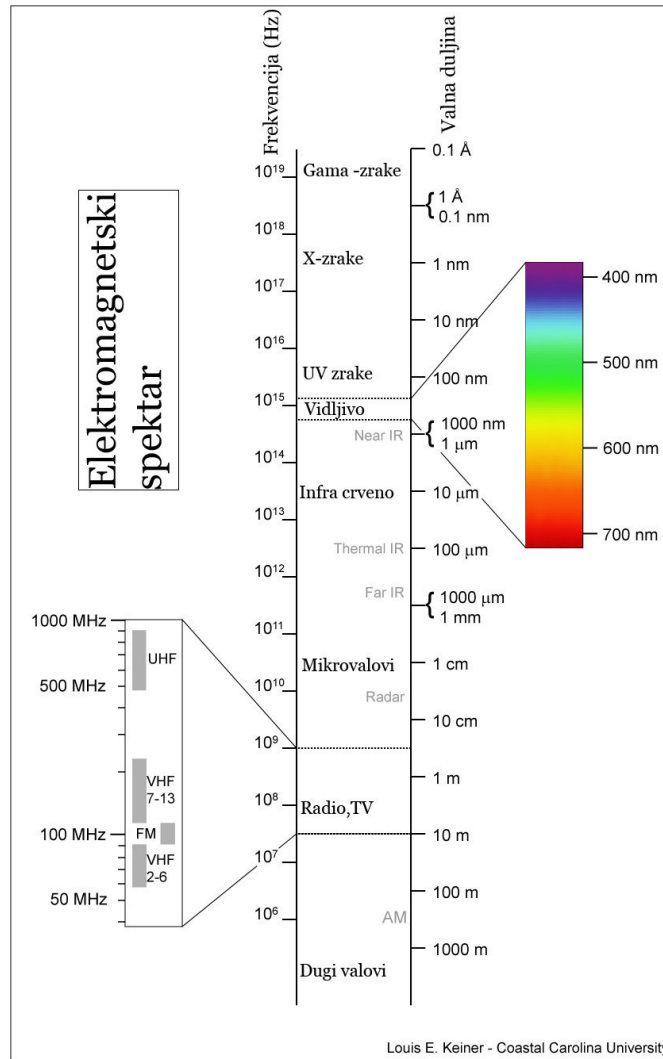
Pod pojmom zračenja odnosno radijacije misli se na prijenos energije elektromagnetskim valovima. Prolaskom kroz materiju frekvencija vala ostaje ista, ali se zbog promjene valne duljine mijenja brzina širenja elektromagnetskih valova. Zračenje ima dualnu prirodu: čestičnu i valnu. Elektromagnetsko zračenje su valovi energije s električkim i magnetskim svojstvima, koji nastaju vibracijom i akceleracijom električnih naboja[14]. Spektar elektromagnetskog zračenja od najniže do najviše frekvencije prikazan je na slici 2.11.

X-zrake (rendgenske zrake) i γ -zrake pripadaju širokom elektromagnetskom spektru frekvencija kao što se vidi iz slike 1. To su zrake vrlo malih valnih duljina i ljudska osjetila ih ne mogu osjetiti. X i γ zrake su električki neutralne i ne utječu svojim djelovanjem na magnetsko ili električno polje. Šire se kao pravocrtni valovi i karakterizira ih njihova frekvencija (f), valna duljina (λ) i brzina širenja valova (c).

X-zrake i γ -zrake su nosioci visoke razine (nivoa) energije i mogu prekidati kemijske veze unutar materijala u koji prodiru. Također su opasne i po ljudsko zdravlje. Male doze ionizirajućeg zračenja nisu opasne, a sve preko preporučenog minimuma uzrokuje teške posljedice po organizam, ovisno o primljenoj dozi.

X-zrake se dijele još na "mekke" x-zrake, koje pripadaju većim valnim duljinama x spektra zračenja, i na "tvrde" x-zrake, koje pripadaju manjim valnim duljinama x spektra zračenja. Tvrde x-zrake prodiru lakše u materijal, i apsorbiraju se manje, dok je kod mekših obrnuto.

Elektromagnetsko zračenje također može biti ionizirajuće i neionizirajuće. Ionizirajuće djelovanje imaju elektromagnetska zračenja malih valnih duljina kao što su x-zračenje ($\lambda=10$ do 0.01 nm) i γ -zračenje ($\lambda < 0.5$ nm). Ionizirajuće zračenje u visokofrekventnom spektru elektromagnetskog zračenja pojavljuje se u obliku čestica (fotona) ili valova. Ionizirajuće zračenje pri prolasku kroz materiju stvara električki nabijene ione.



Slika 2.11. Elektromagnetski spektar

Veličine koje karakteriziraju elektromagnetski spektar su :

- valna duljina :
$$\lambda = \frac{h \cdot c}{E}, \quad (2.12)$$

- frekvencija :
$$f = \frac{E}{h}, \quad (2.13)$$

gdje je :

E.....energija fotona [eV]

h..... Planckova konstanta [$\approx 6,626069 \cdot 10^{-34}$ Js $\approx 4,13567$ μ eV/GHz]

c..... brzina svjetlosti [299,792,458 m/s]

2.2.1.1. Koeficijent linearne atenuacije

Linearna atenuacija (μ) opisuje lomljenje (frakciju) x ili y zraka koje su se apsorbirale ili rasule u materijalu po jedinici debljine apsorbirajućeg materijala. Ta vrijednost u osnovi je broj atoma po kubičnom metru volumena. Intenzitet zračenja (x ili y) na određenoj udaljenosti dan je prema izrazu [6]:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x}, \quad (2.14)$$

gdje je :

Iintenzitet fotona na udaljenosti x od početne udaljenosti [W/m^2]

I_0početni intenzitet fotona [W/m^2]

nbroj atoma po kubnom metru [$atom/m^3$]

xpređena udaljenost [m]

μlinearni koeficijent atenuacije [m^{-1}].

2.2.1.2. Newtonov zakon inverznog kvadrata

Intenzitet zračenja opada sa kvadratom udaljenosti od izvora.

$$INTENZITET = \frac{1}{r^2}. \quad (2.15)$$

Zakon inverznog kvadrata bitan je pri postavljanju objekta snimanja od izvora zračenja, jer kako se vidi prema izrazu intenzitet jako brzo opada sa udaljenošću r .

2.2.2. Rendgensko zračenje

2.2.2.1. Nastanak rendgenskih zraka

Rendgenske zrake nastaju u rendgenskoj cijevi zaustavljanjem elektrona koji se ubrzavaju u jakom električnom polju na anodi koja je načinjena od metala. Na rendgenskoj cijevi narinut je visoki napon, koji može iznositi od 50 kV do 400 kV u uređajima za industrijsku primjenu.

Rendgenski uređaj se obično sastoji od tri osnovna dijela: upravljački uređaj, generator visokog napona i rendgenske cijevi, što je i prikazano na slici 2.12[15].

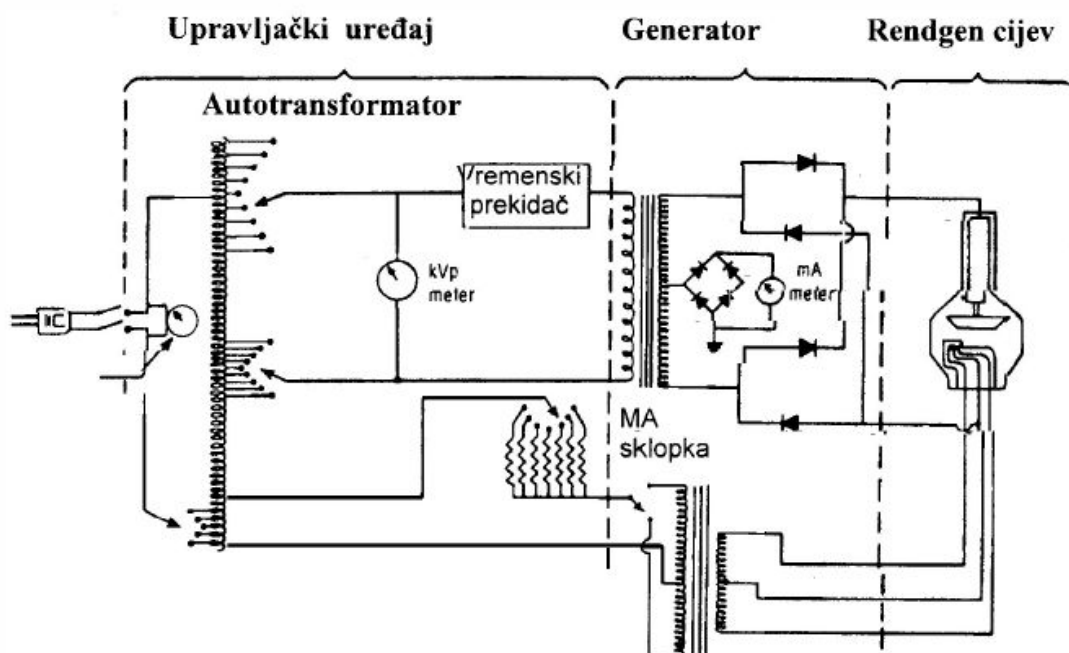
Rendgenska cijev nalazi se pod visokim vakuumom, što omogućava nesmetano strujanje elektrona prema anodi. Elektroni nastaju emisijom iz žarne niti koja je ugrađena u sekundarnom električnom krugu u katodi. Između anode i katode nalazi se jako električno polje koje nastaje prolaskom struje u primarnom električnom krugu.

Električno polje koje je uspostavljeno u rendgenskoj cijevi između anode i katode ubrzava elektrone koji dobivaju veliku količinu kinetičke energije.

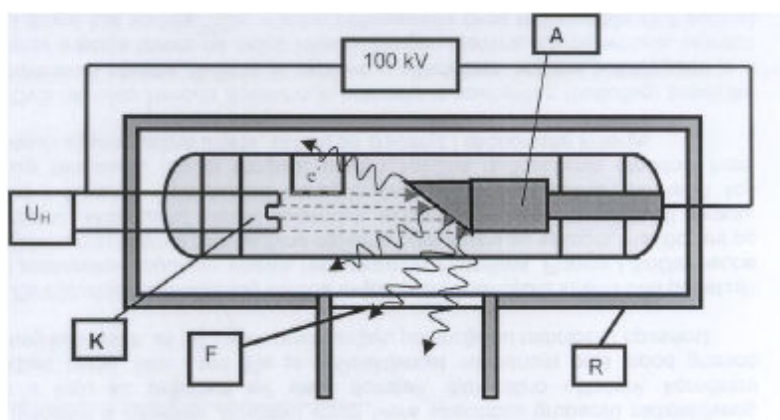
Elektroni koji udaraju u anodu stupaju u interakciju s atomima koji se nalaze u površinskom dijelu anode, i energiju prenose na anodu, pri čemu se anoda zagrijava. Zbog gubitka energije pri interakciji sa anodom, elektroni se zaustavljavaju i dolaze u interakciju sa elektronima atoma anode ili s jezgrama atoma anode.

Gore opisanim procesom samo se mali dio kinetičke energije pretvara se u elektromagnetsku energiju (rendgensko zračenje). Otprilike 99% kinetičke energije elektrona pretvara se u toplinsku energiju, a samo oko 1 % u elektromagnetsku energiju (emitira se rendgensko zračenje).

Naponom na rendgenskoj regulira se emisija fotona, a promjenom jakosti struje na katodi podešava se intenzitet zračenja.



Slika 2.12. Jednostavna shema rendgenskog uređaja



Slika 2.13. Rendgenska cijev

Dijelovi rendgenske cijevi prikazani na slici 2.13. [15] su :

K – katoda

A – anoda

F – otvor za prolaz zračenja

R- rendgensko kućište

U_H – napon grijanja

Visoka energija X-zraka može uzrokovati ionizaciju i čini X-zrake biološki opasnim ako apsorbirana doza nije ispod preporučenog minimuma.

2.2.3. Gama zračenje

Umjesto rendgenskih zraka mogu se primijeniti γ -zrake, manjih valnih duljina u odnosu na x-zrake, koje emitiraju umjetni radioaktivni elementi (Ir192, Co60, Ga75, C14).

Gama zračenje je jedno od tri radioaktivna zračenja koja nastaju prirodnim putem, radioaktivnim raspadom. Gama raspad praćen je emisijom fotona.

Gama zračenje nastaje kao posljedica raspada radioaktivnih atoma (izotopa). U ovisnosti o omjeru neutrona i protona u jezgri atoma, izotop nekog elementa može biti stabilan ili nestabilan. Kada energija vezivanja (spajanja) nije dovoljna da drži jezgru atoma skupa, kaže se da je atom nestabilan, a atomi sa nestabilnom jezgrom konstantno su promjenjivi kao rezultat neravnoteže energije unutar jezgre. S vremenom se jezgra nestabilnog izotopa dezintegrira ili transformira u procesu radioaktivnog raspada. Različiti tipovi penetrirajućeg zračenja mogu biti emitirani iz jezgre i/ili elektrona koji je okružuju. Nuklidi koji prolaze kroz radioaktivni raspad nazivaju se radionuklidi. Bilo koji materijal koji sadrži mjerljivu količinu jednog ili više radionuklida je radioaktivan. Radioaktivni elementi (radioaktivni izotopi) se često nazivaju radionuklidi ili samo nuklidi. Inače, nuklidi su atomi sa poznatim brojem protona i neutrona u jezgri. Iako gama zrake mogu prodrijeti kroz mnoge materijale, one ne čine te materijale radioaktivnim[16]. U industriji gama zrake se koriste za poboljšavanje fizikalnih svojstava drva i plastike te za ispitivanje metalnih dijelova.

Osim gama zračenja, radioaktivnim raspadom nastaju i sljedeći tipovi zračenja :

α -zračenje – nastaje iz teških elemenata kao što su uran i radij. Alfa čestice imaju pozitivan električki naboj. Imaju malu sposobnost prodiranja jer su relativno velike i brzo gube svoju energiju. Mogu se zaustaviti i listom papira. Nisu štetne po ljude kao gama zrake jer taško prodiru kroz tkivo, osim ako se ne udahnu u organizam mogu biti štetne po stanice[ionzr]. Alfa čestice imaju svoju primjenu u raznim granama ljudske djelatnosti. Koriste se za liječenje karcinoma (radij – 226), ili u industriji za neutraliziranje statičkog elektriciteta (polonij – 210). Alfa čestice zbog svog pozitivnog naboja privlače slobodne elektrone i tako smanjuju statički naboj[16].

β -zračenje – emitiraju ga mnogi radioaktivni elementi. Beta čestice su brzi elektroni izbačeni iz svoje jezgre. Manje su od alfa čestica i mogu prodirati u tkivo[ionzr]. Mogu se zaustaviti sa npr. tankom pločom od aluminija ili debelom plastičnom folijom. Emisija beta čestice događa se kada je omjer neutrona i protona u jezgri prevelik. Beta zračenje koristi se

u raznim industrijskim instrumentima koji služe za mjerenje debljine vrlo tankih materijala[16]. Također se koristi se u medicinskoj dijagnostici i liječenju (fosfor-32 i jod-131).

2.2.4. Radijacijske metode

Radijacijske metode rade na principu prozračivanja testnog objekta, temeljem čega se dobiju željene informacije o testiranom objektu. Informacija o testnom objektu dobija se preko radiografske snimke (slike) ili mjerenjem intenziteta zračenja.

U industrijskoj praksi najčešća je primjena metode radiografije. Metoda radiografije zasniva se na postupku dobivanju informacije o razlici intenziteta ionizirajućeg zračenja koje je prošlo kroz testni objekt. Pošto se metoda temelji na činjenici da različiti materijali imaju različit koeficijent apsorpcije zračenja, tako će se na slici (npr. radiogramu, zaslonu) vidjeti sve nepravilnosti (diskontinuiteti) unutar materijala.

Dvije vrste ionizirajućeg zračenja koje se najčešće koriste u ispitivanju materijala su rendgensko zračenje (x-zrakama) i gama zračenje (γ-zrake).

Metode temeljene na ionizirajućem zračenju možemo podijeliti s obzirom na izvor ionizirajućeg zračenja, i to na :

- rendgensko zračenje
 - rendgenografija
 - rendgenoskopija
 - digitalna radiografija
 - semiradiografija
 - visokonaponska radiografija
- gama zračenje
 - gamagrafija
 - autoradiografija

Zračenje se može registrirati na sljedeće načine :

- mjerenjem intenziteta zračenja
- formiranjem trajne slike (radiogram)- koristi se u radiografiji. Dobije se djelovanjem zračenja na fotoemulziju koja se nalazi na radiografskom filmu ili papiru.
- formiranjem slike ograničenog trajanja – koristi se u radioskopiji. Slika se formira na fluorescentnom zaslonu, a nestaje čim prestaje djelovanje zračenja na zaslon.
- grafičko praćenje pisačem

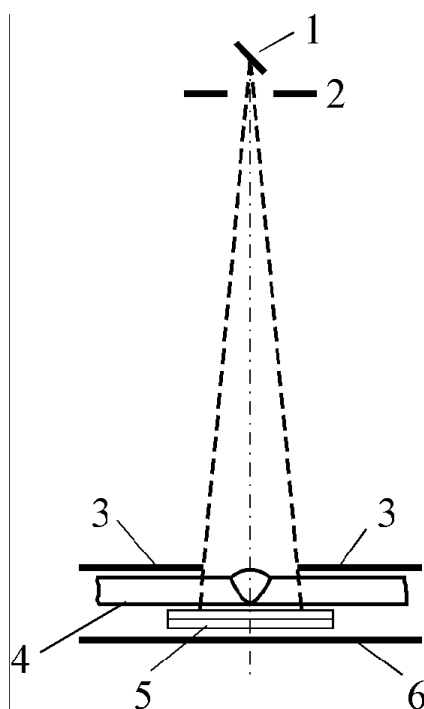
Pri radiografskom snimanju potrebno je odabrati radiografski film za određenu namjenu. Odabir filma ovisi o nekoliko faktora :

- sastav, oblik i veličina objekta
- tip radijacije koji se upotrebljava pri snimanju
- napon na rendgenskoj cijevi uređaja
- kvaliteti snimke koja se želi postići ; brzo i ekonomično ili sporo i kvalitetno sa dosta detalja na snimci

2.2.4.1. Rendgensko ispitivanje

Materijali u ovisnosti od svoje gustoće i debljine apsorbiraju različitu vrijednost rendgenskih ili gama zraka koje prolaze kroz testni materijal. Ako uzorak materijala koji se testira nije homogen odnosno sadrži neku vrstu diskontinuiteta, zrake će kroz takve promjene u materijalu lakše ili teže prolaziti što će se vidjeti na radiogramu kao svjetlija ili tamnija područja. Npr. pukotine u materijalu na radiogramu se vide kao tamnija područja u odnosu na ostatak radiograma.

Slika 2.14. prikazuje princip rada radiografske metode pri testiranju zavarenog spoja

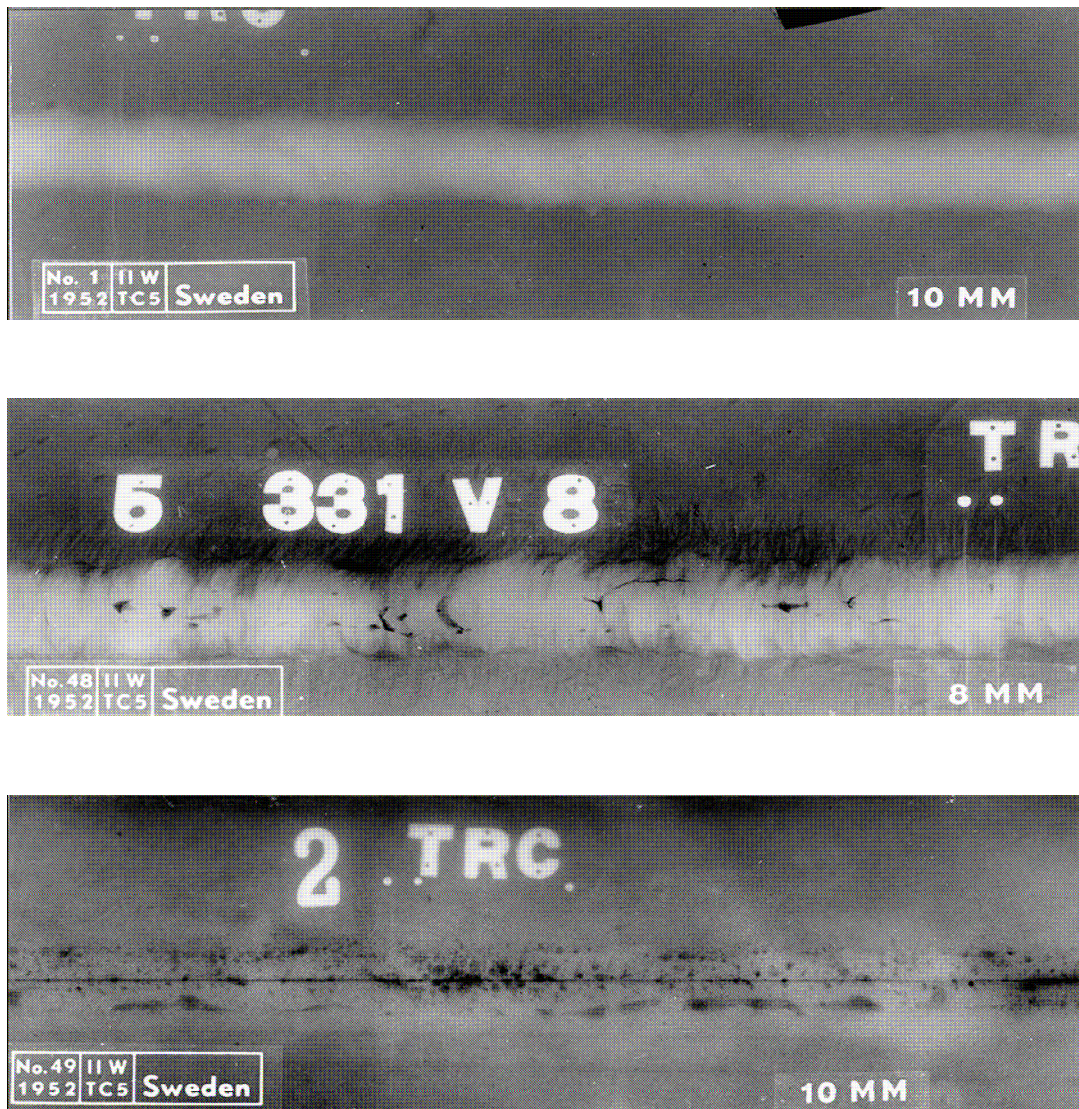


Slika 2.14. Shematski prikaz radiografske metode

Na gornjoj slici prema brojevima su prikazane slijedeće komponente :

- 1 - Izvor rendgenskih ili gama zraka

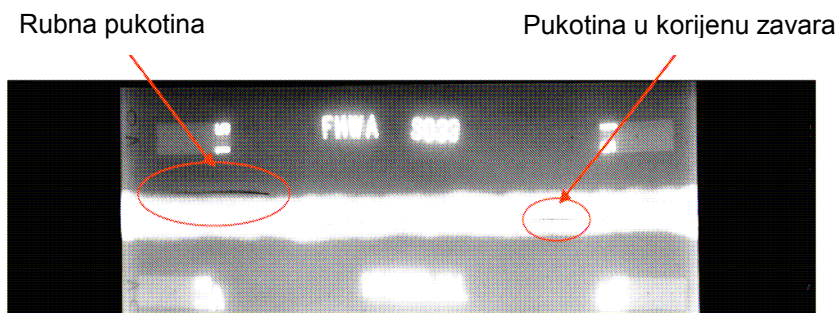
- 2 - Blender
- 3 - Propust za lokalizaciju zavara
- 4 - Zavareni spoj
- 5 - Film sa osjetljivom emulzijom
- 6 - Olovna folija



Slika 2.15. Radiogrami zavarenog spoja

Slika 2.15. prikazuje tri radiograma zavarenog spoja na kojima je različito izraženo mjesto zavara. Zavari su izvedeni različitim postupcima zavarivanja. Radiogrami su načinjeni u svrhu otkrivanja pukotina i nepravilnosti unutar zavara, koje se i vide na slici u obliku crnih nepravilnih oblika u zavaru, dok je zavar svjetlije boje u odnosu na ostatak materijala.

Slika 2.16. isto tako prikazuje radiogram zavara, ali je mjesto zavara vidljivije izražen. Na slici se vide i dvije pukotine, od kojih se jedna nalazi u korijenu zavara a jedna na rubu zavara.



Slika 2.16. Primjer radiograma zavara

Osjetljivost radiografije sa x-zrakama i γ -zrakama na različite vrste grešaka zavisi od niza faktora :

- vrsta materijala - radiografija se ne može koristiti kod materijala jako male ili jako velike gustoće (neutronska radiografija)
- vrsta diskontinuiteta
- oblik proizvoda

Neke prednosti radiografije :

- otkrivanje unutrašnjih grešaka
- otkrivanje razlika u sastavu
- dobivanje trajnog snimka ispitivanja
- osjetljivost - može se otkriti diskontinuitet čija se apsorpcija zračenja razlikuje za 1% od apsorpcije okolnog materijala

Dva velika nedostatka radijacijske metode je visoka cijena opreme i potreba za zaštitom od ionizirajućeg zračenja.

2.3. Elektromagnetske i magnetske metode

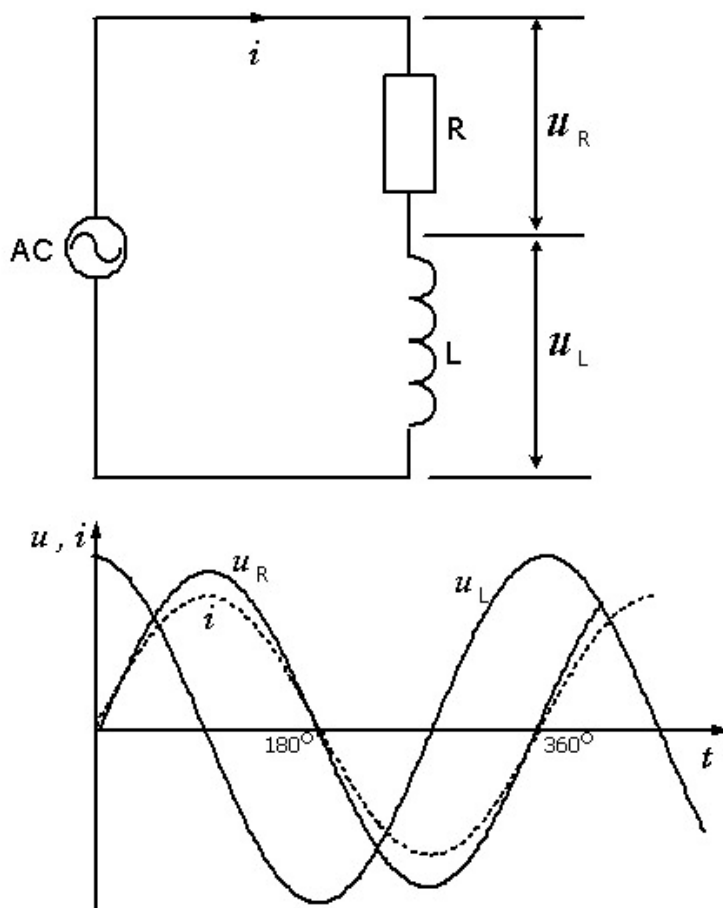
2.3.1. Osnovni principi elektromagnetizma

Prije razmatranja elektromagnetskih metoda za ispitivanje zavara dani su osnovni elektromagnetski principi na kojima počivaju ove dvije metode. Elektromagnetski zakoni i pripadajuće fizikalne veličine pridonijeti će razumijevanju i analizi metoda u ovom poglavlju.

2.3.1.1. Osnovni zakoni električnog strujanja

Zavojnica i njezino djelovanje kada je protjecana električnom strujom osnova su elektromagnetskih metoda odnosno naprava (sondi) za ispitivanje elektromagnetskim metodama.

Slika 2.17. prikazuje RL spoj kroz koji protječe izmjenična struja. Iz dijagrama napona i struja na slici 2.17. se vidi fazni pomak struje pri njezinom prolazu kroz zavojnicu. Prolaskom izmjenične struje kroz zavojnicu (idealnu, koja ima samo reaktivnu komponentu X_L) napon prednjači pred strujom za 90° .



Slika 2.17. Strujni krug sa zavojnicom spojen na izmjeničnu struju

Zavojnica (svitak) ćemo ipak promatrati kao realnu, što znači da osim svog induktivnog otpora (induktivne reaktancije) X_L , zavojnica posjeduje i omski otpor R pa možemo zapisati impedanciju zavojnice prema izrazu :

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}, \quad (2.16)$$

gdje se induktivni reaktancija računa prema izrazu :

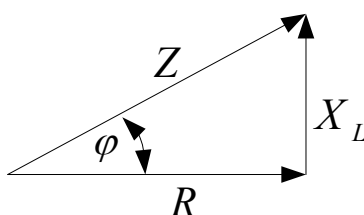
$$X_L = 2 \cdot f \cdot L, \quad (2.17)$$

gdje je:

f – frekvencija izmjenične struje, [Hz]

L – induktivitet zavojnice, [H]

Izraz 2.16. može se prikazati grafički koristeći vektorski prikaz preko trokuta impedancija:



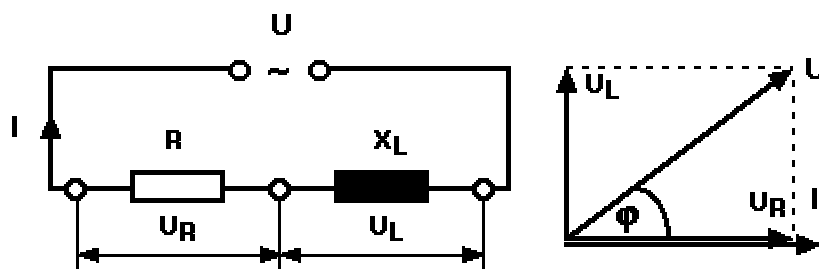
Fazni kut se računa prema izrazu

$$\varphi = \cos^{-1} \frac{R}{Z}, \quad (2.18)$$

ili

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{X_L}{R}, \quad (2.19)$$

Zbog potrošnje energije u otporu zavojnice, za realnu zavojnica (svitak) fazni kut između napona i struje ja manji od 90° , kako je prikazano vektorskim dijagramom napona i struja za RL spoj na slici 2.18.



Slika 2.18. RL spoj i vektorski dijagram napona i struja

Elektromagnetska indukcija, Samoindukcija, Međuidukcija

Elektromagnetska indukcija je pojava da se u zatvorenom zavoju stvara ili inducira napon ako se mijenja magnetski tok Φ što ga obuhvaća zavojnica. Smjer toga napona definira Lenzovim pravilom koje kaže da smjer induciranog napona je uvijek takav da se od tog napona stvorena struja protivi vremenskoj promjeni magnetskog toka zbog kojeg je došlo do induciranja napona.

Izraz za inducirani napon glasi :

$$e = -L \cdot \frac{di}{dt} \quad \text{ili} \quad e = -\frac{d\Phi}{dt} \quad , \quad (2.20)$$

gdje je:

i vremenski promjenjiva struja [A]

L induktivitet 1 zavoja [H]

e inducirani napon [V]

Φ magnetski tok, za izmjenične veličine $\Phi = \Phi_m \cdot \sin \omega t$, [Vs]

Za svitak sa N zavoja vrijedi izraz :

$$e = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad , \quad (2.21)$$

Samoindukcija je pojava kad se u samom svitku kroz koji prolazi vremenski promjenjiva struja inducira napon samoindukcije zbog promjenjivog magnetskog toka Φ što ga je proizvela vlastita struja tog svitka. Samoindukcija je prema donjem izrazu glasi:

$$u = L \cdot \frac{di}{dt} \quad \text{ili} \quad u = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad , \quad (2.22)$$

gdje je:

i vremenski promjenjiva struja, za izmjeničnu $i = I_m \cdot \sin \omega t$, [A]

L induktivitet svitka [H]

u napon samoindukcije [V].

N broj zavoja svitka

Međuidukcija je pojava da se zbog promjene jakosti struje u jednom svitku (primarnom) inducira napon u nekom drugom svitku (sekundarnom).

$$u = M \cdot \frac{di}{dt} , \quad (2.23)$$

gdje je:

i vremenski promjenjiva struja, za izmjeničnu $i = I_m \cdot \sin \omega t$, [A]

M međuiduktivitet svitka [H]

u napon međuidukcije [V]

Međuiduktivitet svitka računa se prema izrazu :

$$M = k \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2} , \quad (2.24)$$

gdje je:

L_1 induktivitet primarnog svitka [H]

L_2 induktivitet sekundarnog svitka [H]

k faktor magnetskog vezanja ($k=1$ za idealnu vezu , $k<1$ za nepotpunu vezu)

Ako je permeabilnost u prostoru oko svitaka konstantna i neovisna o promjenama jakosti struje onda su obje vrijednosti međuiduktiviteta jednake i možemo zapisati :

$$M_{12}=M_{21}=M$$

Magnetska permeabilnost μ

Jedno od svojstava pojedinog materijala je i njegova magnetska permeabilnost μ . Veličina μ označuje specifičnu magnetsku provodljivost materijala. Vrijednost permeabilnosti za različite materijale predočuje se u odnosu na permeabilnost u vakuumu μ_0 koja iznosi :

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs / Am} .$$

Ako se želi izračunati permeabilnost za određeni materijal, onda koristi se izraz :

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r , \quad (2.25)$$

gdje je μ_r relativna permeabilnost za dotični materijal. Relativna permeabilnost je bezdimenzionalan broj koji nam pokazuje koliko će se puta uz iste prilike povećati magnetski tok Φ ako se umjesto u vakuumu magnetski tok stvara u promatranom materijalu.

Električna vodljivost

Još jedno važno svojstvo svakog materijala je njegova električna vodljivost. Električna vodljivost govori nam o tome kako dobro određeni materijal provodi električnu struju. Što je iznos vodljivosti veći, materijal je bolji vodič el. struje.

Izraz prema kojemu se računa vodljivost je :

$$G = \frac{1}{R} \quad \text{ili} \quad G = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{S}{l} \quad \text{ili} \quad G = \sigma \cdot \frac{S}{l} , \quad (2.26)$$

gdje se R računa prema izrazu :

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} . \quad (2.27)$$

Veličine u gornjim izrazima su slijedeće :

G..... električna vodljivost materijala [S]

R..... električni otpor materijala [Ω]

ρ specifični električni otpor [Ωm]

σ specifična električna vodljivost, $\sigma = 1/\rho$, [S/m]

l..... duljina vodiča [m]

S.....površina vodiča [m^2]

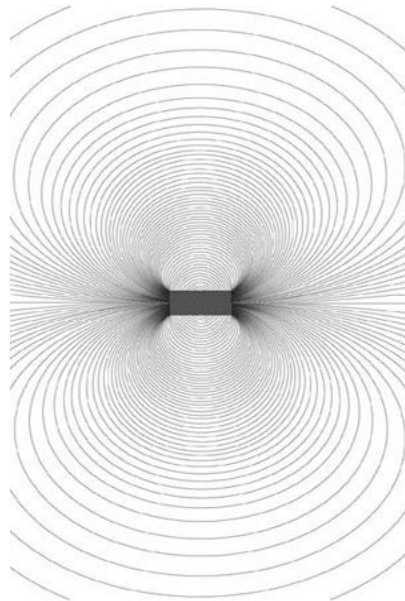
Na vodljivost materijala utječu razni faktori poput temperature materijala (nepoželjna varijabla; što je veća temperatura manja je vodljivost), toplinska obrada materijala, mehanička obrada materijala, razlike u kemijskoj kompoziciji materijala, očvršćavanje materijala.

2.3.1.2. Magnetizam

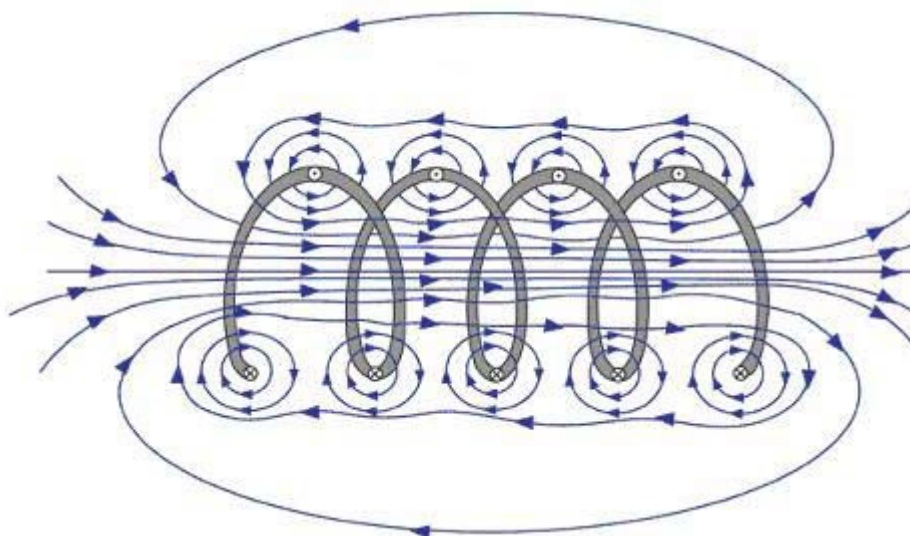
Jedan od učinaka električne struje je stvaranje magnetskog polja u prostoru oko vodiča i u samom vodiču kroz koji teče struja. Do tog otkrića došao je prvi H.C. Oersted (1820). Istraživanja su kasnije nastavili Ampere, Faraday, i Maxwell koji su utvrdili da magnetizam u permanentnim magnetima ima svoj uzrok u elementarnim strujama koje teku unutar molekula samog magneta.

Magnetskim poljem naziva se područje oko kojeg se opažaju pojave koje nazivamo učincima magnetskog polja. Magnetsko polje predočuje se silnicama kako je prikazano na slikama dolje.

Postoji pet različitih vrsta magnetizma: dijamagnetizam (oblik magnetizma koji se može registrirati samo uz prisustvo vanjskog magnetskog polja), paramagnetizam, feromagnetizam (svojstvo materijala (poput željeza - *ferro*) da 'zapamti' učinak magnetskog polja kojem je bio izložen), ferimagnetizam i antiferomagnetizam.



Slika 2.19. Magnetsko polje permanentnog magneta



Slika 2.20. Magnetsko polje zavojnice (svitka) protjecane strujom

Na slici 2.20.[6] prikazano je magnetsko polje zavojnice. Magnetsko polje zavojnice je jače što je veća jakost struje. Isto tako magnetsko polje zavojnice će se povećati sa većim brojem zavoja zavojnice. Kao što se vidi sa slike magnetsko polje zavojnice je slično magnetskom polju svitka. Običan svitak sa N zavoja protjecan strujom ponaša se slično kao permanentni magnet.

Magnetske silnice mag. toka su mnogo gušće unutar feromagnetskog materijala nego u zraku. Uzrok te pojave leži u tome što feromagnetični materijal ima puno veću permeabilnost od zraka.



Slika 2.21 Pravilom desne ruke određuje se smjer magnetskog polja

Pravilo desne ruke (slika 2.21[6]) govori određuje smjer magnetskog polja tako što se palac postavi u smjeru protjecanja struje a prsti nam pokazuju smjer magnetskog polja.

Osnovne veličine magnetskog polja su magnetski tok Φ i magnetska indukcija (gustoća silnica, gustoća toka) \mathbf{B} .

Te dvije veličine povezane su formulom :

$$d\Phi = B_n dS \quad \text{ili} \quad \Phi = \int_S B_n dS, \quad (2.28)$$

gdje je:

Φ magnetski tok , za izmjenične veličine $\Phi = \Phi_m \cdot \sin \omega t$, [Vs = W_b],

\mathbf{B} normalna komponenta magnetske indukcije [T]

\mathbf{S} površina koju sijeku silnice[m²]

Ako pretpostavimo da je magnetsko polje homogeno (silnice ravne i jednoliko raspoređene na određenoj površini) možemo gornju formulu za magnetski tok napisati kao skalarni produkt dvaju vektora prema izrazu :

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} , \quad (2.29)$$

ili ako je površina okomita na silnice :

$$\Phi = B \cdot S . \quad (2.30)$$

Jako bitna veličina u analizi magnetskog polja je i magnetska jakost magnetskog polja **H** [A/m]. Izraz za jakost magnetskog polja vodiča na udaljenosti *r* od vodiča glasi :

$$H = \frac{I}{2 \cdot r \cdot \pi} , \quad (2.31)$$

gdje je:

- I*... točke jakost struje [A]
- r*... udaljenost od središta vodiča [m]
- S**... površina koju sijeku silnice[m²]

Za svitak izraz za jakost magnetskog polja glasi :

$$H \approx \frac{N \cdot I}{l_{sv}} , \quad (2.32)$$

gdje je:

- I*... točke jakost struje [A]
- l_{sv}*... srednja duljina svitka [m]
- N**... površina koju sijeku silnice[m²]

Magnetska permeabilnost **μ**, magnetska indukcija **B**, magnetski tok **Φ** vezani su relacijom:

$$B = \mu \cdot H \quad \rightarrow \quad \mu = \frac{B}{H} , \quad (2.33)$$

gdje se **μ** za određeni materijal izračunava prema formuli $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$.

2.3.2. Metoda vrtložnih struja

Razlog odabira metode vrtložnih struja leži u njezinom širokom spektru primjene iz kojeg se može odabrati ona aplikacija koja najviše odgovara procesu detekcije zavara na osnovu navedenih značajki zavara u uvodu ovog rada.

2.3.2.1. Uvod

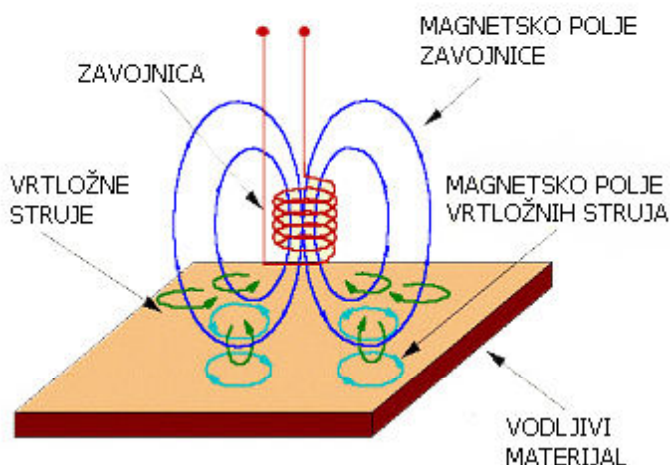
Testiranje materijala pomoću vrtložnih struja spada nerazorne metode ispitivanja i ima vrlo široku primjenu. Bitno je napomenuti da je upotreba metode vrtložnim strujama (eng. *eddy currents method*; u nastavku EC metoda) ograničena samo na materijale koji provode električnu struju (elektrovodljive materijale), i primjenjuje se na vodljivim materijalima različitih oblika i veličina. EC metoda je pogodna i zbog lake prenosivosti opreme potrebne za mjerenje.

2.3.2.2. Vrtložne struje i ispitivanja vrtložnim strujama

Uzrok pojave vrtložnih struja (eng. *eddy currents*, EC) u materijalu je elektromagnetska indukcija. Kada kroz neki vodič (najčešće bakreni) protječe izmjenična struja, unutar i oko njega stvara se magnetsko polje određene jakosti H . Magnetsko polje raste što je jakost struje veća, i obratno.

Kada izmjenična struja protječe kroz zavojnicu, oko zavojnice se stvara promjenjivo magnetsko polje prema pravilu desne ruke (točka 2.3.1.2). Pod utjecajem promjenljivog magnetskog polja u električki vodljivom materijalu induciraju se vrtložne struje.

Vrtložne struje su inducirane el. struje koje imaju kružni tok (slika 2.22.[6]).



Slika 2.22. Induciranje vrtložnih struja u materijalu

Vrtložne struje koje su inducirane unutar vodljivog materijala stvaraju svoje vlastito magnetsko polje (magnetski tok \mathbf{B}), koje je suprotnog smjera u odnosu na magnetsko polje zavojnice. Interakcija između dva suprotno usmjerena magnetska toka uzrokuje slabljenje ukupnog magnetskog toka. Na kraju to rezultira smanjenjem impedancije zavojnice.

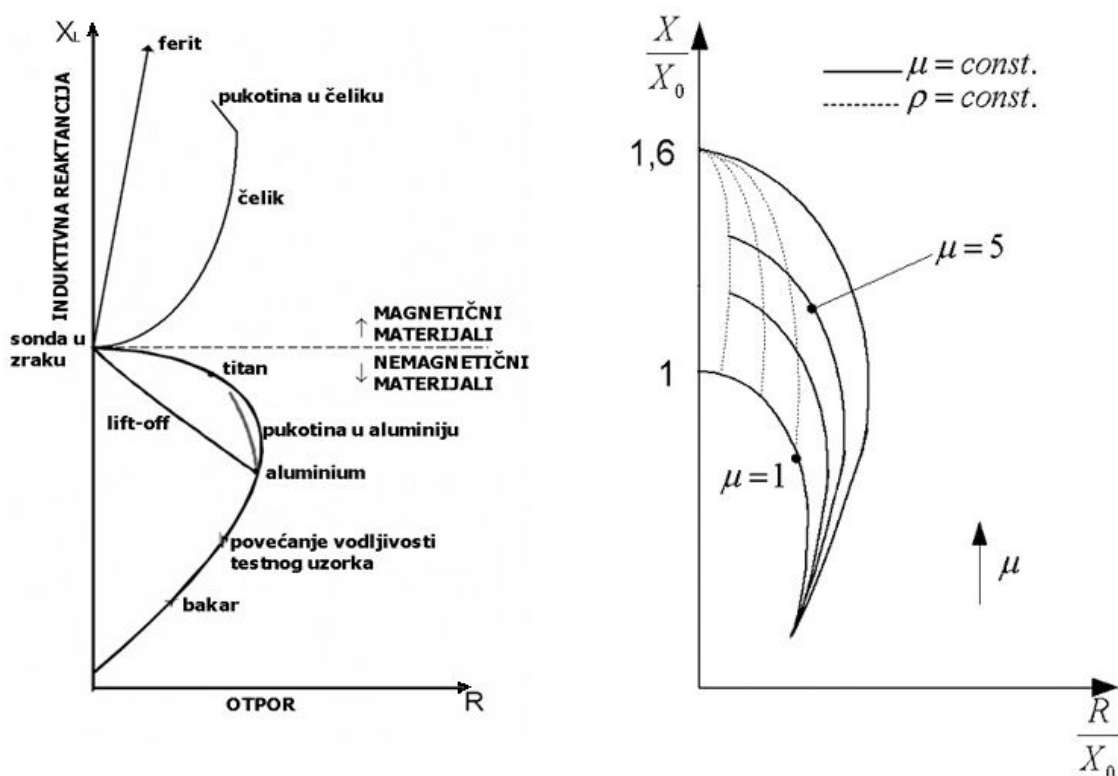
Ispitivanje se vrši posebnim sondama za ispitivanje vrtložnim strujama (eng. *eddy current probe*, EC sonda). Sonda za ispitivanje vrtložnim strujama sastoji se od jedne ili više zavojnica, u ovisnosti o aplikaciji, koje mogu biti uzbudne ili osjetilne (prijemne).

Ispitivanja pomoću vrtložnih ima nekoliko prednosti a jedna od važnijih je brzina odziva tj. brzina dobivanja rezultata, koja je skoro trenutna, a rezultati se odmah vide na nekom od mjernih instrumenata, npr. osciloskopu ili računalu koje na sebi ima potrebnu akvizicijsku karticu.

2.3.2.3. Prikaz odziva mjerenja

Mjereći promjene u impedanciji zavojnice sonde dobiva se informacija o testnom materijalu. Te informacije su najčešće podaci o električnoj vodljivosti ili permeabilnosti materijala.

Za prikazivanje podataka dobivenih testiranjem najčešće se koristi dijagram impedancija. Dijagram je prikazan na slici 2.23[19]. Iz dijagrama impedancija mogu se očitati razni utjecaji na impedanciju sustava (npr. kako magnetska permeabilnost testnog materijala utječe na odziv EC sonde). Isto tako, mogu se očitati promjene u impedanciji zavojnice pri testiranju za različite materijale i diskontinuitete unutar njih.



Slika 2.23. Plan impedancija ; Utjecaji raznih parametara na impedanciju sustava

Na slici 2.23. prikazani su utjecaji pukotina, el.vodljivosti i *lift-off*-a (zračnosti, točka 2.3.2.4.) na impedanciju sustava za feromagnetične i neferomagnetična materijale.

Na slici 2.23. još su prikazani i utjecaji permeabilnosti testnog uzorka na impedanciju u normaliziranom koordinatnom sustavu. Naime, često se koristi i prikaz impedancije sustava u koordinatnom sustavu koji je normaliziran s induktivnim otporom X_0 neopterećenog sustava tj. kada je sonda u zraku.

Osim gore spomenutih utjecaja, u planu impedancija mogu se prikazati i slijedeći utjecaji na impedanciju sustava :

- ▶ utjecaj ispitne frekvencije
- ▶ utjecaj zračnosti između sonde i testnog objekta
- ▶ utjecaj električne vodljivosti materijala koji se ispituje
- ▶ utjecaj dimenzija i geometrije testnog objekta

2.3.2.4. Vanjski faktori koji utječu na odziv EC sonde

Postoji nekoliko faktora koji utječu na odziv sonde za testiranje vrtložnim strujama. Ti faktori utječu na kvalitetu ispitivanja. Uglavnom se odnose na utjecaj testnog materijala odnosno parametara testnog objekta na EC sondu.

Glavni faktori su električke veličine kao vodljivost materijala, permeabilnost materijala, ali također utječu i frekvencija izmjenične (pulsne) struje, geometrija i stanje površine testnog dijela, udaljenost sonde od površine materijala, omjer signal/šum.

Vodljivost materijala σ ima direktan utjecaj na tok vrtložnih struja, i to tako što je veća vodljivost materijala veća je i jakost vrtložnih struja na površini, a time je i bolji odziv metode. Dubina prodiranja opada povećanjem električne vodljivosti ispitnog materijala.

Permeabilnost μ je za različite materijale različita. Za neferitne materijale (mesing, aluminij, bakar) i austenitni nehrđajući čelik permeabilnost je jednaka 1. Za feritne metale permeabilnost iznosi i nekoliko stotina, što ima velik utjecaj na vrtložne struje pa time i odziv EC metode. Dubina prodiranja opada povećanjem permeabilnosti materijala.

Frekvencija struje je vrlo važan faktor koji utječe uglavnom na dubinu prodiranja, i jedan je od faktora kojim je lako upravljati pri testiranju. Pri nižim frekvencijama prodiranje je dublje u materijal, a pri višim pliće. Osim toga o frekvenciji ispitivanja ovisi i osjetljivost metode vrtložnih struja na pojedina svojstva materijala. Prednost više frekvencije je veća gustoća struje, pogotovo u površinskom sloju.

Geometrija testnog dijela može uvelike utjecati na testiranje. Metoda registrira sve udubine koji su dio geometrije objekta.

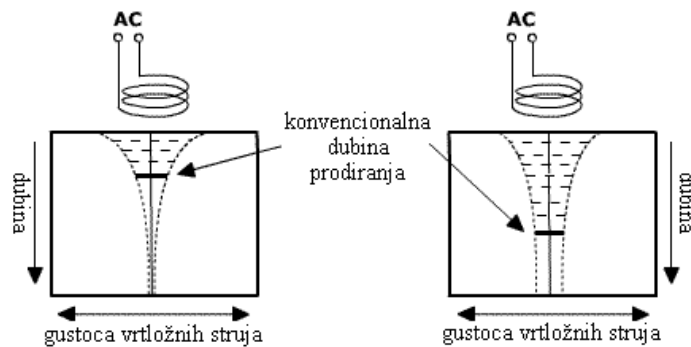
Udaljenost (zračnost) sonde od testnog dijela (eng. *lift-off*, zračnost) utječe više na rezultate što je sonda udaljenija od testnog objekta. Naime, udaljenost sonde od materijala je bitna, jer što je udaljenost veća, magnetski tok je manji, a time i inducirane vrtložne struje u materijalu su manje što utječe na međuidukciju, što uvelike utječe na odziv.

Odnos signal/šum (S/N) je omjer između korisnog signala i šuma (nekorisnog signala). Šum i razne smetnje nastaju kao posljedica stanja površine (npr. gruboća, neravnine površine) i geometrije objekta ili homogenosti materijala. Izvori elektromagnetskih smetnji čest su problem, a nastaju usljed rada različitih uređaja poput električnih motora i generatora,

aparata za zavarivanje ili obično protjecanje struje kroz vodič) ili usljed mehaničkih vibracija (uzrokuje pomicanje testnog dijela ili sonde – *lift-off*). Prevencija protiv šuma odnosno povećanje S/N može se postići čišćenjem testnog objekta, zaštitom prostora testiranja od elektromagnetskih smetnji.

Uspješna procjena mjesta pukotine ili ocjena dobivenih rezultata pomoću nekog od faktora (parametara) metode, traži od metode da se ostali čimbenici drže konstantnim ili se smanji njihov utjecaj na što manju mjeru[6].

2.3.2.5. Raspodjela vrtložnih struja unutar materijala



Slika 2.24. Raspodjela vrtložnih struja po presjeku materijala

Kako se vidi iz slike 2.24.[6] sa dubinom prodiranja u materijal vrtložne struje i magnetski tok se prigušuju zbog tzv. *površinskog efekta*. Prodiranjem vrtložnih struja u materijal povećava se njihovo fazno kašnjenje za kut φ u odnosu na vrtložne struje na površini. Tako je izraz za vrtložne struje koje protječu u površinskom dijelu :

$$i = I_{vs} \cdot \sin \omega t , \quad (2.34)$$

a izraz za vrtložne struje na nekoj dubini δ :

$$i = I_{vs1} \cdot \sin(\omega t - \varphi) . \quad (2.35)$$

Isto vrijedi i za magnetski tok, gdje izraz

$$\Phi = \Phi_{vs} \cdot \sin \omega t , \quad (2.36)$$

vrijedi za tok koji protječe u površinskom dijelu materijala, a izraz

$$\Phi = \Phi_{vs1} \cdot \sin(\omega t - \varphi) , \quad (2.37)$$

vrijedi za tok na nekoj dubini δ .

Naravno, u gornjim izrazima gustoća magnetskog toka i struje se mijenja sa dubinom prodiranja.

Dubina prodiranja se računa prema izrazu:

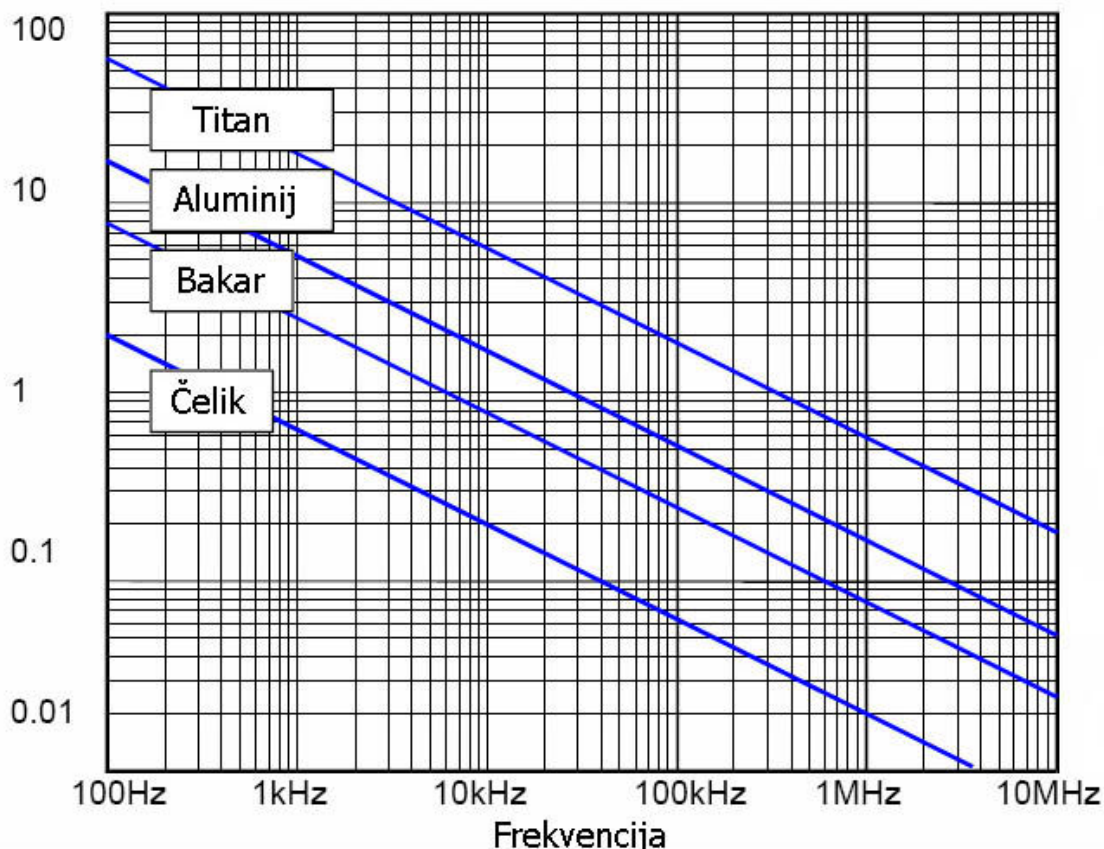
$$\delta \sim \frac{1}{\sqrt{\mu \cdot \sigma \cdot f}} \quad \text{ili} \quad \delta \sim \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f \cdot \pi}}, \quad (2.38)$$

gdje je:

- δkonvencionana dubina prodiranja [mm]
- μ magnetska permeabilnost testnog materijala [H/mm]
- σ električna vodljivost testnog materijala [S/mm]
- ρ specifični električki otpor testnog materijala [Ω m]
- f frekvencija testne struje [Hz]

Preoblikovanjem gornje formule može se jednostavno izračunati frekvencija struje ispitivanja za potrebnu (željenu) dubinu prodiranja. Na slici 2.25 [19]. prikazana je ovisnost dubine prodiranja o frekvenciji za nekoliko materijala.

Dubina prodiranja (mm)



Slika 2.25. Ovisnost dubine prodiranja o frekvenciji za različite materijale

Fazni pomak (kašnjenje) između vrtložnih struja na površini materijala i nekoj dubini d se izvodi prema 2.38. i računa prema izrazu :

$$\varphi = \frac{d}{\delta} = d \cdot \sqrt{\frac{\mu \cdot f \cdot \pi}{\rho}}, \quad (2.39)$$

gdje je :

d dubina [m]

φ fazno kašnjenje [rad]

Porast faznog kašnjenja s dubinom ima znatan utjecaj na impedanciju sustava odnosno na vektor impedancije. Mjerenjem faznog kašnjenja može se odrediti dubina na kojoj se nalazi diskontinuitet.

2.3.2.5. Izvedbe sonde za EC metodu

Testiranje pomoću vrložnih struja obavlja se pomoću sonde koja se sastoji od zavojnice i jezgre koja može biti feritna ili od neferitnog materijala. Postoji više vrsta sonde koje služe za testiranje u ovisnosti o vrsti materijala, debljini, potrebi dubine testiranja itd.

Vrste EC sonde

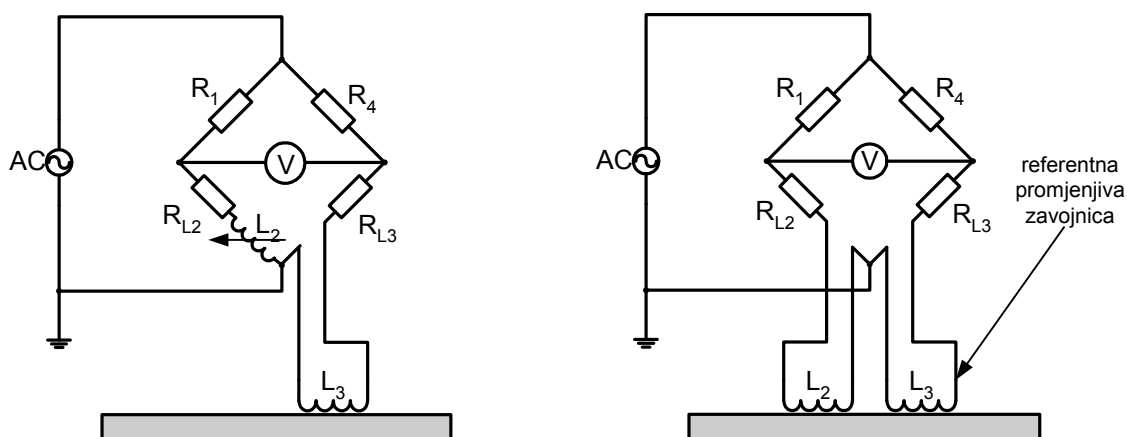
Tri su osnovne vrste sonde :

1. površinska sonda (eng. *surface coil, pancake coil, probe coil,*)
2. bobin sonda odnosno standardna diferencijalna sonda – (eng. *bobbin coil, ID*)
3. prstenasta odnosno rotirajuća sonda (eng. *encircling coil*)

Osim gornje podjele, sonde mogu biti **apsolutne i diferencijalne** – podjela prema načinu rada tj. sonde izvedene u odnosu na način na koji se želi mjeriti impedanciju zavojnice u ovisnosti o onome što se želi izmjeriti (npr. defekte, svojstva materijala itd.). One se prvenstveno razlikuju po tome kako se spajaju u mosni spoj tj. na mjerne mostove poput Wheatston-ovog mosta ili Maxwell-Wien-ovog mosta. Preko mostova se mjeri impedancija sustava tj. sonde, odnosno umjerava sonda. Načini spajanja su prikazani na slici 2.25. Prema gore navedenom načinu podjele postoje i **hibridne sonde**, slične diferencijalnim, koje se sastoje od dvije zavojnice koje nisu jednake tj. nemaju iste parametre. Kod hibridnih sonde jedna je zavojnica uzbudna, a druga prijemna koja registrira promjene unutar materijala.

Apsolutne sonde u principu sadrže jednu zavojnicu koja služi za induciranje vrložnih struja unutar testnog materijala. Rad sonde je opisan u prethodnim odlomcima ovog poglavlja. Upotrebljava se najčešće za mjerenje vodljivosti, debljine, detektiranja pukotina.

Diferencijalne sonde u principu sadrže dvije zavojnice, od kojih je jedna referentna, a druga se pomiče po testnom materijalu, ali to ovisi o izvedbi diferencijalne sonde. Inače, električki se spajaju tako da su suprotstavljene jedna prema drugoj, tako u slučaju da ako na obje zavojnice djeluju isti uvjeti (parametri) od testnog objekta (ili okoline koja je okružuje), na izlazu ne daju nikakav odziv tj. nema signala (osim ako u mostu nije postignuta ravnoteža). Izlazni signal će biti generiran samo u slučaju da na njih djeluju različiti parametri od testnog objekta (tj. ako jedna zavojnica dođe do neke vrste diskontinuiteta).



Slika 2.26. Apsolutni i diferencijalni tipovi sonde u mosnom spoju

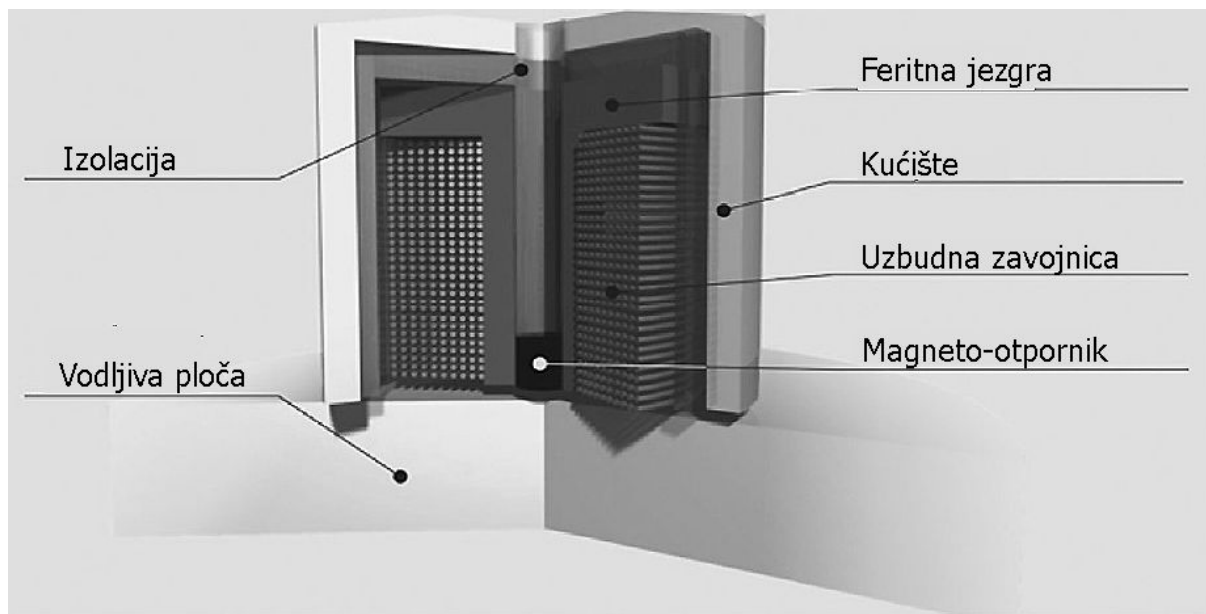
Površinske sonde služe za konvencionalno ispitivanje po površini testnog objekta. Površinske sonde izvide se u raznim veličinama za različite geometrije testnog objekta. Te sonde mogu imati veliku rezoluciju pogotovo u odnosu na bobin ili prstenastu sondu.

Bobin sonde služe za ispitivanje šupljina u objektima odnosno dijelova koji sadrže unutrašnje promjere ili razne provrte, poput cijevi ili raznih šupljih profila.

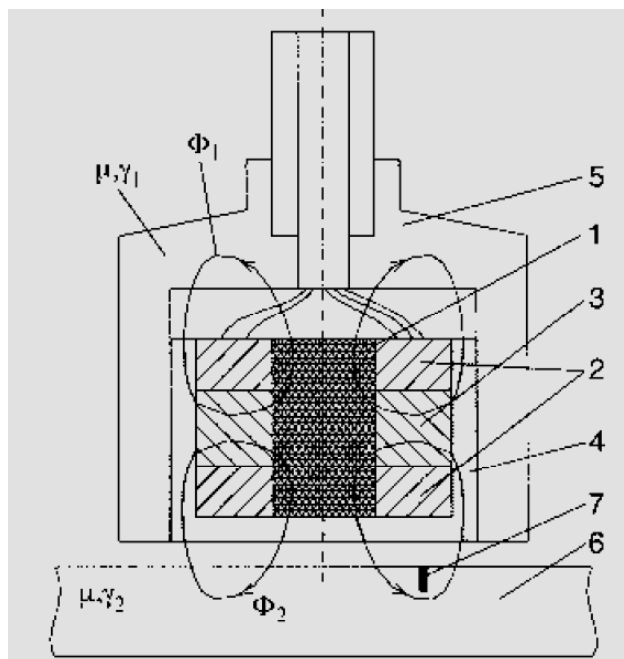
Prstenaste odnosno rotirajuće sonde okružuju dio površine testnog objekta, ili drugim rječima, testni objekt se umeće unutar sonde. Prednost im je što odjednom mogu testirati velik dio površine objekta i omogućuju veliku brzinu testiranja, ali imaju manju osjetljivost na određene vrste diskontinuiteta, manju rezoluciju u odnosu na površinske sonde.

Sonde je prije svake upotrebe potrebno propisno ugoditi tj. kalibrirati za ispitivanje. Za kalibraciju sonde koriste se razni etaloni odnosno referentni uzorci. Kalibraciju je potrebno vršiti često, prije svakog mjerenja. Ugađanje se vrši po raznim standardima (npr. ASME standardi), koji propisuju razna pravila kalibriranja.

Na slikama 2.27. [21] i 2.28. [22] prikazana su dva primjera EC sonde.



Slika 2.27. Primjer EC sonde u presjeku



Slika 2.28. Primjer eddy current sonde

Na slici 2.28. je prikazana EC sonda sa tri zavojnice, od čega su dvije uzbudne zavojnice spojene u seriju i stvaraju suprotno usmjerene magnetske tokove Φ_1 i Φ_2 , a treća je prijemna (osjetilna) zavojnica. Oplata sonde i ispitni materijal imaju jednaku vrijednost el. vodljivosti. Prijemna zavojnica smještena je između dviju uzbudnih zavojnica. Sonda je u stanju ravnoteže sve dok ne naiđe do diskontinuiteta koji uzrokuje neravnotežu u strujnom krugu i generiranje odziva odnosno izlaznog signala. (Napomena ; Na gornjoj slici električna vodljivost označena je oznakom γ)

(1 - feromagnetska jezgra ; 2 - uzbudne zavojnice ; 3 - prijemna zavojnica ; 5 - oplata od vodljivog materijala ; 6 - ispitni materijal)

2.3.2.6. Prikaz i indikacija rezultata testiranja

Za prikaz i indikaciju rezultata EC testiranja koriste se razni indikatori, instrumenti i uređaji.

Prikaz i indikacija rezultata može se vršiti pomoću slijedećih naprava :

- ▶ svjetlosni indikator
- ▶ zvučni alarmi
- ▶ mjerni uređaji – razni metri
- ▶ digitalni uređaji za prikaz
- ▶ CRT monitori
- ▶ zapisnici odziva (rekorderi) pomoću raznih medija za zapis podataka
- ▶ kompjuteri sa akvizicijskim karticama i software-om

2.3.2.7. Primjena metode

EC metoda se primjenjuje u raznim granama industrije, i njezin raspon korištenja za različite svrhe je jako velik. Primjenjuje se za ispitivanje različitih karakteristika materijala. Pouzdanost, preciznost i osjetljivost metode je jako velika. Naprimjer, EC sondom mogu se detektirati razlike u debljini u opsegu od nekoliko mikrometara do deset milimetara.

Primjenjuje se za :

- ▶ za mjerenja raznih svojstava materijala koji provode el. struju, poput mjerenje megnetske permeabilnosti, električne vodljivosti, zrnatost strukture materijala, određivanje toplinske obrade materijala, dimenzije objekata, mjerenje debljine nevodljivih premaza odnosno prevlaka na vodljivim materijalima itd.
- ▶ za detektiranje: pukotina, poroznosti i ostalih diskontinuiteta (defekata) u materijalu
- ▶ za sortiranje materijala i određivanja razlika u njihovom sastavu i mikrostrukturi i drugim svojstvima.

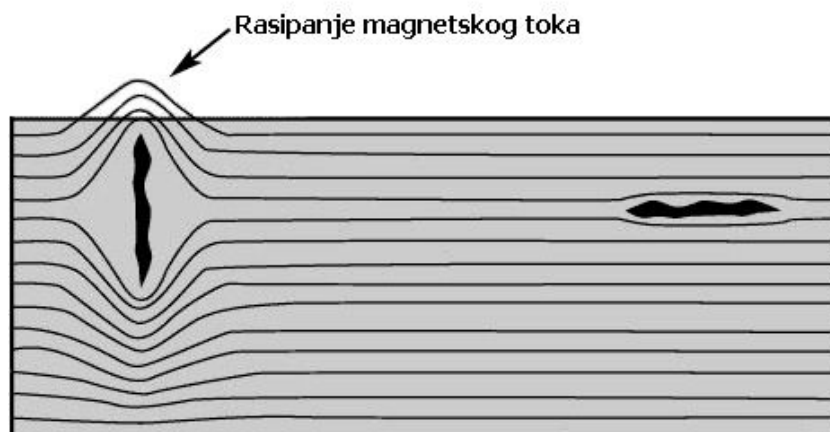
2.3.3. Metoda rasipanjem magnetskog toka

Magnetske metode su jedne od metoda koje se vrlo često koriste u svrhu nerazornih ispitivanja materijala u potrazi za defektima u materijalu, a njihova primjena traje od početka prošlog stoljeća. Razlog tome je prvenstveno cijena i jednostavnost ispitivanja.

Magnetska metoda nazvana rasipanje magnetskog toka (eng. *flux leakage method*, MFL) može se koristiti, osim za otkrivanje površinskih i podpovršinskih grešaka, i za ispitivanje zavara kod feromagnetičnih materijala.

2.3.3.1. Princip MFL-a

Princip rada odnosno uvid u rad magnetskih metoda se može objasniti pomoću metode magnetskim česticama (eng. *Magnetic particle method*, MPI). Naime, MFL i MPI su slične metode, razlika je samo što MFL metoda koristi senzor za detektiranje mjesta diskontinuiteta odnosno defekta u materijalu, dok MPI koristi magnetske čestice raznih boja. Diskontinuiteti poput pukotina sa MPI se detektiraju na slijedeći način; pospu li se magnetske čestice (npr. sitne čestice željeza) po površini ispitivanog materijala, ako postoji pukotina okomito na smjer prolaska silnica magnetskog polja, sitne čestice će se okupiti oko pukotine.



Slika 2.29. Rasipanje silnica oko pukotina

Kako se vidi sa slike 2.29 [6]. dolaskom silnica do pukotine, dolazi do njihovog rasipanja (ogibanja) oko pukotine. U području pukotine imamo različitu gustoću magnetskog polja, pa imamo promjenu magnetskih veličina kao što su magnetski tok, magnetska indukcija i jakost magnetskog polja. Evidentan nedostatak ove metode je otkrivanje pukotina koje su uske i paralelne smjeru silnica magnetskog polja. U tom slučaju rasipanje silnica je manje i teže ga je detektirati. Na sondi za MFL testiranje nalazim se senzor (detektor) koji detektira rasipanje mag. toka, najčešće Hallova sonda.

Na temelju očitanih veličina sa nekog od mjernih uređaja zaključujemo o pukotinama ili promjeni svojstava unutar materijala, jer je došlo do promjene u vrijednosti permeabilnosti ili

električne vodljivosti u području testnog materijala gdje se nalazi diskontinuitet (npr. pukotina,zavar).

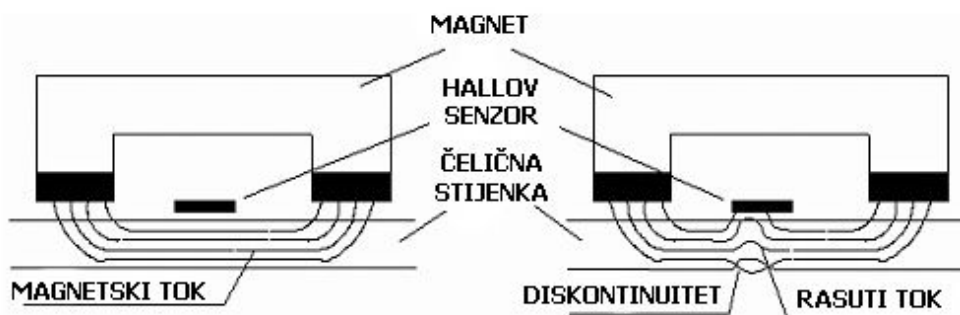
2.3.3.2. Ispitivanje MFL metodom

Ispitivanje MFL metodom svodi se na uspostavljanje jakog magnetskog toka unutar ispitnog materijala od strane jakog magneta. Kada nema nikakvih diskontinuiteta unutar materijala silnice magnetskog toka su uniformne, kako je prikazano na slici 2.30 [24]. Kada silnice dođu do udubine ili pukotine ili dijela materijala kojeg je nagrizla korozija dolazi do rasipanja silnica. Na slici 2.30. isto tako se može vidjeti da dolaskom silnica do udubine u materijalu silnice počinju "ogibati" oko udubine. Senzor, koji je smješten između dva pola magneta (Hallov senzor), detektira te rasute silnice (dio magnetskog toka) i generira električni signal proporcionalan vrijednosti rasutog magnetskog toka. Preciznije rečeno, rasipanje magnetskog toka koje je uzrokovala udubina (diskontinuitet) u materijalu prelazi prethodno postavljeni prag (vrijednost) na senzoru.

Vrijednosti ispitivanja mogu se očitati preko instrumenta poput Gauss- metra, ili grafički prikazati na zaslonu osciloskopa ili uređaja koji ja namijenjen za MFL metodu.

Iznos rasutog magnetskog toka ovisi o :

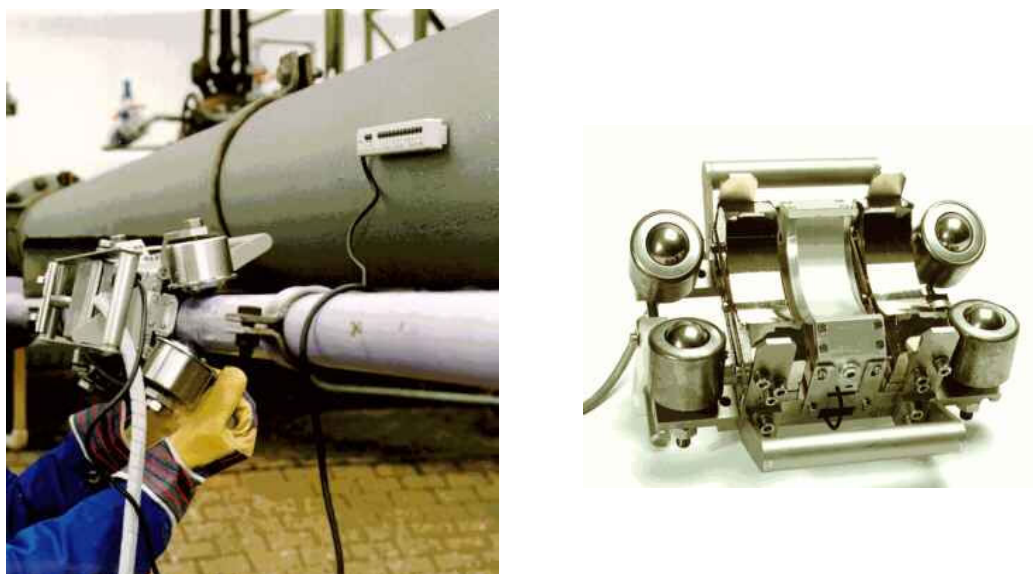
- dubini i veličini diskontinuiteta
- orijentaciji diskontinuiteta
- tipu diskontinuiteta
- orijentaciji diskontinuiteta (da li je s gornje ili donje strane)



Slika 2.30. Ispitivanje MFL metodom

2.3.3.3. Ispitivanje cijevi

Cijevi odnosno cjevovodi i tankovi ovim postupkom se obično ispituju na unutrašnju koroziju ili eroziju materijala, jer u korodiranom području cijevi dolazi do stanjenja materijala. U tom slučaju imamo dvije vrste ispitivanja : ispitivanje cijevi malih promjera (do ~80mm) (eng. *Pipescan*) i ispitivanje stijenki tankova i cijevi većih promjera (eng. *Wallscan*).



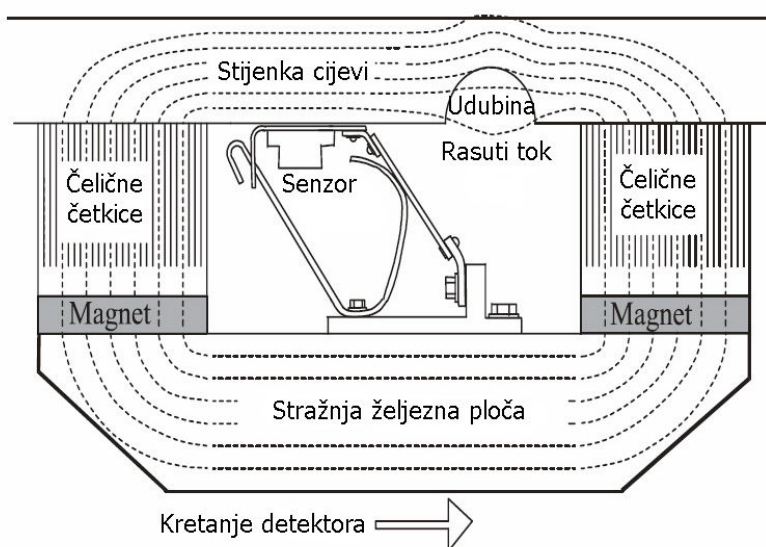
Slika 2.31. Ispitivanje cijevi MFL metodom

Sa slike 2.31. [7] se vidi da MFL uređaji za ispitivanje cijevi sadrže sustav magnetiziranja – elektromagnet ili permanentni magnet – koji magnetizira određenu dužinu cijevi.

Sustav sa elektromagnetom radi na način da se prolaskom struje kroz zavojnicu elektromagneta inducira magnetsko polje. Elektromagnetom se upravlja jednostavno - uključivanjem ili isključivanjem napajanja elektromagnet prestaje sa svojim djelovanjem. Isto tako, jakost magnetskog polja se povećava ili smanjuje promjenom iznosa struje.

2.3.3.4. MFL detektor

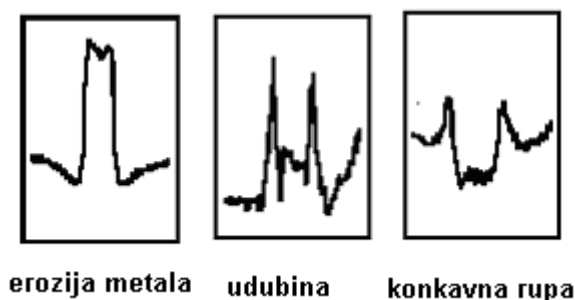
Za izradu MFL detektora koriste se permanentni magneti koji imaju jako prirodno magnetsko polje, poput vrlo jakog permanentnog magneta Nd-Fe-B(*eng.* Neodymium-Iron-Boron). Na slici 2.32. [4] prikazana je shematski sonda (detektor) za mjerenje rasutog magnetskog toka.



Slika 2.32. Shematski prikaz MFL detektora

U MFL uređajima za ispitivanje koriste se dvije vrste senzora. To su zavojnica na principu elektromagnetske indukcije i Hallova sonda. Razlika između ove dvije vrste senzora je u činjenici da zavojnica mjeri iznos promjene magnetskog polja, dok Hallova sonda mjeri trenutnu vrijednost magnetskog polja. Senzor se smješta između dva pola magneta i mjeri magnetsko polje rasutog toka.

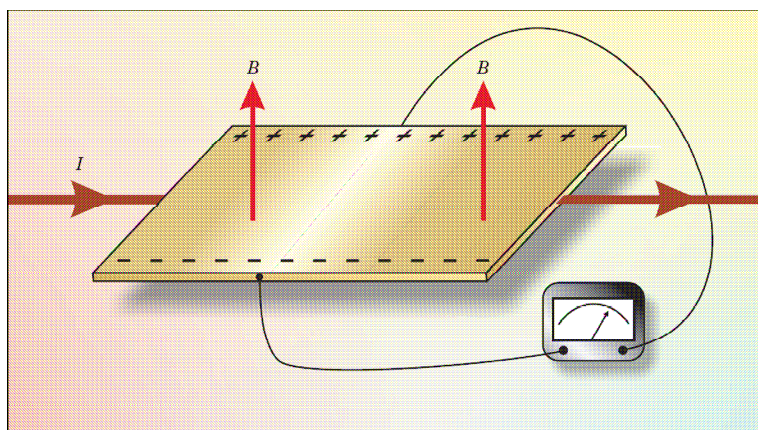
Senzor kojim se detektira polje najčešće je Hallova sonda, koji ujedno i generira električni signal proporcionalan jakosti polja. Ovisno o orijentaciji sonde, sonda može mjeriti aksijalnu, radijalnu ili obodnu (eng. *circumferential*) komponentu signala. Dobiveni električni signal sa sonde najčešće se preko pojačala dovodi na uređaj za grafički prikaz signala ili na akvizicijski sustav mjernog sustava.



Slika 2.33. Primjeri oblika MFL signala

Hall-ova sonda se zasniva na Hallovom efektu. Sonda se sastoji od tanke pločice (filma) metala ili poluvodiča, na čijim se rubovima nalaze dva izvoda, kako je prikazano na slici 2.34[23]. Služi za mjerenje komponente magnetskog polja odnosno magnetske indukcije \mathbf{B} , u smjeru okomitom na pločicu.

Na rubovima poluvodiča dolazi do *gomilanja* nosioca naboja, i spajanjem mjernog instrumenta (voltmetra) na rubove odnosno izvode koji su pričvrćeni na rubovima poluvodiča očitava se vrijednost Hallovog napona U_H .



Slika 2.34. Hallov efekt

Hall-ov efekt može se objasniti na slijedeći način; Ako kroz tanku pločicu metala ili poluvodiča protjecanu strujom djeluje vanjsko magnetsko polje, na slobodne nosioce naboja (elektrone) u gibanju djelovati će Lorentz-ova sila ($q \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{B})$). Sila uzrokuje otklon slobodnih nosioca koji se gomilaju na suprotnim stranama pločice, kako je prikazano na slici 2.34[23]. Nastala nejednolika raspodjela elektrona po poprečnom presjeku pločice ima za posljedicu uspostavljanje Hallovog polja \mathbf{E}_H (električnog polja) u smjeru okomitom na smjer toka struje i na smjer magnetskog polja, odnosno razlike potencijala tj. Hallovog napona U_H na suprotnim stranama vodiča.

2.4. Sustav strojnog vida u detekciji zavara

2.4.1. Uvod

Strojni vid je uzet u razmatranje iz razloga što je na pojedinim cijevima jasno vidljivo mjesto zavara. Ako je kontrast (točka 2.4.2.2.) između zavara i ostatka cijevi (osnovnog materijala) vrlo dobro uočljiv, detekcija zavara vizijskim sustavom je teorijski ostvariva. Razlika u boji u odnosu na osnovni materijal i vertikalni položaj zavara su dvije značajke zavara koje bi trebale omogućiti zadovoljavajuće rezultate pri detekciji zavara vizijskim sustavom.

Razlog iz kojeg je radiografska i ultrazvučna metoda povezana sa detekcijom vizijskim sustavom (pogledati dijagram 1.1.) je mogućnost dobivanja izlazne informacije u slikovnom obliku. Naime, način obrade podataka (u ovom slučaju slike) zahtjeva metode strojnog (računalnog) vida, koje su opisane u daljnjem izlaganju.

Ovo poglavlje ne bavi se općenito računalnim odnosno strojnim vidom i zato su napomenuti i obrađeni pojmovi i postupci koji su od interesa za ovaj rad.

2.4.1.1. Osnovne definicije

Računalni vid (eng. Computer vision) moguće je definirati kao znanstvenu disciplinu koja se bavi teorijom i tehnologijom modeliranja sustava, čija je ulazna informacija slika. Drugim riječima, računalnim vidom se nastoji oponašati ljudski vid i u tom smislu računalni vid može se smatrati dijelom umjetne inteligencije.

Digitalna obrada slike (eng. Digital image procesing) definirana je kao znanstvena disciplina koja se bavi tehnikama podvrgavanja slike raznim numeričkim operacijama s ciljem povećanja kvalitete po nekom određenom kriteriju. Za obradu slike karakteristično je da su na ulazu i izlazu slikovni podaci[25].

Digitalna analiza slike (eng.digital image analysis) definirana je kao proces koji iz slike dobiva informaciju neslikovnog tipa, sa ciljem dobivanja informacija značajnih za daljnu obradu[25].

Razumijevanje slike (eng. Image understaning) definirano je kao proces zaključivanja o stanju okoline (objekata)prikazanih na slici. U ovom slučaju neslikovni podaci su i na ulazu i na izlazu[25].

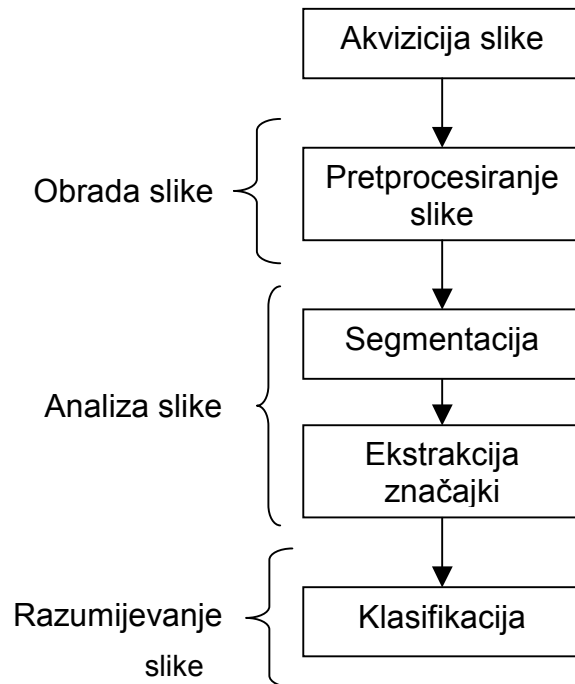
Raspoznavanje uzoraka

Za definiciju raspoznavanja uzoraka najbolje se poslužiti definicijom danom u [26]: "Raspoznavanje uzoraka predstavlja temelje umjetne percepcije - poimanja svijeta strojem. Stroj s percepcijom ima sposobnost da podražajima iz vanjskog svijeta, koji su prisutni na sensorima, dodjeljuje pojmove i na temelju njih i njihovog odnosa zaključuje o svijetu koji ga okružuje. Uzorci pritom predstavljaju sredstva poimanja svijeta, odnosno kvantitativni ili strukturni opis objekta koji ga razvrstava".

Strojni vid predstavlja primjenu računalnog vida na područje industrijskih procesa. U tom smislu, pojam strojnog vida proširuje se na područje industrijske automatizacije , odnosno robotike, što osim znanstvene , ovu disciplinu čini i inženjerskom.

2.4.1.2. Struktura sustava strojnog vida

Sustav strojnog vida može se podijeliti u nekoliko osnovnih faza odnosno razina. Te su faze : procesiranje slike, analiza slike i razumijevanje slike. Svaku fazu dalje možemo podijeliti na pojedine procese u tijeku obrade slike. Dijagram 2.1.[25] prikazuje jednu od mogućih struktura sustava strojnog vida, koja će biti obrazložena za potrebe ovog rada.



Dijagram 2.1. Sustav strojnog vida

Akvizicija slike se odnosi na uzimanje uzorka scene od interesa tj. snimanje. Za akviziciju slike upotrebljavaju se razni senzori vizije ili senzori slike (kamere). Oni pretvaraju svjetlosne signale (informacije) u električne, a zatim električne u binarne brojeve (diskretne, AD konverzijom) tj. digitalnu sliku.

Digitalna slika može se predstaviti u matričnom obliku, prema izrazu :

$$F = \begin{bmatrix} f(0,0) & f(0,1) & \dots & f(0,N-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & \dots & f(1,N-1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f(M-1,0) & f(M-1,1) & \dots & f(M-1,N-1) \end{bmatrix}, (2.40)$$

Gdje je:

F – matrični zapis digitalne slike s M redaka i N stupaca

$f(m,n)$ – osnovni element digitalne slike, piksel (eng. *picture element*). Vrijednost funkcije $f(m,n)$ je prirodni broj i predstavlja intenzitet piksela.

2.4.1.3. Obrada slike

Pretprocesiranje se odnosi na poboljšanje i transformaciju slike raznim računalnim algoritmima, u svrhu pripreme slike za daljnu obradu. Tu spadaju operacije poput filtriranja šuma, podešavanja sjajnosti (iluminacije) slike, i poboljšanja kontrasta i rubova slike.

2.4.1.4. Analiza slike

Segmentacija slike se bavi dekompozicijom scena u njezine sastavne dijelove[25]. Za pojam segmentacije nema konzistentne teorije nego samo skup metoda koji rješava problem segmentacije.

Od užeg interesa za ovaj rad su postupci koji koriste granicu objekta, kao što je Houghova transformacija. Te metode vrše segmentaciju objekata u slici na osnovu granica objekata.

Detekcija rubova je u suštini postupak filtriranja u kojem se reducira znatna količina nepotrebnih (nebitnih) informacija na slici, i ističu samo potrebne informacije za pronalaženje rubova na slici.

Izdvajanje značajki se u osnovi odnosi na identifikaciju istovrsnih značajki (karakteristika) objekata na sceni radi njihovog uspoređivanja i konačnog prepoznavanja. Izdvajanje značajki slike su bitne za segmentaciju i prepoznavanje sadržaja slike.

Značajke se može podijeliti na [30]:

- ▶ značajke "niske razine" (eng. *low level features*) – značajke koje se mogu dobiti automatski, bez informacija o obliku, čime se misli na prostorne odnose unutar slike. To su npr. boja, rubovi, vrhovi, zaobljenja na promatranom objektu.
- ▶ značajke "visoke razine" (eng. *high level features*) - značajke za čije je dobivanje potrebna informacija o obliku objekta. To su linije , krugovi i proizvoljni geometrijski oblici.

2.4.2. Uzimanje uzorka slike

2.4.2.1. Uvod

Problem osvjetljavanja površine objekta ili scene je važan stavak u procesu analize i prepoznavanja računalnim (strojnim) vidom sadržaja scene ili karakteristika objekta. Raspored i intenzitet osvjetljenja ima bitan utjecaj na kvalitetu dobivene slike nekim od senzora slike (kamere). Odabir adekvatnih izvora svjetlosti i njihov raspored dovodi do povećanja preciznosti, pouzdanosti sustava i može smanjiti vrijeme odziva cjelokupnog sustava. Naime, "pravilno" osvjetljenje određene površine može pružiti više informacija o onome što se nalazi na njoj, ili istaknuti one značajke koje su nam na površini bitne. Dobivena slika trebala bi imati velik kontrast, naglašenu teksturu, što manje sjena, kako bi se strojnim vidom mogao što bolje obaviti postavljeni zadatak.

2.4.2.2. Kontrast

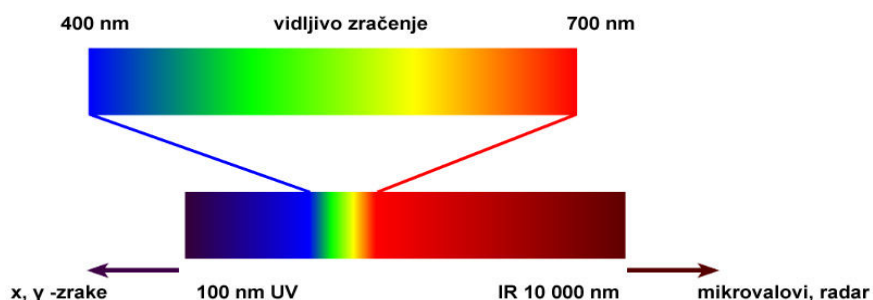
Kontrast se prema potrebi može definirati na nekoliko načina, a ovdje se navode dva, i to , kontrast kao :

- stupanj razlike između svijetlih i tamnih značajki na slici
- razlika u izgledu pojedinih područja unutar vidnog polja prilikom gledanja.

2.4.2.3. Kratki pregled izvora svjetlosti i tehnika osvjetljivanja

Svjetlost

Svjetlost je dio spektra elektromagnetskog zračenja koje izaziva vizualni osjet svjetline u ljudskom osjetilu vida, a obuhvaća dio spektra valne duljine od 380 nm do 780 nm. Izvori svjetlosti mogu zračiti i dio elektromagnetskog spektra koji ljudski osjet vida ne može registrirati, a to su infracrveno i ultraljubičasto zračenje. Navedeni spektri prikazani su na slici 2.35.



Slika 2.35. Vidljivi, UV i IR spektar elektromagnetskog zračenja

Fizikalna svojstva svjetlosti zasnivaju se na dualnoj teoriji zračenja: valna teorija (svjetlost se širi kao elektromagnetski val) i kvantna teorija (svjetlost je sastavljena od čestica nazvanih fotoni). Dvije navedene teorije objašnjavaju učinke svjetlosti, kao i ponašanje svjetlosti u prirodi.

Postoje dva načina generiranja svjetlosti, prema kojima se mogu podijeliti i izvori svjetlosti :

- termičko zračenje (npr. žarulja sa žarnom niti)
- luminiscentno zračenje (npr. fluorescentne cijevi - princip izboja u plinu)

Fizikalne i fotometrijske veličine svjetlosti

Svjetlost se može promatrati na dva načina, preko fizikalnih veličina koje promatraju svjetlost kao elektromagnetski val ili energetsku česticu (foton), i preko fotometrijskih veličina, preko kojih se svjetlost promatra na temelju osjetilnog efekta, i ograničena je samo na vidljivo zračenje spektra 380 do 780 nm.

Elektromagnetski spektar zračenja i fizikalne veličine koje ga karakteriziraju opisane su u poglavlju 2. o radiografiji, pa su ovdje ukratko opisane samo fotometrijske veličine.

Svjetlosni tok predstavlja snagu zračenja koju emitira izvor svjetla u svim smjerovima.

Jakost svjetlosti predstavlja snagu zračenja koju emitira izvor svjetla u određenom smjeru.

Rasvjetljenost je mjerilo za količinu svjetlosnog toka koja pada na određenu površinu.

Luminacija je sjajnost rasvjetljene ili svjetleće površine kako je vidi ljudsko oko tj. opisuje fiziološki učinak svjetlosti na oko.

Svjetlosna iskoristivost izvora svjetlosti definira se kao omjer dobivenog svjetlosnog toka izvora svjetlosti i uložene snage, i pokazuje iskoristivost kojom se uložena električna energija pretvara u svjetlost.

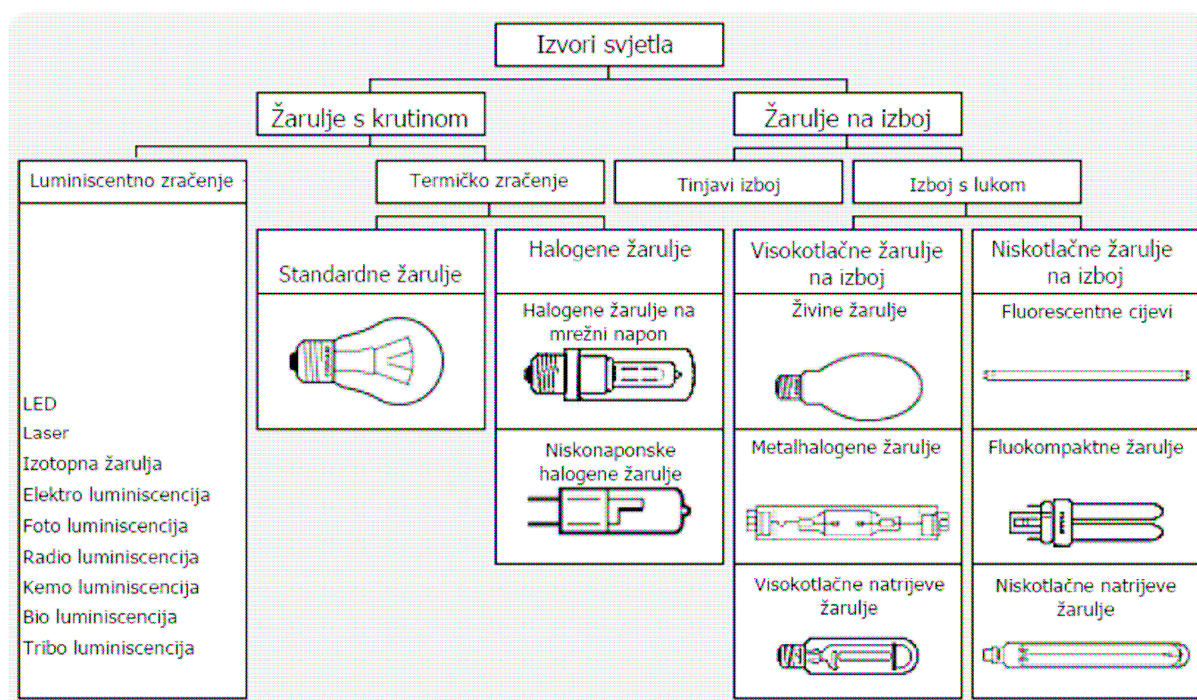
Za više informacija pogledati pod [31].

Izvori svjetlosti

Pod izvorima svjetlosti najčešće se misli na rasvjetna tijela koja zrače elektromagnetski spektar vidljive svjetlosti. Najčešće rasvjetna tijela koje emitiraju vidljivu svjetlost su razne vrsta žarulja, laseri ili LED. Osim izvora koji zrače vidljivu svjetlost još se upotrebljavaju i izvori koji zrače infracrveni spektar (IR) ili ultraljubičasti spektar (UV) elektromagnetskog zračenja.

Izvori vidljive svjetlosti podijeljeni su na [31]:

1. Izvori svjetlosti koji rade na principu termičkog zračenja
2. Izvori svjetlosti koji koriste princip luminiscentnog zračenja



Slika 2.36. Podjele izvora svjetlosti

U ovom radu se koriste sljedeće vrste izvora svjetlosti :

Halogene žarulje su žarulje sa žarnom niti, te koriste princip termičkog zračenja pri generiranju svjetla.

Fluorescentne žarulje pripadaju grupi niskotlačnih izvora na izboj. Svjetlost se generira izbojem u živinim parama visoke luminoznosti, pri čemu se stvara uglavnom nevidljivo UV zračenje, koje se fosfornim slojem na unutrašnjoj stjenki cijevi pretvara u vidljivo svjetlo. Ovaj princip generiranja svjetla naziva se foto-luminiscencija.

LED (*eng.* Light emitting diode) – poluvodička komponenta (dioda) koja emitira svjetlost kada je propusno polarizirana. Malih su dimenzija i slab su izvor svjetlosti osim ako se ne grupiraju u skupine. Imaju dug životni vijek i veliku iskoristivost i pouzdanost.

Laseri (*eng.* Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) su izvori svjetlosti koji emitiraju koherentni snop fotona. Laseri emitiraju samo monokromatsku svjetlost određene (jedne) valne duljine. Snop je koherentan, što znači da su elektromagnetski valovi međusobno u istoj fazi i šire se u istom smjeru (usmjereni snop).

Postoji nekoliko vrsta lasera koji se dijele po mediju koji se koristi za generiranje laserske zrake :

- ▶ laseri s čvrstom jezgrom (*eng.* solid state laser)
- ▶ plinski laseri,
- ▶ poluvodički laseri,
- ▶ kemijski laseri
- ▶ laseri s bojilima (*eng.* dye laser)

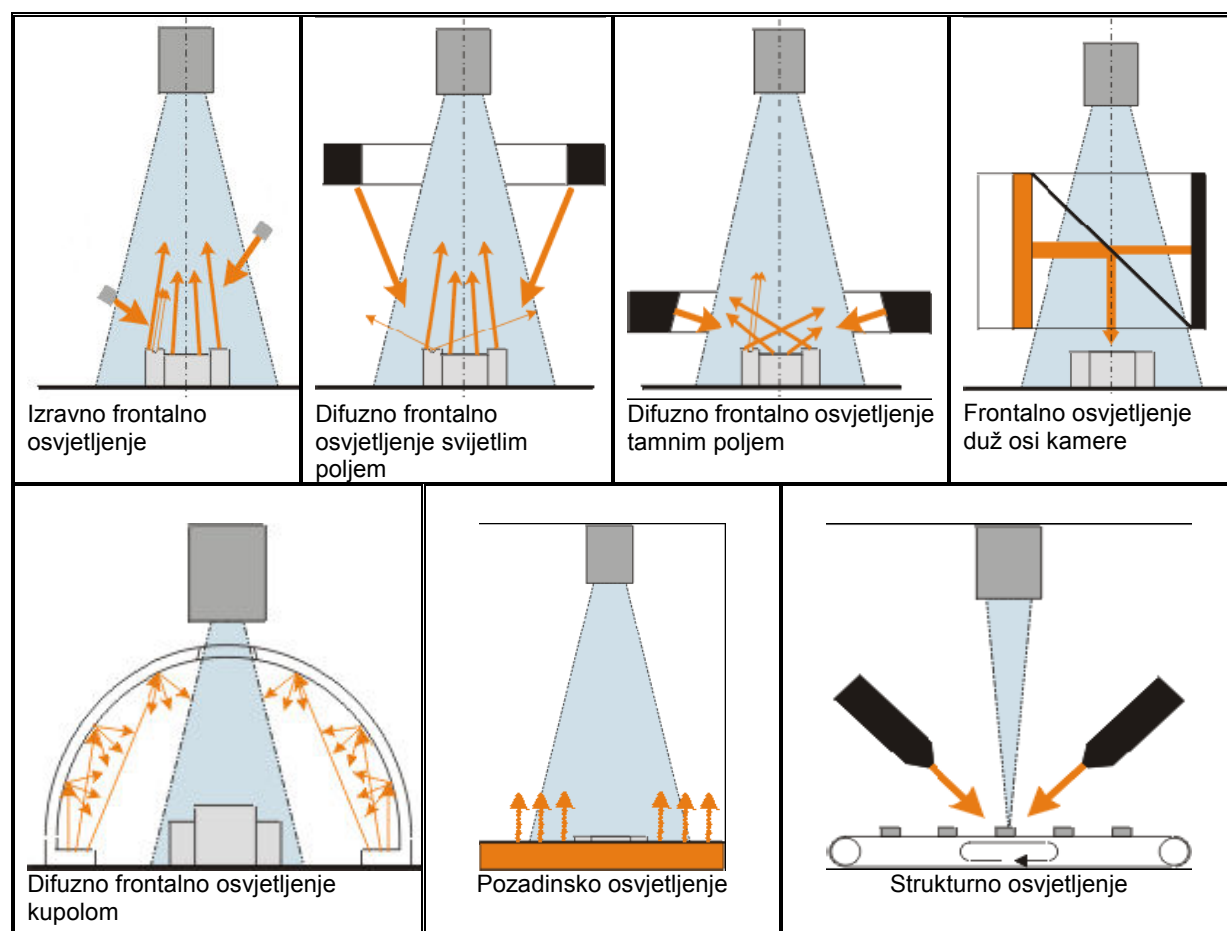
► laseri sa slobodnim elektronima

Primjena lasera je široka i primjenjuje se u skoro svim vidovima ljudske djelatnosti, kao što je industrija (obrada materijala), medicina (kirurgija, oftalmologija), mjeriteljstvu, graditeljstvu, elektroničko-optičkim uređajima za čitanje i pohranu podataka itd. Kod strojnog vida upotrebljavaju se plinski He-Ne (helij- neon) laseri i poluvodički laseri. Helij–neonski plinski laseri su laseri opće namjene. Emitiraju crvenu svjetlost ili infracrvenu svjetlost. Izlazne snage lasera su reda veličine od nekoliko watt-a, što je sasvim dovoljno za relativno jako osvjjetljenje točaka ili linija.

Poluvodički su laseri u odnosu na plinske kompaktniji i općenito izdržljiviji. Uz navedeno, mogu raditi pulsirano pri vrlo visokim frekvencijama, što ih čini pogodnim za osvjjetljavanje pokretnih proizvoda koji se gibaju većim brzinama. Snage poluvodičkih lasera u rasponu su od 100 mW do 1W. Mogu raditi intermitirano, čime se izlazna snaga može dodatno povećati.

Tehnike osvjjetljenja

Postoji nekoliko tehnika osvjjetljavanja, koje su prikazane na slici 2.37.



Slika 2.37. Tehnike osvjjetljenja

2.4.2.4. Kamere u primjeni strojnog vida u industriji

Kamere su jedan od osnovnih elemenata sustava strojnog vida, jer vrše akviziciju slike koja se kasnije određenim algoritmima obrađuje i analizira.

U sustavima strojnog vida najčešće se upotrebljavaju kamere koje su kompaktne, lagane sa ugrađenom video memorijom i procesorom za obradu slika. Koriste RAM memoriju za spremanje slika. Sastoje se od CCD (eng. Coupled Charge Device) senzora, procesora za obradu slike i sučelja kojim se povezuju na druge uređaje. Kamere u industriji moraju biti otporne na udarce, neosjetljive na vibracije i elektromagnetske smetnje.

U slučaju da kamera nema ugrađenu memoriju i procesor za obradu slike potreban je sustav za obradu koji se najčešće sastoji od PC-a sa *frame grabberom*. *Frame grabberi* su uređaji za digitalizaciju i prikupljanje slika. Ovisno o primjeni koriste se *frame grabberi* za digitalizaciju u boji (po RGB komponentama) ili monokromatski u nijansama sivog. Neke uobičajene standardizirane rezolucije *frame grabbera* su: 768x576, 768x876, 640x480, 800x600, 1280x1024, 1600x1280 i 4096x4096. Kod *frame grabbera* važan je i podatak o brzini digitalizacije slika sa ulaza zbog kontinuiteta prikupljenih slika (okvira po sekundi), kao i brzina prijenosa tih slika na sabirnicu računala radi obrade (MB po sekundi).

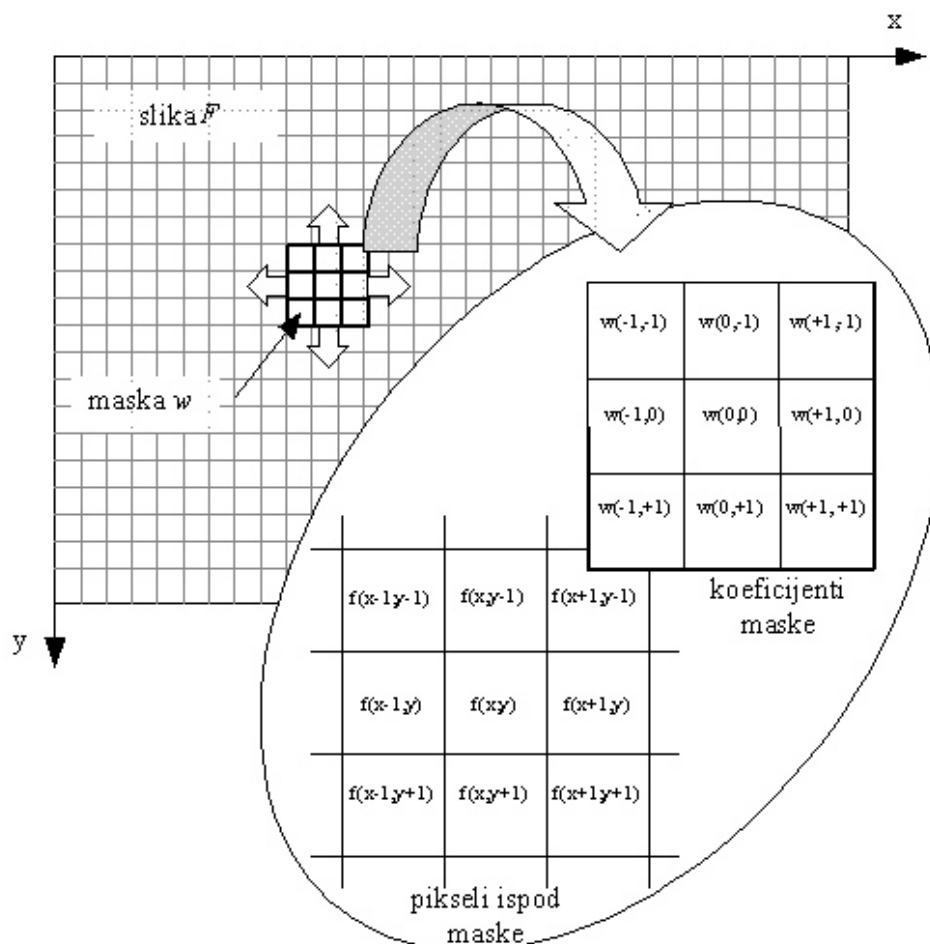
2.4.3. Postupci za detekciju zavara vizijskim sustavom

Nakon što su gore objašnjeni neki osnovni pojmovi o sustavu strojnog vida (vizijskom sustavu), potrebno je odabrati odgovarajuće postupke i opremu za rješenje problema zadanog u zadatku.

2.4.3.1. Konvolucijske maske

Konvolucija je postupak kojim se u prostornoj ili frekvencijskoj domeni sintezom dva ulazna signala dobiva izlazni signal[29]. Konvolucija se izvodi pomoću konvolucijskih maski, čije su dimenzije npr. 3x3, 5x5, 7x7 itd. Broj redaka i stupaca je obično neparan broj.

Proces linearnog filtriranja konvolucijskom maskom izvodi se jednostavnim pomicanjem maske iz točke u točku slike, pri čemu se slikovni elementi pod maskom množe njenim koeficijentima i potom sumiraju, na način prikazan slikom 2.38. [27].

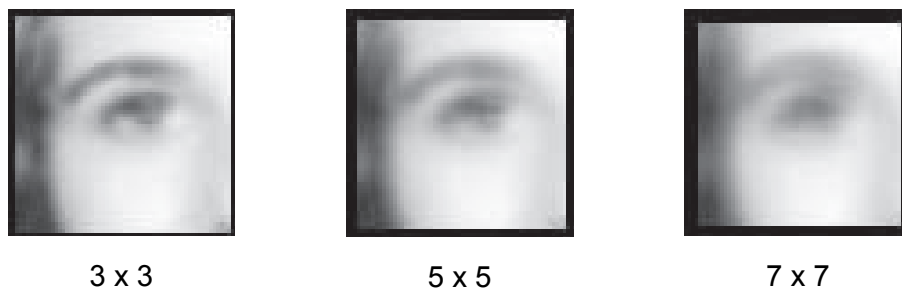


Slika 2.38. Primjer prostornog filtriranja slike konvolucijskom maskom dimenzija 3x3

Jedan takav filter je i Gaussov filter. Gaussov filter je linearni filter čiji iznosi koeficijenata konvolucijske maske računaju izrazom :

$$g(x, y) = e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (2.47)$$

Slika 2.39. prikazuje rezultate filtriranja slike Gausovim filtrom maskama različitih dimenzija [30].



Slika 2.39. Rezultati filtriranja Gausovim filtrom maskama različitih dimenzija

2.4.3.1. Detekcija rubova objekata

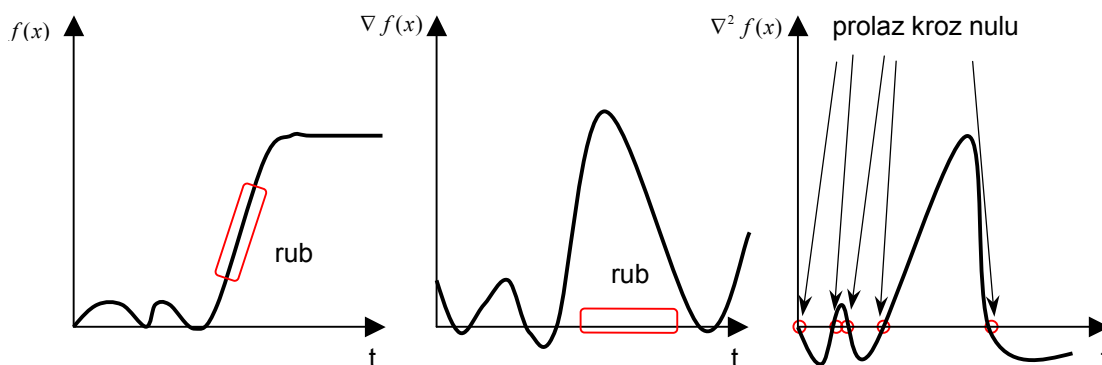
Za rješenje zadatka detekcije zavara u ovom radu koriste se metode koje se zasnivaju na detekciji rubova objekata. Naime, zavar je orijentiran uzdužno i ako je vidljiv na slici, potrebno je da samo bude prepoznat (klasificiran) od vizijskog sustava kao običan pravac. U narednom izlaganju opisane su upotrijebljeni postupci i algoritmi pri detekciji.

Metode za detekcije rubova mogu se podijeliti na:

- gradijentne metode - procjenjuje položaj ruba traženjem maksimuma prve derivacije slike
- Laplaceove metode - procjenjuje položaj ruba traženjem nultočaka druge derivacije funkcije slike

2.4.3.2. Gradijentni postupci

Gradijentni postupci za detekciju rubova su postupci koji koriste svojstvo prve derivacije za nalaženje maksimuma u prvoj derivaciji funkcije slike. Naime, položaj ruba se može procijeniti maksimumom prve derivacije, odnosno nultočkom druge derivacije. To se može vidjeti na slici 2.40. za jednodimenzionalni slučaj .



Slika 2.40. Prva i druga derivacija funkcije $f(t)$

Za rubove jednostavno možemo reći da su to područja na slici gdje je kontrast između vrijednosti intenziteta pojedinih piksela dovoljno izražen da se na tom području može tvrditi da se nalazi rub nekog objekta na sceni.

Gornji slučaj je bio jednodimenzionalan, dok su slike dvodimenzionalne i stoga je potrebno pronaći način za nalaženje derivacije za dvodimenzionalnu diskretnu sliku. Računanje prve derivacije svodi se na računanje gradijenta u dva ortogonalna smjera.

Kod tehnike detekcije rubova gradijentom slika se konvoluirano samo s dvije maske, od kojih jedna procjenjuje gradijent u x smjeru, G_x , a druga gradijent u y smjeru, G_y . Iznos gradijenta dan je izrazom:

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} . \quad (2.41)$$

Još jedan važan podatak je smjer ruba, koji se računa prema izrazu :

$$\Theta = \arctg \frac{G_y}{G_x} . \quad (2.42)$$

Gradijent funkcije dviju varijabli je vektor koji pokazuje smjer najbrže promjene funkcije f , i piše se prema izrazu[25]:

$$\text{grad } f(x, y) = \left[\frac{\partial f(x, y)}{\partial x} \quad \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \right]^T = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix}. \quad (2.43)$$

Za svaki smjer definiraju se dvije maske h_1 i h_2 .

Rezultat konvolucije slike sa maskama su ortogonalni gradijenti g_1 i g_2 [25]:

$$g_1(m, n) = \sum_i \sum_j h_1(i, j) f(m-i, n-j) \quad i \quad g_2(m, n) = \sum_i \sum_j h_2(i, j) f(m-i, n-j), \quad (2.44)$$

gdje su uređeni parovi (m, n) točke dvodimenzionalna slike.

Iznos i smjer gradijentnog vektora računa se prema [25]:

$$g(m, n) = \sqrt{g_1^2(m, n) + g_2^2(m, n)}. \quad (2.45)$$

$$\Theta(m, n) = \arctg \frac{g_2(m, n)}{g_1(m, n)}. \quad (2.46)$$

Nakon dobivanja prve derivacije identificiraju se pikseli koji čine rub. To se radi metodom praga, na način da se vrijednosti gradijenta koje su veće od praga uzimaju za rub, a manje vrijednosti se zanemaruje.

Primjeri gradijentnih operatora:

$$\text{Roberts} \quad h_1(m, n) = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{vmatrix} \quad h_2(m, n) = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{vmatrix}$$

$$\text{Prewitt} \quad h_1(m, n) = \begin{vmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad h_2(m, n) = \begin{vmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}$$

$$\text{Sobel} \quad h_1(m, n) = \begin{vmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -\sqrt{2} & 0 & \sqrt{2} \\ -1 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad h_2(m, n) = \begin{vmatrix} -1 & -\sqrt{2} & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & \sqrt{2} & 1 \end{vmatrix}$$

Operatori rade na način da oduzimaju vrijednosti točaka s jedne i druge strane točke za koju se gradijent računa. Dobivena razlika odgovora aproksimaciji gradijenta.

Problem detekcije granice objekta na sceni svodi se na postupak detekcije ruba i postupak spajanja detektiranih rubova.

2.4.3.3. Canny metoda detekcije rubova

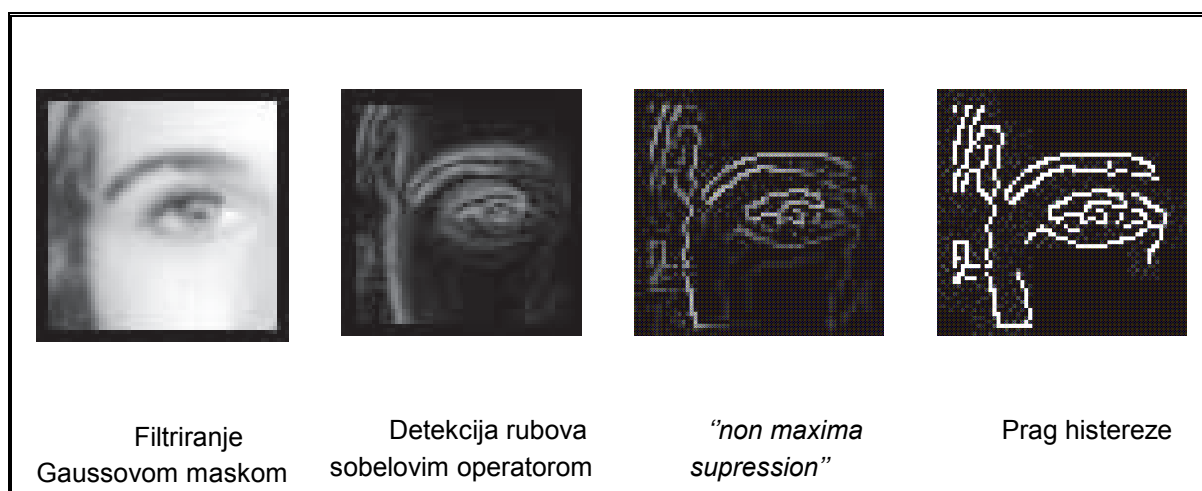
Canny-eva metoda za detekciju rubova pripada gradijentnim postupcima za detekciju rubova. Canny je zaključio da optimalni algoritam detekcije ruba mora imati slijedeće[25]:

- Dobra detekcija – mora označiti sve realne rubove slike
- Dobra lokalizacija – označeni rubovi moraju biti što je moguće bliže rubovima koje ima stvarna slika
- Minimalni odziv – svaki rub smije biti označen samo jednom, a šum slike ne smije stvarati lažne rubove

Ulaz Cannyevog algoritma je slika u sivim tonovima (monokromatska)(eng. *Greyscale*). Izlaz Cannyevog algoritma je binarna slika, pri čemu su rubovi označani svijetlim pikselima, a svi ostali poprimaju vrijednost 0.

Detekcija Canny-evim algoritmom odvija se u nekoliko koraka :

1. Otklanjanje šuma – izvodi se konvolucijom Gauss-ovom maskom, čime se izlazna slika lagano zamućuje u odnosu na ulaznu (izvornu) sliku.
2. Računanje maksimuma prve derivacije odnosno gradijenta intenziteta - obavlja se raznim operatorima (maskama) sličnim Sobelovom.
3. Obavlja se postupak koji se naziva *non-maxima suppression* koji svaku vrijednost gradijenta koja nije lokalni maksimum postavlja na 0 i pri tome koristi informaciju o smjeru gradijenta.
4. Filtriranje pragom histereze – nakon postupka *non-maxima suppression* koristi se prag histereze, na točke koje su u listi rubova. Prag histereze ima dva praga, manji i veći, i ako je vrijednost piksela veća od gornjeg praga histereze, taj se piksel proglašava jakim rubom (strong edge). Sve vrijednosti koje su manje od manjeg praga proglašavaju se slabim rubom (weak edge). Svi jaki rubovi se kasnije proglašavaju rubovima. Ovim postupkom se izbjegava isprekidanost rubova koja nastaje upotrebom jednog praga.



Slika 2.41. Slike dobivene u različitim fazama Canny-evog postupka

2.4.3.4. Houghova transformacija

Prije Houghove transformacije podrazumijeva se da je obavljeno detektiranje rubova nekom od metoda detekcije rubova npr. Canny-evom metodom, koja se također razmatra ovim radom.

Osnovna ideja ove tehnike je parametrizacija krivulja u odgovarajući parametarski prostor, za što su pogodne krivulje poput pravca, kružnice ili elipse.

Houghova transformacija za pravac radi na principu preslikavanje pravaca u točke. Ako imamo skup piksela koji su kolinearni možemo reći da se nalaze na pravcu:

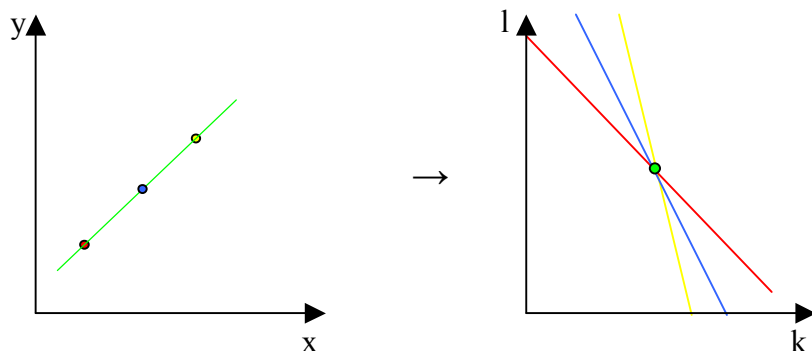
$$y = kx + l, \tag{2.48}$$

u kartezijском koordinatnom sustavu.

Preinakom gornje jednadžbe dobije se Houghova transformacija za pravac, gdje za svaku točku (piksel) izvorne slike postoji pripadajući pravac u parametarskom prostoru :

$$l = -kx + y, \tag{2.49}$$

Skupina pravaca u parametarskom prostoru dobivena skupom kolinearnih točaka u prostoru x,y izvorne slike(kartezijevom koordinatnom sustavu) sijeku se u istoj točki koja predstavlja pravac na kojem se nalaze točke iz (x,y) prostora. To je prikazano na slici 2.42 [26].

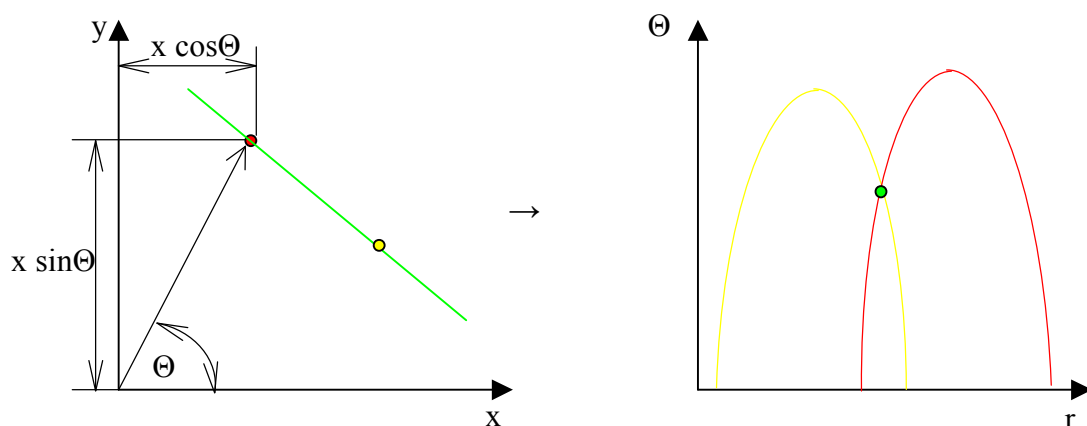


Slika 2.42. Primjer Hough-ove transformacije za pravce

Nedostatak gornjeg postupka je parametar m čiji je iznos varira od $\langle -\infty, +\infty \rangle$, zato se gornji postupak najčešće izvodi u polarnim koordinatama, gdje je pravac opisan sa jednadžbom :

$$r = x \cos \Theta + y \sin \Theta . \quad (2.50)$$

Sada vrijedi, prema gornjoj jednadžbi, da je Houghova transformacija pravca u kartezijskom koordinatnom sustavu točka u (Θ, r) polarnom koordinatnom sustavu (slika 2.43.). Ako postoje kolinearne točke u (x, y) ravnini koje predstavljaju pravac, te će se točke preslikati u parametarskom prostoru u sinusoide, koje se sijeku u istoj točki. Koordinate točke u parametarskom prostoru predstavljaju parametre pravca. Naravno, pretpostavlja se da su sinusoide nastale od familije pravaca koji prolaze kroz svaku točku. Transformacija je prikazana slikom 2.43. [25].



Slika 2.43. Primjer Hough-ove transformacije za pravce u polarnim koordinatama

Osim Houghove transformacije za pravce postoji i generilizirana Houghova transformacija koja se bavi složenijim konturama.

3.1. Rezultati detekcije radiografskom metodom

3.1.1. Opis mjerenja

Mjerenja su obavljena rendgenografijom. Dobiveni radiogram može se vidjeti na slici 3.1. Korišten je medicinski rendgenski uređaj.

3.1.2. Oprema i parametri mjerenja

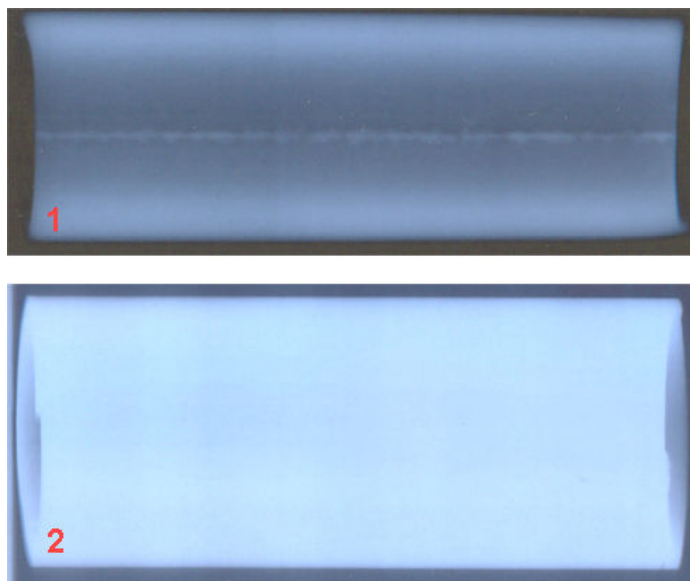
Oprema :

- radiografski uređaj
- radiografski film

Parametri mjerenja odnosno vrijednosti postavljene na rendgenskom uređaju:

- $U_{k.c.} = 109 \text{ Kv}$ - napon na rendgenskoj cijevi
- $I = 400 \text{ mA}$ - jakost struje na rendgenskoj cijevi
- $t_z = 776 \text{ ms}$ - vrijeme prozračivanja

3.1.3. Rezultati snimanja



Slika 3.1. Radiogrami cijevi

3.1.4. Osvrt na postupak

Test je djelomično uspio samo na jednoj cijevi, na kojoj je korijen zavora bio donekle zadebljan u korijenu zavora. Na ostalim cijevima se ne vidi zavor vjerovatno zbog nedovoljnog intenziteta zračenja odnosno velike gustoće materijala. Gore navedeni parametri su maksimalni parametri koji se mogu podesiti na uređaju.

3.1.5. Zaključak

Iako iz gornjih snimaka nije vidljivo mjesto zavora, iz snimaka predočenih u poglavlju 2.2.4.1. zavora je itekako vidljiv, pa je zaključak da ovom metodom postoji mogućnost detekcije zavora uz pravilno odabrane parametre i opremu.

Nepraktičnost metode leži u činjenici da su rendgenske zrake štetne za ljudski organizam što zahtijeva velike mjere zaštite od ionizirajućeg zračenja, i u velikoj mjeri utječe na cijenu i praktičnost takve metode.

3.2. Rezultati detekcije metodom vrtložnih struja

3.2.1. Opis mjerenja

Mjerenje je izvedeno improviziranom sondom i mjernom opremom. Postav sa sastojao od uređaja navedenih u točki 3.2.2.

3.2.2. Oprema i parametri mjerenja

- EC sonda
- Osciloskop
- Generator funkcija
- Pojačalo

3.2.3. Rezultati mjerenja

Mjerenjem su dobiveni loši rezultati odnosno šumovi i iz tog razloga su izostavljeni.

3.2.4. Osvrt na mjerenje

Izostanak povoljnih rezultata mjerenja je uzrokovano improviziranom opremom koja nije bila prikladna za ovu vrstu ispitivanja.

3.2.5. Zaključak

Glavna pretpostavka pod kojom je uzeta u razmatranje metoda vrtložnih struja je promjena magnetskih odnosno električnih svojstava u području zavara. Poznato je i da se EC metoda koristi za mjerenje svojstava materijala poput magnetske permeabilnosti, električne vodljivosti, zrnatosti strukture materijala, ili određivanja toplinske obrade materijala.

Iako nije obavljeno mjerenje metodom vrtložnih struja sa odgovarajućom opremom, iz navedenih činjenica izloženih u ovom radu o dotičnoj metodi može se zaključiti da je ova metoda primjenjiva za detekciju zavara. Stoga ovu metodu treba izdvojiti kao jednu od prikladnijih za rješenje ovog zadatka.

3.3. Rezultati detekcije MFL metodom

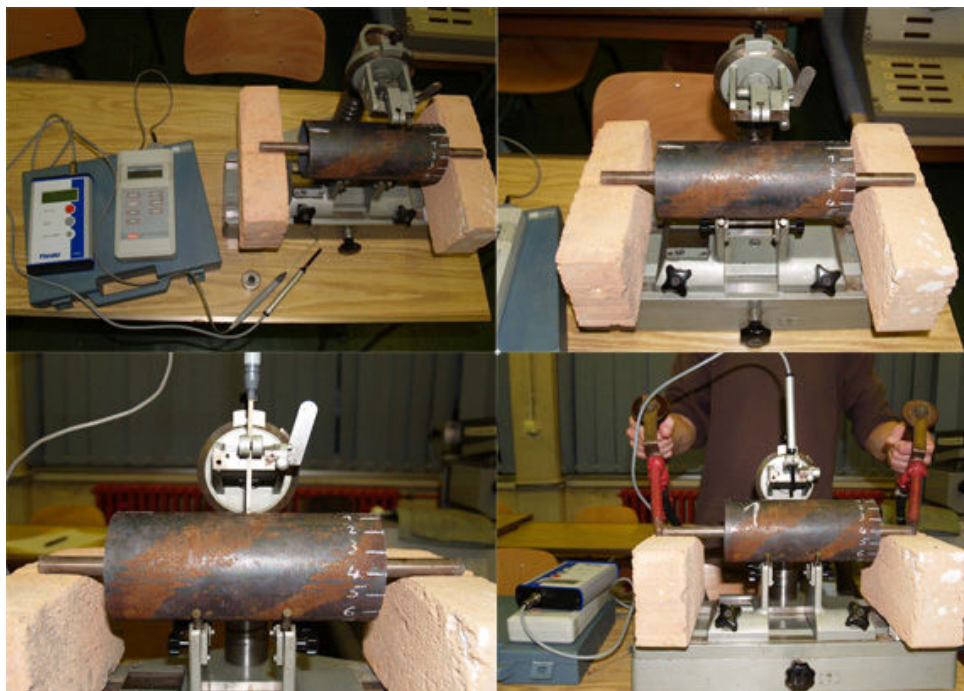
3.3.1. Opis mjerenja

Mjerenje je izvedeno na način prikazan na slici 3.2. Mjerila se jakost magnetskog polja na vanjskom obodu cijevi. Cijev je bila postavljena i centrirana na spravu prikazanu na slici 3.2., tako da je metalna šipka (vodič kroz koji protječe struja, i stvara magnetsko polje u svojoj okolini) bila uvijek u centru radijusa cijevi, što naravno nije uvjet. Cijev se zakretala za određeni kut pri svakom očitavanju sa Gaussmetra. Očitavanja su prikazana u tablici 3.1.

3.3.2. Oprema i parametri mjerenja

- Gaussmetar Hirst gm04
- Gaussmetar Tiede
- izvor struje, elektrode
- sprava za mjerenje kružnosti
- Hallova sonda

3.3.3. Rezultati mjerenja



Slika 3.2. Slike postava i mjerenja MFL metodom

Tablica 3.1. Rezultati mjerenja MFL metodom

Cijev br.2 – srednja cijev			Cijev br.1 – mala cijev		
900 A	Pozicija broj	Jakost magnetskog polja H [A/cm], peak mode	900 A	Pozicija broj	Jakost magnetskog polja H [A/cm], peak mode
	1	18.3		1	28.0
2	18.3	2	26.2		
3	17.4	3	27.3		
4	17.2	4	28.4		
5	19.0	5	26.8		
6	18.2	6	28.4		
7	18.3	7	29.2		
8	19.2	8	27.9		
9	20.0	9	29.5		
10	18.8	10	30.0		
ZUT1	18.3	ZUT1	29.2		
ZUT2	19.0	ZUT2	28.2		
500 A	1	3.8			
	2	3.2			
	3	2.6			
	4	3.8			
	5	3.6			
	6	3.5			
	7	3.0			
	8	3.4			
	9	3.7			
	10	3.0			
	ZUT1	3.2			
	ZUT2	3.8			

3.3.4. Osvrt na mjerenje

Mjerenje je izvedeno na cijevi br. 1 (manja cijev) i br. 2 (srednja cijev), pri jakosti struje od 500 A i 900 A, a nakon toga mjerenje je prekinuto iz razloga navedenih u daljnjem izlaganju.

Kako se vidi iz rezultata mjerenja, očitavanja fluktuiraju i na mjestu zavara nema naglog skoka ili pada u vrijednosti **H**. Rezultati su stoga neupotrebljivi i iz njih se ne može dobiti informacija o mjestu zavara.

Pri mjerenju detektirani su slijedeći problemi :

► kružnost cijevi nije idealna i cijev ima udubina. Sonda treba biti kontinuirano prislonjena na cijev i uvijek na istoj udaljenosti od vodiča protjecanog strujom.

► senzor sonde (Hallova poluvodička sonda) izrađen je od poluvodičkog materijala, pa zbog utjecaja topline, koja je bila znatno prisutna, dešava se tzv. *drift* odnosno pomak radne točke sonde.

► utjecaj elektromagnetskog zračenja od uređaja u blizini sonde također utječu na mjerenje tj. pridonose grešci pri mjerenju.

3.3.5. Zaključak

Mjerenje je izvedeno improviziranom opremom koja nije bila prikladna za ovu vrstu ispitivanja, što je glavni razlog izostanka povoljnih rezultata.

Ipak, metoda je primjenjiva u detekciji zavara iz činjenice da postoje uređaji koji rade na MFL principu. Velika prednost ovakve metode je cijena, jednostavnost izvedbe sonde.

3.4. Rezultati detekcije zavara vizijskim sustavom

3.4.1. Opis ispitivanja

Snimljeno je nekoliko uzoraka slike zavara sa različitim osvjetljenjem, na mjestu zavara na cijevi i mjestu gdje zavar nije prisutan na cijevi. Snimke su uzete sa unutrašnje strane cijevi iz razloga bolje izraženosti zavara. Snimljene slike su podvrgnute postupcima obrade i analize slike opisanima u poglavlju 2.4.3.

3.4.2. Oprema

- digitalni fotoaparat Olympus E 300
- digitalna kamera Sony
- izvori svjetlosti :
 - laserska lepeza
 - fluorescentna svjetiljka (rasvjeta okoline)
 - halogena žarulja
- PC sa potrebnom programskom podrškom – LINUX OS, Canny algoritam, Hough transform algoritam

3.4.3. Rezultati prepoznavanja zavara

U ovom radu zavar je detektiran vizijskim sustavom na dva načina : prema opisanim postupcima u poglavlju 2.4. ovog rada i brojanjem piksela određenih intenziteta. Rezultati su prikazani u tablicama 3.2. i 3.3.

Faze izvođenja detekcije (prepoznavanja) zavara na uzorcima slika prikazanih u tablici 3.2. izvedeni su na slijedeći način:

1. Učitana je slika u monokromatskom formatu (ovdje nije prikazan, nego samo uzorak slike u boji)
2. Izdvojeno je područje interesa (regija interesa)
3. Izvršena je detekcija rubova Canny-evim postupkom
4. Izvršena je Hough-ova transformacija (HT) na dobivenim slikama detekcije ruba

Svi navedeni pojmovi vezani uz detekciju objašnjeni su u poglavlju 2.4. o vizijskom sustavu.

Parametri detekcije:

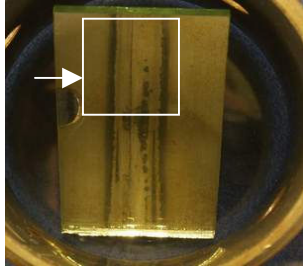


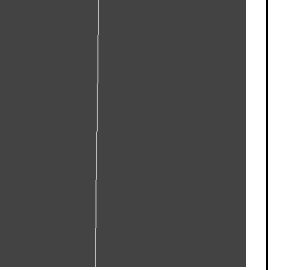
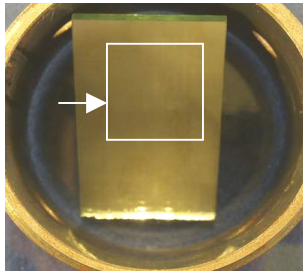



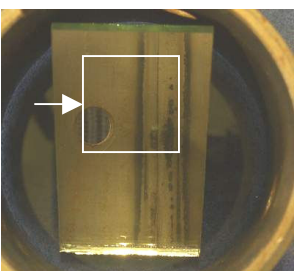

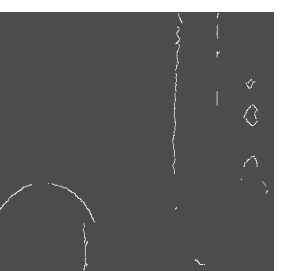

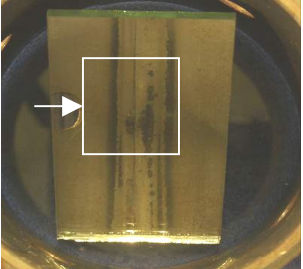

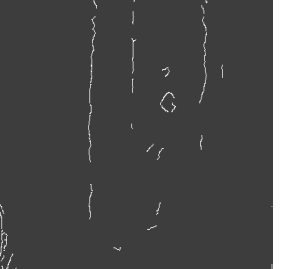
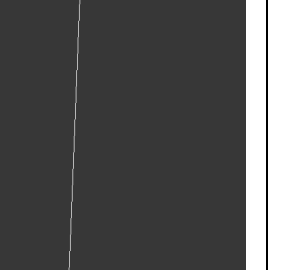
Niski prag histereze (**L**) za Canny-ev algoritam = **30**

Visoki prag histereze (**H**) za Canny-ev algoritam = **70**

Standardna devijacija za Canny-ev algoritam = **2.5**

Prag (eng. *threshold*) detekcije pravca za Hough transform = **0.99**

Tablica 3.2. Rezultati detekcije zavara vizijskom metodom

Uzorak slike	Detekcija (prepoznavanje) zavara		
	Regija interesa	Detekcija rubova	Hough transf.(HT)
			
			
			
			

Iz slika u tablici 3.2. vidljivo je nekoliko ishoda. U slučaju uzorka slike zavara, zavar je bio detektiran od HT-a kao vertikalni pravac. Kad zavar nije bio *prisutan* na slici, slika HT-a je bila bez pravca.

U slučaju pojavljivanja šumova na slici (npr. rupe od provrta), detektor ruba ih je prikazao kao rubove, ali na slici HT oni nisu vidljivi.

Opisani postupak je izvršen na velikom broju različitih uzoraka, i u većini slučajeva pokazivao je povoljne rezultate.

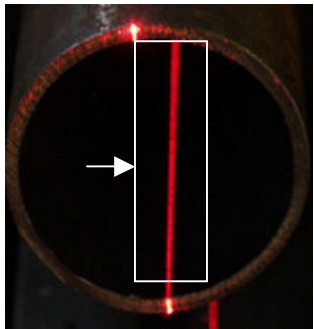
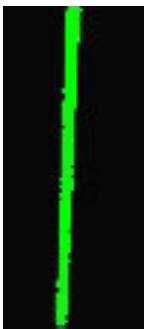
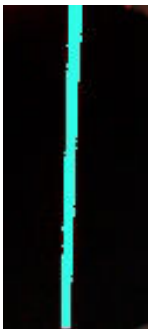
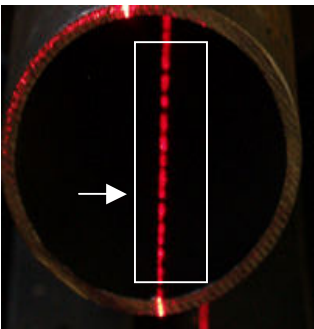
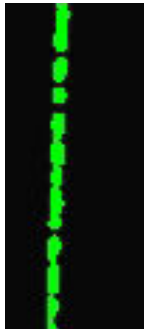

Detekcija zavara brojanjem piksela

U slučaju da je zavar geometrijski izražen i bez kontrasta u odnosu na ostatak cijevi, kao na cijevima br.1 i br.3. u korijenu, moguće je detektirati zavar tzv. brojanjem piksela na slici. Brojanje piksela (određenog intenziteta odnosno boje) se može izvesti na monokromatskoj slici (u sivim nijansama, eng. *greyscale*) ili na slici u boji. Provedena su oba slučaja, što se vidi na slikama u tablici 3.3.

Kod monokromatskih slika prag, odnosno broj piksela ispod kojeg se zavar smatra detektiranim je 490, a kod slika u boji za prag je uzeto 640 piksela. Zavar je u oba slučaja detektiran.

U ovom slučaju upotrijebljeno je osvjetljenje laserskom lepezom u svrhu isticanja zavara, kako je prikazano u tablici 3.3. Zavar se vidi kao isprekidana crvena linija.

Tablica 3.3. Detekcija brojanjem piksela na slici

Ulazna slika	Monokromatska slika	Slika u boji
	 broj piksela = 524	 broj piksela = 684
	 broj piksela = 455	 broj piksela = 590

Brojanje piksela je izvršeno na ograničenom području.

3.4.4. Osvrt na detekciju zavara

Kako se vidi sa slika prikazanih u tablicama, zavar je uspješno detektiran vizijskim sustavom na tri cijevi uz adekvatnu rasvjetu za svaku cijev. Na slikama se vidi da je pravilno odabranim i primjenjenim izvorom svjetlosti moguće kvalitetno izraziti mjesto zavara i dobiti upotrebljiv uzorak slike za daljnu obradu.

HT algoritam uspješno je izdvojio zavar, što se može vidjeti kao uspravan pravac na slikama iz tablice 3.2. U drugom slučaju, detekcija brojanjem piksela se također pokazala efikasnom.

3.4.5. Zaključak

Prepoznavanje odnosno detekcija zavara vizijskim sustavom je uspjela na nekoliko uzoraka cijevi, čime se vizijska metoda može klasificirati kao uspješnom pri detekciji zavara. No, ovaj postupak je primjenjiv samo u određenim slučajevima kada je zavar vizualno izražen tj. kontrast između zavara i ostatka cijevi dovoljan da ga vizijski sustav može "razaznati", ili kad je geometrijski izražen. Znači, pouzdanost ovakve metode uvelike ovisi o stanju površine cijevi.

4. Zaključak

Ovim je radom dan sažeti pregled industrijski primjenjivih postupaka za detekciju zavara na metalnim šavnim cijevima. Kako bi se pojedini postupak okarakterizirao industrijski primjenjivim, razmatrano je nekoliko značajnih faktora poput pouzdanosti, cijene, kompleksnosti izvedbe mjerne opreme, kao i potrebnog operacijskog vremena detekcije za svaki pojedini postupak.

Dostupnom opremom, obavljena su probna mjerenja, temeljem čega je ukazano na prikladnost primjene pojedinih metoda.

Postupci zasnovani na vrtložnim strujama i rasipanju magnetskog toka mogu se okarakterizirati prikladnim, na što primjerice ukazuje postojeća mjerna oprema tvrtke Roland Electronics, iako zbog nedostatka odgovarajuće mjerne opreme nisu obavljena probna mjerenja.

Radiografski postupci okarakterizirani su manje prikladnim, prvenstveno zbog potencijalno nepovoljnog utjecaja na ljudsko zdravlje. Kompleksnost izvedbe mjerne opreme, cijena, kao i operacijsko vrijeme detekcije ovih uređaja također idu u prilog navedenom.

Kod postupaka temeljenih na ultrazvuku zahtjevano je uranjanje ispitnog uzorka u odgovarajući medij, što ove postupke također ubraja u manje prikladne, osobito u slučajevima kada je ispitni uzorak većih gabarita.

Rezultati probnih mjerenja primjenom vizijskog sustava općenito su dali dobre rezultate, pri čemu su se u prvom slučaju detektirali pravci kao posljedica izraženog kontrasta zavara, odnosno šava, dok je u drugom slučaju detektirana promjena u kontinuitetu projicirane laserske linije na geometrijski izraženom šavu. Potrebno je još naglasiti da ovaj postupak nije moguće primijeniti ukoliko na ispitnom uzorku, odnosno cijevi, sam šav nije vizualno ili geometrijski izražen.

5. Literatura

- [1] Roland electronic web stranice, www.roland-electronic.com, 2007
- [2] Lukačević Z., "Zavarivanje", Strojarski fakultet, Slavonski brod, 1998
- [3] Sablik M. J., Weidner C., and Rubin S. W., "Finite element modeling of a magnetic test to determine whether a weld is annealed" J. Appl. Phys. -- May 15, 2002 -- Volume 91, Issue 10, pp. 8299-8301, s Interneta, <http://scitation.aip.org/getabs/servlet/>, 2007
- [4] Clapham L., Babbar V., Byrne J., "Detection Of Mechanical Damage Using The Magnetic Flux Leakage Technique", Queen's University, Kingston, Ontario, Canada,, s Interneta, <http://www.ultrasonic.de>, 2007
- [5] Clapham L., Heald C., Krause T. Atherton D.L., "The Origin of a Magnetic Easy Axis in Pipeline Steels", J. Applied Physics, **86**, 1574-1580., <http://scholar.google.hr/>, 2007
- [6] Non destructive education portal, <http://www.ndt-ed.org>, 2007
- [7] Non destructive testing, portal, <http://www.ndt.net/>, 2007
- [8] Predavanja FER, *Ultrazvuk i hidroakustika*, elektroakustika 2007
- [9] Predavanja, FER, *Ultrazvučna dijagnostika*, 2007
- [10] Predavanja FER, *Akustika prostora : 2. Pojave koje prate širenje zvuka*, 2007
- [11] Kirić M., "Ultrazvučno ispitivanje sa C- slikom", review paper, 2006
- [12] Rezai A., Moore M., Green T., Washer G., "Laboratory and Field Testing of Automated Ultrasonic Testing (AUT) Systems for Steel Highway Bridges", 2005
- [13] Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Internet stranice, <http://www.sfsb.hr/kth/zavar/index.html>
- [14] Zračenje, FSB, s Interneta, <http://www.fsb.hr/termovel/>, 2007
- [15] Državni zavod za zaštitu od zračenja Rendgen uređaj i nastanak rendgenskih zraka", physics.mefos.hr
- [16] "Rizici pojave karcinoma uslijed izloženosti ionizirajućem zračenju", FER, s Interneta, web.zpr.fer.hr/ergonomija/, 2007
- [17] Pinter V., "Osnove elektrotehnike I", Tehnička knjiga, Zagreb, 1994
- [18] Pinter V., "Osnove elektrotehnike II", Tehnička knjiga, Zagreb, 1994
- [19] Buckley J. M., "An introduction to Eddy Current Testing theory and technology", s Interneta, www.google.com, 2007
- [20] Sikora, R. and Chady, T. "Optimization of eddy-current sensor for multifrequency systems", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 39 No. 3, pp. 1313-6., <http://ieeexplore.ieee.org/>, 2003
- [21] Brykalski A. and Rogala T., "Identification of equivalent dynamic model parameters in eddy current problems", www.emeraldinsight.com/, 2006
- [22] Komorowski, M. and Chady, T. (1994), "Investigation of differential eddy current probe", *International Journal No. 5 Joint to International Symposium on Theoretical Electrotechnics*, Budapest, pp. 145-52., www.emeraldinsight.com/, 1994
- [23] Tang T. B., An explanation of the research by Dan Tsui et al. on "Fractional Quantum Hall Effect" that led to their award of the 1998 Nobel Prize in Physics, <http://www.hkbu.edu.hk>, 2007
- [24] Mfl tutorial, s Interneta, <http://www.battelle.org/pipetechnology/MFL/>, 2007
- [25] Lončarić, S., predavanja iz kolegija „Digitalna obrada slike“, FER, Zagreb, 2004.
- [26] Gyergyek, L., Pavišić, N., Ribarić, S., Uvod u raspoznavanje uzoraka, Tehnička knjiga, Zagreb, 1988.
- [27] Gonzalez, R., Woods, R., Digital image processing, 2nd edition, Prentice Hall, New Jersey, 2002.
- [28] Staroveški T., Strojni vid u vođenju industrijskog robota, Diplomski rad, FSB, 2007
- [29] Smith, W., The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing, <http://www.dspguide.com>, 2007.
- [30] Nixon, M., Aguado, A., Feature Extraction and Image Processing, Newnes, UK, 2002.
- [31] Krajcar S., Predavanja iz kolegija Električna rasvjeta i niskonaponske mreže i instalacije, s Interneta, www.fer.hr/zvne, 2002.

